

공학석사 학위논문

도로교설계기준의 중력방향 한계상태의
하중-저항계수 및 재료계수 결정

**Determination of Load-Resistance Factors and
Material Factors for Gravitational Loads-Governed
Limit State of Korean Highway Bridge Design Code**

2019년 2월

서울대학교 대학원
건설환경공학부
송 상 원

초 록

도로교설계기준(한계상태설계법)을 포함한 대부분의 현대 교량 설계기준은 신뢰도이론에 기반한 하중-저항계수 설계법을 따르고 있다. 신뢰도 기반 하중-저항계수 설계법에서 안전수준은 신뢰도지수로 표현되며, 목표신뢰도지수는 구조물을 구성하는 모든 부재에 대하여 확보되어야 한다. 하지만 현재 도로교설계기준(한계상태설계법)의 하중-저항계수에 의하여 확보되는 신뢰도지수는 목표신뢰도지수 보다 상당히 높게 나타난다. 따라서 이 논문에서는 최적화에 기반한 하중-저항계수 결정법을 제안한다. 다양한 구조형식과 하중효과에 대한 하중-저항계수의 적용성을 위해 한계상태식을 총 공칭하중효과로 표준화하고, 하중비의 개념을 도입한다. 하중-저항계수에 의하여 계산되는 요구공칭강도와 목표신뢰도지수를 정확히 확보하는 목표강도 사이의 오차를 최소화하는 목적함수를 이용하여 목표신뢰도지수를 균일하게 확보하는 하중-저항계수를 계산한다.

한편, 현재 도로교설계기준(한계상태설계법)은 철근콘크리트부재의 설계에 재료계수를 적용한다. 도로교설계기준(한계상태설계법)의 재료계수와 하중계수에 의해 철근콘크리트부재에 대하여 확보되는 신뢰도지수가 목표신뢰도지수 보다 상당히 높게 나타나는 것을 확인하며, 최적화에 기반한 재료계수 결정법을 제안한다. 휨 및 압축부재에 대하여 목표저항계수와 재료계수에 의하여 계산되는 등가저항계수의 차이를 최소화하는 목적함수를 구성하고 최적의 재료계수를 계산한다. 계산된 재료계수

와 하중계수가 목표신뢰도지수를 균일하게 확보하는 것을 확인하며, 하중-저항 및 재료계수는 항상 함께 캘리브레이션된 값으로 사용해야함을 이해한다. 더불어 유로코드의 재료계수 산정 개념을 이해하고 유로코드에 제시된 재료계수의 산정 과정에서 나타난 몇 가지 문제점을 지적한다. 이러한 문제점을 수정하여 유로코드의 방법으로 도로교설계기준(한계상태설계법)에 대한 재료계수를 계산해보고, 유로코드 기반 재료계수 산정법의 근본적인 문제점을 확인한다.

최종적으로는 위에서 설명한 최적화 기반 하중-저항 및 재료계수 결정법으로 도로교설계기준(한계상태설계법)에 적합한 하중-저항 및 재료계수를 제안한다. 제안한 하중-저항 및 재료계수를 통해 확보되는 신뢰도 지수가 목표신뢰도지수에 근사하여 균일하게 나타나는 것을 확인한다.

주요어 : 하중-저항계수, 재료계수, 최적화, 신뢰도지수, 도로교설계기준,
유로코드, 코드캘리브레이션

학 번 : 2017-26785

목 차

초 록.....	i
목 차.....	iii
그림 목차.....	iv
표 목차.....	vii
1. 서 론.....	1
2. 확률변수의 표준화 및 역신뢰도해석.....	7
2.1. 확률변수의 표준화.....	7
2.2. 하중비에 의한 매개화.....	9
2.3. 역신뢰도해석.....	11
3. 공칭강도 최적화 기반 하중-저항계수 결정법.....	18
3.1. Reference 최적화 기법.....	19
3.2. Sequential 최적화 기법.....	31
3.3. 하중-저항계수의 제안.....	42
3.4. 3차식을 이용한 목표강도의 근사.....	48
4. RC부재의 재료계수의 결정.....	52
4.1. KHBDC LSD의 재료계수.....	53
4.2. 최적화 기반 재료계수 결정법.....	64
4.3. 신뢰도 기반 재료계수 산정법.....	72
5. 최적화 기법을 통한 하중-저항/재료계수 제안.....	85
6. 결 론.....	98
7. 참고 문헌.....	101
8. 부 록.....	104
Abstract.....	108

그림 목차

그림2.1 단-중경간 교량 거더 단면의 하중비	10
그림2.2 세 재료의 $\eta=0.8$ 에서의 목표강도: (a) 휨; (b) 전단	16
그림2.3 휨모멘트에 대한 ST부재의 $\eta=0.8$ 에서의 정확한 하중-저항계수	17
그림3.1 고정하중비 영역 경계점에 따른 목적함수값	23
그림3.2 Reference 하중-저항계수의 휨부재 요구공칭강도 및 목표강도: (a) $\eta=0.8$ 일 때 세 재료; (b) ST부재의 서로 다른 4개의 DC하중비	25
그림3.3 Reference 하중-저항계수의 전단부재 요구공칭강도 및 목표강도: (a) $\eta=0.8$ 일 때 세 재료; (b) ST부재의 서로 다른 4개의 DC하중비	28
그림3.4 Reference 하중-저항계수의 요구공칭강도에 의해 확보되는 평균신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단	29
그림3.5 Reference 하중-저항계수의 ST부재의 요구공칭강도에 의하여 확보되는 DC하중비별 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단	30
그림3.6 $\eta=0.8$ 일 때의 Sequential 하중-저항계수의 요구공칭강도 및 목표강도: (a) 휨; (b) 전단	35
그림3.7 Sequential 하중-저항계수의 요구공칭강도가 확보하는 평균신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단	36
그림3.8 Sequential 하중-저항계수의 요구공칭강도가 확보하는 ST부재의 DC하중비별 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단	37
그림3.9 Sequential 및 KHBDC LSD 하중-저항계수의 요구공칭강도가 확보하는 부재 및 DC하중비 전체에 대한 평균신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단 ..	40
그림3.10 $\eta=0.8$ 인 세 재료의 표준화된 휨강도의 변화에 대한 표준화된 신뢰도지수의 변화: (a) $\xi=0.8$; (b) $\xi=0.4$	41
그림3.11 $\eta=0.8$ 일 때의 제안 하중-저항계수에 의한 요구공칭강도 및 목표강도: (a) 휨; (b) 전단	45
그림3.12 제안 하중-저항계수에 의하여 확보되는 평균신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단	46

그림3.13 제안 하중-저항계수에 의하여 확보되는 ST부재의 DC하중비별 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단.....	47
그림3.14 표3.5의 계수를 적용하여 3차식으로 근사한 요구공칭강도가 확보하는 신뢰도지수: (a) 재료별 평균신뢰도지수; (b) ST부재 DC하중비별 신뢰도지수.....	51
그림4.1 휨부재와 압축부재의 강도철근비의 변화에 따른 등가저항계수의 변화.....	56
그림4.2 표4.2의 하중계수별 고정하중비에 따른 총 계수하중효과의 변화.....	59
그림4.3 USD와 LSD의 하중-저항/재료계수에 따른 요구공칭강도의 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 압축.....	61
그림4.4 조정된 LSD의 하중-저항/재료계수에 따른 요구공칭강도의 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 압축.....	70
그림4.5 Reference 하중-저항/재료계수에 따른 요구공칭강도의 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 압축.....	71
그림4.6 하중비에 따른 철근과 콘크리트의 파괴점에서의 단위법선벡터 저항방향 성분.....	77
그림4.7 철근과 콘크리트의 표준화된 요구공칭재료저항 및 목표재료저항.....	79
그림4.8 신뢰도 기반 산정법으로 계산된 하중-재료계수에 의한 철근과 콘크리트의 요구공칭재료저항이 확보하는 신뢰도지수.....	81
그림4.9 신뢰도기반 산정법으로 계산된 하중-재료계수에 따른 요구공칭강도의 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 압축.....	82
그림5.1 두 구간 하중계수를 적용한 경우의 휨강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재.....	88
그림5.2 두 구간 하중계수를 적용한 경우의 전단강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재.....	89
그림5.3 두 구간 하중계수를 적용한 경우의 압축강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재.....	90
그림5.4 단일 구간 하중계수를 적용한 경우의 휨강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재.....	91

그림5.5 단일 구간 하중계수를 적용한 경우의 전단강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재	92
그림5.6 단일 구간 하중계수를 적용한 경우의 압축강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재	93
그림5.7 두 구간 하중계수와 재료계수를 적용한 경우의 RC휨강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재	94
그림5.8 두 구간 하중계수와 재료계수를 적용한 경우의 RC압축강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재	95
그림5.9 단일 구간 하중계수와 재료계수를 적용한 경우의 RC휨강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재	96
그림5.10 단일 구간 하중계수와 재료계수를 적용한 경우의 RC압축강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재	97

표 목차

표2.1 부재강도 및 하중효과의 통계특성	14
표3.1 Reference 하중-저항계수	24
표3.2 Sequential 하중-저항계수	34
표3.3 KHBDC LSD의 하중-저항계수	39
표3.4 제안 하중-저항계수.....	42
표4.1 재료계수 및 강도철근비에 따른 등가저항계수	57
표4.2 현재 연구에 사용된 하중-저항/재료계수	58
표4.3 철근과 콘크리트의 재료저항의 통계특성(ECP, 2008)	72
표4.4 철근과 콘크리트의 단위법선벡터 저항방향 성분의 평균값 및 재료계수	78
표4.5 신뢰도 기반 및 Reference 최적화 기반 산정법에 의하여 계산된 하중계수.....	80
표5.1 제안 하중계수.....	87
표5.2 제안 저항계수.....	87
표5.3 제안 재료계수.....	87
표8.1 강도비와 철근비의 범위.....	107
표8.2 표준화된 휨강도와 압축강도의 통계특성에 대한 MCS 결과.....	107

1. 서론

미국의 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications(AASHTO specifications; AASHTO, 2014)와 유럽의 Eurocode 0(유로코드; CEN, 2002)를 비롯한 대부분의 현대 교량 설계기준은 신뢰도 이론에 기반한 하중-저항계수 설계법을 따르고 있다. 국내에서도 이에 발 맞추어 신뢰도기반 하중-저항계수 설계법을 도입한 설계기준들을 개발하였으며, 그 결과 도로교설계기준(한계상태설계법)(KHBDC LSD; 국토교통부, 2016a)과 도로교설계기준(한계상태설계법)-케이블교량편(국토교통부, 2016b)가 개발되어 설계에 적용되고 있다.

신뢰도에 기반한 하중-저항계수 설계법의 안전수준은 목표신뢰도지수로 표현된다. 신뢰도 기반 하중-저항계수 설계법에서는 구조물을 구성하는 모든 부재에 대하여 목표신뢰도지수가 확보되어야 한다. 구조부재의 신뢰도지수는 공칭강도 및 하중효과에 대한 비선형함수로 나타나는 반면, 하중-저항계수에 의하여 정해지는 요구공칭강도는 하중효과들의 선형조합으로 나타나기 때문에 하중-저항계수에 의하여 정해지는 요구공칭강도가 모든 하중효과의 조합에 대하여 목표신뢰도지수를 정확히 확보하지는 못하게 된다. 그렇기 때문에 설계기준에서 고려하고 있는 모든 종류의 부재와 하중조합에 대하여, 허용오차 범위 안에서 가능한 가장 균일한 신뢰도지수를 확보하도록 하는 하중-저항계수를 결정하는 것이 중요하다. 이러한 논의는 하중-저항계수가 수학적 그리고 물리적으로

유의미한 최적화 기법으로 결정되어야 한다는 것을 시사하며, 하중-저항 계수에 의하여 확보되는 신뢰도의 수준에 대한 심도있는 탐구가 이루어져야 한다는 것을 명확히 보여준다.

지난 몇 십 년간 일부 연구자들에 의해 교량 설계에 대한 합리적인 하중-저항계수가 제안되어 왔다(Nowak and Lind, 1979; Nowak, 1995; Nowak, 1999). 하지만 대부분의 연구들에서는 한정된 예시에 대하여 몇 가지 가정과 근사를 도입하여 하중-저항계수를 산정하였기 때문에, 이러한 연구들의 통해 제시된 하중-저항계수의 일반적인 적용성에 대해서는 검증이 되지 않은 실정이다. 또한 현재 설계기준들에 적용된 하중-저항계수의 심각한 결함 중 하나는 이 하중-저항계수들이 하중의 구성과 무관하게 규정되어 있다는 점이다.

이러한 기존 연구 및 설계기준의 문제점을 해결하기 위해 Bae(2016)의 연구에서는 중력방향 한계상태를 총 공칭하중효과로 표준화하는 최적화 기반 하중-저항계수 결정법을 제안하였다. 한계상태식을 구성하는 각 확률변수들을 총 공칭하중효과로 표준화를 하였으며, 또한 각 확률변수를 고정하중비와 DC하중비로 매개화하였다. 고정하중비는 총 공칭하중효과에서 고정하중에 의한 하중효과가 차지하는 비율이며, DC하중비는 총 고정하중효과에서 구조물의 자중 및 부착물에 의한 하중효과가 차지하는 비율을 의미한다. 이를 통해 다양한 구조형식과 하중효과에 대한 하중-저항계수의 적용의 수학적 타당성을 보장하였다. 또한 이 하중-저항계수 결정법은 대상 하중비 범위 내에서 하중-저항계수에 의해 확보되

는 신뢰도지수와 목표신뢰도지수의 차이를 최소화하는 기법으로, 계산된 하중-저항계수에 의해 최적화 대상 하중비 범위 내에서 목표신뢰도지수가 균일하게 확보되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 신뢰도지수는 파괴확률을 나타내는 하나의 지수에 불과하므로 Bae(2016)의 연구에서 개발한 기법은 최적화 결과에 대해 물리적인 의미가 불명확한 단점이 있었다. 따라서 이 연구에서는 이를 보완하기 위해 하중-저항계수에 의하여 정해지는 요구공칭강도와 목표신뢰도지수를 정확히 만족시키는 목표강도의 차이를 최소화하는 코드캘리브레이션 기법을 개발하였으며, 최적화 결과에 대한 물리적 의미를 명확히 하였다.

이 연구에서 제안하는 최적화 기법의 목적함수는 목표강도와 요구공칭강도 간의 오차에 대한 L_2 -norm 으로 정의된다. 목표강도는 KHBDC LSD에서 규정하고 있는 목표신뢰도지수 3.72를 적용하여 역신뢰도해석으로 계산한다. 역신뢰도해석은 목표강도에 대한 비선형문제이기 때문에, 이를 반복계산법으로 풀기 위하여 Newton-Raphson 방법을 도입한다. 캘리브레이션은 철근콘크리트(RC), 강(ST), 그리고 프리스트레스트 콘크리트(PC)의 세 재료의 부재에 대하여 동시에 수행한다. 단-중경간 교량 거더 단면에 작용하는 하중효과들의 비를 조사하고 최적화의 범위를 설정한다. 목표강도의 비선형성으로 인해 고정하중비를 두 영역으로 나누며, 각 영역에 대하여 서로 다른 하중-저항계수를 계산한다.

이 연구에서는 두 종류의 하중-저항계수 최적화 기법을 설명한다. 하나는 Reference 최적화 기법이며, 다른 하나는 Sequential 최적화 기법

이다. Reference 최적화 기법은 절대적인 관점에서 목표강도와 요구공칭 강도 간의 오차를 최소화하는 하중-저항계수를 결정하는 방법이며, Sequential 최적화 기법은 설계기준에 적용하여 사용하기에 편리한 하중-저항계수를 결정하는 방법이다. Reference 최적화 기법은 Sequential 최적화 기법보다 더 정교한 하중-저항계수를 계산한다. 두 최적화 기법으로 계산된 하중-저항계수가 오차범위 $\pm 5\%$ 내에서 목표신뢰도지수를 균일하게 확보하는 것을 확인한다. 더 나아가 Sequential 최적화 기법에 실무 적용성을 위한 몇 가지 조건들을 추가하여 제안 하중-저항계수를 계산한다. 제안 하중-저항계수 또한 대부분의 하중비 영역에서 오차범위 $\pm 5\%$ 내로 목표신뢰도지수를 균일하게 확보함을 확인한다.

더불어 기존의 하중-저항계수에 기반하여 요구공칭강도를 설정하는 방법에서 벗어나 요구공칭강도를 고정하중비에 대해 3차 다항식으로 표현하여 목표강도를 근사하고, 그 의의를 확인한다. 3차 다항식으로 표현된 요구공칭강도에 의하여 확보되는 신뢰도지수는 목표신뢰도지수에 매우 근접하여 나타나는 것을 확인한다.

한편, KHBDC LSD에서는 RC부재의 설계에 저항계수 대신 재료계수를 적용한다. 현재 KHBDC LSD에 채택된 재료계수는 김재홍과 이재훈(2000)의 연구를 근거로 한 것으로 알려져 있다(이재훈, 2015). 김재홍과 이재훈(2000)의 연구에 따르면, 이 재료계수는 강도설계법(한국콘크리트학회·대한건축학회, 1999)에서 정의한 저항계수를 잘 근사하도록 결정되었으며, 휨부재와 압축부재에 대하여 독립적인 목적함수를 정의하여 계

산된 것으로 나타난다. 하지만 강도설계법은 신뢰도의 개념이 도입되지 않은 설계법이기 때문에, 강도설계법에서 정의된 저항계수를 근사하도록 설정된 재료계수를 한계상태설계법에 그대로 적용하는 것은 무리가 있는 것으로 보여진다. 또한 휨과 압축에 대하여 개별적인 목적함수를 정의할 경우 수학적으로 최적해를 계산하는 것이 불가능하기 때문에 계산 결과에 대한 명확한 설명이 불가능한 문제점이 있다.

이 연구에서는 보다 합리적인 최적화 기법을 통해 KHBDC LSD에 적합한 재료계수를 제안한다. 목표신뢰도지수를 균일하게 확보하는 하중-재료계수를 결정하기에 앞서 목표신뢰도지수를 균일하게 확보하는 하중-저항계수가 먼저 결정되어야 함을 확인하고, 이를 결정하기 위해 3장에서 소개한 공칭강도 기반 하중-저항계수 최적화 기법을 사용한다. 공칭강도 기반 하중-저항계수 최적화 기법을 이용하여 목표신뢰도를 균일하게 확보하는 하중-저항계수를 계산하고 이 저항계수를 근사하는 재료계수를 최적화 기법을 통해 계산한다. 휨과 압축을 동시에 고려한 목적함수를 도입한 최적화 기법으로 재료계수를 계산하고, 그 계산 과정을 명확히 한다. 이 과정을 통해 계산된 하중-재료계수를 적용하여 신뢰도해석을 수행하고 목표신뢰도지수 3.72를 균일하게 확보하는 것을 확인한다.

유로코드에서 제시하는 재료계수는 신뢰도기반 안전계수의 기본 개념에 맞추어 합리적으로 설정된 것으로 보이지만, 그 유도과정에서 몇 가지 문제점이 발견된다. 한계상태식의 파괴점에서 철근과 콘크리트의 저항방향 단위법선벡터 성분을 동일하게 가정한 점, 하중계수를 고려하

지 않고 재료계수만 독립적으로 계산한 점, 복합 재료를 사용한 부재의 거동에 대한 불확실성을 충분히 고려할 수 없는 점이 그러한 문제점이다. 이를 해결하기 위해 한계상태식의 파괴점에서 철근과 콘크리트의 단위법선백터 저항방향성분의 대표값을 개별적으로 산정하여 재료계수를 계산하였으며, 결정된 재료계수에 부합하는 하중계수를 3장에서 보인 공칭강도 최적화 기법을 이용하여 계산하였다. 이러한 과정을 통해 계산한 하중-재료계수를 이용하여 RC부재에 대한 신뢰도해석을 수행하고, 계산된 신뢰도지수가 목표신뢰도지수를 잘 근사하지 못하는 것을 확인한다. 이러한 결과에 대한 원인으로 재료저항과 하중효과의 통계특성의 상대적인 영향을 고려하지 못한 점과 복합 재료를 사용한 부재의 거동에 대한 불확실성을 충분히 고려하지 못한 점을 지적한다.

3장과 4장에서 제시한 최적화 기반 하중-저항계수 및 재료계수 결정법을 바탕으로 통합코드캘리브레이션을 수행하고 하중-저항계수 및 재료계수를 제안한다. 하중계수는 두 가지 방법으로 제안한다. 하나는 두 고정하중비 구간에 대하여 하중계수를 개별적으로 제안한 것이며, 다른 하나는 전체 고정하중비 구간에 대하여 단일 하중계수를 제안한 것이다. 제안한 하중-저항계수 및 재료계수의 타당성을 검증하기 위해 신뢰도해석을 수행한다. 제안한 하중-저항계수 및 재료계수에 의하여 결정되는 요구공칭강도가 충분한 신뢰도를 확보하는 것을 확인한다.

2. 확률변수의 표준화 및 역신뢰도해석

이 장에서는 Bae (2016)의 연구내용인 총 공칭하중효과에 의한 확률변수의 표준화, 하중비에 의한 매개화, 그리고 역신뢰도해석의 개념에 대하여 설명한다.

2.1. 확률변수의 표준화

고정하중에 의한 하중효과와 차량활하중에 의한 하중효과를 포함하는 중력방향 하중조합은 하중-저항계수 설계법에서 가장 중요한 하중조합 중 하나로 다루어진다. AASHTO specifications(AASHTO, 2014)의 강도 한계상태1과 KHBDC LSD(국토교통부, 2016a)의 극한한계상태1이 이에 해당한다. 중력방향 하중조합의 설계식은 아래의 식(2.1)와 같이 표현되며, 요구공칭강도는 이 설계식을 통해 계산할 수 있다.

$$\phi S_0 = \sum_i \gamma_i (Q_i)_0 \quad \text{for } i = DC, DW, LL \quad (2.1)$$

여기서 S 는 부재강도, ϕ 는 저항계수를 의미하며 Q_i 와 γ_i 는 각각 i 번째 하중요소의 하중효과, 하중계수를 의미한다. 아래첨자 0은 공칭값을 의미한다. DC 는 구조부재의 자중, DW 는 포장하중, 그리고 LL 는 충격을 포함한 차량활하중을 의미한다. 위의 설계식을 통해 계산되는 공칭강도 S_0 는 요구공칭강도라 정의한다. 각 설계기준들은 보통 지점침하,

온도변화 등에 의한 하중효과를 한계상태식에 포함하고 있지만, 일반적인 코드캘리브레이션 과정에서는 이러한 기타 하중효과는 고려하지 않는 것이 관례이기 때문에 이 연구에서도 따로 고려하지 않기로 한다. 프레임부재에 대한 대표적인 하중효과로 휨과 전단을 고려하기로 한다.

이 연구에서는 모든 공칭하중효과와, 각 확률변수들의 편심계수와 변동계수는 정해진 것으로 가정하게 된다. 각 하중요소에 의하여 유발되는 공칭하중효과는 설계기준에 규정된 공칭값으로 구조해석을 수행하여 얻는다. 임의의 확률변수 v 에 대하여 평균, 표준편차, 편심계수, 그리고 변동계수의 관계는 아래와 같이 나타난다.

$$\mu_v = \lambda_v V_0, \quad \sigma_v = u_v \lambda_v V_0 \quad (2.2)$$

여기서 μ_v , σ_v , λ_v , 그리고 u_v 는 각각 임의의 확률변수 v 의 평균, 표준편차, 편심계수, 그리고 변동계수를 의미한다. 식(2.1)의 설계식에 의해 요구공칭강도가 결정되면 요구공칭강도의 평균과 표준편차는 식(2.2)로 계산할 수 있다.

식(2.1)의 설계식에 해당하는 한계상태식 G 는 다음과 같이 표현된다.

$$G = S - \sum_i Q_i = 0 \quad (2.3)$$

Bae (2016)의 연구에서는 다음과 같이 신뢰도해석 과정을 일반화 및 단순화하기 위해 식(2.3)의 한계상태식을 총 공칭하중효과 C_0 로 나누어 표준

화를 하였다.

$$\bar{G} = \frac{S}{C_0} - \sum_i \frac{Q_i}{C_0} = \bar{S} - \sum_i \bar{Q}_i = 0, \quad \text{where } C_0 = \sum_i (Q_i)_0 \quad (2.4)$$

여기서 윗줄로 표시한 확률변수는 총 공칭하중효과에 의하여 표준화된 확률변수를 지칭한다. 이러한 표준화를 통해 교량의 형식과 크기에 구애받지 않고 식(2.1)의 하중조합에 대한 하중-저항계수를 설정할 수 있게 된다. 따라서 다양한 형식과 크기에 교량에 대하여 하중-저항계수의 일반적인 적용이 가능하게 된다. 다양한 종류의 실제 단면을 개별적으로 고려하지 않고도 하중-저항계수를 결정할 수 있기 때문에, 실제 단면의 신뢰도해석에 필요한 많은 비용들이 감소하게 된다. 표준화된 확률변수의 평균은 아래의 식(2.5)와 같이 표준화된 확률변수의 공칭값에 편심계수를 곱하여 얻을 수 있으며, 표준화된 확률변수의 표준편차는 표준화된 확률변수의 평균에 변동계수를 곱하여 얻게 된다.

$$\mu_{\bar{V}} = \lambda_v \bar{V}_0, \quad \sigma_{\bar{V}} = \nu_v \lambda_v \bar{V}_0 \quad (2.5)$$

2.2. 하중비에 의한 매개화

이러한 수식 유도 편의를 위해 하중비의 개념을 도입한다. 고정하중비 ξ 와 DC하중비 η 는 아래의 식(2.6)과 같이 정의한다.

$$\xi = \frac{(Q_{DC})_0 + (Q_{DW})_0}{\sum_i (Q_i)_0} = (\bar{Q}_{DC})_0 + (\bar{Q}_{DW})_0 \quad (2.6)$$

$$\eta = \frac{(Q_{DC})_0}{(Q_{DC})_0 + (Q_{DW})_0} = \frac{(\bar{Q}_{DC})_0}{(\bar{Q}_{DC})_0 + (\bar{Q}_{DW})_0}$$

고정하중비는 총 공칭하중효과에서 고정하중에 의한 공칭하중효과가 차지하는 비율을 나타내며, DC하중비는 고정하중에 의한 공칭하중효과 중에서 DC하중에 의한 공칭하중효과의 비율을 나타낸다. 아래의 그림2.1에는 실제 단-중경간 교량 거더 단면에서 나타난 하중비의 사례를 도시하였다. 그림2.1에 따르면 $0.1 \leq \xi \leq 0.9$, $0.6 \leq \eta \leq 1.0$ 범위에 하중비가 주로 분포하여 있는 것으로 나타난다. 단-중경간 교량 거더의 단면에서 DC하중과 DW하중에 의한 하중효과는 주로 같은 방향으로 작용하며, 차량활하중에 의한 하중효과는 총 공칭하중효과를 최대화하기 위해 이들과 같은 방향으로 작용하도록 택하였다.

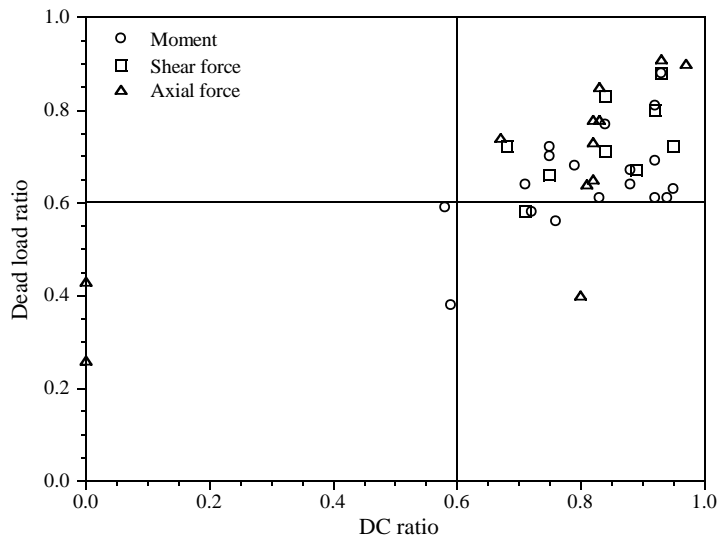


그림2.1 단-중경간 교량 거더 단면의 하중비

다음으로, 위에서 정의한 하중비로 각 하중효과를 매개화하여 표현하면 아래의 식(2.7)과 같이 나타난다.

$$(\bar{Q}_{DC})_0 = \xi\eta, (\bar{Q}_{DW})_0 = \xi(1-\eta), (\bar{Q}_{LL})_0 = 1-\xi \quad (2.7)$$

표준화된 요구공칭강도 \bar{S}_0 는 하중비로 아래의 식(2.8)과 같이 매개화하여 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{S}_0(\phi, \gamma_{DC}, \gamma_{DW}, \gamma_{LL}, \xi, \eta) &= \frac{1}{\phi} \sum_i \gamma_i (\bar{Q}_i)_0 \\ &= \frac{1}{\phi} ((\gamma_{DC}\eta - \gamma_{DW}\eta + \gamma_{DW} - \gamma_{LL})\xi + \gamma_{LL}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

대부분의 하중-저항계수 설계법 기반 설계기준들에서 하중계수의 크기는 $\gamma_{DC} < \gamma_{DW} < \gamma_{LL}$ 순으로 나타나기 때문에, DC하중비가 양수일 때 식(2.8)의 요구공칭강도는 고정하중비가 증가함에 따라 감소하게 된다. 이는 고정하중비가 늘어남에 따라 총 공칭하중효과에서 불확실성이 작은 고정하중에 의한 공칭하중효과가 차지하는 비율이 증가하기 때문이다. DC하중계수와 DW의 하중계수의 차이가 작을수록 DC하중비의 변화에 따른 요구공칭강도의 변화는 줄어들게 된다.

2.3. 역신뢰도해석

표준화된 한계상태식의 신뢰도지수는 아래의 식(2.9)와 같이 개선된 일계이차모멘트법(Haldar and Mahadevan, 2000)으로 계산할 수 있다.

$$\beta = \frac{\mu_S^{eq} - \sum_i \mu_{Q_i}^{eq}}{\sqrt{(\sigma_S^{eq})^2 + \sum_i (\sigma_{Q_i}^{eq})^2}} = \frac{\mu_{\bar{S}}^{eq} - \sum_i \mu_{\bar{Q}_i}^{eq}}{\sqrt{(\sigma_{\bar{S}}^{eq})^2 + \sum_i (\sigma_{\bar{Q}_i}^{eq})^2}} \quad (2.9)$$

여기서, β 는 신뢰도지수를 의미하여, 윗첨자 eq 는 정규분포를 따르지 않는 확률변수에 대하여 Rackwitz-Fiessler 변환(Rackwitz and Fiessler, 1978)을 수행하여 얻은 등가의 정규분포상의 값을 지칭한다. 식(2.9)에 나타난 바와 같이, 표준화된 확률변수와 표준화되지 않은 확률변수에 대하여 신뢰도지수는 동일하게 나타난다.

표준화된 공칭강도 중에서 목표신뢰도지수를 정확히 맞추는 공칭강도는 목표강도라 칭하며 \bar{S}_T 로 표시한다. 이를 구하기 위해선 아래의 식(2.10)과 같은 비선형 방정식을 풀어야 한다.

$$\beta(\bar{S}_T(\xi, \eta)) = \beta_T \quad (2.10)$$

여기서 β_T 는 목표신뢰도지수를 의미한다. 위 식(2.10)의 해 \bar{S}_T 를 계산하는 과정을 일반적으로 역신뢰도해석(Der Kiureghian *et al.*, 1994)이라 칭한다. 식(2.9)에 나타난 바와 같이, 신뢰도지수는 각 확률변수의 평균과 표준편차에 대하여 비선형으로 나타나기 때문에 식(2.10)의 역신뢰도해석 문제는 반복계산을 통해 풀어야 한다. 이 연구에서는 Bae (2016)의 연구와 같이 Newton-Raphson 방법을 기반으로 한 반복계산법으로 역신뢰도해석을 수행하였다.

목표강도 강도와 목표신뢰도지수에 상응하는 정확한 하중-저항계수

는 아래의 식(2.11)에 따라 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{\bar{S}^*}{\bar{S}_T} = \frac{1}{\bar{S}_T} \left(\mu_{\bar{S}}^{eq} - \frac{(\sigma_{\bar{S}}^{eq})^2}{\sqrt{(\sigma_{\bar{S}}^{eq})^2 + \sum_i (\sigma_{\bar{Q}_i}^{eq})^2}} \beta_T \right) \\ \gamma_i &= \frac{\bar{Q}_i^*}{(\bar{Q}_i)_0} = \frac{1}{(\bar{Q}_i)_0} \left(\mu_{\bar{Q}_i}^{eq} + \frac{(\sigma_{\bar{Q}_i}^{eq})^2}{\sqrt{(\sigma_{\bar{S}}^{eq})^2 + \sum_i (\sigma_{\bar{Q}_i}^{eq})^2}} \beta_T \right)\end{aligned}\quad (2.11)$$

여기서 \bar{S}^* 와 \bar{Q}_i^* 는 각각 강도와 i 번째 하중효과의 MPFP를 지칭하며, 이는 역신뢰도해석을 통해 얻을 수 있다. 강도와 하중효과의 MPFP는 하중의 구성에 따라 달라지기 때문에, 식(2.11)의 정확한 하중-저항계수는 하중비에 따라 달라지게 된다.

다음으로는 KHBDC LSD의 목표신뢰도지수 3.72에 상응하는 RC부재, ST부재, 그리고 PC부재의 목표강도를 계산한다. 계산에 사용된 부재강도의 통계특성과 하중효과의 통계특성은 기존 연구들(Paik *et al.*, 2009; Shin *et al.*, 2006; Bae, 2016; Nowak, 1999; Lee, 2014)로부터 인용하였으며, 이는 표2.1에 출처와 함께 정리하였다. 표2.1에서 FM과 CIP는 각각 공장제작부재와 현장제작부재를 의미한다. RC부재의 압축강도의 통계특성에 대해선 4장에서 다루기로 한다.

그림2.2에는 공장제작부재에 대하여 DC하중비 0.8에서의 목표강도를 고정하중비에 따라 도시하였다. 고정하중비 구간 $0.0 \leq \xi \leq 0.6$ 에서 세 재료의 목표강도는 거의 선형에 가깝게 나타나며 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 목표강도의 감소량은 $\xi = 0.6$ 주변에서 빠르게 줄어들고

표2.1 부재강도 및 하중효과의 통계특성

확률변수		편심계수	변동계수	분포특성	출처
부재강도	휨	1.229	0.130	대수정규	Paik <i>et al.</i> (2009)
	RC 전단	1.289	0.144	대수정규	Paik <i>et al.</i> (2009)
	압축	1.229	0.183	대수정규	현재 연구
	ST 휨	1.180	0.093	대수정규	Shin <i>et al.</i> (2006)
	전단	1.224	0.115	대수정규	Bae (2016)
	PC 휨	1.056	0.073	대수정규	Paik <i>et al.</i> (2009)
	전단	1.274	0.139	대수정규	Paik <i>et al.</i> (2009)
DC(FM/CIP)		1.03/1.05	0.08/0.10	정규	Nowak (1999)
하중효과	DW	1.00	0.25	정규	Nowak (1999)
	LL	1.00	0.20	대수정규	Lee (2014)

$0.6 \leq \xi \leq 1.0$ 구간에서는 목표강도가 아래 쪽으로 블록하면서 평평한 모습을 띠게 된다. 전체적으로 보았을 때 고정하중비가 증가함에 따라 목표강도는 감소하는 모습을 나타내는데, 그 이유는 고정하중비가 증가함에 따라 총 공칭하중효과에서 변동성이 큰 차량활하중이 차지하는 비중이 감소하기 때문이다.

목표강도에 대하여 평균값은 목표강도에 편심계수를 곱하여 얻을 수 있다. 변동계수가 큰 재료일수록 목표강도의 평균값이 크게 나타나게 되며, 이는 신뢰도 기반 설계기준의 기본적인 원리에 부합하는 것이다. 그림2.2(b)에 나타난 목표 전단강도는 그림2.2(a)에 나타난 목표 휨강도에 비하여 작게 나타난다. 그 이유는 전단강도와 휨강도의 공칭값이 같을

경우, 전단강도가 휨강도에 비하여 더 큰 평균값을 요구하게 되기 때문이다. 이는 그림2.2에서 세 재료 모두에 대하여 목표 전단강도의 평균값이 목표 휨강도의 평균값보다 높게 나타나는 데에서 확인할 수 있다.

그림2.3에는 $\eta=0.8$ 에서의 ST부재의 휨모멘트에 대한 정확한 하중-저항계수를 나타내었다. 하중-저항계수는 고정하중비에 따라 비선형적으로 변하며, 이들의 변화 양상은 고정하중비 0.5보다 0.6 주변에서 더 빠른 것으로 나타난다. 그 이유는 차량활하중에 의한 하중효과가 왜도를 가진 대수정규분포로 가정되었기 때문이다. 고정하중비가 0.6보다 작은 영역에서는 활하중계수가 고정하중계수보다 크게 나타난다. 그 이유는 해당 영역에서는 총 하중효과에서 활하중에 의한 하중효과가 지배적으로 나타나기 때문이다. 고정하중비가 0.6보다 큰 영역에서는 그 경향이 정반대로 나타난다. 저항계수는 전체적으로 고정하중비가 증가함에 따라 서서히 감소하는 것으로 나타난다.

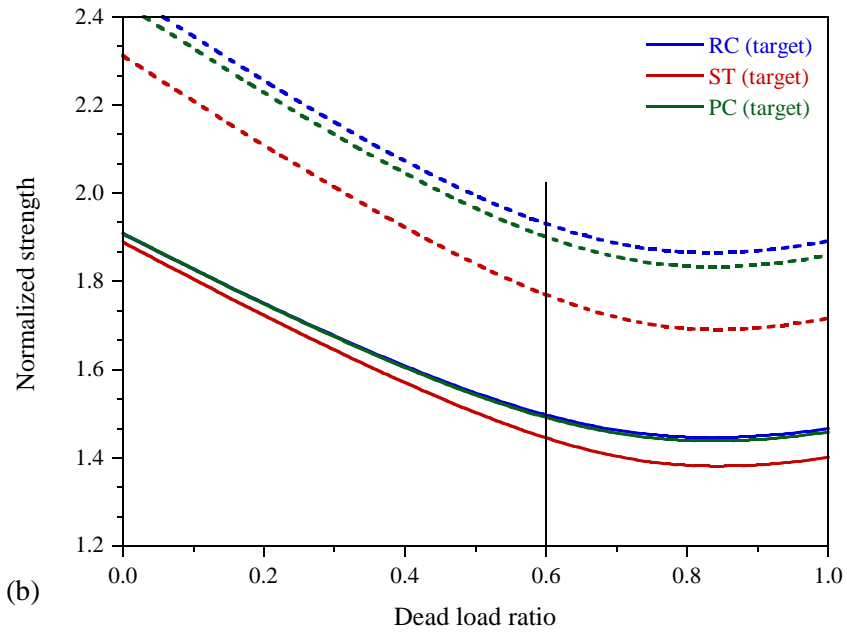
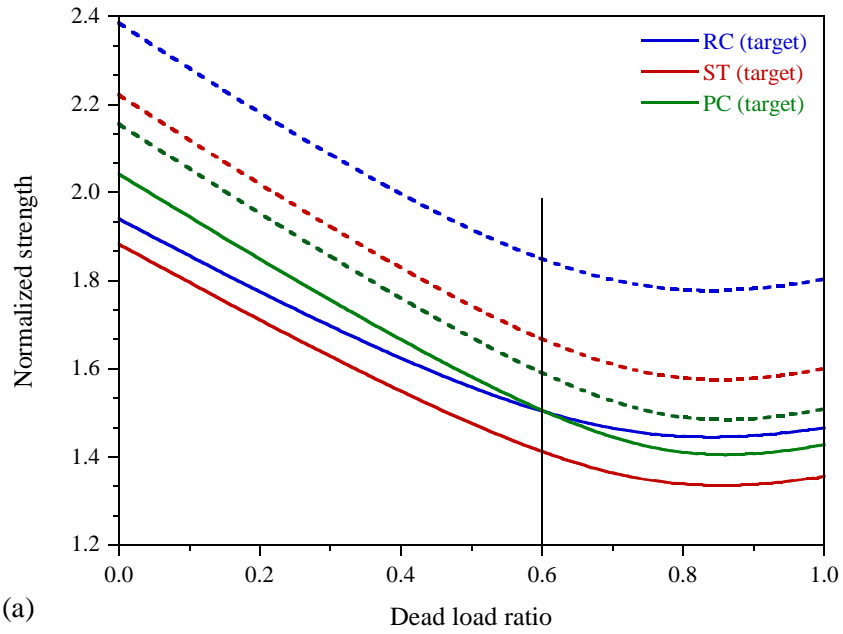


그림 2.2 세 재료의 $\eta=0.8$ 에서의 목표강도: (a) 휨; (b) 전단

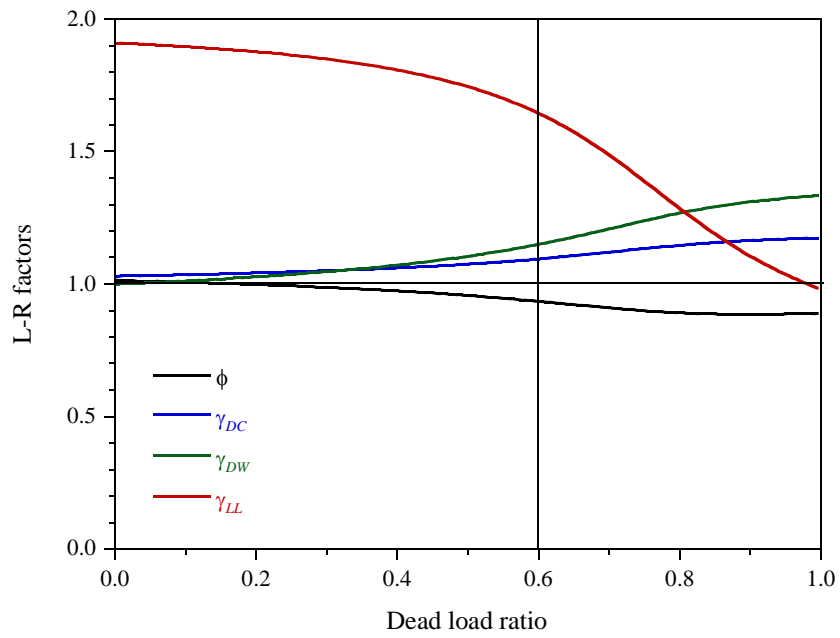


그림2.3 휨모멘트에 대한 ST부재의 $\eta = 0.8$ 에서의 정확한 하중-저항계수

3. 공칭강도 최적화 기반 하중-저항계수 결정법

2장에서 보인 것과 같이 목표강도는 각 하중비에 따라 비선형적으로 변하게 된다. 하지만 하중-저항계수가 고정되어 있기에 요구공칭강도는 하중비에 따라 선형적으로 변하게 된다. 따라서 하중-저항계수는 설정한 하중비 내에서 요구공칭강도가 목표강도를 가능한 잘 근사할 수 있도록 결정되어야 한다. 이러한 논의에 따라 하중-저항계수의 결정함에 있어 최적화 기법을 도입하게 된다.

이 장에서는 2종류의 최적화 기법에 대하여 서술한다. 하나는 Reference 최적화 기법이며, 다른 하나는 Sequential 최적화 기법이다. 전자는 목표강도와 요구공칭강도 간의 오차를 절대적인 관점에서 최소화하는 하중-저항계수를 결정하는 방법이다. 후자는 설계기준에 적용하여 사용하기에 더 편리한 하중-저항계수를 결정하는 방법이다. Reference 최적화 기법은 Sequential 최적화 기법보다 더 정교한 하중-저항계수를 계산하게 된다.

그림2.2에서 확인할 수 있었던 바와 같이 목표강도는 낮은 고정하중비 구간에서 선형에 가까운 모습으로 감소하는 것으로 나타나며, 높은 고정하중비 구간에서는 약간의 곡률을 가진 상태로 평평한 모습으로 나타나게 된다. 이를 바탕으로 생각하였을 때, 목표강도를 하나의 직선이 아닌 두 개의 직선으로 근사하는 것이 합리적일 것이라 판단할 수 있다. 따라서 고정하중비를 $0.0 \leq \xi \leq \xi_b$ 와 $\xi_b \leq \xi \leq 1.0$ 의 두 개의 영역으로 나

누어 각 영역에 대하여 개별적인 최적화를 수행한다. 여기서 ξ_b 는 고정하중비 영역의 경계점이다. $0.0 \leq \xi \leq \xi_b$ 와 $\xi_b \leq \xi \leq 1.0$ 을 각각 제 1영역과 제 2영역이라 정의하였을 때, 제 1영역에서는 차량활하중에 의한 하중효과가 지배적이며 제 2영역에서는 고정하중에 의한 하중효과가 지배적으로 나타난다. 고정하중이 지배적인 제 2영역에서 목표강도가 완만하게 변하는 것을 보았을 때, 이 영역에서 활하중의 비중이 조금 늘어나고 줄어드는 것은 목표강도에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단되며, 따라서 활하중을 제외한 한계상태인 극한한계상태4는 따로 필요하지 않는 것으로 판단된다.

한편, 하중-저항계수를 기반으로 하여 목표강도를 1차식으로 근사하는 것에서 더 나아가, 목표강도를 3차식으로 근사하고 그 결과를 확인해 본다. 이 방법을 실무에 적용하기는 어렵겠지만, 새로운 방법을 도입하여 목표강도를 더욱 정교하게 근사할 수 있음을 확인하는 데에 그 의의가 있다고 할 수 있다.

3.1. Reference 최적화 기법

Reference 하중-저항계수는 아래 식(3.1)의 최적화 문제를 풀으로써 구할 수 있다.

$$\text{Min}_{\mathbf{x}} \Pi = \frac{1}{2} \sum_p \int_{\xi_l}^{\xi_u} \int_{\eta_l}^{\eta_u} (\bar{S}_0^p(\mathbf{x}, \xi, \eta) - \bar{S}_T^p(\xi, \eta))^2 d\eta d\xi = \frac{1}{2} \int_{\xi_l}^{\xi_u} \int_{\eta_l}^{\eta_u} \|\bar{\mathbf{S}}_0 - \bar{\mathbf{S}}_T\|_2^2 d\eta d\xi \quad (3.1)$$

여기서, \bar{S}_0^p 와 \bar{S}_T^p 는 각각 재료 p 에 대한 요구공칭강도와 목표강도를 의미한다. $\|\cdot\|_2$ 는 벡터의 2-norm을 의미한다. ξ_u 과 ξ_l 는 고정하중비의 상한과 하한을 의미하며, η_u 과 η_l 는 DC하중비의 상한과 하한을 의미한다. 제 1영역에 대해서는 고정하중비의 상한과 하한을 ξ_b 와 0으로 설정하며, 제 2영역에 대해서는 고정하중비의 상한과 하한을 1과 ξ_b 로 설정한다. DC하중비의 상한과 하한은 각각 1 과 0.6으로 설정한다. 식(3.1)의 각 벡터들은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= (\phi^{RC}, \phi^{ST}, \phi^{PC}, \gamma_{DC}, \gamma_{DW}, \gamma_{LL}) = (\boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\gamma})^T \\ \bar{\mathbf{S}}_0 &= (\bar{S}_0^{RC}, \bar{S}_0^{ST}, \bar{S}_0^{PC})^T \\ \bar{\mathbf{S}}_T &= (\bar{S}_T^{RC}, \bar{S}_T^{ST}, \bar{S}_T^{PC})^T\end{aligned}\tag{3.2}$$

\mathbf{x} 는 하중-저항계수의 벡터이며, $\bar{\mathbf{S}}_0$ 와 $\bar{\mathbf{S}}_T$ 는 각각 세 재료에 대한 요구공칭강도와 목표강도의 벡터이다.

하나의 요구공칭강도는 무수히 많은 선형종속의 하중-저항계수로 나타낼 수 있기 때문에, 식(3.1)의 최적화 문제는 부정의 해를 갖게 된다. 따라서 식(3.1)의 최적화 문제를 풀기 위해선 하중-저항계수 중 하나가 미리 정해져야 한다. 이 연구에서는 AASHTO specifications(AASHTO, 2014)에 따라 RC부재의 저항계수를 0.9로 설정하기로 한다.

식(3.1)의 최적화 문제의 1차 필요조건은 다음과 같이 목적함수에 하중-저항계수에 대한 변분을 취하여 구할 수 있다.

$$\delta_{\mathbf{x}}\Pi = \int_{\xi_l}^{\xi_u} \int_{\eta_l}^{\eta_u} \delta_{\mathbf{x}} \bar{\mathbf{S}}_0^T \cdot (\bar{\mathbf{S}}_0 - \bar{\mathbf{S}}_T) d\eta d\xi \quad (3.3)$$

요구공칭강도는 저항계수에 대한 비선형함수로 표현되기 때문에, 위의 최적화 문제를 반복계산법으로 풀기 위하여 아래와 같이 요구공칭강도를 테일러 전개를 통해 1차 근사를 한다.

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{S}}_0(\mathbf{x}_{k+1}) &\approx \bar{\mathbf{S}}_0(\mathbf{x}_k) + \frac{\partial \bar{\mathbf{S}}_0}{\partial \phi} \Delta \phi + \frac{\partial \bar{\mathbf{S}}_0}{\partial \gamma} \Delta \gamma = \bar{\mathbf{S}}_0(\mathbf{x}_k) + \bar{\mathbf{h}}^\phi \Delta \phi + \bar{\mathbf{h}}^\gamma \Delta \gamma = \bar{\mathbf{S}}_0(\mathbf{x}_k) + \bar{\mathbf{h}} \Delta \mathbf{x} \\ \delta_{\mathbf{x}} \bar{\mathbf{S}}_0 &= \frac{\partial \bar{\mathbf{S}}_0}{\partial \phi} \delta \phi + \frac{\partial \bar{\mathbf{S}}_0}{\partial \gamma} \delta \gamma = \bar{\mathbf{h}}^\phi \delta \phi + \bar{\mathbf{h}}^\gamma \delta \gamma = (\bar{\mathbf{h}}^\phi, \bar{\mathbf{h}}^\gamma) \begin{pmatrix} \delta \phi \\ \delta \gamma \end{pmatrix} = \bar{\mathbf{h}} \delta \mathbf{x} \end{aligned} \quad (3.4)$$

여기서 $\bar{\mathbf{h}} = (\bar{\mathbf{h}}^\phi, \bar{\mathbf{h}}^\gamma)$ 이며, $\bar{\mathbf{h}}^\phi$ 와 $\bar{\mathbf{h}}^\gamma$ 는 다음과 같다.

$$\bar{\mathbf{h}}^\phi = - \begin{bmatrix} \frac{\bar{S}_0^{RC}}{\phi^{RC}} & & & \mathbf{0} \\ & & & \\ & \frac{\bar{S}_0^{ST}}{\phi^{ST}} & & \\ \mathbf{0} & & & \frac{\bar{S}_0^{PC}}{\phi^{PC}} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{h}}^\gamma = \begin{bmatrix} \frac{(\bar{Q}_{DC})_0}{\phi^{RC}} & \frac{(\bar{Q}_{DW})_0}{\phi^{RC}} & \frac{(\bar{Q}_{LL})_0}{\phi^{RC}} \\ \frac{(\bar{Q}_{DC})_0}{\phi^{ST}} & \frac{(\bar{Q}_{DW})_0}{\phi^{ST}} & \frac{(\bar{Q}_{LL})_0}{\phi^{ST}} \\ \frac{(\bar{Q}_{DC})_0}{\phi^{PC}} & \frac{(\bar{Q}_{DW})_0}{\phi^{PC}} & \frac{(\bar{Q}_{LL})_0}{\phi^{PC}} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

식(3.3)에 식(3.4)를 대입하고 정리하면 아래와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \delta_{\mathbf{x}}\Pi &\approx \int_{\xi_l}^{\xi_u} \int_{\eta_l}^{\eta_u} (\bar{\mathbf{h}} \delta \mathbf{x})^T \cdot (\bar{\mathbf{S}}_0(\mathbf{x}_k) - \bar{\mathbf{S}}_T + \bar{\mathbf{h}} \Delta \mathbf{x}) d\eta d\xi \\ &= \delta \mathbf{x}^T \int_{\xi_l}^{\xi_u} \int_{\eta_l}^{\eta_u} \bar{\mathbf{h}}^T \cdot \bar{\mathbf{h}} d\eta d\xi \Delta \mathbf{x} + \delta \mathbf{x}^T \int_{\xi_l}^{\xi_u} \int_{\eta_l}^{\eta_u} \bar{\mathbf{h}}^T \cdot (\bar{\mathbf{S}}_0(\mathbf{x}_k) - \bar{\mathbf{S}}_T) d\eta d\xi \\ &= \delta \mathbf{x}^T (\mathbf{H} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}) = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

여기서 \mathbf{H} 와 \mathbf{B} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{H} = \int_{\xi_l}^{\xi_u} \int_{\eta_l}^{\eta_u} \bar{\mathbf{h}}^T \cdot \bar{\mathbf{h}} d\eta d\xi, \quad \mathbf{B} = \int_{\xi_l}^{\xi_u} \int_{\eta_l}^{\eta_u} \bar{\mathbf{h}}^T \cdot (\bar{\mathbf{S}}_0(\mathbf{x}_k) - \bar{\mathbf{S}}_T) d\eta d\xi \quad (3.7)$$

최적해는 식(3.6)의 마지막 수식 괄호 안의 증분형 방정식을 반복적으로 풀어서 계산할 수 있다. $\bar{\mathbf{h}}$ 와 $\bar{\mathbf{S}}_0$ 는 각 하중비에 대하여 다항식으로 표현되기 때문에, 식(3.7)에서 \mathbf{B} 의 두 번째 항을 제외하고는 해석적 적분을 통한 계산이 가능하다. 목표강도 $\bar{\mathbf{S}}_T$ 는 각 하중비에 대하여 해석적으로 표현되지 않기 때문에, \mathbf{B} 의 두 번째 항의 적분에 대해선 수치적분을 도입한다. 이 연구에서는 \mathbf{B} 의 두 번째 항의 고정하중비 방향 적분에 대하여 사다리꼴 적분법을 적용하였으며, DC하중비 방향 적분에 대하여 가우스 7점 적분법을 적용하였다.

고정하중비 영역 경계점 ξ_b 는 다음과 같은 최소화 문제를 통하여 결정하였다.

$$\text{Min}_{\xi_b} \Pi_b(\xi_b) = \frac{1}{2} \int_0^{\xi_b} \int_{\eta_l}^{\eta_u} \|\bar{\mathbf{S}}_0 - \bar{\mathbf{S}}_T\|_2^2 d\eta d\xi + \frac{1}{2} \int_{\xi_b}^1 \int_{\eta_l}^{\eta_u} \|\bar{\mathbf{S}}_0 - \bar{\mathbf{S}}_T\|_2^2 d\eta d\xi \quad (3.8)$$

식(3.8)을 고정하중비 영역 경계점 ξ_b 에 대하여 직접 푸는 것은 까다로운 문제이기 때문에, 미리 정해둔 몇 개의 ξ_b 에 대하여 최적 하중-저항계수를 계산하고, 이를 식(3.8)의 목적함수에 대입하여 가장 작은 목적함수를 도출하는 ξ_b 를 취하는 방식으로 위의 최소화 문제를 풀었다. 그림3.1은 $0.4 \leq \xi_b \leq 0.8$ 범위에서 계산된 목적함수의 크기를 보이고 있으며, 가장

작은 목적함수를 도출하는 ξ_b 는 0.63으로 계산되었다. 이렇게 결정된 고정하중비 영역 경계점과 전술한 최적화 기법을 바탕으로 계산한 Reference 하중-저항계수는 아래의 표3.1에 정리하였다.

표3.1에 따르면, 예상한 바와 같이 제 1영역에서는 차량활하중에 의한 하중효과가 지배적이므로 활하중계수가 고정하중계수보다 높게 평가되는 것을 확인할 수 있다. ST 및 PC부재의 저항계수는 제 2영역보다 제 1영역에서 낮게 평가되며, 공장제작부재와 현장제작부재에 대하여 저항계수는 서로 거의 비슷하게 나타난다. 공장제작부재의 하중계수와 비교하였을 때, 현장제작부재의 하중계수에서는 DC하중계수가 더 높게 나타나며, 그 외의 다른 하중계수는 조금씩 더 낮게 나타난다.

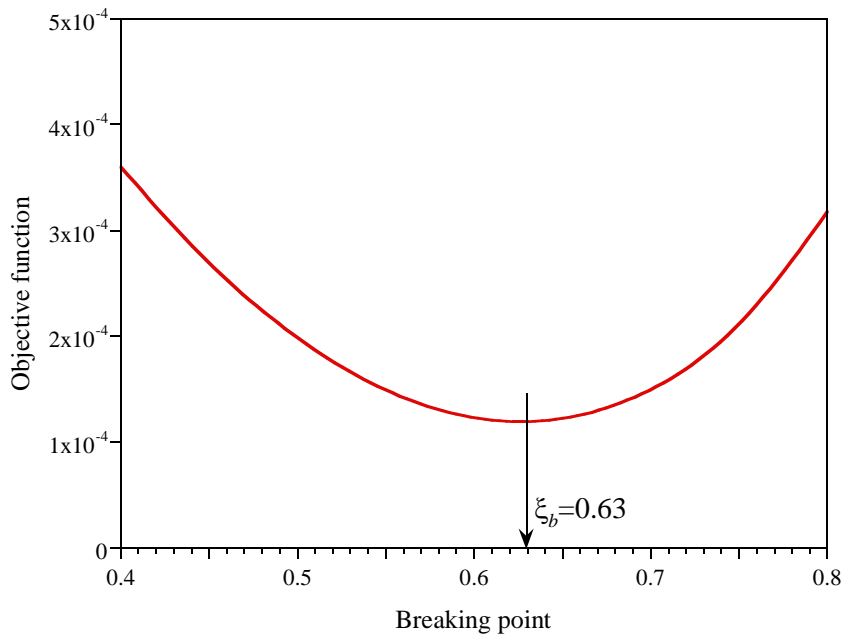


그림3.1 고정하중비 영역 경계점에 따른 목적함수값

표3.1 Reference 하중-저항계수

부재 특성	하중 효과	고정하중비	저항계수			하중계수		
			ϕ^{RC}	ϕ^{ST}	ϕ^{PC}	γ_{DC}	γ_{DW}	γ_{LL}
공장 제작	휨	$0.00 \leq \xi \leq 0.63$	0.900	0.939	0.871	1.027	1.054	1.752
		$0.63 \leq \xi \leq 1.00$	0.900	0.970	0.919	1.280	1.408	1.378
	전단	$0.00 \leq \xi \leq 0.63$	0.900	0.918	0.901	1.068	1.092	1.709
		$0.63 \leq \xi \leq 1.00$	0.900	0.940	0.905	1.291	1.395	1.343
현장 제작	휨	$0.00 \leq \xi \leq 0.63$	0.900	0.939	0.871	1.067	1.047	1.750
		$0.63 \leq \xi \leq 1.00$	0.900	0.968	0.915	1.353	1.377	1.342
	전단	$0.00 \leq \xi \leq 0.63$	0.900	0.918	0.901	1.108	1.084	1.707
		$0.63 \leq \xi \leq 1.00$	0.900	0.938	0.904	1.358	1.370	1.317

그림3.2(a)에는 $\eta=0.8$ 일 때 공장제작 휨부재의 Reference 하중-저항계수에 의해 계산되는 요구공칭강도와 목표강도를 재료별로 도시하였으며, 그림3.2(b)에는 ST 휨부재의 4개의 DC하중비에 대한 요구공칭강도와 목표강도를 도시하였다. 그림3.2(a)에 따르면, 영역별 Reference 하중-저항계수에 의하여 2개의 직선으로 표현된 요구공칭강도가 목표강도를 잘 근사하게 된다. 이는 제안한 기법에 의하여 하중-저항계수의 최적화가 잘 수행되었음을 의미한다. 그림3.2(b)에 따르면, 제 1영역에서 DC하중비에 따른 요구공칭강도의 변화는 미미한 것으로 나타난다. 그 이유는 제 1영역에서는 DC하중계수와 DW하중계수가 유사하게 나타나기 때문이다. 반면, 제 2영역에서는 DC하중계수와 DW하중계수 간의 차이가 증가하고 DC하중비의 변화에 따른 요구공칭강도의 변화 또한 뚜렷하게 나타난다.

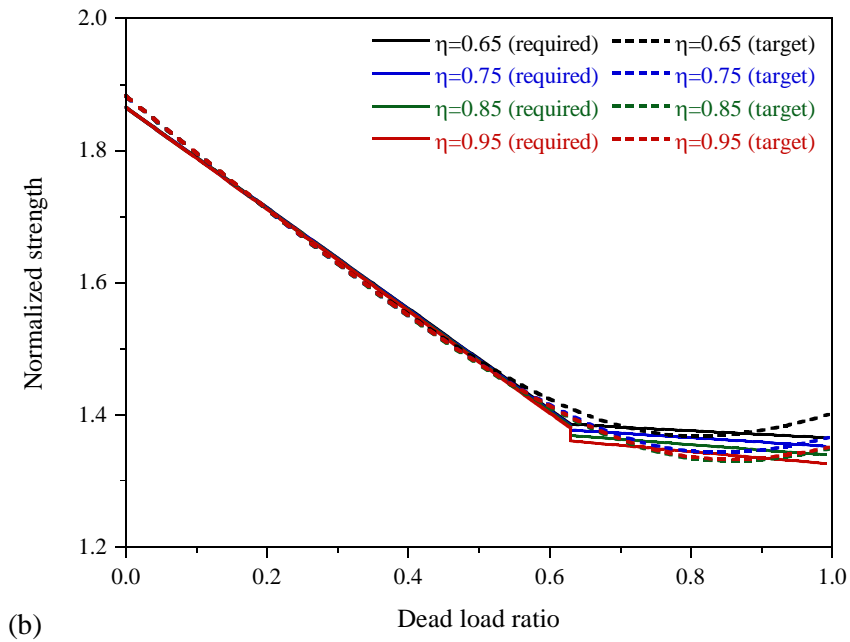
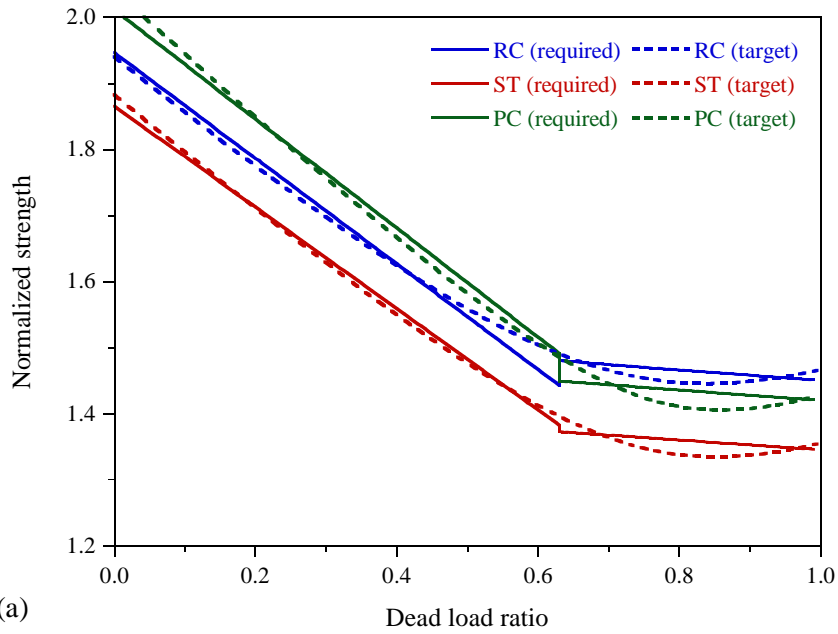


그림3.2 Reference 하중-저항계수의 휨부재 요구공칭강도 및 목표강도: (a) $\eta=0.8$ 일 때 세 재료; (b) ST부재의 서로 다른 4개의 DC하중비

이어서, 아래의 그림3.3(a)에는 공장제작 전단부재에 대하여 $\eta=0.8$ 일 때 Reference 하중-저항계수에 의해 계산되는 요구공칭강도와 목표강도를 재료별로 나타내었으며, 그림3.3(b)에는 ST 전단부재에 대하여 서로 다른 4개의 DC하중비에 대해 요구공칭강도와 목표강도를 나타내었다. 그림 3.3(a)에 따르면 RC 및 PC부재의 전단에 대한 요구공칭강도와 목표강도는 거의 동일하게 나타난다. 그 이유는 표2.1에서 확인할 수 있는 바와 같이 RC 및 PC부재의 전단강도에 대하여 통계특성이 서로 매우 유사하게 적용되었기 때문이다.

그림3.4(a)와 그림3.4(b)에는 각각 휨과 전단에 대해 Reference 하중-저항계수로 정해지는 요구공칭강도가 평균적으로 확보하는 신뢰도지수를 재료별로 도시하였다. 신뢰도지수의 평균값은 아래와 같이 DC하중비 방향으로 가우스 7점 적분을 수행하고 구간길이 0.4로 나누는 방법으로 계산하였다.

$$\beta_{avg}^p(\xi) = \frac{1}{0.4} \int_{0.6}^{1.0} \beta^p(\xi, \eta) d\eta, \text{ for } p = RC, ST, PC \quad (3.9)$$

그림3.4(a)와 그림3.4(b)에서 목표신뢰도지수 3.72는 검은 가로 실선으로 표시하였으며, 오차범위 $\pm 5\%$ 는 검은 가로 점선으로 표시하였다. 그림 2.1의 실제 단면의 하중비에 대하여 확보되는 신뢰도지수는 도형으로 표시하였다. 도형의 색깔은 각 단면의 재료를 의미한다. 그림3.4(a)와 그림3.4(b) 볼 수 있는 바와 같이 Reference 하중-저항계수의 요구공칭강도

에 의하여 확보되는 신뢰도지수의 평균값은 목표신뢰도지수 3.72에 대하여 오차범위 $\pm 5\%$ 를 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있다.

그림3.5(a)와 그림3.5(b)에는 각각 힘과 전단에 대하여 Reference 하중-저항계수로 정해지는 ST부재의 요구공칭강도가 서로 다른 4개의 DC하중비에 대하여 확보하는 신뢰도지수를 도시하였다. 이 역시 목표신뢰도지수 3.72로부터 오차범위 $\pm 5\%$ 를 벗어나지 않는 것으로 나타난다.

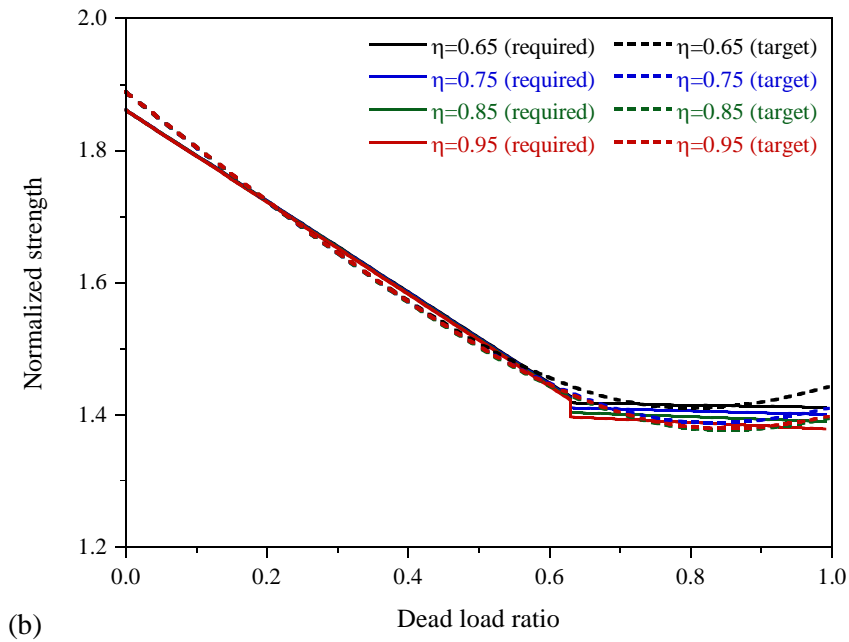
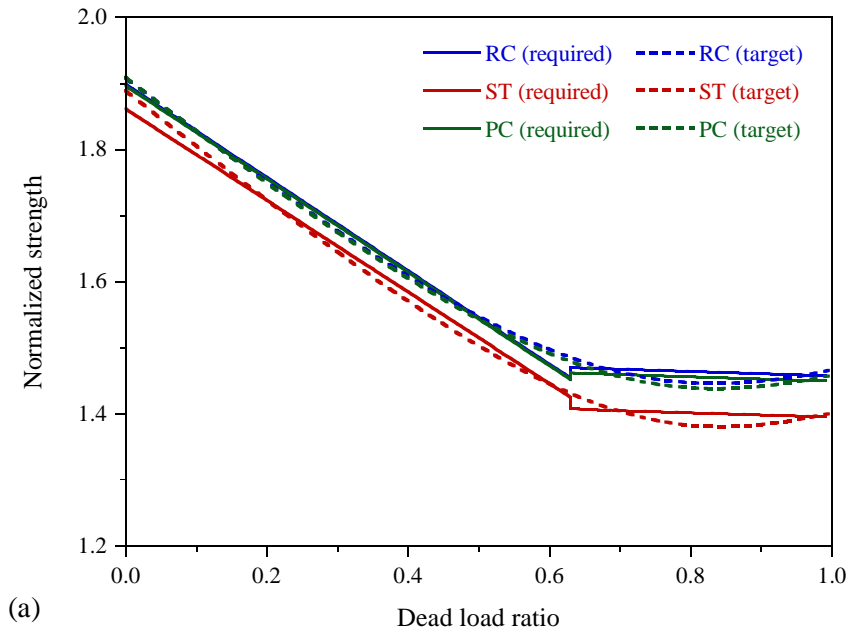


그림3.3 Reference 하중-저항계수의 전단부재 요구공칭강도 및 목표강도:
 (a) $\eta=0.8$ 일 때 세 재료; (b) ST부재의 서로 다른 4개의 DC하중비

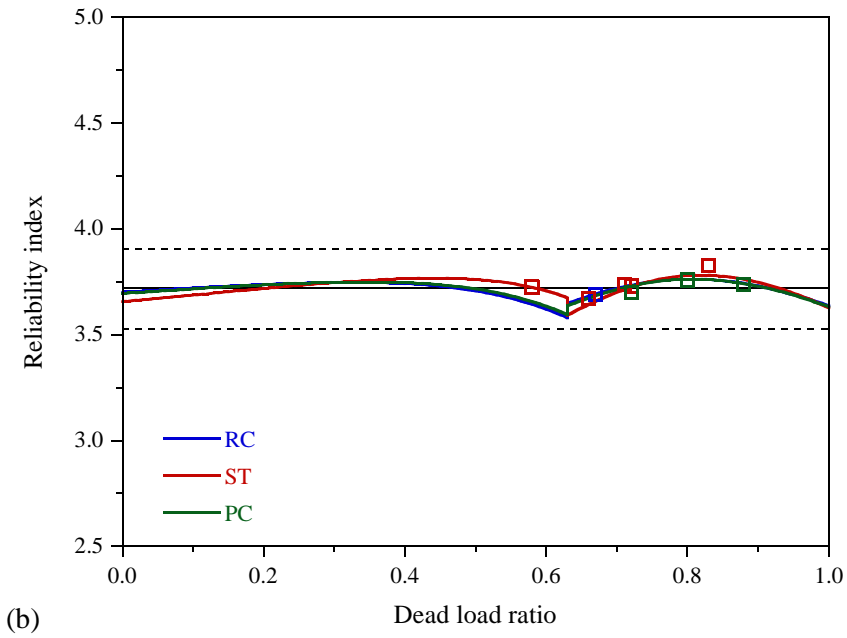
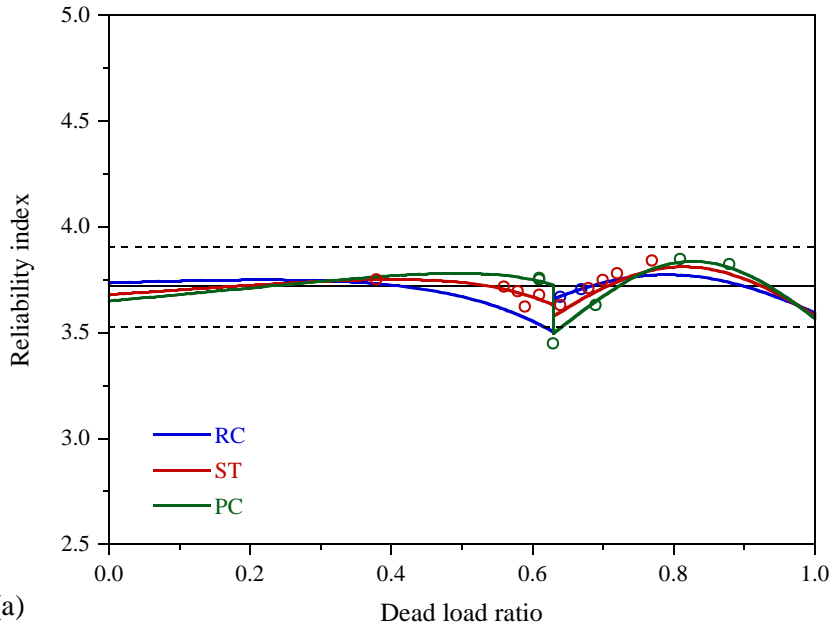


그림3.4 Reference 하중-저항계수의 요구공칭강도에 의해 확보되는 평균 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단

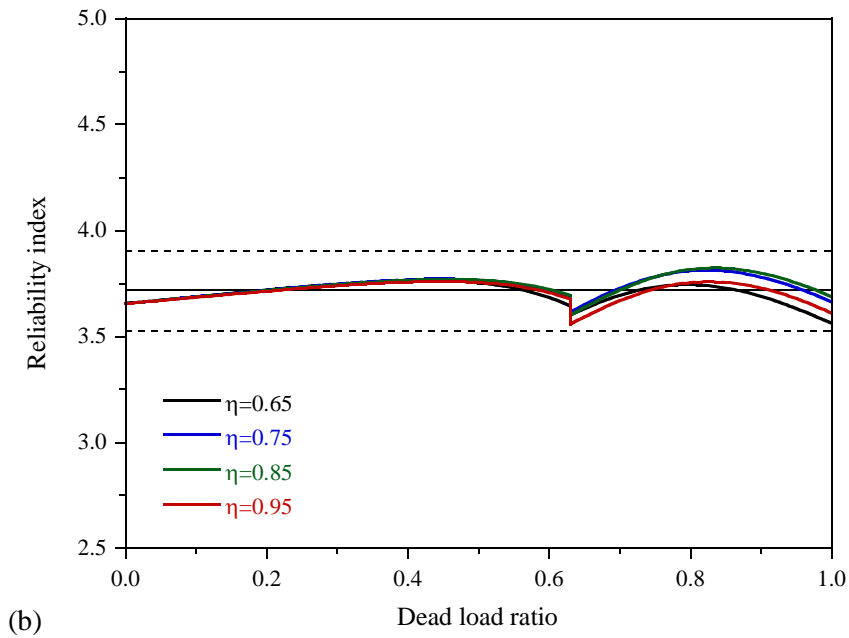
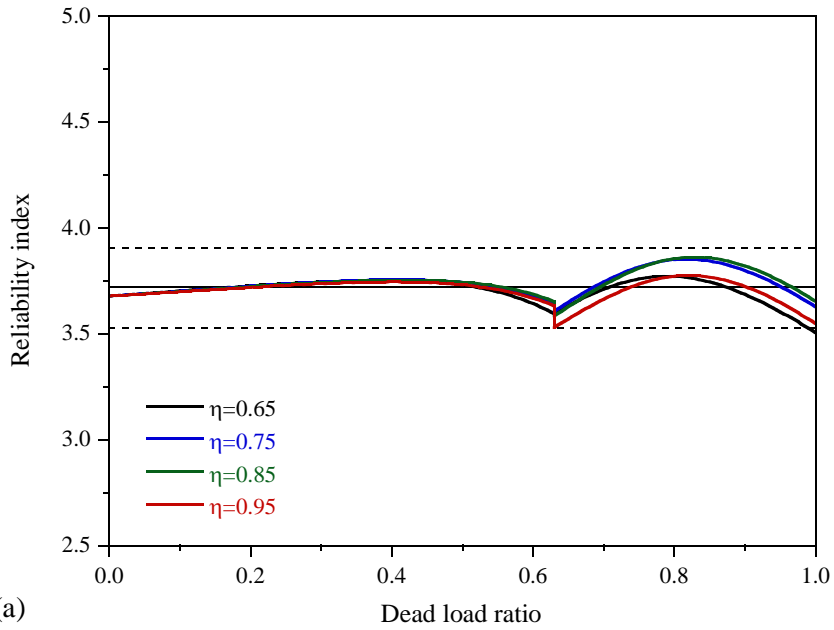


그림3.5 Reference 하중-저항계수의 ST부재의 요구공칭강도에 의하여 확보되는 DC하중비별 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단

3.2. Sequential 최적화 기법

Reference 하중-저항계수는 최적화 대상 하중비 범위에서 목표강도를 가장 잘 근사하는 요구공칭강도를 산출한다. 하지만 Reference 하중-저항계수는 모든 고정하중비 영역 및 하중효과에 대하여 독립적으로 정의되기 때문에, 이를 설계기준에 그대로 도입하기에는 무리가 있다. 총 하중효과의 구성은 각 고정하중비 영역별로 상이하지만, 부재강도의 특성은 고정하중비 영역별로 다르지 않다는 것을 고려하였을 때, 저항계수는 모든 고정하중비 영역에 대하여 동일하고 하중계수는 고정하중비 영역별로 상이하게 설정하는 것이 합리적이라 생각할 수 있다. 더불어 하중-저항계수 설계법이 적용된 설계기준에서 일반적으로 휨과 전단에 대해 저항계수는 개별적으로 적용하고 하중계수는 통일하는 것이 관례이다. 이러한 하중-저항계수 설계법 기반 설계기준의 구성을 고려하여 하중-저항계수를 순차적으로 산정하기 위해, Sequential 최적화 기법을 도입한다.

목표강도의 변화양상은 제 1영역에서는 선형으로, 제 2영역에서는 비선형으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 요구공칭강도는 선형으로 나타나기 때문에 목표강도와 요구공칭강도 간의 오차는 제 2영역에서 더 크게 나타날 가능성이 높으며, 최적화는 전체적인 오차를 줄이기 위하여 제 2영역에 대하여 먼저 수행한다. 휨부재의 제 2영역에 대해서는 Reference 최적화를 통해 계산한 하중-저항계수를 취하고, 여기서 계산된 저항계수를 전 영역에 대한 공통 저항계수로 취한다. 제 1영역의 하중계수는 위에서 말한 공통 저항계수를 적용하여 하중계수에 대해서만 제

1영역에서 최적화를 수행하여 계산한다. 이 경우, 1차 필요조건은 수식 전개를 통해 다음과 같은 선형방정식으로 유도된다.

$$\mathbf{H}^{\gamma\gamma}\boldsymbol{\gamma}^1 + \mathbf{B}^\gamma = 0 \quad (3.10)$$

여기서 $\boldsymbol{\gamma}^1$ 은 제 1영역의 하중계수의 벡터를 의미하며, $\mathbf{H}^{\gamma\gamma}$ 과 \mathbf{B}^γ 은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{H}^{\gamma\gamma} = \int_0^{\xi_b} \int_{\eta_l}^{\eta_u} (\bar{\mathbf{h}}^\gamma)^T \cdot \bar{\mathbf{h}}^\gamma d\eta d\xi, \quad \mathbf{B}^\gamma = - \int_0^{\xi_b} \int_{\eta_l}^{\eta_u} (\bar{\mathbf{h}}^\gamma)^T \cdot \bar{\mathbf{S}}_T d\eta d\xi \quad (3.11)$$

이어서 전단의 저항계수는 힘에서 계산된 하중계수를 이용하여 계산한다. 힘에서와 마찬가지로, 모든 고정하중비 영역에 대하여 전단저항계수는 동일한 값으로 적용한다. 전단저항계수를 계산하기 위한 최적화 문제는 아래의 식(3.12)와 같이 정의된다.

$$\text{Min}_{\boldsymbol{\phi}^s} \Pi = (1 - \Theta) \int_0^{\xi_b} \int_{\eta_l}^{\eta_u} \|\bar{\mathbf{S}}_0 - \bar{\mathbf{S}}_T\|_2^2 d\eta d\xi + \Theta \int_{\xi_b}^1 \int_{\eta_l}^{\eta_u} \|\bar{\mathbf{S}}_0 - \bar{\mathbf{S}}_T\|_2^2 d\eta d\xi \quad (3.12)$$

여기서 $\boldsymbol{\phi}^s$ 는 전단 저항계수의 벡터를 의미하며, Θ 는 최적화의 가중치를 의미한다. Θ 는 0와 1사이의 값을 가지며 Θ 가 1에 가까운 값을 가질수록 제 2영역의 오차를 더 줄이는 방향으로 최적화 계산이 수행된다. 목표강도는 제 2영역에서 더 강한 비선형성을 나타내기 때문에, 최대 오차를 줄이기 위해선 가중치 Θ 을 1에 가까운 값으로 사용하는 것이 합리

적이다. 이 연구에서는 가중치 Θ 를 약 0.9로 사용할 때 충분히 합리적인 전단저항계수를 도출하는 것을 확인하였다.

하중계수를 힘에서 계산한 값으로 고정한 뒤, 1차 필요조건을 통해 수식을 유도하면 다음과 같은 증분식을 도출해낼 수 있다.

$$\mathbf{H}^{\phi\phi}\Delta\phi^S + \mathbf{B}^\phi = 0 \quad (3.13)$$

여기서 $\mathbf{H}^{\phi\phi}$ 과 \mathbf{B}^ϕ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^{\phi\phi} &= (1 - \Theta) \int_0^{\xi_b} \int_{\eta_l}^{\eta_u} (\bar{\mathbf{h}}^\phi)^T \cdot \bar{\mathbf{h}}^\phi d\eta d\xi + \Theta \int_{\xi_b}^1 \int_{\eta_l}^{\eta_u} (\bar{\mathbf{h}}^\phi)^T \cdot \bar{\mathbf{h}}^\phi d\eta d\xi \\ \mathbf{B}^\phi &= (1 - \Theta) \int_0^{\xi_b} \int_{\eta_l}^{\eta_u} (\bar{\mathbf{h}}^\phi)^T \cdot (\bar{\mathbf{S}}_0(\phi_k^S) - \bar{\mathbf{S}}_T) d\eta d\xi + \Theta \int_{\xi_b}^1 \int_{\eta_l}^{\eta_u} (\bar{\mathbf{h}}^\phi)^T \cdot (\bar{\mathbf{S}}_0(\phi_k^S) - \bar{\mathbf{S}}_T) d\eta d\xi \end{aligned} \quad (3.14)$$

$\bar{\mathbf{h}}^\phi$ 는 대각행렬이기 때문에 식(3.13)은 전단저항계수에 대한 3개의 비연관 비선형 방정식으로 나타난다. 이러한 과정을 통해 계산한 하중-저항계수를 Sequential 하중-저항계수라 칭하며, 아래의 표3.2에 정리하였다.

표3.1과 표3.2를 비교하였을 때, 힘에 대하여 제 2영역의 하중계수는 정확히 일치하며 제 1영역의 하중계수는 큰 차이를 나타내지 않는 것을 확인할 수 있다. Sequential 하중-저항계수의 전단 저항계수는 Reference 하중-저항계수에서 공장제작부재의 제 2영역의 전단저항계수와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 Sequential 최적화 시 전단의 저항계수의 계산에서 제 2영역에서 대한 가중치를 높게 주었기 때문이다.

표3.2 Sequential 하중-저항계수

하중 효과	고정하중비	저항계수			하중계수			
		ϕ^{RC}	ϕ^{ST}	ϕ^{PC}	γ_{DC}		γ_{DW}	γ_{LL}
					FM	CIP		
휨	$0.00 \leq \xi \leq 0.63$	0.900	0.970	0.919	1.058	1.093	1.085	1.802
	$0.63 \leq \xi \leq 1.00$				1.280	1.341	1.408	1.378
전단	$0.00 \leq \xi \leq 0.63$	0.908	0.944	0.912	1.058	1.093	1.085	1.802
	$0.63 \leq \xi \leq 1.00$				1.280	1.341	1.408	1.378

현장제작부재의 경우에는 DC하중계수를 제외한 나머지 하중-저항계수를 공장제작부재에 대하여 계산된 결과로 고정한 뒤 DC하중계수에 대해서만 최적화 계산을 수행하였다.

그림3.6(a)와 그림3.6(b)에는 휨과 전단에 대하여 $\eta=0.8$ 의 Sequential 하중-저항계수의 요구공칭강도와 목표강도를 도시하였다. 아래의 그림 3.7(a)와 그림3.7(b)에는 Reference 하중-저항계수의 경우와 마찬가지로 Sequential 하중-저항계수의 요구공칭강도가 확보하는 평균신뢰도지수를 도시하였으며, 그림3.8(a)와 그림3.8(b)에는 ST부재의 DC하중비별 신뢰도 지수를 도시하였다.

그림3.4와 3.7을 비교하였을 때, Sequential 하중-저항계수는 Reference 하중-저항계수보다 오차가 더 큰 신뢰도지수를 도출하는 것을 확인할 수 있다. 오차는 제 1영역에서 더욱 두드러지게 나타난다. 이러한 결과가 나타나는 이유는, Sequential 하중-저항계수는 Reference 하중-저항계수와는 달리 절대적인 측면에서 요구공칭강도와 목표강도 간의 오차를 최소화하

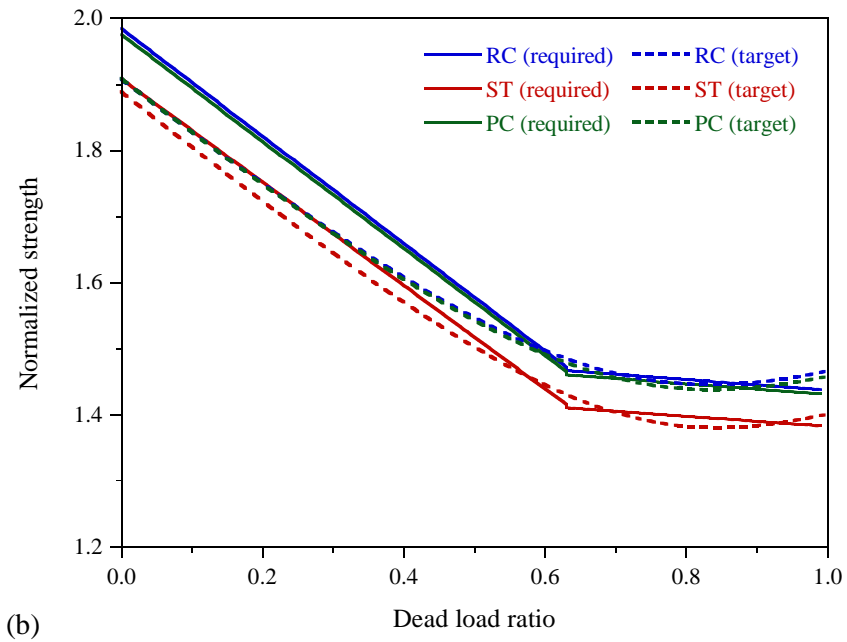
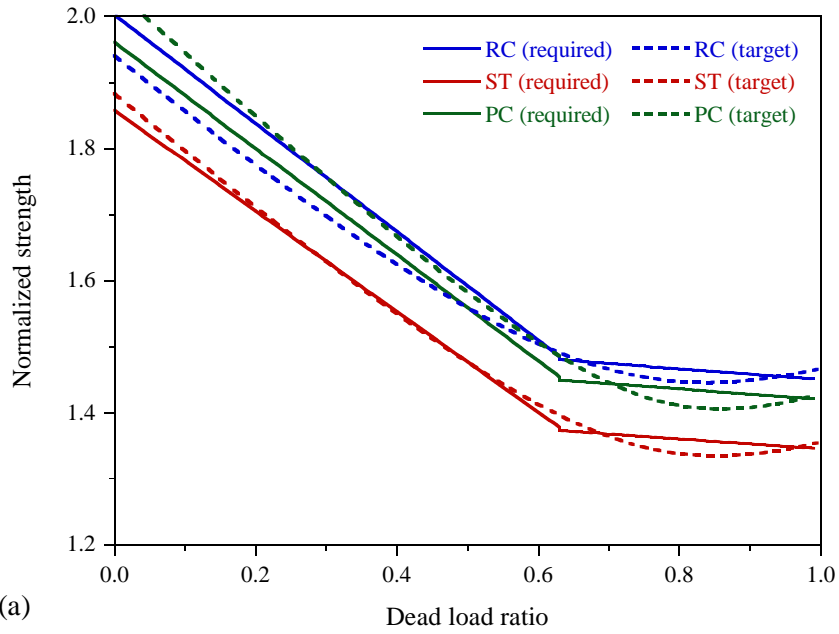


그림3.6 $\eta=0.8$ 일 때의 Sequential 하중-저항계수의 요구공칭강도 및 목표 강도: (a) 휨; (b) 전단

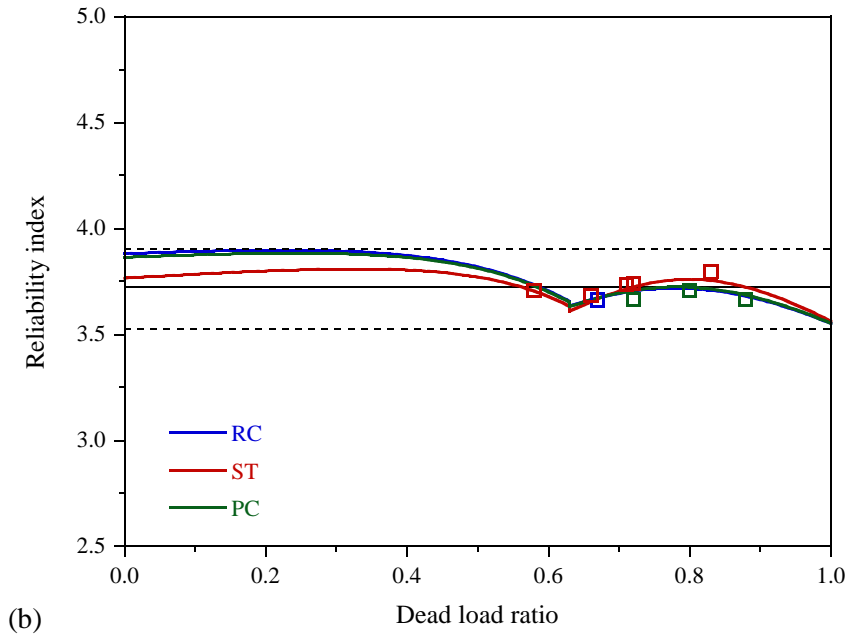
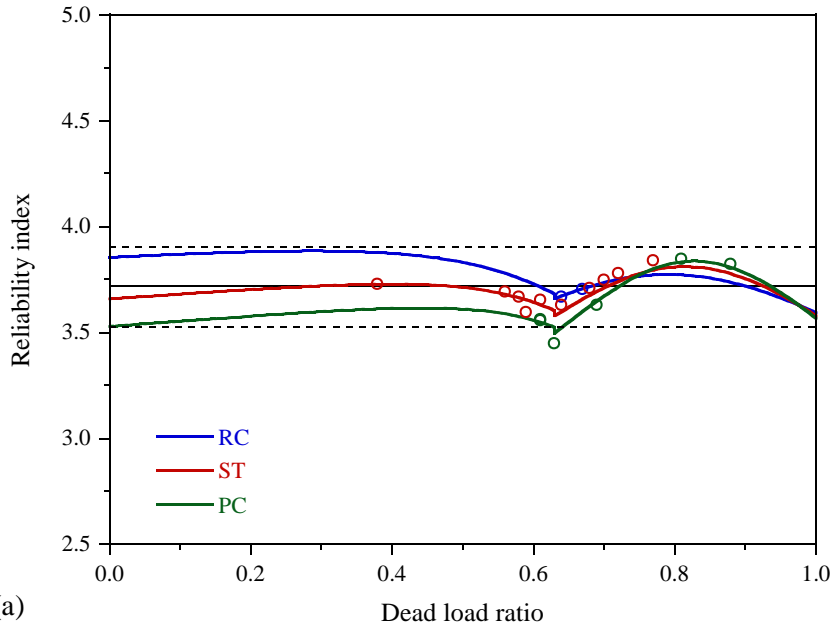


그림3.7 Sequential 하중-저항계수의 요구공칭강도가 확보하는 평균신뢰도 지수: (a) 휨; (b) 전단

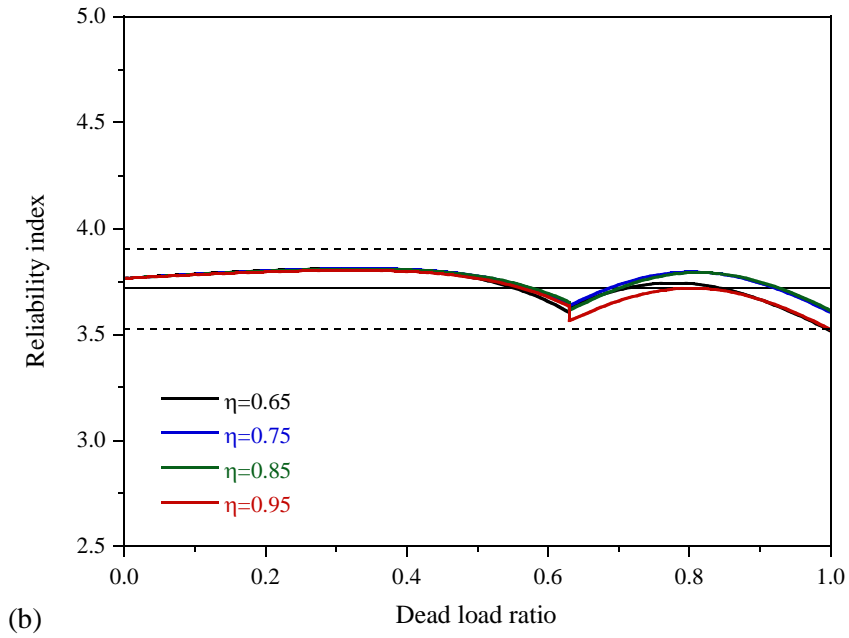
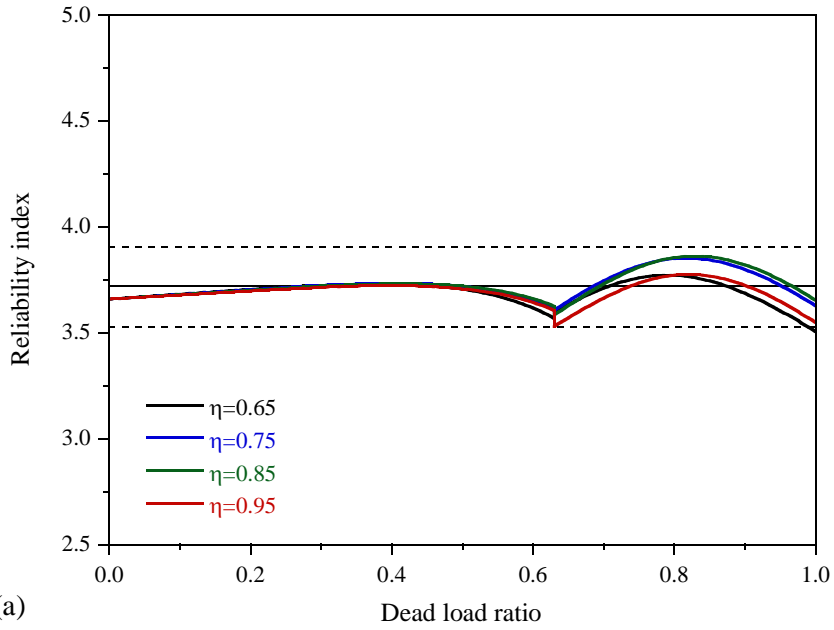


그림3.8 Sequential 하중-저항계수의 요구공칭강도가 확보하는 ST부재의 DC하중비별 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단

는 하중-저항계수가 아니기 때문이다. 그림3.5와 3.8을 비교해봐도 그림 3.8에서 신뢰도지수의 변동성의 크기가 증가한 것을 확인할 수 있다. Reference 하중-저항계수의 결과와 비교하여 Sequential 하중-저항계수의 경우가 신뢰도지수의 오차가 증가한 것은 사실이지만 Sequential 하중-저항계수의 경우에서도 신뢰도지수의 오차율이 대부분 $\pm 5\%$ 의 범주에서 나타나는 것에는 변함이 없다.

그림3.9에는 Sequential 하중-저항계수와 KHBDC LSD(국토교통부, 2016a)의 하중-저항계수의 요구공칭강도가 확보하는 평균신뢰도지수를 도시하였다. 신뢰도지수는 모든 부재와 DC하중비 구간 $0.6 \leq \eta \leq 1.0$ 에 대하여 평균을 낸 값이다. KHBDC LSD의 하중-저항계수는 표3.3에 정리하였다. 그림3.9에 나타난 평균신뢰도지수는, 임의의 재료와 DC하중비를 선택했을 때 해당 기준에서 확보할 것이라 기대할 수 있는 평균적인 신뢰도지수로 이해할 수 있다. 그림3.9에 나타난 두 기준의 신뢰도지수를 비교해보면 KHBDC LSD의 하중-저항계수에 의한 신뢰도지수가 대부분의 고정하중비 영역에 대하여 훨씬 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 표3.2와 표3.3을 비교해보면, 표3.2의 Sequential 하중계수의 양 구간에 대한 값 중에서 큰 값만을 취한 것은 표3.3의 KHBDC LSD 극한한계상태1의 하중계수와 비슷한 수준으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. KHBDC LSD의 하중계수는 고정하중비와는 무관하게 설정되어 있다는 점을 고려할 때, KHBDC LSD의 하중계수는 두 고정하중비 구간에서 큰 하중계수를 택하여 좀 더 보수적인 방향으로 설정되었을 것으로 보인다.

표3.3 KHBDC LSD의 하중-저항계수

하중효과	한계상태	저항계수			하중계수		
		ϕ^{RC*}	ϕ^{ST}	ϕ^{PC*}	γ_{DC}	γ_{DW}	γ_{LL}
휨 및 전단	극한한계상태1	0.90	1.00	0.90	1.25	1.50	1.80
	극한한계상태4				1.50	1.50	-

*: KHBDC LSD의 재료계수에 대한 등가의 저항계수

그림3.9의 고정하중비 0.875에서 KHBDC LSD의 신뢰도지수가 가파르게 떨어진다. 이는 KHBDC LSD의 극한한계상태1과 4의 경계점으로, 극한한계상태4에서 활하중에 의한 효과가 배제되고 DC 하중계수가 증가함에 따라 신뢰도지수의 불연속점이 생겨나게 된다. 반면, Sequential 하중-저항계수는 $\pm 5\%$ 의 오차범위에서 신뢰도지수를 잘 확보하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 신뢰도의 관점에서 봤을 때, 극한한계상태4는 적절히 정의되었다고 볼 수 없다고 판단되며, 극한한계상태4는 극한한계상태1과 다른 독립적인 한계상태로 고려될 필요는 없을 것으로 판단된다.

그림3.10에는 $\xi=0.8$ 과 $\xi=0.4$ 에서의 표준화된 휨강도의 변화에 따른 표준화된 신뢰도지수의 변화를 나타내었다. 신뢰도지수는 목표신뢰도지수에 대하여, 휨강도는 Sequential 하중-저항계수에 의하여 계산되는 요구공칭강도에 대하여 표준화하였다. 그림에 따르면 신뢰도지수의 증가속도는 휨강도의 증가속도보다 빠른 것으로 나타나며, 강도가 약간만 변하더라도 신뢰도지수는 크게 변하는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어 ST부재에서 휨강도가 약 10% 정도 증가하는 것은 $\xi=0.8$ 과 $\xi=0.4$ 에서 신뢰도지수가 25%, 15%가 증가하는 효과를 가져오게 된다.

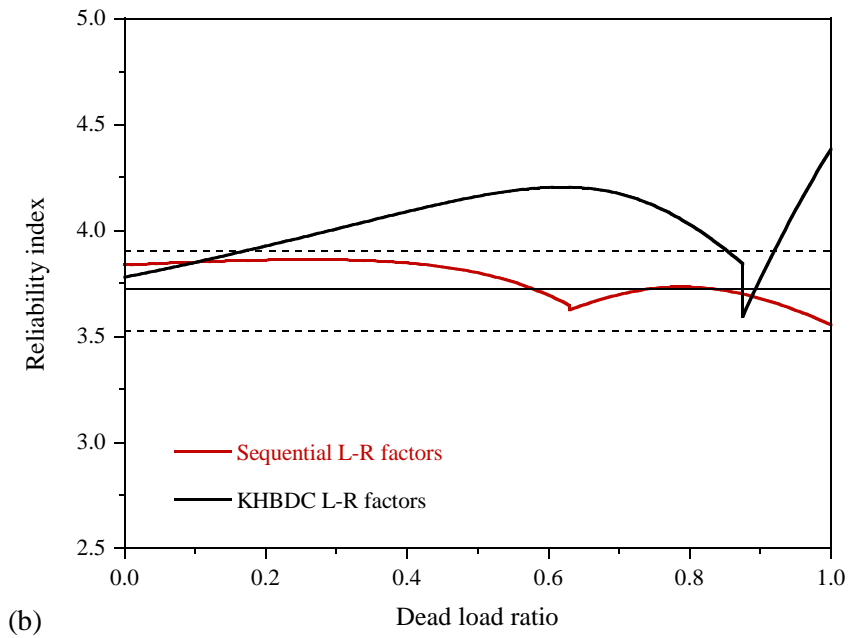
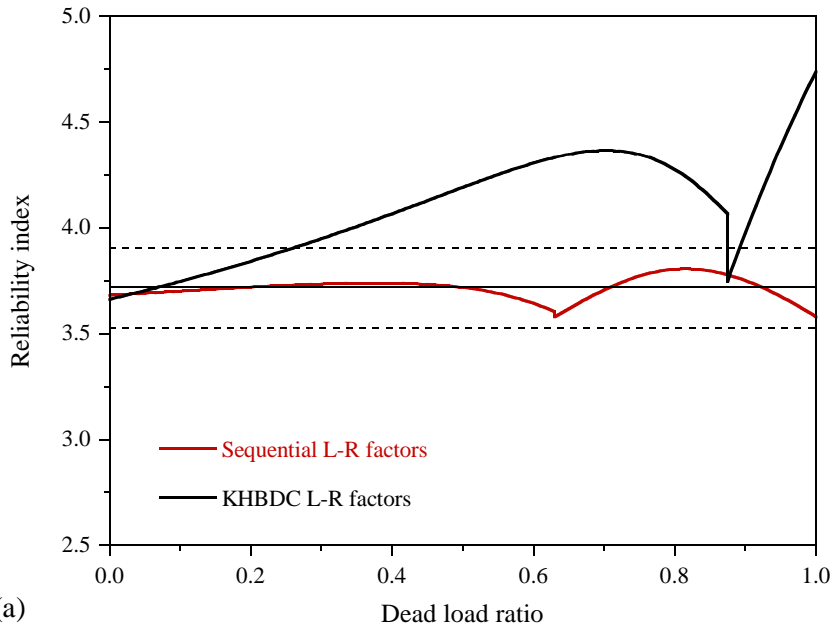


그림3.9 Sequential 및 KHBDC LSD 하중-저항계수의 요구공칭강도가 확보 하는 부재 및 DC하중비 전체에 대한 평균신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단

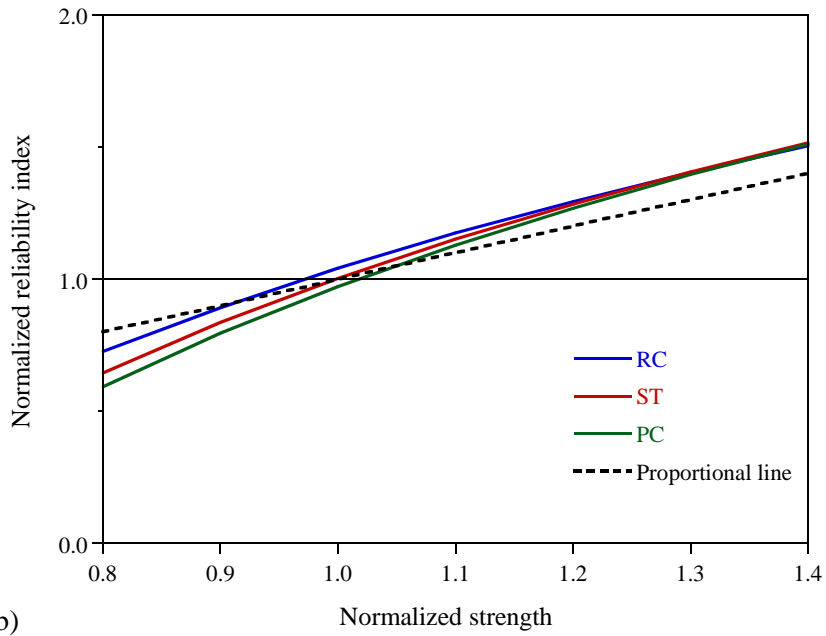
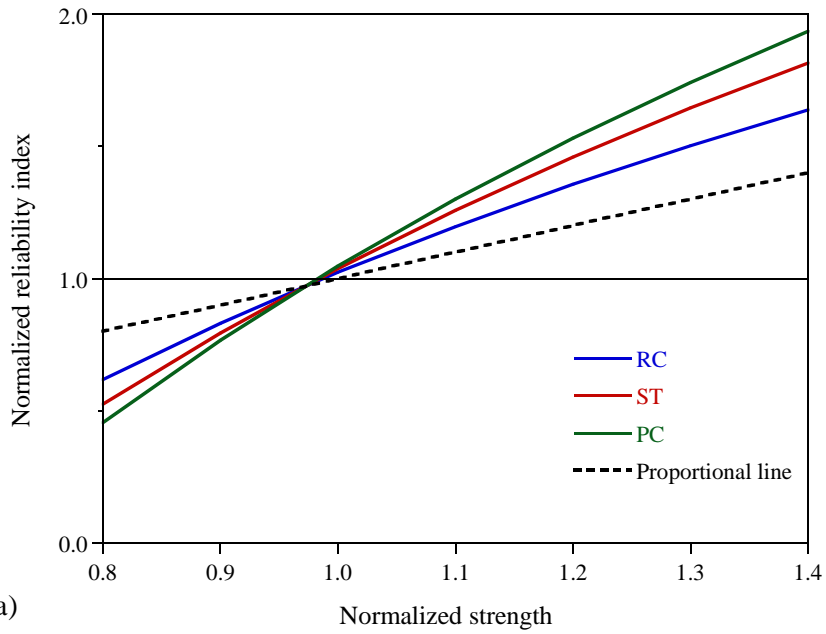


그림3.10 $\eta=0.8$ 인 세 재료의 표준화된 휨강도의 변화에 대한 표준화된 신뢰도지수의 변화: (a) $\xi=0.8$; (b) $\xi=0.4$

3.3. 하중-저항계수의 제안

이 절에서는 2절의 Sequential 최적화 기법을 바탕으로 KHBDC LSD에 적합한 하중-저항계수를 계산하고 제안한다. 기본적인 계산과정은 Sequential 최적화 기법의 과정을 따르되 실무의 적용성을 고려한 몇 가지 조건을 추가한다. 먼저 고정하중비 경계점을 1절에서 계산한 0.63 대신 0.55로 적용한다. 이는 설계실무자들의 의견을 반영한 값으로, 교량의 구조형식별로 고정하중비를 보다 명확히 구분할 수 있도록 제안된 값이다. 이로써 제안 하중-저항계수를 설계실무에 용이하게 적용할 수 있다. 다음으로는 계산된 하중-저항계수를 0.05 단위로 절삭하고 유효숫자를 소수점 2째 자리까지 취한다. 대부분의 설계기준에서는 하중-저항계수의 사용의 편의성을 도모하기 0.05 단위로 절삭된 하중-저항계수를 규정하고 있으며, 이 연구에서도 동일한 방법을 적용한다. 기본적으로는 절삭된 값을 그대로 사용하되, 공학적 판단에 따라 너무 크거나 작다고 판단되는 하중-저항계수에 대해서는 추가적인 조정을 수행한다. 이러한 과정을 통해 하중-저항계수를 제안하고 아래의 표3.4에 정리하였다.

표3.4 제안 하중-저항계수

하중효과	고정하중비	저항계수			하중계수		
		ϕ^{RC}	ϕ^{ST}	ϕ^{PC}	$\frac{\gamma_{DC}}{\text{FM}}$	γ_{DW}	γ_{LL}
휨 및 전단	$0.00 \leq \xi \leq 0.55$	0.90	0.95	0.90	1.05	1.05	1.80
	$0.55 \leq \xi \leq 1.00$				1.25	1.30	1.40

아래의 그림3.11에는 휨과 전단에 대하여 표3.4의 제안 하중-저항계수의 요구공칭강도와 목표강도를 도시하였다. DC하중비는 0.8에 대하여 도시하였으며, 세 재료에 대하여 나타내었다. 또한 아래의 그림3.12에는 제안 하중-저항계수의 요구공칭강도가 확보하는 평균신뢰도지수를 도시하였으며, 그림3.13에는 ST부재의 DC하중비별 신뢰도지수를 도시하였다.

제안 하중-저항계수의 경우, RC와 PC부재의 하중-저항계수가 일치하기 때문에 그림3.11에서 요구공칭강도가 일치하여 나타난다. RC와 PC부재의 요구공칭강도가 겹쳐 그려지는 것은 RC부재의 요구공칭강도를 \times 도형으로 표시하여 구분하였다.

그림3.7과 3.12를 보았을 때, 제안 하중-저항계수는 Sequential 하중-저항계수의 경우보다 신뢰도지수의 최대오차가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Sequential 하중-저항계수의 경우에는 모든 고정하중비 영역에서 목표신뢰도지수에 대한 평균신뢰도지수의 오차가 $\pm 5\%$ 안으로 나타나지만, 제안 하중-저항계수는 고정하중비가 높은 일부 영역에서 오차가 $\pm 5\%$ 를 넘어서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과가 나타나는 이유는, 제안 하중-저항계수의 경우에는 0.05 단위로 절삭하였기 때문에 요구공칭강도가 목표강도로부터 더 많은 차이를 나타내게 되고, 따라서 신뢰도지수의 오차가 크게 나타나기 때문이다.

아래의 그림3.13에는 DC하중비에 따른 ST부재의 신뢰도지수의 변화를 도시하였다. 그림3.8과 비교하였을 때, 신뢰도지수의 변동성이 증가한 것을 확인할 수 있다. 전단의 경우에는 고정하중비가 0.9 이상인 영

역에서 평균신뢰도지수가 목표신뢰도지수에 대하여 -5% 이하로 떨어지는 것도 확인할 수 있다. 하지만 실제 교량의 단면에 대하여 고정하중비가 0.9 이상으로 나타나는 경우는 드물기 때문에 이는 크게 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 대부분의 영역에 대해서는 신뢰도지수의 오차율이 대부분 $\pm 5\%$ 의 범주에서 나타나는 것에 변함이 없다.

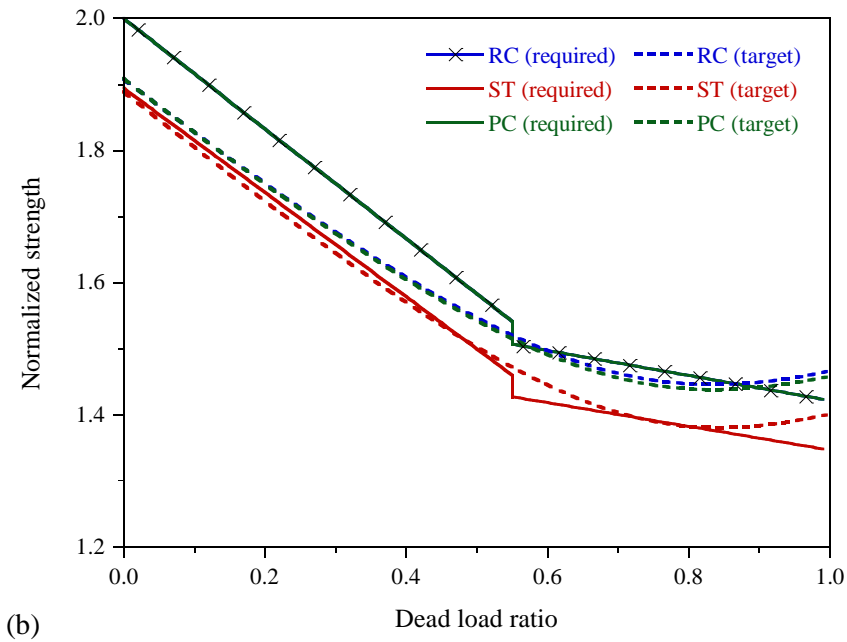
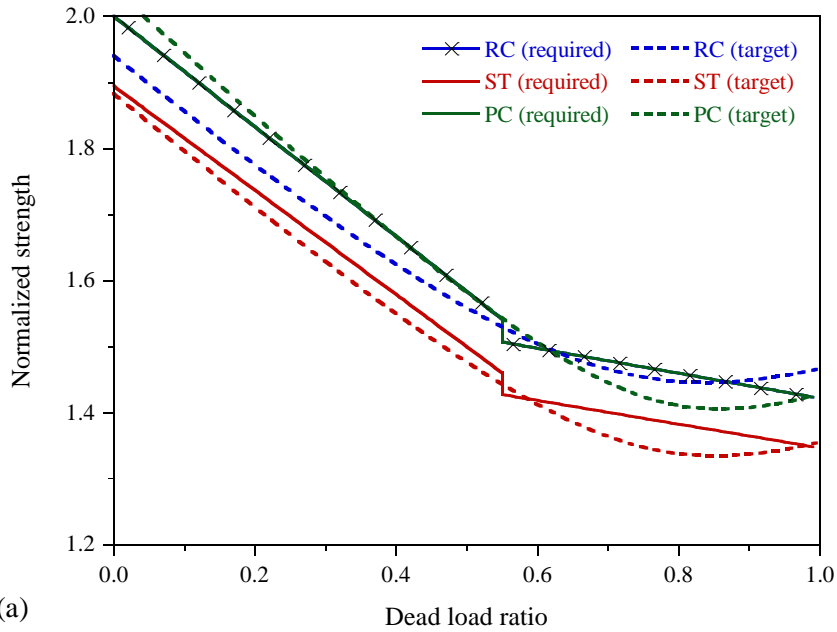


그림3.11 $\eta=0.8$ 일 때의 제안 하중-저항계수에 의한 요구공칭강도 및 목표강도: (a) 휨; (b) 전단

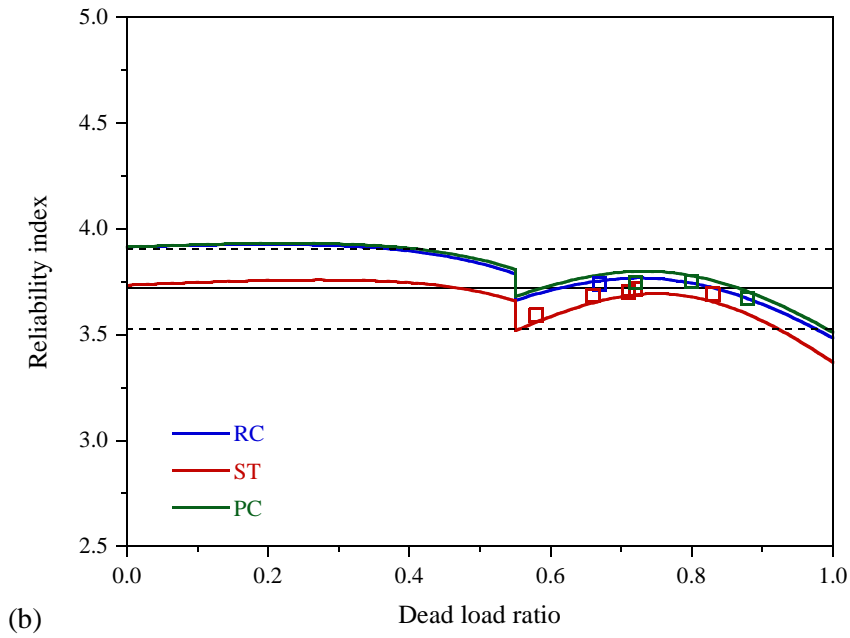
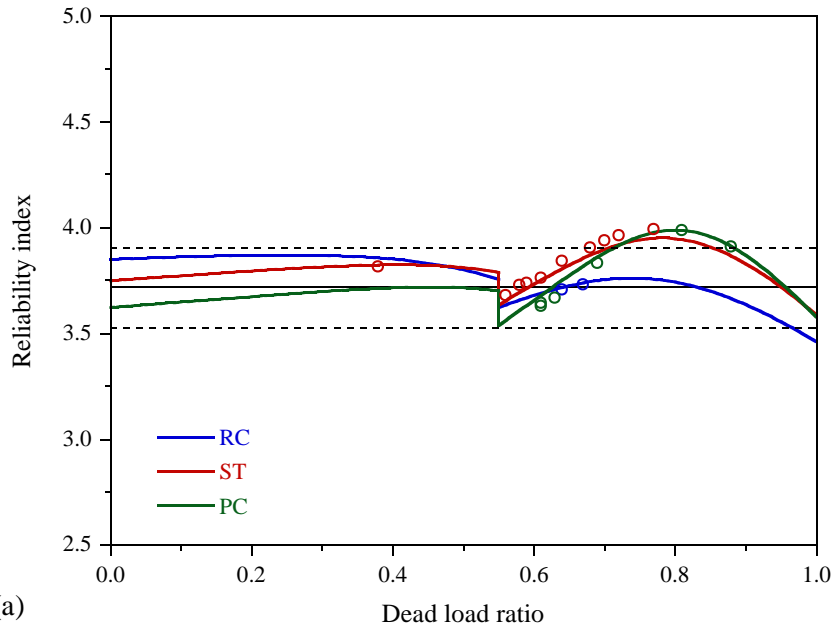


그림3.12 제안 하중-저항계수에 의하여 확보되는 평균신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단

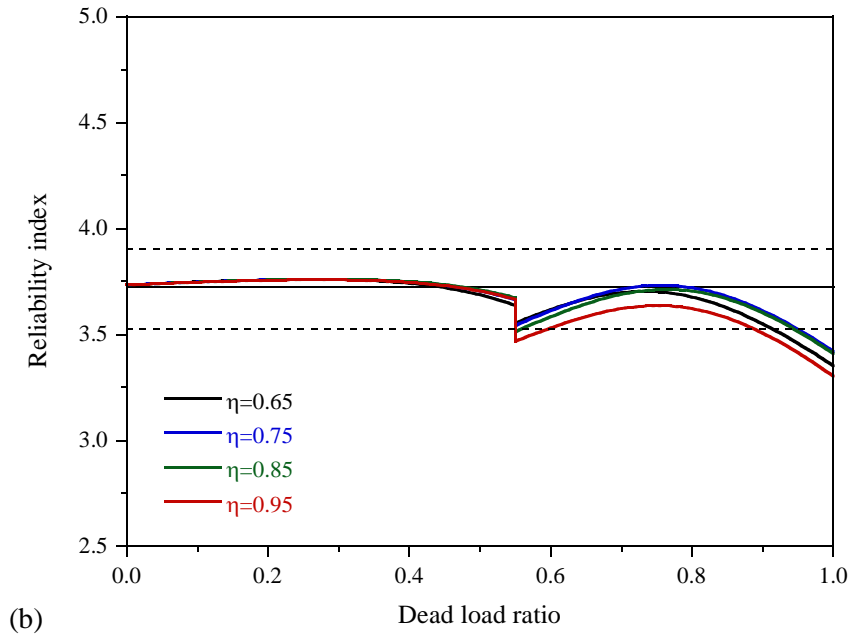
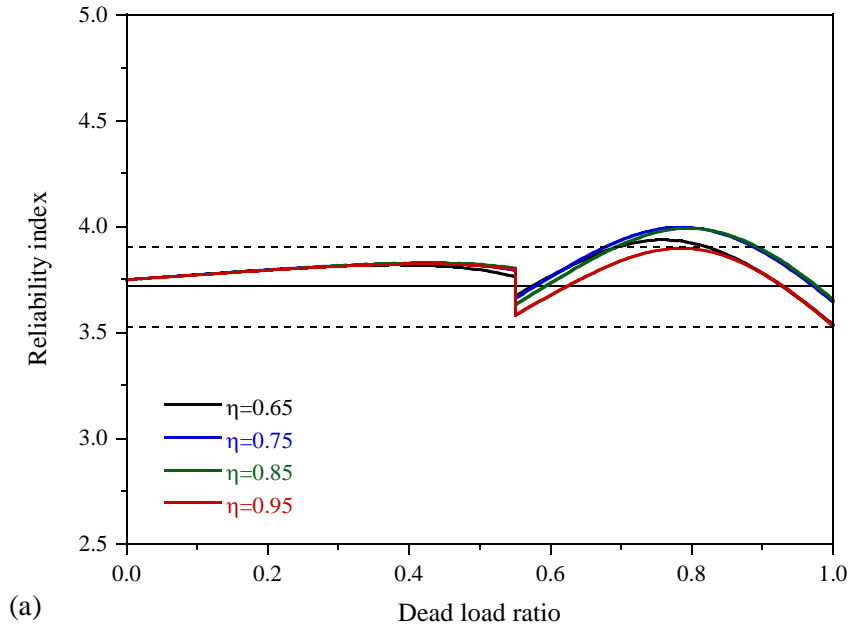


그림3.13 제안 하중-저항계수에 의하여 확보되는 ST부재의 DC하중비별 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 전단

3.4. 3차식을 이용한 목표강도의 근사

이 절에서는 기존의 하중-저항계수를 통해 요구공칭강도를 1차식으로 근사했던 방법과는 다르게, 요구공칭강도를 3차식으로 표현하여 목표강도를 근사한다. 요구공칭강도를 고정하중비 방향으로는 3차식으로 가정하고 DC하중비 방향으로는 2차식으로 가정을 하면 아래의 식(3.15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{S}_0 = (a_0 + a_1\xi + a_2\xi^2 + a_3\xi^3)(b_0 + b_1\eta + \eta^2) = f(\xi)g(\eta) \quad (3.15)$$

여기서 a_i 와 b_i 는 각각 고정하중비의 3차식과 DC하중비의 2차식의 계수이다. 최적의 다항계수는 아래의 최적화 문제로 구할 수 있다.

$$\text{Min}_{\mathbf{x}^{3rd}} \Pi = \frac{(1-\Theta)}{2} \int_0^{\xi_b} \int_{\eta_l}^{\eta_u} \|\bar{S}_0 - \bar{S}_T\|_2^2 d\eta d\xi + \frac{\Theta}{2} \int_{\xi_b}^1 \int_{\eta_l}^{\eta_u} \|\bar{S}_0 - \bar{S}_T\|_2^2 d\eta d\xi \quad (3.16)$$

고정하중비 영역의 경계점 ξ_b 는 0.63으로 설정하였으며, 가중치 Θ 는 0.9로 적용하였다. DC하중비의 상한과 하한은 1.0과 0.6으로 하였다. 미지수 벡터 \mathbf{x}^{3rd} 는 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{x}^{3rd} = (a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1) = (\mathbf{a}, \mathbf{b})^T \quad (3.17)$$

식(3.16)의 최적화 문제는 식(3.18)의 1차 필요조건식을 통해 풀 수 있다.

$$\delta_{\mathbf{x}^{3rd}} \Pi = (1 - \Theta) \int_0^{\xi_b} \int_{\eta_l}^{\eta_u} \delta_{\mathbf{x}^{3rd}} \bar{S}_0^T \cdot (\bar{S}_0 - \bar{S}_T) d\eta d\xi + \Theta \int_{\xi_l}^1 \int_{\eta_l}^{\eta_u} \delta_{\mathbf{x}^{3rd}} \bar{S}_0^T \cdot (\bar{S}_0 - \bar{S}_T) d\eta d\xi \quad (3.18)$$

전과 같이 반복계산을 통해 문제를 풀기 위하여 요구공칭강도를 테일러 전개를 통해 1차 근사를 한다.

$$\begin{aligned} \bar{S}_0(\mathbf{x}_{k+1}^{3rd}) &\approx \bar{S}_0(\mathbf{x}_k^{3rd}) + \frac{\partial \bar{S}_0}{\partial \mathbf{a}} \Delta \mathbf{a} + \frac{\partial \bar{S}_0}{\partial \mathbf{b}} \Delta \mathbf{b} \\ &= \bar{S}_0(\mathbf{x}_k^{3rd}) + \bar{\mathbf{h}}^a \Delta \mathbf{a} + \bar{\mathbf{h}}^b \Delta \mathbf{b} \\ &= \bar{S}_0(\mathbf{x}_k^{3rd}) + \bar{\mathbf{h}} \Delta \mathbf{x}^{3rd} \\ \delta_{\mathbf{x}^{3rd}} \bar{S}_0 &= \frac{\partial \bar{S}_0}{\partial \mathbf{a}} \delta \mathbf{a} + \frac{\partial \bar{S}_0}{\partial \mathbf{b}} \delta \mathbf{b} \\ &= \bar{\mathbf{h}}^a \delta \mathbf{a} + \bar{\mathbf{h}}^b \delta \mathbf{b} \\ &= \bar{\mathbf{h}} \delta \mathbf{x}^{3rd} \end{aligned} \quad (3.19)$$

이 때, $\bar{\mathbf{h}}^a, \bar{\mathbf{h}}^b$ 는 다음과 같다.

$$\bar{\mathbf{h}}^a = g(\eta) [1 \quad \xi \quad \xi^2 \quad \xi^3], \quad \bar{\mathbf{h}}^b = f(\xi) [1 \quad \eta] \quad (3.20)$$

이후로는 공칭강도 기반 최적화 기법의 경우와 마찬가지로, 식(3.19)의 1차 근사항들을 식(3.18)에 대입하여 증분형 방정식을 유도하고 이를 반복적으로 풀으로써 최적해를 계산한다. 각 재료별 힘강도에 대한 최적해의 계산결과는 아래의 표3.5에 정리하였다. 표3.5에 정리된 다항식 계수를 적용하여 신뢰도해석을 수행한 결과는 그림3.14에 나타내었다.

목표강도는 직선이 아닌 곡선의 형태로 나타난다. 따라서 요구공칭강도 역시 3차식을 도입하여 곡선으로 근사를 하면 목표강도를 더욱 정교하게 근사할 수 있다. 이는 그림3.14의 신뢰도지수를 통해 확인할 수

표3.5 휨강도의 최적 다항식계수 계산결과

재료	a_0	a_1	a_2	a_3	b_0	b_1
RC	0.644	-0.272	-0.041	0.162	3.765	-1.754
ST	0.716	-0.295	-0.150	0.253	3.381	-1.764
PC	0.836	-0.330	-0.258	0.348	3.194	-1.770

있다. 3차식으로 표현된 요구공칭강도가 목표강도를 잘 근사하게 됨에 따라, 그림3.14(a)의 모든 재료에서 평균신뢰도지수가 목표신뢰도지수를 매우 정확하게 맞추고 있는 것을 확인할 수 있다. 그림3.14(b)의 ST부재의 DC하중비별 신뢰도지수를 확인해보아도 전 구간에서 오차율 $\pm 5\%$ 를 넘지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서 오차 최소화의 관점에서는 요구공칭강도를 1차식으로 근사하는 것보다 3차식으로 근사하는 것이 훨씬 만족스러운 결과를 가져올 수 있다. 물론 하중-저항계수와는 다르게 다항식 계수는 안전계수로서의 의미가 모호하기 때문에 아직 이를 실무에 적용하기에는 무리가 있다. 하지만 기존의 하중-저항계수를 사용하는 관습에서 벗어나, 신뢰도의 측면에서 더욱 진보된 방법을 제시하고 그 결과가 매우 우수하게 나타난다는 사실을 확인했음에 의의가 있다고 볼 수 있다.

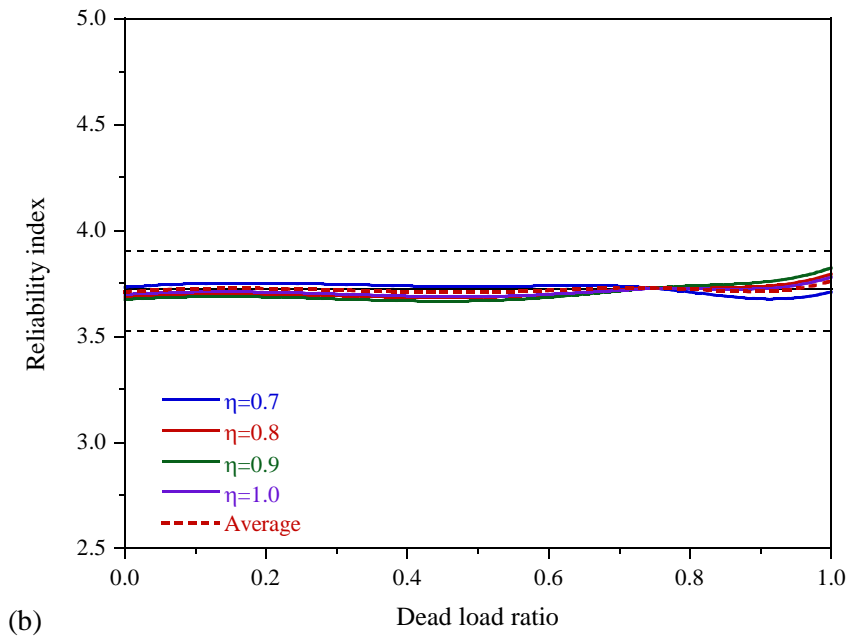
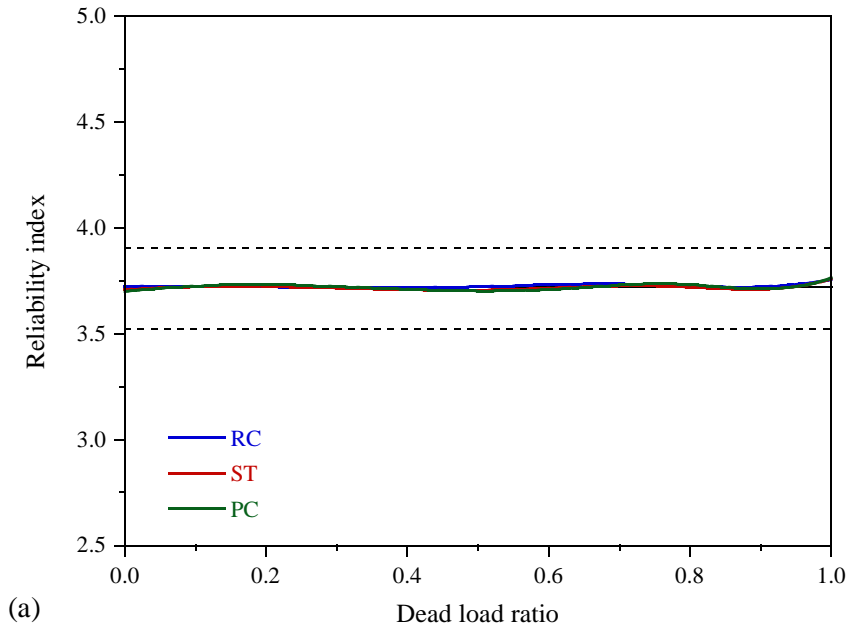


그림3.14 표3.5의 계수를 적용하여 3차식으로 근사한 요구공칭강도가 확보하는 신뢰도지수: (a) 재료별 평균신뢰도지수; (b) ST부재 DC하중비별 신뢰도지수

4. RC부재의 재료계수의 결정

현재 KHBDC LSD(국토교통부, 2016a)의 재료계수는 김재홍과 이재훈(2000)의 연구를 근거로 채택되었다고 알려져 있다(이재훈, 2015). 김재홍과 이재훈(2000)의 연구에 따르면, 이 재료계수는 강도설계법에 기반한 콘크리트구조 설계기준(한국콘크리트학회·대한건축학회, 1999)에 정의된 저항계수를 근사하도록 결정되었다. 하지만 강도설계법은 신뢰도의 개념이 도입되어 있지 않은 설계법이며, 따라서 강도설계법의 저항계수를 근사한 재료계수를 한계상태설계법에 그대로 도입하는 것은 무리가 있는 것으로 판단된다..

이 장에서는 현재 KHBDC LSD에서 RC부재의 설계에 적용하고 있는 재료계수의 문제점을 지적하고, 잘 정립된 최적화 과정으로 새로운 재료계수를 계산하고 제안한다. 현재 KHBDC LSD에 정의된 하중-재료계수를 이용하여 RC부재에 대한 신뢰도해석을 수행하며, 극한한계상태1과 4에서 확보되는 신뢰도지수가 목표신뢰도지수 3.72를 상회하고 있음을 보인다. 이를 해결하기 위해 3장에서 서술한 공칭강도 최적화 기반 하중-저항계수 결정법을 이용하여 하중-저항계수를 조정하고, 최적화 기반 재료계수 결정법을 도입하여 적절한 재료계수를 계산한다. 또한 계산된 하중-재료계수가 목표신뢰도지수 3.72를 잘 확보하는 것을 보인다.

한편, 유로코드(CEN, 2002)에서는 신뢰도 기반 안전계수의 기본 개념에 맞추어 재료계수를 정의하고 있다. 하지만 유로코드 재료계수의 산

출과정에서 몇 가지 문제점을 발견하였고, 이에 대한 해결책을 제시한다. 이 장에서는 유로코드 기반 접근법의 문제점을 해결하기 위해 역신뢰도 해석으로 한계상태식의 파괴점에서의 철근 및 콘크리트의 저항방향 단위 법선벡터 성분을 계산하고, 대표값을 취하여 재료계수를 계산한다. 이러한 방법으로 결정된 재료계수에 대하여 공칭강도 최적화 기반 하중-저항 계수 결정법으로 적절한 하중계수를 계산하고 제시한다. 이와 같은 과정을 통하여 재료계수 자체는 신뢰도의 기본 이론에 입각하여 산정을 하였지만, 하중효과와 재료강도 간의 상대적인 영향을 고려하지 못했기 때문에 계산된 하중-재료계수가 목표신뢰도지수를 잘 확보하지 못하는 것을 보인다. 더불어, 콘크리트부재에 대하여 위 과정으로 계산된 재료계수를 적용하여 신뢰도해석을 수행하고 그 결과가 목표신뢰도지수를 잘 만족시키지 못하는 것을 확인한다. 그 이유로는 재료계수 산정 시 고려되지 못한 부재 자체의 불확실성을 지적한다.

4.1. KHBDC LSD의 재료계수

직사각형 단철근보의 공칭휨강도 및 순수 압축력을 받는 RC단주의 공칭압축강도는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 M_0 &= \rho_{fl} f_y b d^2 (1 - a \rho_{fl} \frac{f_y}{f_{ck}}) \\
 P_0 &= A_g (0.85 f_{ck} (1 - \rho_{cp}) + f_s \rho_{cp})
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

여기서 M_0 은 공칭휨강도, P_0 은 공칭압축강도를 의미한다. f_{ck} 는 콘크

리트의 압축강도, f_s 는 철근의 응력, f_y 는 철근의 항복응력을 지칭한다. ρ 는 철근비를 지칭하며 아래첨자 fl 및 cp 는 각각 휨 및 압축부재에 해당하는 값을 지칭하기 위하여 사용한다. 일반적으로 휨부재의 철근비는 $\rho_{fl} = A_s / bd$ 로 계산하며 압축부재의 철근비는 $\rho_{cp} = A_s / A_g$ 로 계산한다. 여기서 A_s 는 철근의 단면적, A_g 는 부재의 전단면적, b 는 휨단면의 폭, d 는 휨단면의 유효깊이를 의미한다. a 는 콘크리트의 응력분포에 따라 결정되는 값으로, 강도설계법의 등가직사각형응력분포를 적용할 경우에는 1/1.7이며 한계상태설계법의 콘크리트 응력-변형도 곡선을 사용하였을 때에는 $a = \chi / (0.85\alpha)$ 이다. 여기서 α 는 콘크리트 압축 합력 크기의 계수이며 χ 는 콘크리트 압축 합력 작용점 위치의 계수이다. 일반적으로 χ 는 RC 분야에서 β 로 정의하는 변수이지만 이 연구에서는 신뢰도지수를 지칭할 때 사용하는 β 와 구분하기 위하여 χ 로 표시한다.

저항계수는 재료의 공칭강도와 실제강도 간 차이, 부재의 제작 오차, 그리고 구조 해석의 불확실성을 고려한 안전계수이다. 저항계수를 사용할 경우, 부재의 설계강도는 저항계수를 공칭강도에 곱한 것으로 정의된다. 반면 재료계수는 재료강도의 불확실성만을 고려한 안전계수이다. 재료계수를 적용한 경우의 부재의 설계강도는 재료의 공칭강도에 재료계수를 곱하여 계산되는 부재강도로 정의된다. 재료계수에 의해 결정되는 설계강도와 공칭강도의 비를 등가저항계수로 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\psi_{fl}(\theta_s, \theta_c) &= \theta_s \frac{1 - a\tilde{\rho}_{fl}(\theta_s / \theta_c)}{1 - a\bar{\rho}_{fl}} \\ \psi_{cp}(\theta_s, \theta_c) &= \theta_c \frac{0.85(1 - \rho_{cp}) + \tilde{\rho}_{cp}(\theta_s / \theta_c)}{0.85(1 - \rho_{cp}) + \tilde{\rho}_{cp}} \approx \theta_c \frac{0.85 + \tilde{\rho}_{cp}(\theta_s / \theta_c)}{0.85 + \tilde{\rho}_{cp}}\end{aligned}\quad (4.2)$$

여기서 ψ 는 등가저항계수며 θ 는 재료계수이다. 아래첨자 c 와 s 는 콘크리트와 철근을 지칭하기 위하여 사용된다. $\tilde{\rho}$ 는 강도철근비로 정의하며 휨부재의 강도철근비는 $\tilde{\rho}_{fl} = \rho_{fl} f_y / f_{ck}$, 압축부재의 강도철근비는 $\tilde{\rho}_{cp} = \rho_{cp} f_s / f_{ck}$ 로 정의한다.

김재홍과 이재훈(2000)의 연구에서는 아래의 식(4.3)과 같은 목적함수를 이용한 최적화 문제를 풀으로써, 기존 강도설계법의 저항계수를 잘 근사하는 재료계수를 계산하였다. 이 목적함수는 기존 강도설계법의 저항계수와 등가저항계수의 오차를 나타내는 식으로, 휨과 압축부재에 대하여 개별적으로 정의되었다.

$$\Phi_{fl}(\theta_s, \theta_c) = \phi_{fl} - \psi_{fl}, \quad \Phi_{cp}(\theta_s, \theta_c) = \phi_{cp} - \psi_{cp}\quad (4.3)$$

여기서 Φ 는 최적화의 목적함수이다. 김재홍과 이재훈(2000)의 연구에서는 210개의 휨부재 단면과 56개의 압축부재 단면에 대하여 콘크리트구조설계기준(한국콘크리트학회·대한건축학회, 1999)에서 정의된 RC부재의 휨 및 압축저항계수 $\phi_{fl} = 0.85$, $\phi_{cp} = 0.70$ 를 적용하고 휨과 압축에 대하여 개별적인 최적화를 수행하였다. 그 결과 철근 및 콘크리트의 재료계수를 각각 0.90, 0.65로 제안하였으며, 이렇게 계산된 재료계수가 현재의

KHBDC LSD에 도입되었다고 알려져 있다(이재훈, 2015). 김재홍과 이재훈(2000)이 제안한 재료계수에 상응하는 등가저항계수를 식(4.2)로 계산하고 그림4.1에 그 결과를 도시하였다. 또한 대표적인 강도철근비 0.1, 0.2 그리고 0.3에 대하여 등가저항계수를 계산하고 표4.1에 정리하였다.

김재홍과 이재훈(2000)은 식(4.3)에 나타난 각 목적함수를 독립적으로 최적화하여 각 재료계수를 계산하였다고 밝히고 있다. 그러나 철근 항복응력과 콘크리트 압축강도 및 철근비가 정해진 경우에 대하여 식(4.3)에 의하여 정의되는 각 목적함수는 독립적으로 최적화할 수 없다. 그 이유는 각 부재에 대한 목적함수가 2개의 미지수를 포함하고 있으나 조건식이 하나뿐이기에 부정방정식이 유도되기 때문이다. 만일 여러 물성치의 단면을 함께 고려하여 최적화를 수행한다고 하더라도, 휨과 압축에

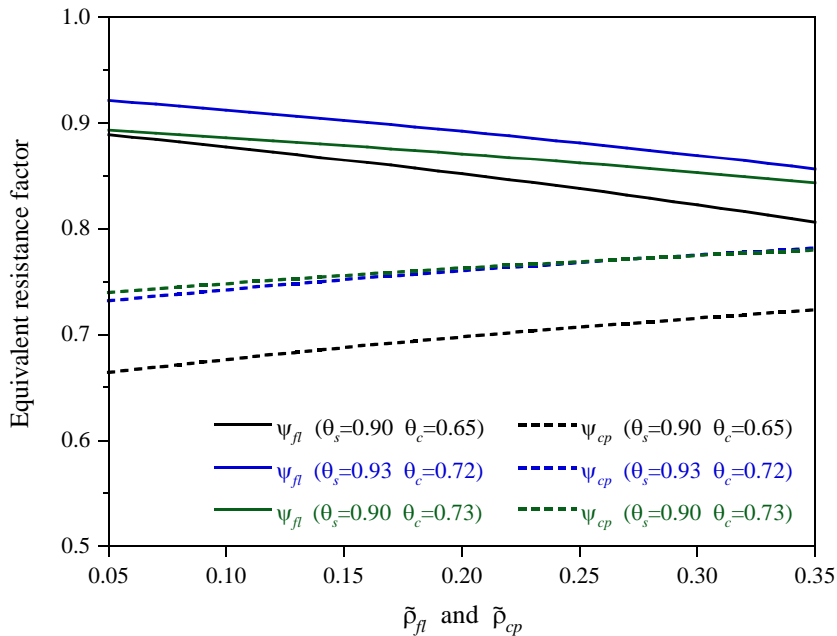


그림4.1 휨부재와 압축부재의 강도철근비의 변화에 따른 등가저항계수의 변화

표4.1 재료계수 및 강도철근비에 따른 등가저항계수

산출법	근거	재료계수		강도철근비	등가저항계수	
		θ_s	θ_c	$\tilde{\rho}_{fl}, \tilde{\rho}_{cp}$	Ψ_{fl}	Ψ_{cp}
최적화 기반	김재홍과 이재훈 (2000)			0.1	0.88	0.68
		0.90	0.65	0.2	0.85	0.70
				0.3	0.82	0.72
	현재 연구			0.1	0.91	0.74
		0.93	0.72	0.2	0.89	0.76
				0.3	0.87	0.77
신뢰도 기반	현재 연구			0.1	0.89	0.75
		0.90	0.73	0.2	0.87	0.76
				0.3	0.85	0.77

대하여 독립적으로 최적화를 수행한다면 힘과 압축에 대한 절대 최적해가 $\theta_c = \theta_s = 0.85$ 과 $\theta_c = \theta_s = 0.70$ 이 되며, 이 때 각 목적함수는 0으로 나타나게 된다. 따라서 수학적으로 김재홍과 이재훈(2000)이 제시한 재료계수는 유도될 수가 없다.

표4.2에는 국내의 대표적인 설계기준에서 나타난 하중-저항/재료계수를 정리하였으며, 비교를 위하여 Reference 최적화에 의해 계산된 최적 하중-저항계수를 같이 나타내었다. 표4.2에서 USD와 LSD는 각각 도로교설계기준(KHBDC USD; 건설교통부, 2005)과 KHBDC LSD를 의미한다. 김재홍과 이재훈(2000)은 강도설계법으로 콘크리트구조 설계기준(한국콘크리트학회·대한건축학회, 1999)을 인용하였으나, 이 연구에서는 동일한 저항계수를 사용하고 있는 KHBDC USD를 인용한다. KHBDC LSD에서

표4.2 현재 연구에 사용된 하중-저항/재료계수

출처	한계상태/ 고정하중비	하중계수			저항계수		재료계수	
		γ_{DC}	γ_{DW}	γ_{LL}	ϕ_{fl}	ϕ_{cp}	θ_s	θ_c
USD	-	1.300	1.300	2.150	0.85	0.70	-	-
LSD	극한한계상태1	1.250	1.500	1.800	-	-	0.90	0.65
	극한한계상태4	1.500	1.500	-	-	-	-	-
조정된 LSD	극한한계상태1	1.162	1.395	1.674	0.90	0.75	-	-
	극한한계상태4	1.395	1.395	-	-	-	-	-
Reference	$0.63 \leq \xi \leq 1.00$	1.280	1.408	1.378	0.90	0.75	-	-

는 중력방향 하중조합으로 극한한계상태1과 극한한계상태4를 정의한다. 각 극한한계상태는 대략적으로 고정하중비 0.875 이하와 이상에서 부재의 설계를 지배하게 된다. 그러나 3장의 연구에서 극한한계상태4는 필요없으며 고정하중비 0.63~1.00 사이에서는 단일 한계상태로 정의하여도 충분하다는 것을 보였고, 이 때의 하중계수를 표4.2 정리하였다.

설계기준에서 확보하는 신뢰도수준은 저항계수와 하중계수의 영향을 동시에 받는다. 따라서 김재홍과 이재훈(2000)의 연구에서 제시한 재료계수는 콘크리트구조 설계기준(한국콘크리트학회·대한건축학회, 1999)의 하중계수와 함께 사용할 때만 적합한 결과를 기대할 수 있으며, 다른 하중계수를 사용하는 설계기준에는 적용할 수 없다. $\eta=0.8$ 에 대하여 표 4.2에 주어진 하중계수에 의한 총 계수하중효과를 계산하고, 고정하중비에 따른 총 계수하중효과의 변화를 그림4.2에 도시하였다. 그림4.2에서 확인할 수 있는 바와 같이 총 계수하중효과는 설계기준에 따라 확연히

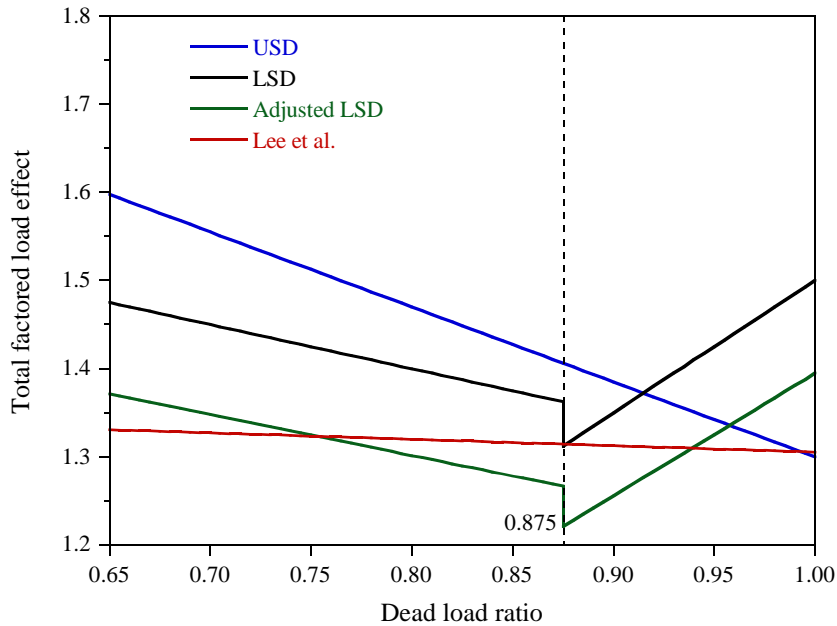


그림4.2 표4.2의 하중계수별 고정하중비에 따른 총 계수하중효과의 변화

달라지는 것으로 나타난다. 저항계수가 동일하더라도 하중계수가 달라지면 하중-저항계수에 의한 요구공칭강도는 달라지게 되며 따라서 각 설계기준에서 확보하게 되는 신뢰도지수도 달라지게 된다. 그렇기 때문에 어떤 설계기준에서 결정된 저항 및 재료계수를 상이한 하중계수를 적용하는 다른 설계기준에 그대로 적용한다면 신뢰도의 측면에서 부적절한 결과를 도출할 수 밖에 없다.

신뢰도해석을 위한 RC부재 강도 및 하중효과의 통계특성은 표2.1에 정리한 값을 사용하였다. 압축강도의 통계특성은 국내의 유효한 통계자료가 없어, 휨강도의 통계특성에 취성파괴에 대한 불확실성을 추가적으로 고려하여 설정하였다. 압축강도의 변동계수는 AASHTO specifications

(AASHTO, 2014)의 RC부재 압축저항계수 0.75를 채택하였을 때 표4.2의 Reference 하중계수와 함께 목표신뢰도 3.72를 평균적으로 잘 확보하도록 하는 변동계수를 계산하였으며 그 값은 0.183으로 나타났다. 표2.1에서 주어진 통계자료들의 일관성은 부족하지만 국내의 유효한 자료 중에서 가장 적절하다고 판단되는 자료를 인용하였으며, 신뢰할 수 있는 통계자료가 추가적으로 확보 된다면 더 엄밀하고 실제적인 분석이 가능할 것으로 판단한다.

그림4.3에는 김재홍과 이재훈(2000)이 제안한 재료계수 $\theta_s = 0.90$ 와 $\theta_c = 0.65$ 를 적용하여 KHBDC USD와 KHBDC LSD의 중력방향 하중조합에 대한 요구공칭강도가 확보하는 신뢰도지수를 도시하였다. 각 확률변수의 통계특성은 표2.1의 값을 적용하였으며, 각 강도철근비에 대한 등가저항계수는 표4.1의 값을 적용하였다. 그림4.3에서 재료계수를 적용한 경우의 신뢰도지수는 도형으로 표시하였으며, 저항계수를 적용한 경우의 신뢰도지수는 실선으로 표시하였다. 그림4.3에 따르면 두 설계기준에 대하여 동일한 저항 및 재료계수를 적용하였지만, 신뢰도지수는 확연히 다르게 나타남을 알 수 있다. 이는 두 설계기준에서 적용하고 있는 하중계수가 다르기 때문이다. 그림4.3에 따르면 신뢰도지수는 평균적으로 약 4.5정도로 나타나며, 이는 KHBDC LSD에서 명시하는 목표신뢰도지수 3.72를 상회하는 값이다. 따라서 설계기준에서 정의한 목표신뢰도를 만족할 수 있도록 저항 및 재료계수를 증가시키거나 하중계수를 감소시키는 조정이 필요하다.

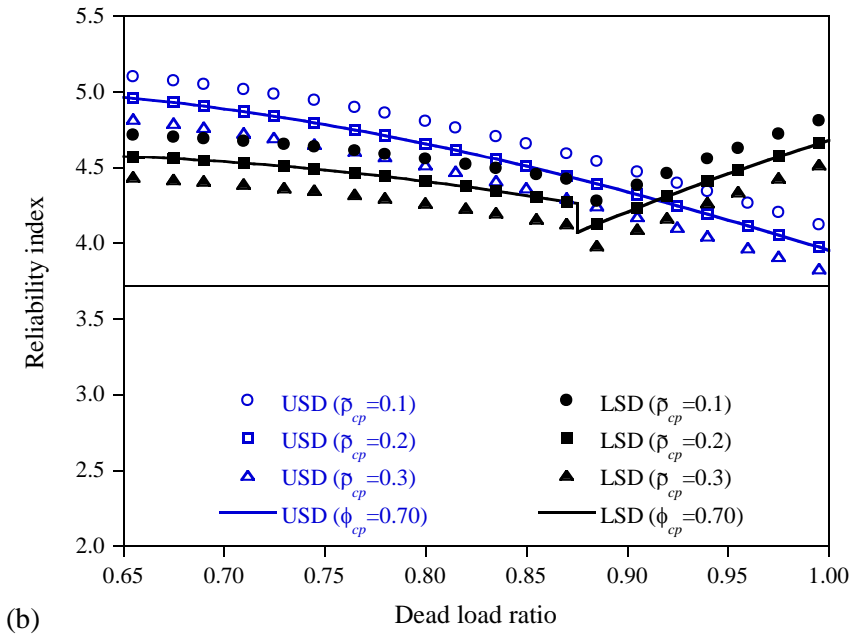
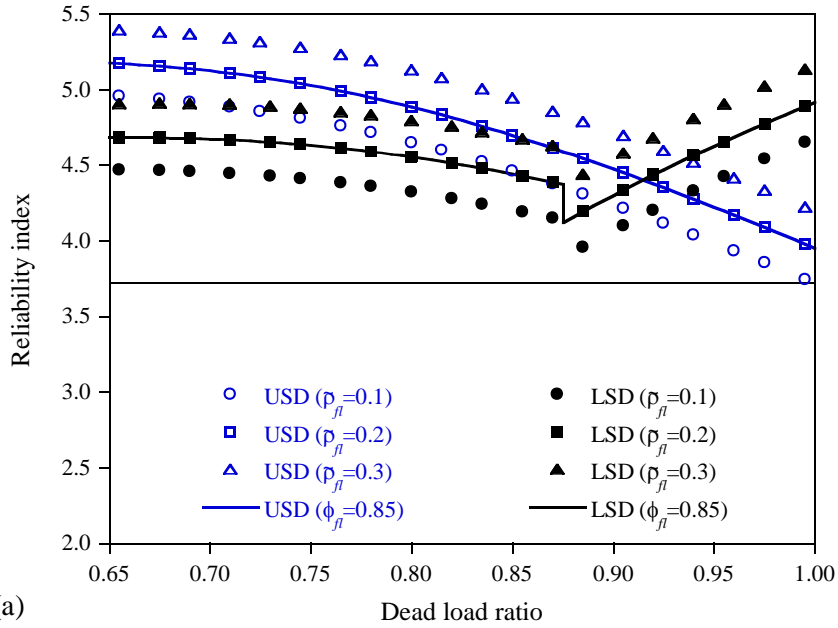


그림4.3 USD와 LSD의 하중-저항/재료계수에 따른 요구공칭강도의 신뢰도 지수: (a) 휨; (b) 압축

그림4.3에 따르면 각 설계기준에서 재료계수를 적용한 경우의 신뢰도지수는 저항계수를 사용한 경우와 유사한 경향성을 보이며, 재료계수 값 자체는 합리적으로 설정되었다고 판단된다. 그러나 그림4.1과 같이 철근비가 감소할 수록 휨부재에서는 등가저항계수가 증가하고 압축부재에서는 감소하기 때문에, 그림4.3에서 나타난 바와 같이 철근비가 감소할수록 휨부재의 신뢰도지수는 증가하고 압축부재에서는 신뢰도지수가 감소한다. 이러한 현상은 모든 부재 및 단면에 대하여 균일한 신뢰도를 확보하는 것을 추구하는 신뢰도기반 설계법의 목표와 부합하지 않는 현상이다. 따라서 재료계수의 개념을 신뢰도기반 설계기준에 적용하는 것이 과연 적합한 것인지에 대한 원론적인 문제점을 제기할 수 있다.

김재홍과 이재훈(2000)의 연구에서는 RC부재의 휨강도의 계산에 있어서, KHBDC LSD에서 채택하고 있는 포물선-직선 형상의 응력-변형도 곡선을 적용하지 않고 KHBDC USD에서 채택한 등가직사각형 응력분포를 적용하였다. 포물선-직선 형상의 응력-변형도 곡선과 등가직사각형 응력분포에 따르면 식(4.1)의 a 의 값은 각각 0.61과 0.59 정도로 나타난다. 비록 두 값의 차이가 크지는 않지만, 해당 설계기준에 정의된 규정에 따라 강도를 계산하고 재료계수를 결정하는 것이 원칙이라고 할 수 있다.

김재홍과 이재훈(2000)의 연구에서는 재료계수를 사용할 경우 연성도가 커질수록 등가저항계수가 커지기 때문에, 재료계수를 적용하는 것이 단면의 연성도를 반영할 수 있는 합리적인 설계라고 서술하였다. 이 때 단면의 연성도는 곡률연성지수로 대표되었으며, 곡률연성지수는 휨부재

에서 최외측 인장철근이 항복변형도에 도달할 때의 곡률에 대한 콘크리트 압축연단의 변형도가 0.003에 도달할 때의 곡률의 비로 정의하였다. 이러한 정의에 따르면 철근비가 줄어들수록 단면의 연성도가 커지게 되며, 그림4.1에서 볼 수 있는 바와 같이 휨부재의 등가저항계수 또한 커지게 된다. 신뢰도의 관점에서 보았을 때, 이는 철근비가 줄어들수록 부재강도의 불확실성이 줄어든다는 것을 의미한다. 그러나 신뢰도의 관점에서 볼 때, 철근비가 줄어들수록 단면에서 불확실성이 작은 철근보다 불확실성이 큰 콘크리트가 차지하는 비율이 커지게 되고 오히려 부재강도의 불확실성이 더 커지게 된다. 따라서 연성도가 커질수록 (혹은 철근비가 작을수록) 휨부재의 등가저항계수가 커지는 것은 신뢰도의 기본 개념에 반하는 현상으로 판단되며, 신뢰도기반 설계기준에서 재료계수의 우수성을 연성도로 설명하는 것은 합리적인 접근법이라 볼 수 없다.

4.2. 최적화 기반 재료계수 결정법

최적화에 기반하여 재료계수를 결정하기에 앞서, 목표신뢰도지수를 균일하게 확보하기 위한 하중-저항계수에 대한 조정을 우선적으로 수행한다. 이를 위해 3장의 공칭강도 최적화 기반 하중-저항계수 결정법을 사용한다. 표4.2의 LSD의 하중계수를 고정하고 휨부재의 저항계수에 대한 최적화 계산을 수행한다. 그 결과, LSD의 하중계수와 함께 목표신뢰도지수를 가장 균일하게 확보하는 휨저항계수는 0.968로 나타난다. 계산된 휨저항계수를 AASHTO specifications에서 제시하는 RC부재 휨저항계수 0.90에 맞추기 위하여 하중-저항계수를 모두 0.968로 나누고 0.90를 다시 곱하여 표준화를 수행한다. 이렇게 표준화하여 조정된 KHBDC LSD의 하중-저항계수는 표4.2의 조정된 LSD란에 정리하였다. 조정된 LSD의 하중계수에 의한 총 계수하중효과는 그림4.2에 도시하였다. 이렇게 조정된 KHBDC LSD의 하중계수와 저항계수 $\phi_{fl} = 0.90, \phi_{cp} = 0.75$ 에 의한 공칭요구강도가 확보하는 신뢰도지수는 그림4.4에 붉은색 실선으로 도시하였다. 하중-저항계수를 목표신뢰도를 잘 만족할 수 있도록 계산하고 표준화하여 조정하였기 때문에 그림4.4의 붉은색 실선이 목표신뢰도 3.72를 전체적으로 균일하게 만족하는 것을 확인할 수 있다.

다음으로는 재료계수를 결정하기 위하여 식(4.4)와 같은 최적화 식을 도입한다.

$$\text{Min}_{\theta_s, \theta_c} \Pi = \frac{1}{2} \int_{\tilde{\rho}_{fl}^l}^{\tilde{\rho}_{fl}^u} (\phi_{fl} - \psi_{fl}(\theta_s, \theta_c, \tilde{\rho}_{fl}))^2 d\tilde{\rho}_{fl} + \frac{1}{2} \int_{\tilde{\rho}_{cp}^l}^{\tilde{\rho}_{cp}^u} (\phi_{cp} - \psi_{cp}(\theta_s, \theta_c, \tilde{\rho}_{cp}))^2 d\tilde{\rho}_{cp} \quad (4.4)$$

힘 및 압축부재에 대하여 강도철근비의 상한과 하한은 각각 $\tilde{\rho}_{fl}^u = \tilde{\rho}_{cp}^u = 0.35$, $\tilde{\rho}_{fl}^l = \tilde{\rho}_{cp}^l = 0.02$ 로 설정한다. 힘 및 압축부재의 등가저항 계수는 식(4.2)를 적용한다. 식(4.4)의 최적화 문제를 풀으므로써 힘 및 압축부재의 저항계수를 동시에 고려한 최적의 재료계수를 계산할 수 있다. 식(4.4)의 목적함수의 1차 필요조건은 변분식을 통하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\delta_{\mathbf{x}^m} \Pi = - \int_{\tilde{\rho}_{fl}^l}^{\tilde{\rho}_{fl}^u} \delta_{\mathbf{x}^m} \psi_{fl}^T \cdot (\phi_{fl} - \psi_{fl}) d\tilde{\rho}_{fl} - \int_{\tilde{\rho}_{cp}^l}^{\tilde{\rho}_{cp}^u} \delta_{\mathbf{x}^m} \psi_{cp}^T \cdot (\phi_{cp} - \psi_{cp}) d\tilde{\rho}_{cp} = 0 \quad (4.5)$$

여기서 $\mathbf{x}^m = (\theta_s, \theta_c)^T$ 이다. 힘부재의 등가저항계수가 재료계수에 대해 비선형 함수로 나타나기 때문에 최적화 문제를 풀기 위하여 반복계산법을 도입한다. Newton-Raphson 방법에 기반한 반복계산법으로 문제를 풀기 위하여 힘부재의 등가저항계수에 대해 테일러 전개를 수행한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_{fl}}{\partial \theta_s} &\approx \frac{\partial \psi_{fl}}{\partial \theta_s} + \frac{\partial^2 \psi_{fl}}{\partial \theta_s \partial \theta_c} \Delta \theta_c + \frac{\partial^2 \psi_{fl}}{\partial \theta_s^2} \Delta \theta_s \\ \frac{\partial \psi_{fl}}{\partial \theta_c} &\approx \frac{\partial \psi_{fl}}{\partial \theta_c} + \frac{\partial^2 \psi_{fl}}{\partial \theta_c^2} \Delta \theta_c + \frac{\partial^2 \psi_{fl}}{\partial \theta_c \partial \theta_s} \Delta \theta_s \end{aligned} \rightarrow (\mathbf{h}_{fl})_{k+1} = (\mathbf{h}_{fl})_k + \mathbf{H}_{fl} \Delta \mathbf{x}^m \quad (4.6)$$

$$\psi_{fl} \approx \psi_{fl} + \frac{\partial \psi_{fl}}{\partial \theta_s} \Delta \theta_s + \frac{\partial \psi_{fl}}{\partial \theta_c} \Delta \theta_c \rightarrow (\psi_{fl})_{k+1} = (\psi_{fl})_k + (\mathbf{h}_{fl})_k^T \Delta \mathbf{x}^m \quad (4.7)$$

이 때, ψ_{fl} 과 ψ_{cp} 의 θ_s 와 θ_c 에 대한 1차 미분항은 식(4.8)와 같이 나타나며, ψ_{fl} 의 θ_s 와 θ_c 에 대한 2차 미분항은 식(4.9)과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \psi_{fl}}{\partial \theta_s} &= \frac{1 - 1.22 \tilde{\rho}_{fl} (\theta_s / \theta_c)}{1 - 0.61 \tilde{\rho}_{fl}} \\
\frac{\partial \psi_{fl}}{\partial \theta_c} &= \frac{0.61 \tilde{\rho}_{fl} (\theta_s^2 / \theta_c^2)}{1 - 0.61 \tilde{\rho}_{fl}} \\
\frac{\partial \psi_{cp}}{\partial \theta_s} &= \frac{\tilde{\rho}_{cp}}{0.85 + \tilde{\rho}_{cp}} \\
\frac{\partial \psi_{cp}}{\partial \theta_c} &= \frac{0.85}{0.85 + \tilde{\rho}_{cp}}
\end{aligned} \tag{4.8}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial^2 \psi_{fl}}{\partial \theta_s^2} &= \frac{-1.22 \tilde{\rho}_{fl} (1 / \theta_c)}{1 - 0.61 \tilde{\rho}_{fl}} \\
\frac{\partial^2 \psi_{fl}}{\partial \theta_s \partial \theta_c} &= \frac{\partial^2 \psi_{fl}}{\partial \theta_c \partial \theta_s} = \frac{1.22 \tilde{\rho}_{fl} (\theta_s / \theta_c^2)}{1 - 0.61 \tilde{\rho}_{fl}} \\
\frac{\partial^2 \psi_{fl}}{\partial \theta_c^2} &= \frac{-1.22 \tilde{\rho}_{fl} (\theta_s^2 / \theta_c^3)}{1 - 0.61 \tilde{\rho}_{fl}}
\end{aligned} \tag{4.9}$$

식(4.6)와 (4.7)에서 유도된 힘에 대한 항을 식(4.5)의 1차 필요조건에 대입한 뒤, 힘에 대한 항만 나타내보면 식(4.10)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
(\phi_{fl} - \psi_{fl}) \begin{pmatrix} \frac{\partial \psi_{fl}}{\partial \theta_s} \\ \frac{\partial \psi_{fl}}{\partial \theta_c} \end{pmatrix} &= (\phi_{fl} - (\psi_{fl})_k - (\mathbf{h}_{fl})_k^T \Delta \mathbf{x}^m) (\mathbf{h}_{fl})_k + \mathbf{H}_{fl} \Delta \mathbf{x}^m \\
&= (\phi_{fl} - (\psi_{fl})_k) (\mathbf{h}_{fl})_k - ((\mathbf{h}_{fl})_k (\mathbf{h}_{fl})_k^T + \\
&\quad (\phi_{fl} - (\psi_{fl})_k) \mathbf{H}_{fl}) \Delta \mathbf{x}^m + \Delta \mathbf{x}^{mT} (\mathbf{h}_{fl})_k \mathbf{H}_{fl} \Delta \mathbf{x}^m
\end{aligned} \tag{4.10}$$

여기서 증분항에 대한 2차식을 제외하면 식(4.11)이 유도된다.

$$\begin{aligned}
& (\phi_{fl} - \psi_{fl}) \begin{pmatrix} \frac{\partial \psi_{fl}}{\partial \theta_s} \\ \frac{\partial \psi_{fl}}{\partial \theta_c} \end{pmatrix} \\
& \approx (\phi_{fl} - (\psi_{fl})_k) (\mathbf{h}_{fl})_k - ((\mathbf{h}_{fl})_k (\mathbf{h}_{fl})_k^T + (\phi_{fl} - (\psi_{fl})_k) \mathbf{H}_{fl}) \Delta \mathbf{x}
\end{aligned} \tag{4.11}$$

이를 식(4.5)에 대입하고 간단히 정리하면 증분형 방정식이 유도된다.

$$\mathbf{H}^m \Delta \mathbf{x}^m + \mathbf{B}^m = 0 \tag{4.12}$$

여기서 \mathbf{H}^m 와 \mathbf{B}^m 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\mathbf{H}^m &= \int_{\tilde{\rho}_{fl}^l}^{\tilde{\rho}_{fl}^u} ((\mathbf{h}_{fl})_k (\mathbf{h}_{fl})_k^T - (\phi_{fl} - (\psi_{fl})_k) \mathbf{H}_{fl}) d\tilde{\rho}_{fl} + \int_{\tilde{\rho}_{cp}^l}^{\tilde{\rho}_{cp}^u} (\mathbf{h}_{cp})_k (\mathbf{h}_{cp})_k^T d\tilde{\rho}_{cp} \\
\mathbf{B}^m &= - \int_{\tilde{\rho}_{fl}^l}^{\tilde{\rho}_{fl}^u} (\phi_{fl} - (\psi_{fl})_k) (\mathbf{h}_{fl})_k d\tilde{\rho}_{fl} - \int_{\tilde{\rho}_{cp}^l}^{\tilde{\rho}_{cp}^u} (\phi_{cp} - (\psi_{cp})_k) (\mathbf{h}_{cp})_k d\tilde{\rho}_{cp}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

식(4.13)의 각 적분은 10점 가우스 적분법으로 수행하였다. 식(4.12)의 증분형 방정식을 반복적으로 풀면 최적의 재료계수를 계산할 수 있다.

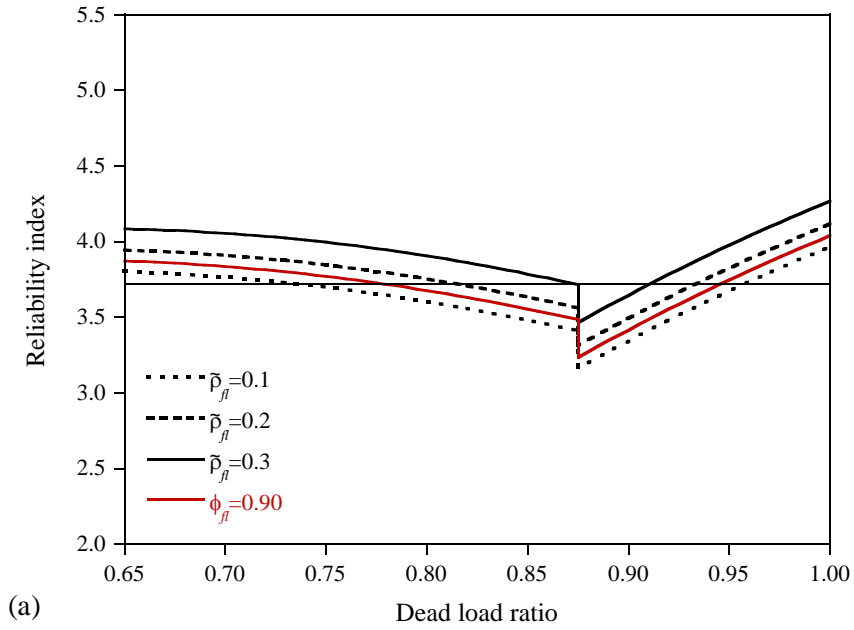
이 연구에서는 최적화 대상 강도철근비 영역에서 저항계수 $\phi_{fl} = 0.90$ 와 $\phi_{cp} = 0.75$ 에 대한 최적의 재료계수를 계산하였으며, 그 결과 $\theta_s = 0.93$ 과 $\theta_c = 0.72$ 로 계산되었다. 계산된 재료계수를 이용하여 강도 철근비에 따른 등가저항계수를 계산하고 표4.1에 정리하였다. 계산된 재료계수의 타당성을 검증하기 신뢰도해석을 수행하였다. 신뢰도해석 시 부재강도의 통계특성은 표2.1의 RC부재에 대한 값을 적용하였다. 그림 4.4에는 표4.2의 조정된 LSD의 하중계수와 위에서 계산한 재료계수의 강

도철근비별 등가저항계수에 의하여 확보되는 요구공칭강도의 신뢰도지수를 검은색 선으로 도시하였다. 전술한 최적화 과정을 이용하여 결정된 재료계수에 의한 신뢰도지수는 그림4.3의 기존 설계기준들의 신뢰도지수와 비교하였을 때, 그 변동 폭이 약 20% 정도 감소된 것으로 나타난다. 이는 하중계수와 저항계수에 대한 캘리브레이션을 목표신뢰도지수를 확보하도록 동시에 수행하고, 이어서 이 저항계수를 가장 잘 근사하도록 최적의 재료계수를 결정하였기 때문이다.

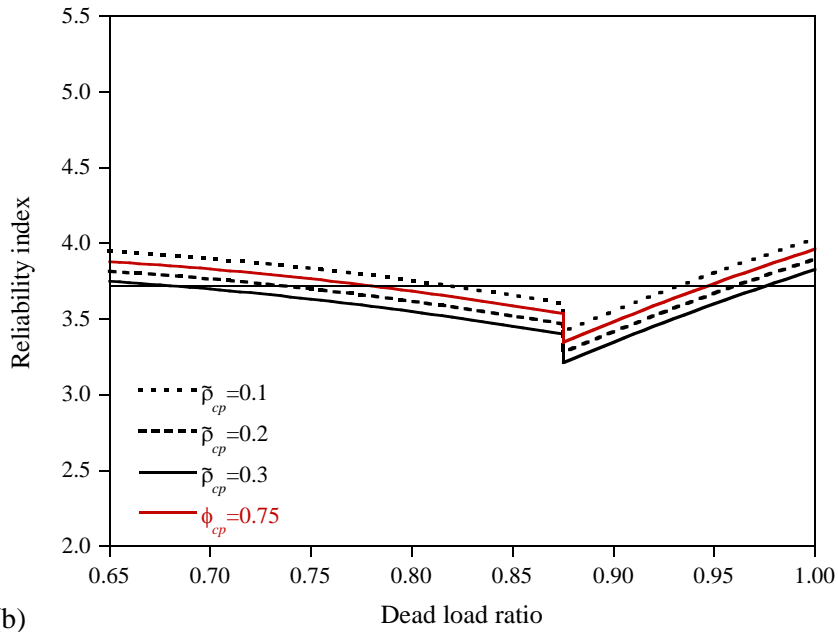
그림4.5에는 표4.2의 Reference 하중계수와 재료계수 $\theta_s = 0.93$, $\theta_c = 0.72$ 에 상응하는 강도철근비별 등가저항계수 및 저항계수가 확보하는 요구공칭강도의 신뢰도지수를 도시하였다. 그림4.3~4.5를 비교하였을 때, 그림4.5에서 목표신뢰도지수가 가장 균일하게 확보되고 있음을 확인할 수 있다. 이는 Reference 하중-저항계수가 해당 고정하중비 구간에서 목표신뢰도지수를 가장 균일하게 확보하도록 설정되었기 때문이다. 이러한 결과로부터 최적화 기법을 바탕으로 재료계수를 결정하기 위해선 반드시 목표신뢰지수를 잘 확보하도록 하중-저항계수를 먼저 결정한 후 재료계수를 결정하여야 하며, 더불어 해당 하중계수와 함께 하중-재료계수 조합이 구성되어야 목표신뢰도지수를 잘 확보할 수 있다는 것을 알 수 있다.

위에서 보인 최적화 기반 재료계수 결정법은 단순히 김재홍과 이재훈(2000)이 사용한 최적화 방법의 문제점을 해결하기 위하여 개발한 방법이기 때문에, 최적화를 적용한 재료계수 결정법의 근본적 문제점을 해

결하지는 못한다. 다시 말하자면 최적화 방법을 기반으로 재료계수를 결정하는 이상, 재료계수는 단순히 저항계수를 잘 근사하도록 결정되며 재료강도 자체의 통계적 불확실성을 독립적으로 고려할 수 없기 때문에, 재료계수를 도입하는 근본적인 공학적 의미가 퇴색되는 것으로 보인다.



(a)



(b)

그림4.4 조정된 LSD의 하중-저항/재료계수에 따른 요구공칭강도의 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 압축

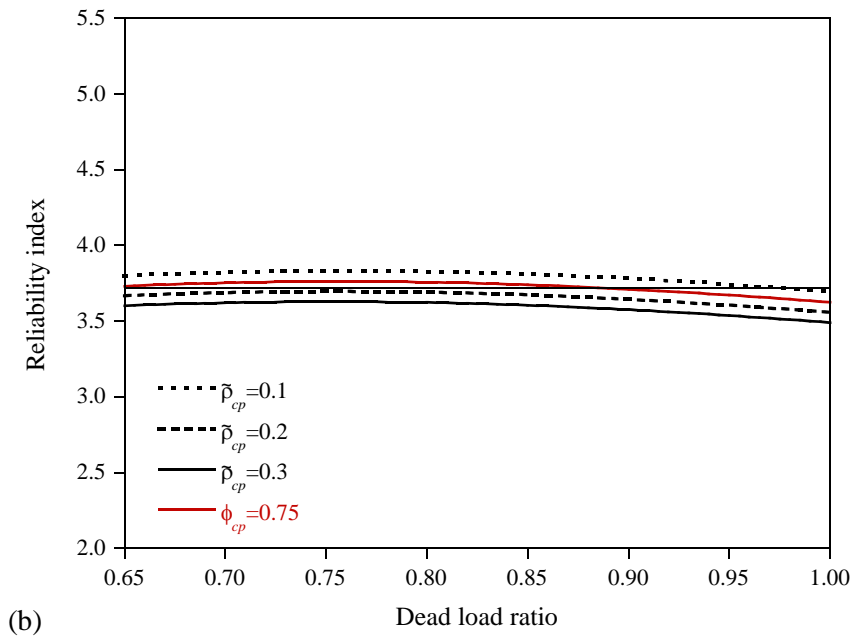
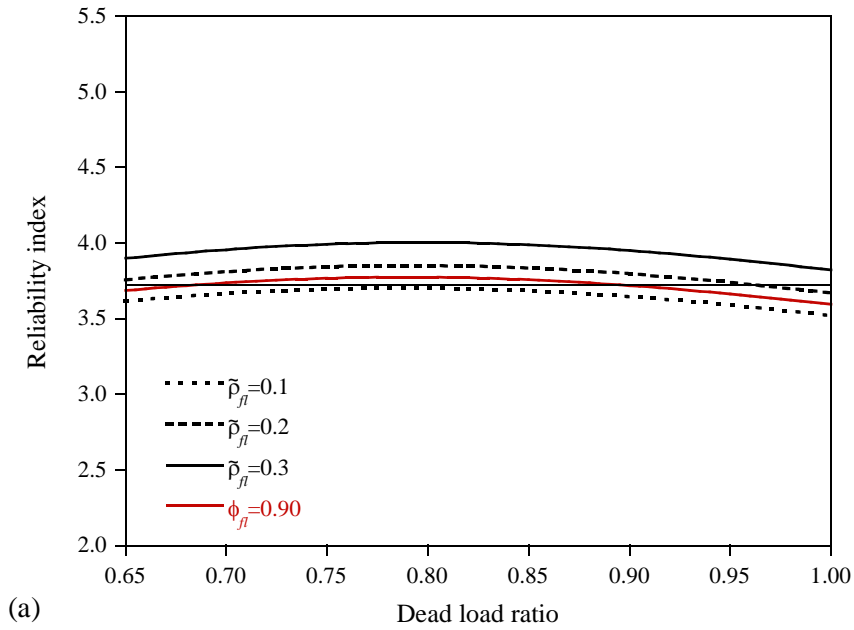


그림4.5 Reference 하중-저항/재료계수에 따른 요구공칭강도의 신뢰도지수:
(a) 휨; (b) 압축

4.3. 신뢰도 기반 재료계수 산정법

유로코드에서는 RC부재에 대하여 신뢰도의 기본 개념에 기반하여 산정된 재료계수를 도입하고 있으며, 재료저항과 재료강도에 대하여 다음과 같은 관계를 가정하고 있다.

$$R_k = M_k G_k X_k, \text{ for } k = s, c \quad (4.14)$$

위 식에서 R_k , M_k , G_k 그리고 X_k 는 각각 재료 k 의 재료저항, 모델 오차, 기하학적 오차 그리고 재료강도를 의미한다. 재료저항은 각 재료가 부재 내에서 외력에 저항하는 전체적인 저항능력을 의미하며 재료강도는 재료 자체의 강도를 의미한다.

유로코드에서 적용한 각 확률변수의 통계특성은 유로코드2의 해설서 (ECP, 2008)에서 인용하였으며 표4.3에 정리하였다. 재료저항의 편심계수와 변동계수는 일반적으로 사용되는 아래와 같은 근사식으로 계산되었다.

$$\lambda_{R_k} = \lambda_{M_k} \lambda_{G_k} \lambda_{X_k}, \quad \upsilon_{R_k} = \sqrt{\upsilon_{M_k}^2 + \upsilon_{G_k}^2 + \upsilon_{X_k}^2}, \quad k = s, c \quad (4.15)$$

표4.3 철근과 콘크리트의 재료저항의 통계특성(ECP, 2008)

재료	모델오차		기하학적오차		재료강도		재료저항		분포종류
	λ_{M_k}	υ_{M_k}	λ_{G_k}	υ_{G_k}	λ_{X_k}	υ_{X_k}	λ_{R_k}	υ_{R_k}	
철근	1.000	0.025	1.000	0.050	1.070	0.040	1.070	0.069	대수정규
콘크리트	1.000	0.050	1.000	0.050	1.290	0.150	1.290	0.166	대수정규

유로코드의 RC부재에 대한 부재강도의 통계특성은 표4.3에 나타난 유로코드의 재료 통계특성을 바탕으로 부록에 수록된 MCS 과정을 통해 추정할 수 있다. 하지만 이 연구는 KHBDC LSD에 적합한 재료계수를 확인하는 과정이기 때문에, 이어서 수행할 신뢰도해석에서 부재강도의 통계특성은 표2.1에 나타난 값을 적용하기로 한다.

유로코드2의 해설서(ECP, 2008)에 따르면 유로코드에서 재료계수는 수식을 이용하여 산정되었다.

$$\theta_k = \exp(n_{R_k} \beta_T v_{R_k} - u_{X_k} v_{X_k}), \quad k = s, c \quad (4.16)$$

여기서, n_{R_k} 는 한계상태식의 파괴점에서 단위법선벡터의 R_k 방향으로의 성분을 지칭하며, u_{X_k} 는 공칭재료강도의 확률분포 상에서의 분위계수를 지칭한다. 분위계수는 주어진 비초과확률에 대응하는 확률변수의 값과 해당 확률변수의 평균값 간의 거리를 표준편차에 대하여 표시하는 계수이다.

식(4.16)의 재료계수 산정식이 유도되는 과정은 다음과 같다. 재료강도가 대수정규분포를 따른다고 가정할 때, 공칭재료강도의 분위계수, 편심계수 그리고 변동계수간의 관계는 아래와 같이 유도된다.

$$\lambda_X = \frac{\mu_X}{X_0} = \frac{\mu_X}{\frac{\mu_X}{\sqrt{1+v_X^2}} \exp(u_X \sigma_{\ln X})} = \frac{\sqrt{1+v_X^2}}{\exp(u_X \sigma_{\ln X})} \approx \frac{1+0.5v_X^2}{\exp(u_X v_X)} \quad (4.17)$$

$$\ln \frac{1}{\lambda_X} \approx u_X v_X - \ln(1+0.5v_X^2) \approx u_X v_X - 0.5v_X^2 \approx u_X v_X$$

식(4.17)의 첫 번째 줄의 근사에는 다음과 같은 관계가 적용되었다.

$$\sigma_{\ln X} = \sqrt{\ln(1+u_X^2)} \approx u_X, \quad \sqrt{1+u_X^2} \approx 1+0.5u_X^2 \quad (\text{for } u_X \ll 1) \quad (4.18)$$

한편, 신뢰도의 기본 이론에 따라 재료계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = \frac{R_d}{R_0} \quad (4.19)$$

여기서, 아래첨자 d 는 확률변수의 파괴점을 지칭한다. 재료저항이 대수 정규분포를 따른다고 가정할 때, 재료저항의 파괴점 R_d 는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\ln R_d = \mu_{\ln R} - n_R \beta_T \sigma_{\ln R} \approx \mu_{\ln R} - n_R \beta_T u_R \quad (4.20)$$

또한 재료저항의 공칭값 R_0 는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\ln R_0 = \mu_{\ln R} + u_X u_X \quad (4.21)$$

식(4.21)이 도출되는 과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\mu_{\ln R} &= \ln \mu_R - 0.5 \ln(1 + \nu_R^2) = \ln \mu_R - 0.5 (\sigma_{\ln R})^2 \\
R_0 &= \frac{\mu_R}{\lambda_R} = \frac{\mu_R}{\lambda_X} \\
\ln R_0 &= \ln \mu_R + \ln \frac{1}{\lambda_X} \\
&= \mu_{\ln R} + 0.5 (\sigma_{\ln R})^2 + \ln \frac{1}{\lambda_X} \\
&\approx \mu_{\ln R} + 0.5 (\nu_R)^2 + u_X \nu_X \\
&\approx \mu_{\ln R} + u_X \nu_X
\end{aligned} \tag{4.22}$$

식(4.22)의 근사에는 식(4.17), (4.18)과 같은 근사가 적용되었다. 식(4.19)~(4.21)의 관계를 이용하면 식(4.16)와 같은 관계를 유도해낼 수 있다.

한편, 유로코드에서는 공칭값을 특성값(characteristic value)이라고 지칭하며, 재료강도의 특성값은 비초과확률 5%에 해당하는 값을 사용하는 것으로 규정하고 있다. 이는 분위계수 -1.64에 해당하는 값이며, 편심계수로는 철근과 콘크리트에 대해 각각 1.07, 1.29에 해당한다. 한계상태식 파괴점에서의 단위법선벡터의 R_k 방향 성분은 각 하중효과와 재료저항의 분산에 의하여 정의된다.

$$n_{R_k} = -\frac{\sigma_{R_k}^{eq}}{\sqrt{(\sigma_{R_k}^{eq})^2 + \sum_i (\sigma_{Q_i}^{eq})^2}}, \text{ for } k = s, c \tag{4.23}$$

재료저항의 분산이 커지면 식(4.23)의 단위법선벡터의 성분의 절대값이 커지고, 식(4.16)의 재료계수는 감소한다. 즉, 재료의 불확실성이 커질수록 재료계수는 줄어들게 된다.

유로코드에서는 단위법선벡터의 재료저항방향 성분을 철근과 콘크리트에 대하여 동일하게 -0.8로 가정하고, 목표신뢰도지수를 3.8로 설정한다. 이 경우 철근과 콘크리트의 재료계수는 각각 0.87 그리고 0.77로 계산된다. 콘크리트의 경우에는 강도 측정의 대상이 되는 공시체의 강도와 실제 부재의 콘크리트의 강도의 차이에 대한 변동성을 추가적으로 고려하기 위하여 0.77에 1.15를 나눈 값인 0.67을 콘크리트의 재료계수로 규정한다. 하지만 전술한 불확실성을 유로코드와 같이 단순히 재료계수를 감소시키는 방법으로 고려하는 것은 부적절한 접근법이라 판단되며, 그러한 불확실성을 나타내기 위해선 독립적인 확률변수를 식(4.15)에 도입하는 것이 원칙적으로 옳은 접근법이라 판단된다. 이 연구에서는 추가적인 계수 1.15의 근거가 불명확하므로 이는 고려하지 않는다.

유로코드에서 재료계수는 신뢰도 이론에 따라 재료강도의 변동성을 잘 반영하는 것으로 보이지만, 파괴점에서의 단위법선벡터의 재료저항방향 성분을 철근과 콘크리트에서 모두 -0.8로 가정한 것이 문제점으로 판단된다. 또한, 신뢰도지수는 저항과 하중의 통계특성의 상대적 크기로 결정되는데, 하중의 통계특성을 고려하지 않고 재료계수만 독립적으로 계산한 것은 신뢰도기반 설계법의 기본 원칙을 위반한 것으로 판단된다.

표4.3에 나타난 재료저항의 통계특성과 KHBDC LSD에 명시된 목표신뢰도지수 3.72를 적용하여 역신뢰도해석으로 계산한 철근과 콘크리트의 파괴점에서의 저항방향 단위법선벡터 성분은 하중비에 따라 그림4.6에 도시하였다. 그림4.6에 따르면 파괴점에서 단위법선벡터의 재료저항

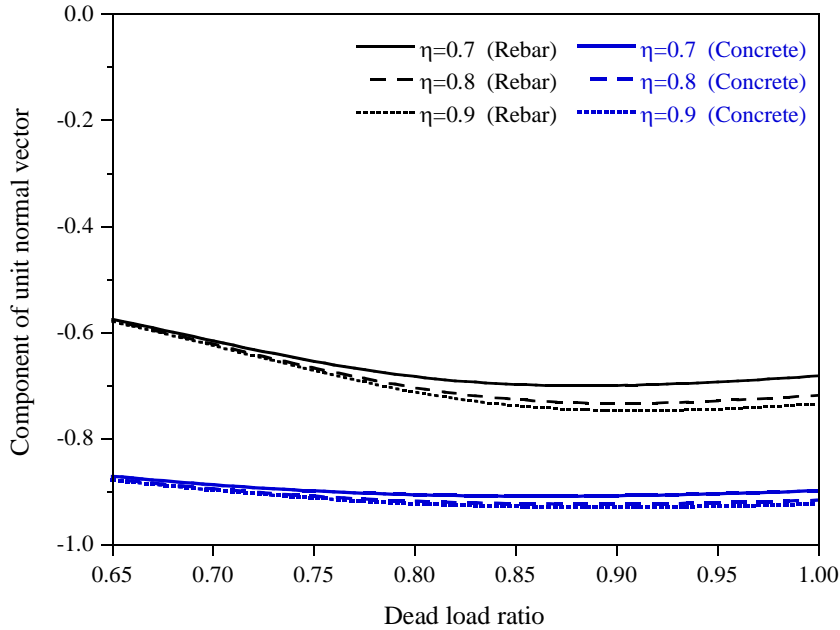


그림4.6 하중비에 따른 철근과 콘크리트의 파괴점에서의 단위법선벡터 저항방향 성분

방향 성분의 절대값은 콘크리트가 철근에 비하여 훨씬 크게 나타나며 그 차이도 상당하다. 따라서 두 재료의 단위법선벡터 성분을 -0.8로 통일하는 것은 비합리적인 것으로 판단된다. 이 연구에서 대상으로 하는 하중비 범위 내에서 단위법선벡터 성분의 평균값은 철근과 콘크리트에 대하여 각각 -0.67과 -0.9로 나타나며 이 값에 상응하는 철근과 콘크리트의 재료계수는 각각 0.90과 0.73 정도로 계산된다. 이는 표4.4에 정리하였다.

신뢰도기반 설계기준에서는 동일한 하중효과에 대해 서로 다른 불확실성을 가지는 재료 및 부재가 목표신뢰도지수를 확보하도록 재료 및 저항계수를 적용한다. 철근과 콘크리트에 대하여 하중-재료계수에 의해 계

표4.4 철근과 콘크리트의 단위법선벡터 저항방향 성분의 평균값 및 재료 계수

재료	고정하중비 범위	DC하중비 범위	단위법선벡터 저항방향 성분의 평균값	재료계수
철근	0.63~1.00	0.60~1.00	-0.67	0.90
콘크리트			-0.90	0.73

산되는 표준화된 요구공칭재료저항 \bar{R}_0 는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\bar{R}_0^k(\xi, \eta) = \frac{1}{\theta_k} \sum_i \gamma_i (\bar{Q}_i)_0, \text{ for } k = s, c \quad (4.24)$$

식(4.24)에 의하여 계산된 요구공칭재료저항이 모든 하중비에 대하여 역신뢰도해석으로 계산되는 목표재료저항 \bar{R}_T 를 맞춘다면, 요구공칭재료저항은 항상 목표신뢰도지수를 확보할 수 있다. 그림4.7에는 $\eta=0.8$ 에 대하여 요구공칭재료저항을 점선으로 도시하였으며 목표재료저항을 실선으로 도시하였다. 그림4.7에 따르면 목표재료저항은 고정하중비에 따라 비선형적으로 변하는 반면, 요구공칭재료저항은 고정하중비에 대해 선형으로 변하기 때문에 재료계수를 하중비에 무관하게 고정된 값으로 사용하면, 목표재료저항과 동일한 요구공칭재료저항을 계산할 수 없다. 따라서 요구공칭재료저항이 역신뢰도해석에 의하여 계산된 목표재료저항을 가장 잘 근사할 수 있도록 하중계수를 결정하여야 하고, 이를 결정하기 위하여 아래와 같이 공칭강도 최적화 기반 하중계수 결정법을 도입한다.

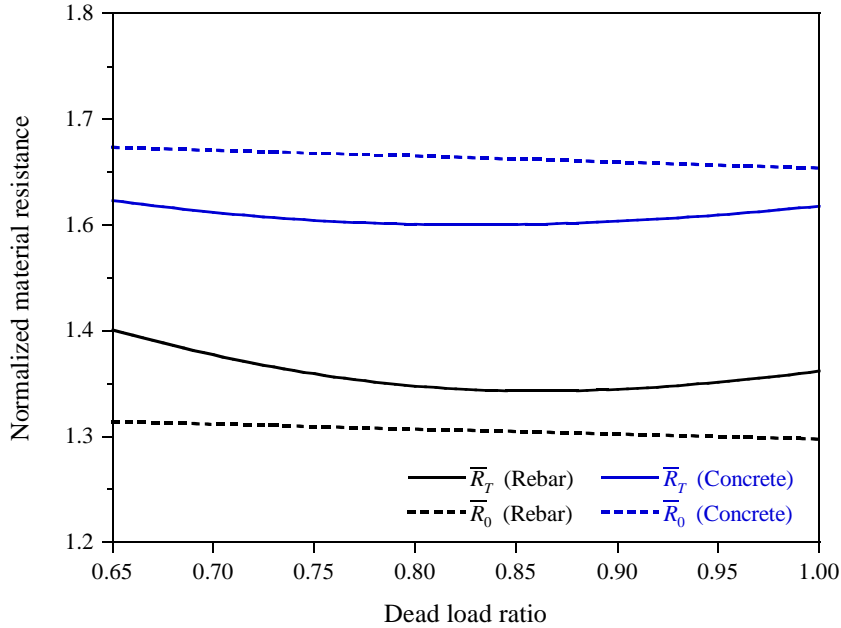


그림4.7 철근과 콘크리트의 표준화된 요구공칭재료저항 및 목표재료저항

$$\text{Min}_{\gamma} \Pi = \frac{1}{2} \sum_k \int_{0.63}^{1.0} \int_{0.6}^{1.0} \left(\frac{1}{\theta_k} \sum_i \gamma_i (\bar{Q}_i)_0 - \bar{R}_T^k \right)^2 d\eta d\xi, \text{ for } k = s, c \quad (4.25)$$

위 최적화 문제에서 재료계수는 표4.4에 주어진 값으로 고정한다. 식 (4.25)은 간단한 2차식 문제이며, 3장의 Sequential 최적화에서 했던 것과 같은 방법으로 하중계수에 대한 선형방정식을 풀으로써 쉽게 최적 하중계수를 구할 수 있다.

식(4.25)의 최적화 문제를 풀어 계산한 각 하중계수와 Reference 하중계수를 표4.5에 정리하였다. 그림4.7에는 $\eta = 0.8$ 에 대하여 제안된 재료계수와 식(4.25)의 최적화 결과로부터 제안된 하중계수에 의한 요구공칭재료저항을 점선으로 도시하였다. 그림4.7에 따르면, 철근에서는 요구공

표4.5 신뢰도 기반 및 Reference 최적화 기반 산정법에 의하여 계산된 하중계수

하중-저항/재료계수 산정법	하중계수		
	γ_{DC}	γ_{DW}	γ_{LL}
신뢰도기반	1.165	1.268	1.236
Reference	1.280	1.408	1.378

칭재료저항이 목표재료저항에 비하여 약간 작게, 그리고 콘크리트에서는 약간 크게 평가됨을 알 수 있다.

그림4.8에는 계산된 하중-재료계수에 의한 요구공칭재료저항이 확보하는 신뢰도지수를 도시하였다. 그림4.8에 따르면, 콘크리트는 신뢰도지수가 목표신뢰도지수보다 약간 크게 나타나며, 철근에서는 신뢰도지수가 목표신뢰도지수보다 약간 작게 나타난다. 재료계수 계산 시 목표신뢰도지수 3.72를 고려했음에도 불구하고 위와 같은 결과가 나타나는 이유는, 재료계수 산정식에서 재료강도 및 재료저항의 변동성만 고려하고 하중효과의 변동성은 함께 고려하지 못했기 때문이라 판단된다.

표4.4에 제시된 재료계수에 상응하는 강도철근비별 등가저항계수는 표4.1의 신뢰도기반 항목에 정리하였다. 신뢰도기반 재료계수의 등가저항계수와 표4.5의 신뢰도기반 하중계수에 의해 RC부재의 요구공칭강도가 확보하는 신뢰도지수는 그림4.9에 도시하였다.

RC휨부재의 파괴는 철근의 파괴가 지배한다. 따라서 그림4.8에 나타난 철근의 신뢰도지수와 그림4.9(a)에 나타난 휨부재의 신뢰도지수를 비교해볼 수 있다. RC휨부재의 강도의 변동계수가 0.13으로 철근에 비

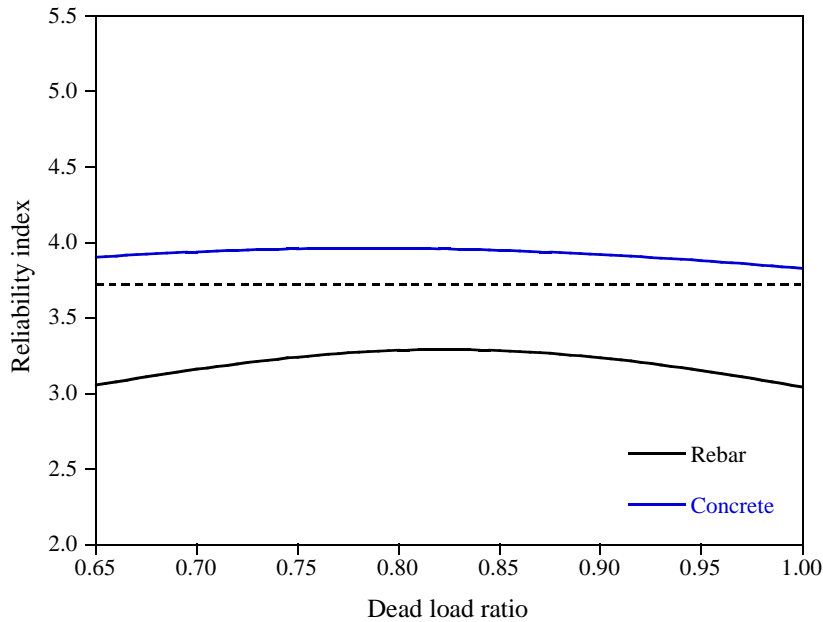


그림4.8 신뢰도 기반 산정법으로 계산된 하중-재료계수에 의한 철근과 콘크리트의 요구공칭재료저항이 확보하는 신뢰도지수

하여 더 크지만, 휨부재의 편심계수가 철근에 비하여 약 15% 정도 더 크기 때문에 철근과 휨부재의 신뢰도지수는 비슷한 수준으로 계산된다. RC압축부재의 파괴는 콘크리트의 파괴가 지배한다. 따라서 그림4.8에 나타난 콘크리트의 신뢰도지수와 그림4.9(b)에 나타난 압축부재의 신뢰도지수를 비교할 수 있다. RC압축부재의 강도의 편심계수는 콘크리트에 비하여 약 5% 정도 작고 변동계수는 약 10% 정도 크기 때문에, 압축부재의 신뢰도지수는 콘크리트의 신뢰도지수보다 작게 평가된다. 또한 콘크리트의 재료계수에 비하여 RC압축부재의 저항계수가 더 크기 때문에 압축부재의 신뢰도지수를 더욱 감소시키게 되며, 결국 휨부재와 압축부

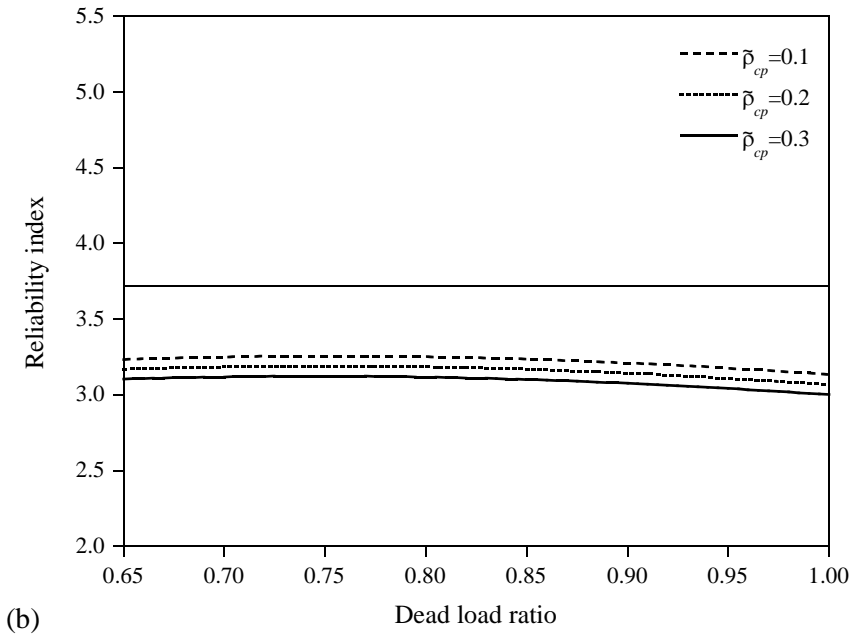
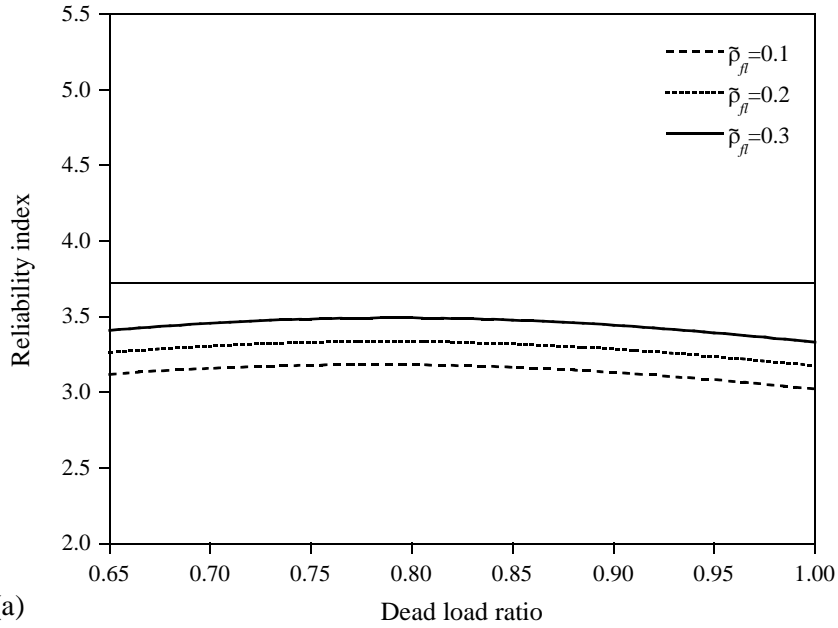


그림4.9 신뢰도기반 산정법으로 계산된 하중-재료계수에 따른 요구공칭 강도의 신뢰도지수: (a) 휨; (b) 압축

재의 신뢰도지수는 비슷하게 나타나게 된다.

유로코드의 신뢰도기반 산정법을 바탕으로 결정된 재료계수는 각 재료강도의 개별적인 불확실성만을 고려하며, 부재단위의 강도의 불확실성을 명시적으로 고려하지 않는다. 만일 유로코드에서 언급하고 있는 모델 오차와 기하학적 오차가 부재단위의 불확실성을 포함한 것이라 할지라도, 복합 재료로 구성된 부재의 거동의 불확실성은 반영하지 못한다. RC부재와 같이 두 재료가 결합하여 하나의 부재로서 거동하는 경우에는, 각 재료의 강도 외에 각 재료의 응력상태, 부재 변형상태, 베르누이 들보의 평면 가정, 두 재료 간의 부착 상태 등 다양한 요인이 복합적으로 부재강도의 불확실성에 기여하게 된다. 하지만 유로코드의 재료계수 결정법에서는 전술한 다양한 요인에 의한 불확실성을 재료 단위로 나누어 고려하게 되며, 두 재료의 복합적 거동에 대한 불확실성을 명시적으로 고려할 수 없기 때문에, 유로코드 기반 재료계수 산정법은 합리적이지 않은 것으로 판단된다. RC부재의 휨 및 압축강도의 불확실성과 각 부재강도의 파괴를 지배하는 재료의 불확실성의 차이는 재료강도의 불확실성을 제외한 부재로서의 불확실성을 의미하며, 이러한 복합 재료에 의한 부재의 불확실성이 재료계수에 적절히 반영되지 못했기 때문에 부재단위의 신뢰도지수가 목표신뢰도지수 보다 낮게 평가되는 것으로 보인다.

재료저항과 부재강도 사이의 통계적 관계를 정확하게 설정하기 위해선 많은 시간과 노력이 필요할 것으로 판단된다. 다만 한 가지 확실한 것은 전술한 다양한 요인으로 인하여 부재강도의 불확실성이 재료저항의

불확실성 보다는 크게 나타날 것이며, 따라서 재료계수에 의하여 결정된 부재의 요구공칭강도는 실제 필요한 부재강도보다 작게 계산될 것이라는 사실이다. 따라서 부재로서의 불확실성 또한 고려할 수 있는 재료계수의 개념이 새롭게 도입되어야 할 것이며, 이런 개념이 도입되기 전까지는 RC부재의 설계에 저항계수를 적용하는 것이 신뢰도의 관점에서 합리적일 것으로 판단된다. KHBDC LSD에 적용되고 있는 재료계수는 유로코드의 재료계수의 개념과는 완전히 다르고 오직 저항계수에 의하여 결정되기 때문에, 유로코드의 재료계수에 대하여 지적한 문제점들은 나타나지 않을 것이다.

5. 최적화 기법을 통한 하중-저항/재료계수 제안

이 장에는 3장과 4장에서 설명한 하중-저항 및 재료계수 최적화 기법을 바탕으로 하중-저항 및 재료계수를 최종적으로 제안한다. 또한 제안한 하중-저항 및 재료계수의 요구공칭강도가 확보하는 신뢰도지수를 확인하고 제안한 하중-저항 및 재료계수의 타당성을 검토한다.

제안할 하중-저항 및 재료계수로는 3장의 제안 하중-저항계수와 4장의 최적화 기반 재료계수를 택하였다. 이들은 표5.1, 5.2, 그리고 5.3에 정리하였다. 표5.1에 나타난 바와 같이 하중계수는 두 가지 방법으로 제안하였다. 하나는 두 고정하중비 구간에 대하여 하중계수를 개별적으로 제안한 것이며, 다른 하나는 전체 고정하중비 구간에 대하여 단일 하중계수로 제안한 것이다. 단일 구간으로 하중계수는 두 구간 하중계수의 양 구간에서 큰 하중계수를 취함으로써 안전 측으로 제안한 것이다. 따라서 두 구간 하중계수를 적용할 경우, 더 경제적인 설계를 유도할 수 있다.

다음으로는 신뢰도해석을 통해 제안 하중-저항계수 및 재료계수의 타당성에 대한 검증을 수행하였다. 그림5.1~5.6에는 표5.1과 표5.2의 하중계수와 저항계수를 적용하여 신뢰도해석을 수행한 결과를 도시하였다. 그림5.7~5.10에는 표5.1의 하중계수와 표5.3의 재료계수를 적용하여 RC부재에 대한 신뢰도해석을 수행한 결과를 도시하였다. 그림5.1~5.3과 그림5.7~5.8에는 표5.1의 두 구간 하중계수를 적용한 경우의 신뢰도지수 도시

하였으며, 그림5.4~5.6과 그림5.9~5.10에는 단일 구간 하중계수를 적용한 경우의 신뢰도지수를 도시하였다. 신뢰도해석 시 부재강도와 하중효과 의 통계특성은 표2.1의 값을 적용하였다. 각 그림에서 목표신뢰도지수 3.72는 검은 가로 실선으로 나타내었으며, 목표신뢰도지수의 오차범위 $\pm 5\%$ 는 검은 가로 점선으로 나타내었다.

두 구간 하중계수를 적용한 경우, 신뢰도지수의 오차는 오차범위 $\pm 5\%$ 를 크게 벗어나지 않는 것으로 나타난다. 단일구간 하중계수를 적용한 경우에 대해서도 신뢰도지수가 목표신뢰도지수에 대하여 -5% 이하로 떨어지는 경우는 거의 나타나지 않으며, 신뢰도지수가 목표신뢰도 지수에 대하여 -5% 이하로 떨어지는 경우는 고정하중비가 매우 높거나 낮은 영역에서 드물게 나타난다. 따라서 전체적으로 보았을 때, 제안 하중-저항 및 재료계수의 요구공칭강도에 의하여 확보되는 신뢰도지수는 합리적인 오차범위 내로 나타나며, 제안한 하중-저항 및 재료계수는 타당한 것으로 판단된다.

표5.1 제안 하중계수

구분	고정하중비	γ_{DC}		γ_{DW}	γ_{LL}
		공장제작	현장제작		
두 구간	$0.00 \leq \xi \leq 0.55$	1.05		1.05	1.80
	$0.55 \leq \xi \leq 1.00$	1.25	1.30	1.40	1.45
단일 구간	$0.00 \leq \xi \leq 1.00$	1.25	1.30	1.40	1.80

표5.2 제안 저항계수

강도	ϕ^{RC}	ϕ^{ST}	ϕ^{PC}
휨	0.90	0.95	0.90
전단	0.90	0.95	0.90
압축	0.75	-	-

표5.3 제안 재료계수

재료계수		강도철근비	등가저항계수	
θ_s	θ_c	$\tilde{\rho}_f, \tilde{\rho}_{cp}$	Ψ_f	Ψ_{cp}
0.93	0.72	0.1	0.91	0.74
		0.2	0.89	0.76
		0.3	0.87	0.77

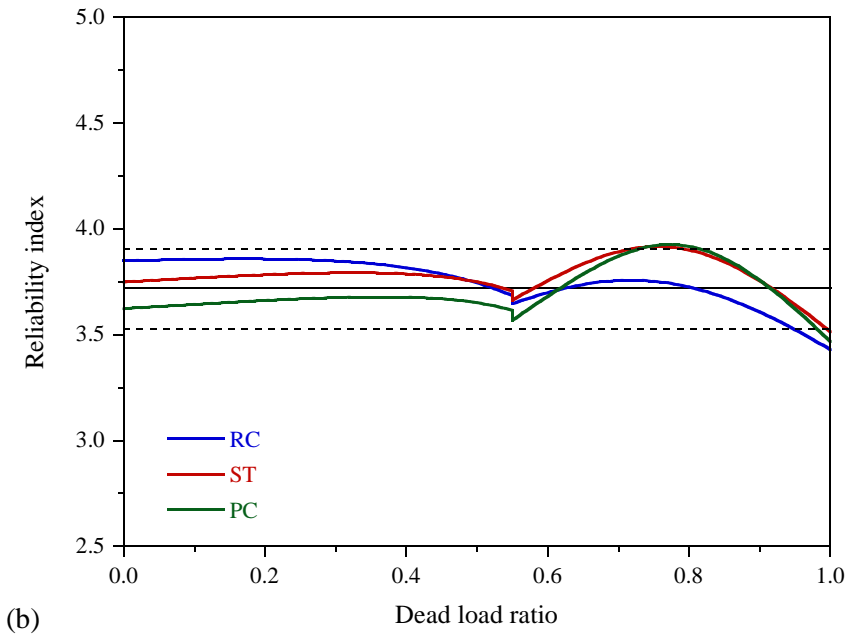
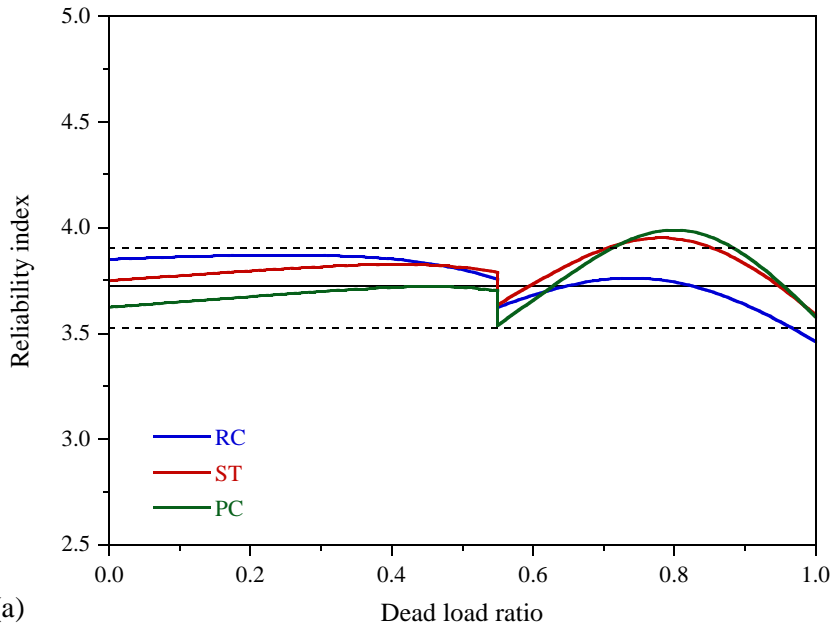


그림5.1 두 구간 하중계수를 적용한 경우의 휨강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재

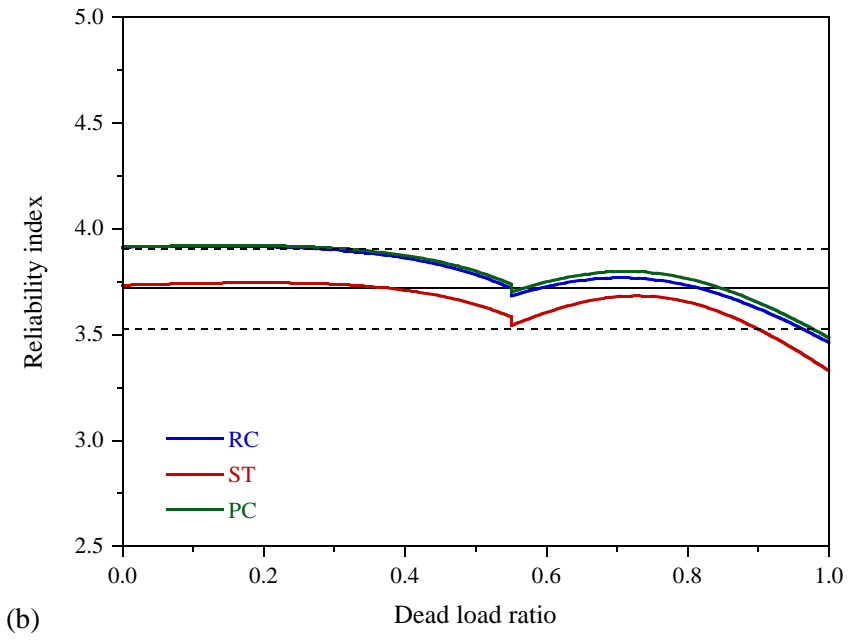
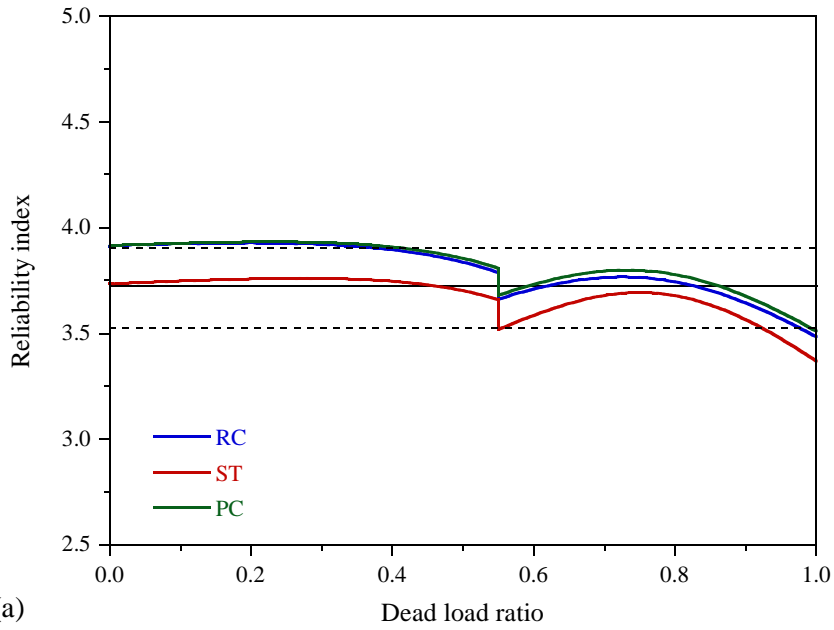


그림5.2 두 구간 하중계수를 적용한 경우의 전단강도의 평균신뢰도지수:
 (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재

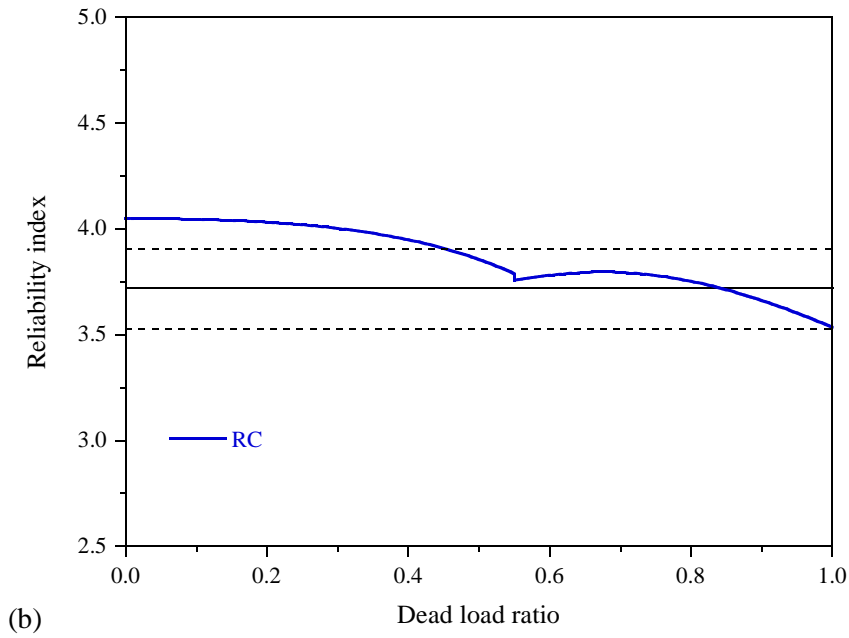
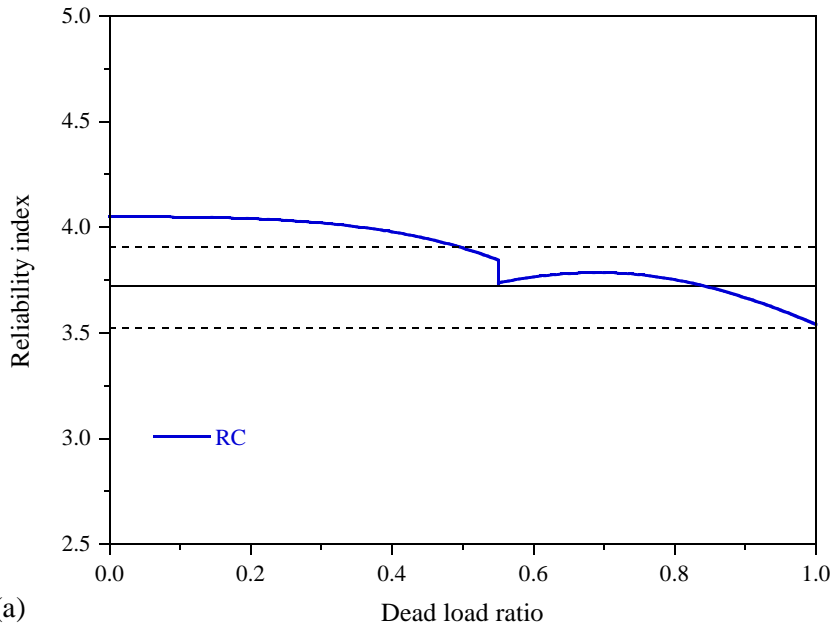


그림5.3 두 구간 하중계수를 적용한 경우의 압축강도의 평균신뢰도지수:
 (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재

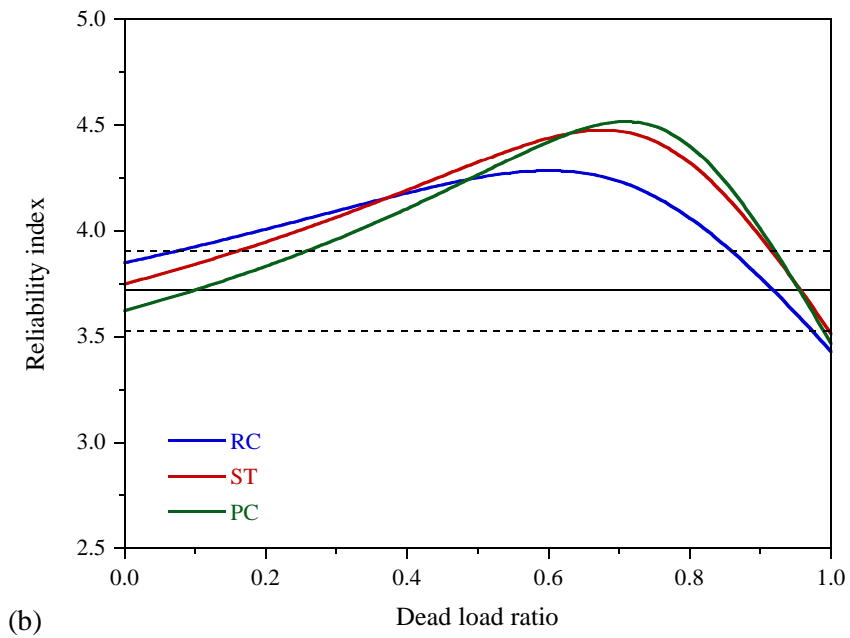
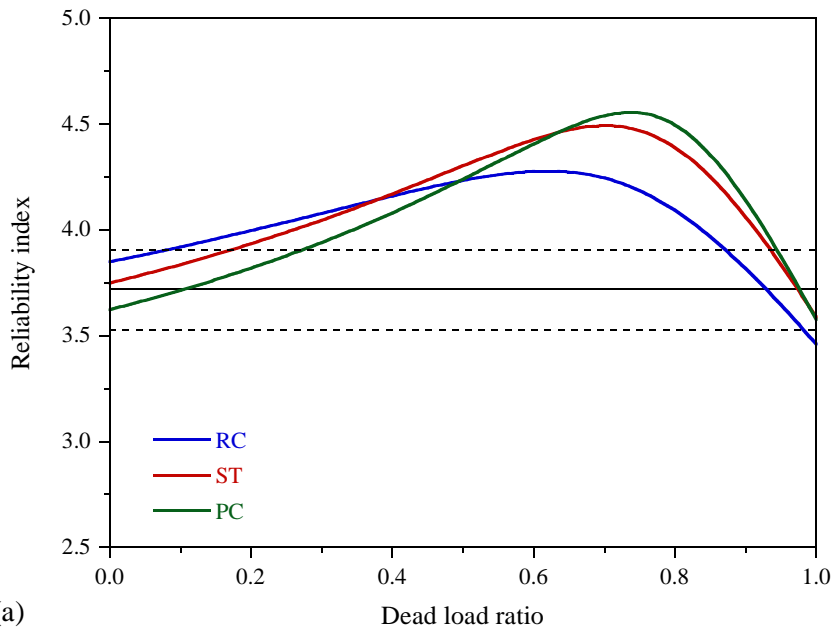


그림5.4 단일 구간 하중계수를 적용한 경우의 휨강도의 평균신뢰도지수:
 (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재

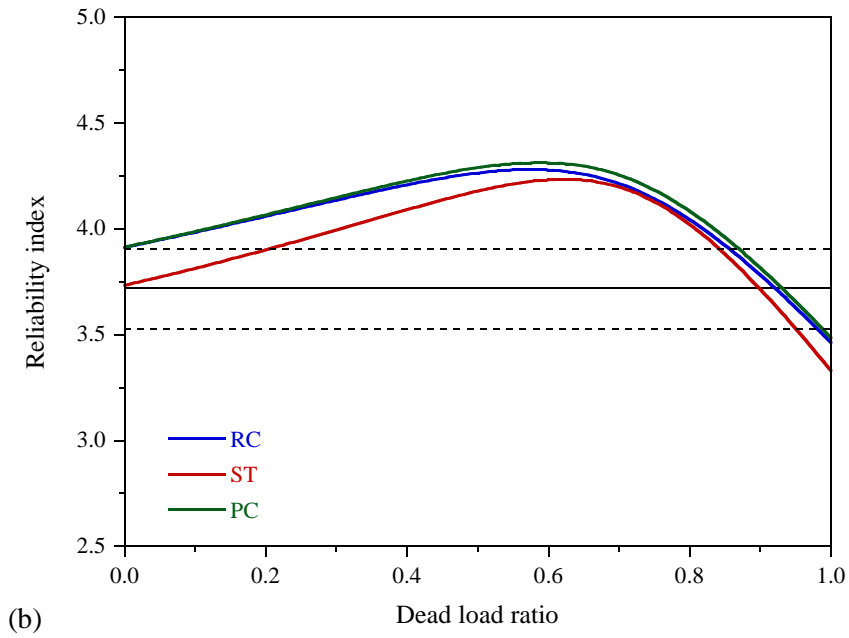
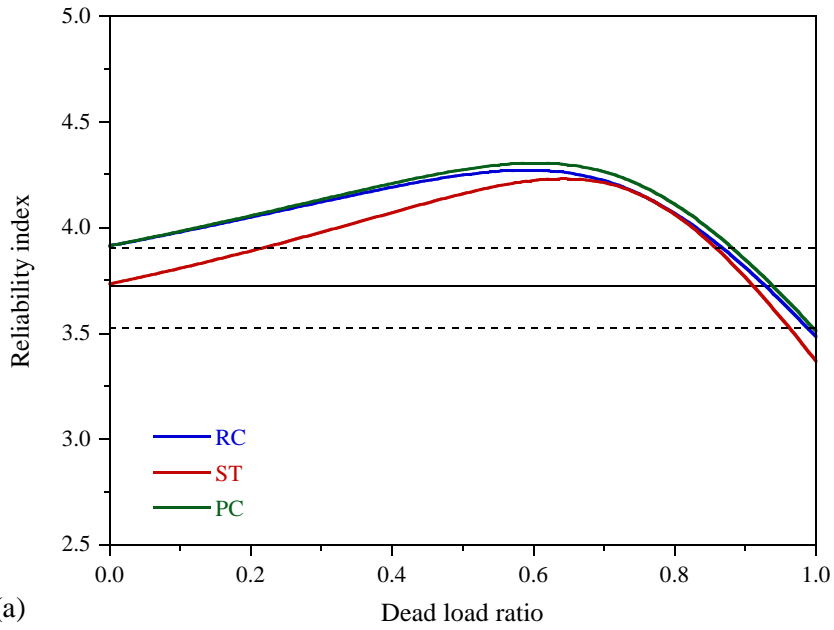
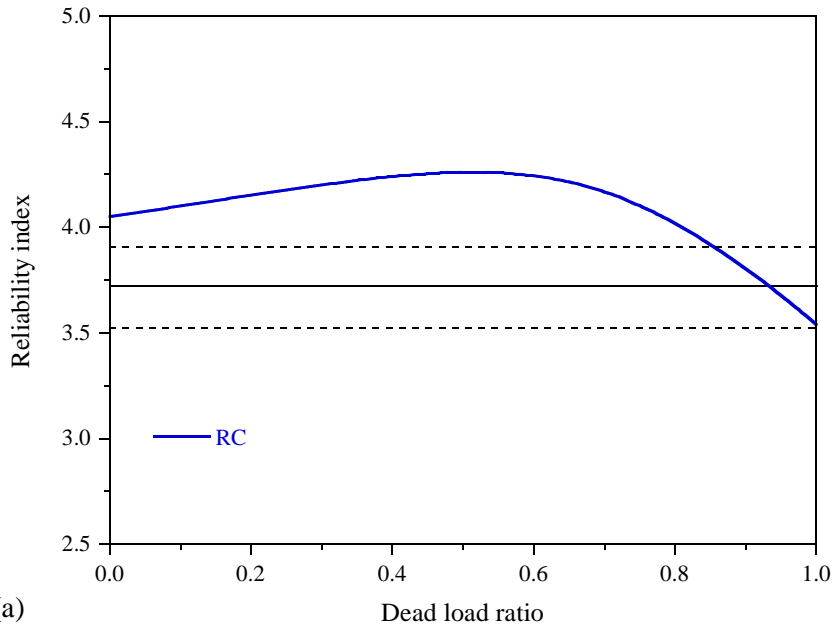
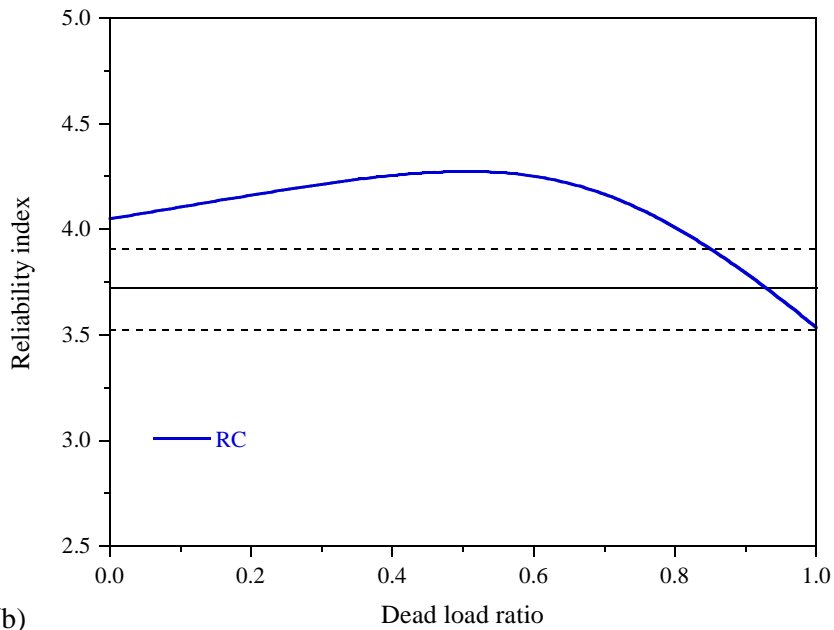


그림5.5 단일 구간 하중계수를 적용한 경우의 전단강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재



(a)



(b)

그림5.6 단일 구간 하중계수를 적용한 경우의 압축강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재

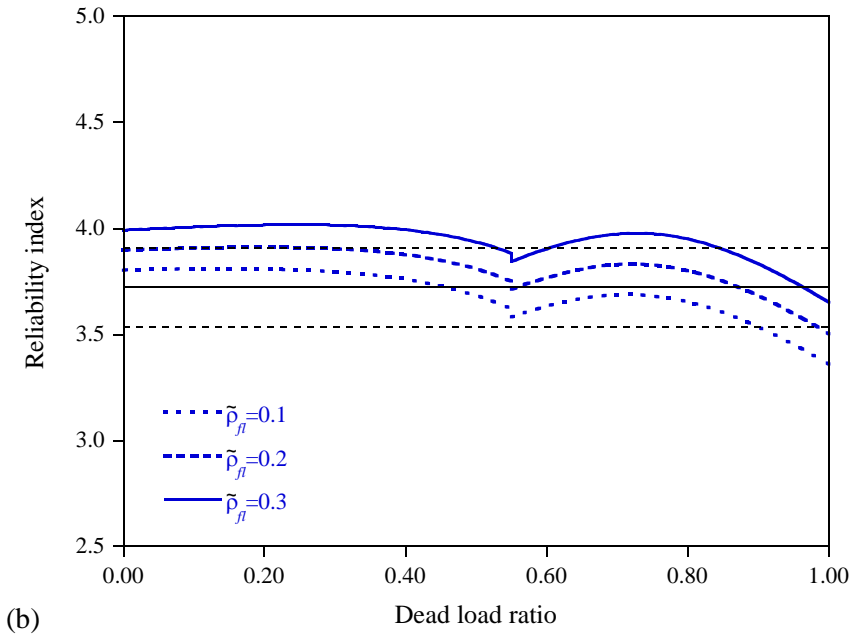
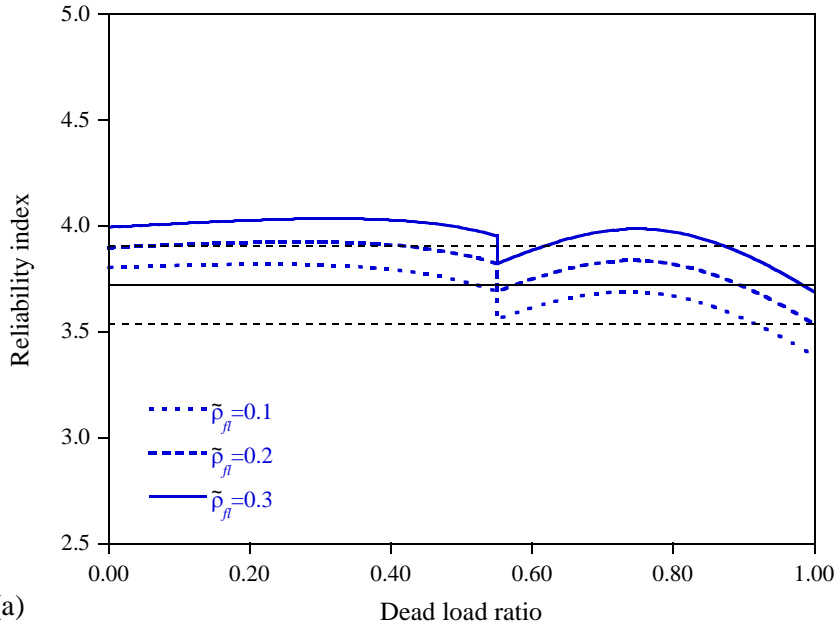


그림5.7 두 구간 하중계수와 재료계수를 적용한 경우의 RC휨강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재

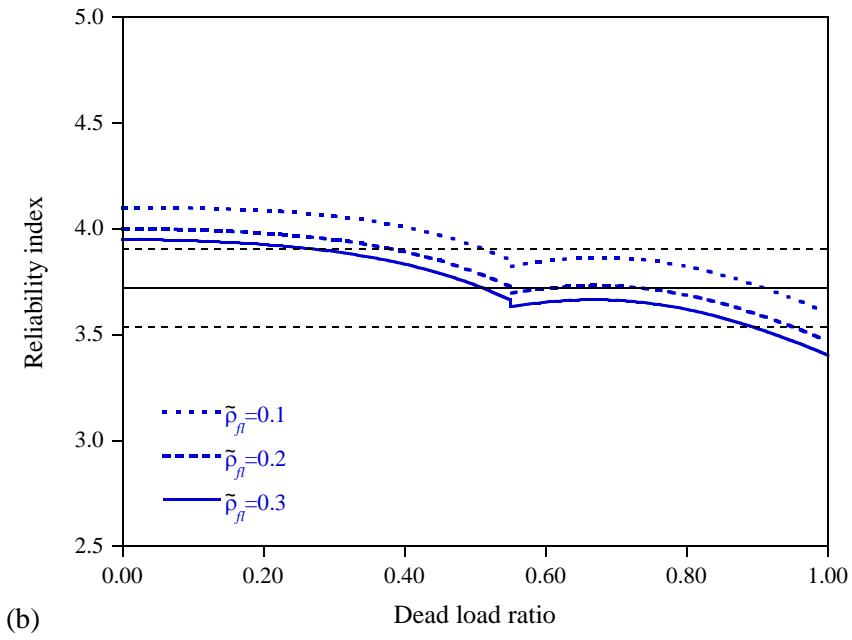
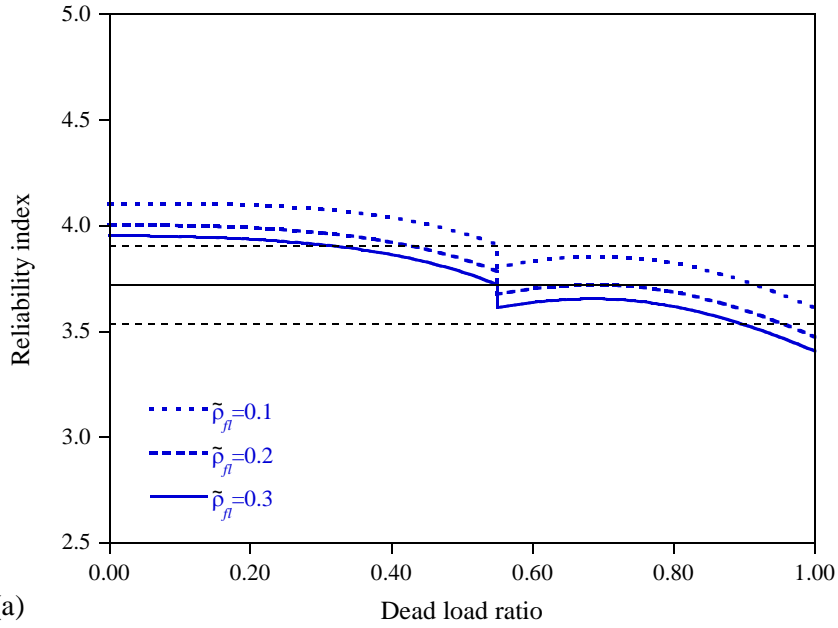


그림5.8 두 구간 하중계수와 재료계수를 적용한 경우의 RC압축강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재

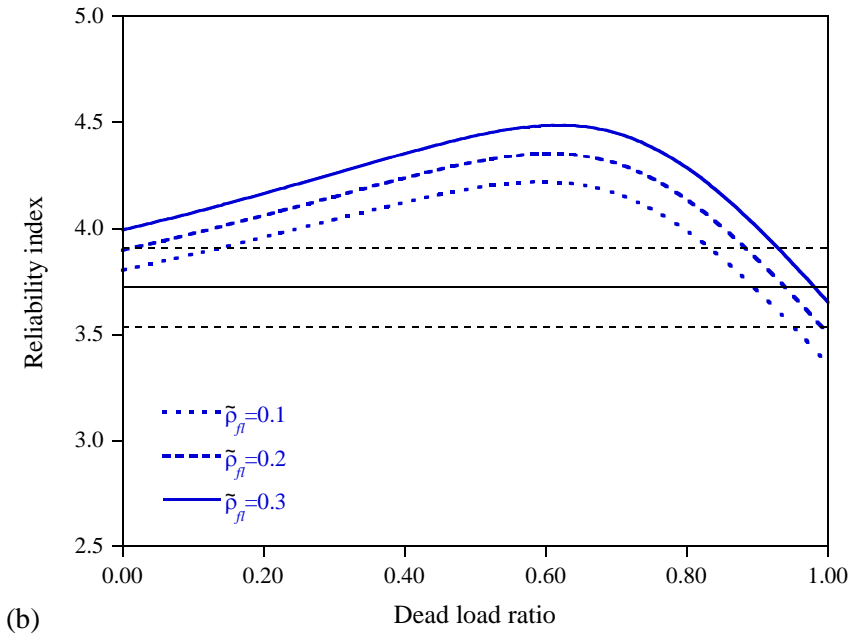
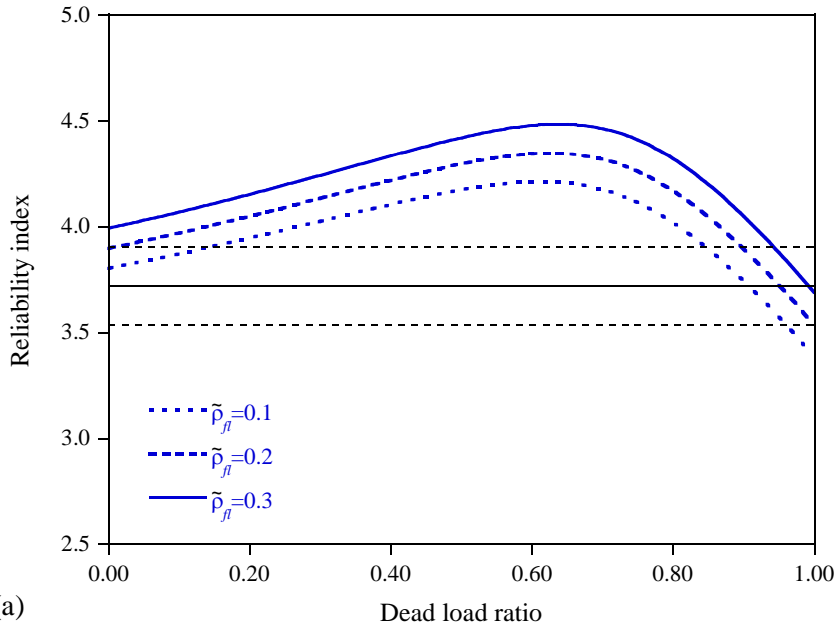


그림5.9 단일 구간 하중계수와 재료계수를 적용한 경우의 RC휨강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재

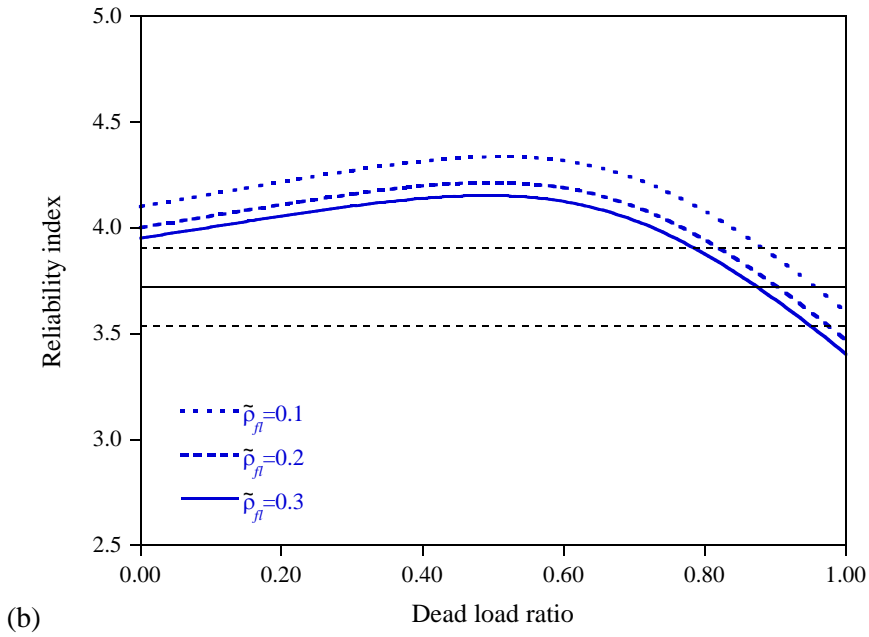
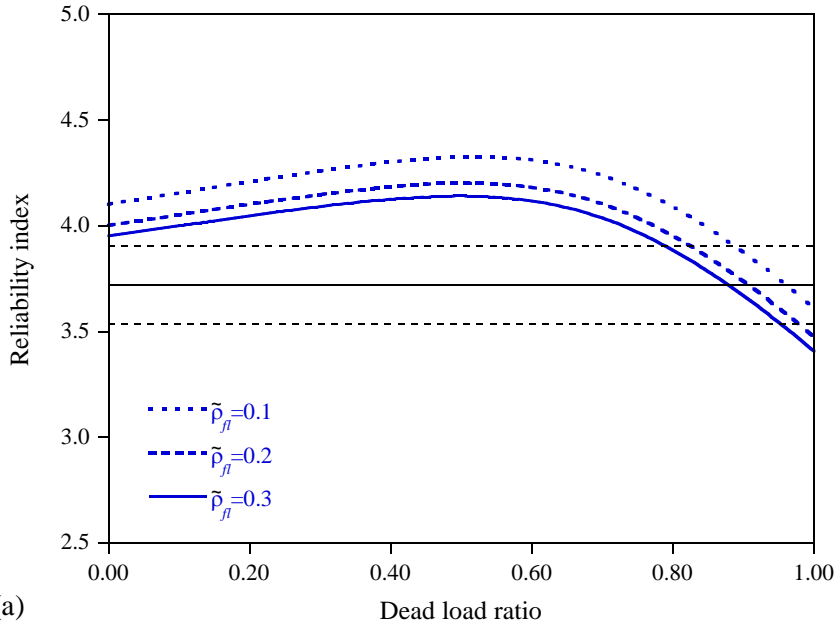


그림5.10 단일 구간 하중계수와 재료계수를 적용한 경우의 RC압축강도의 평균신뢰도지수: (a) 공장제작부재; (b) 현장제작부재

6. 결 론

이 연구에서는 하중-저항계수에 의하여 정해지는 요구공칭강도와 역신뢰도해석을 통해 계산되는 목표강도의 차이를 최소화하는 목적함수를 바탕으로 최적화 기반 코드캘리브레이션 기법을 개발하였고, 계산 결과에 그 물리적인 의미를 명확히 하였다.

공칭강도 최적화 기반 하중-저항계수 결정법으로서 두 종류의 최적화 기법을 제안하였다. 하나는 Reference 최적화 기법이며, 다른 하나는 Sequential 최적화 기법이다. 전자는 하중-저항계수에 의하여 결정되는 요구공칭강도와 역신뢰도해석으로 계산되는 목표강도 간의 오차를 절대적인 관점에서 최소화하는 코드캘리브레이션 기법이다. 후자는 설계기준에 적용하여 사용하기에 좀 더 편리한 하중-저항계수를 결정하는 코드캘리브레이션 기법이다. 신뢰도해석을 통해 Reference 하중-저항계수의 요구공칭강도가 Sequential 하중-저항계수의 요구공칭강도보다 목표신뢰도지수에 더 가까운 신뢰도지수를 확보하는 것을 확인하였다. 또한 Sequential 하중-저항계수의 요구공칭강도도 오차범위 $\pm 5\%$ 내에서 목표신뢰도지수를 잘 확보하는 것을 확인하였다.

Sequential 최적화 기법을 이용하여 KHBDC LSD(국토교통부, 2016a)에 적합한 하중-저항계수를 계산하고 제안하였다. 실무적용성을 고려하여 고정하중비 영역 경계점은 0.55로 설정하였으며 하중-저항계수는 0.05를 단위로 절삭하였다. 제안 하중-저항계수에 의한 요구공칭강도가 대부분

의 고정하중비 영역에서 오차범위 $\pm 5\%$ 내로 목표신뢰도지수를 균일하게 확보하는 것을 확인하였다.

더불어 기존의 하중-저항계수의 관습에서 벗어나 요구공칭강도를 3차 다항식으로 표현하여 요구공칭강도를 표현하였고, 신뢰도해석을 통해 3차 다항식으로 표현된 요구공칭강도가 오차범위 내에서 목표신뢰도지수를 매우 균일하게 확보하는 것을 확인하였다.

이에 더하여 현재 KHBDC LSD(국토교통부, 2016a)에 적용된 재료계수의 근거인 김재홍과 이재훈(2000)의 연구에서 수행된 재료계수 최적화 과정의 문제점을 확인하였다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 RC부재의 휨강도와 압축강도를 동시에 고려한 최적화 과정을 개발하였으며, 이에 따라 계산된 재료계수를 이용하여 신뢰도해석을 수행하고 계산된 재료계수의 타당성을 확인하였다.

또한 유로코드에서 제시하고 있는 신뢰도기반 재료계수의 문제점을 확인하고 이를 수정하여 국내 설계기준에 부합하는 신뢰도기반 하중-재료계수를 계산하였다. 유로코드의 방법으로 계산된 국내 기준에 해당하는 하중-재료계수가 목표신뢰도지수를 잘 확보하지 못하는 것을 신뢰도해석을 통해 확인하였으며, 유로코드 기반 재료계수 결정법의 문제점을 지적하였다. 유로코드 기반 재료계수 결정법의 문제점으로는 재료계수 산정식에 하중효과의 불확실성을 동시에 고려하지 못한 점과 복합 재료를 사용한 부재로서의 불확실성을 고려하지 못한 점을 지적하였다.

제안한 하중-저항계수 및 재료계수 최적화 기법을 바탕으로 코드캘

리브레이션을 수행하였으며, 새로운 하중-저항계수 및 재료계수를 제안하였다. 제안한 하중-저항계수 및 재료계수를 이용하여 신뢰도해석을 수행하고 그 타당성을 검토하였다. 두 구간으로 제안한 하중계수를 적용한 경우는 전 고정하중비 영역에서 신뢰도지수가 목표신뢰도지수에 대해 오차범위 $\pm 5\%$ 내에서 나타나는 것을 확인하였다. 단일 구간으로 제안한 하중계수를 적용한 경우는 신뢰도지수가 목표신뢰도지수에 대하여 $+5\%$ 이상으로 벗어나는 영역이 발생하였지만, -5% 이하로 떨어지는 영역은 거의 나타나지 않았다.

이 연구에서는 국내외로 가용한 통계자료 중에서 가장 적절하다고 판단되는 자료들을 인용하였다. 후속 연구들을 통해 신뢰할 수 있는 통계자료가 추가적으로 확보된다면 전술한 최적화 기반 하중-저항/재료계수 결정법들을 바탕으로 더 엄밀하고 실제적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단한다.

7. 참고 문헌

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2014). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, Washington, D.C.
- Bae, C. (2016). *Determination of the Load-Resistance Factors for Reliability-Based Codes by Optimization*, Master thesis, Seoul National University, Seoul, South Korea.
- Der Kiureghian, A., Zhang, Y., and Li, C.-C. (1994). “Inverse Reliability Problem.” *J. Eng. Mech.*, Vol. 120, No. 5, 1154-1159.
- European Committee for Standardization (CEN). (2002). *Eurocode 0: Basis of Structural Design EN 1990*, Brussels, Belgium.
- European Concrete Platform (ECP). (2008). *Eurocode 2 Commentary*, European Concrete Platform ASBL, Brussels, Belgium.
- Haldar, A. and Mahadevan, S. (2000). *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 181-224.
- Kim, J. H. and Lee, J. H. (2000). “Material Resistance Factors for Reinforced Concrete Flexural and Compression Members.” *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, Vol. 12, No. 2, pp. 21-30 (in Korean).
- Korea Concrete Institute · Architectural Institute of Korea. (1999). *Structural Concrete Design Code*, Kimoondang (in Korean).
- Lee, H. S., Bae, C., and Kim, J. H. (2018). “Assessment of Reliability Levels and Adjustment of Load-resistance Factors Using Optimization for Gravitational Loads-governed Limit States of the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.” *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 22, Issue 9, pp. 3462-3472.

- Lee, J. H. (2015). *Prestressed concrete: strength design and limit state design*, Dong Myeoung publishers, pp. 180-182 (in Korean).
- Lee, S. H. (2014). *Calibration of the Load-Resistance Factors for the Reliability-based Design of Cable-supported Bridges*, Ph. D. thesis, Seoul National University, Seoul, South Korea. (in Korean)
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT). (2005). *Korean Highway Bridge Design Code*, MOCT (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2016a). *Korean Highway Bridge Design Code (Limit State Design)*, MOLIT (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2016b). *Korean Highway Bridge Design Code (Limit State Design)-Cable Supported Bridges*, MOLIT (in Korean).
- Nowak, A. S. (1995). "Calibration of LRFD bridge code." *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 121, No. 8, pp. 1245-1251.
- Nowak, A. S. (1999). *Calibration of LRFD bridge design code*, NCHRP Report 368, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Nowak, A. S., and Lind, N. C. (1979). "Practical Bridge Code Calibration." *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 105, No. 12, pp. 2497-2510.
- Paik, I., Hwang, E. S., and Shin, S. (2009). "Reliability analysis of concrete bridges designed with material and member resistance factors." *Computers and Concrete*, Techno-Press, Vol. 6, No. 1, pp. 59-78.
- Rackwitz, R., and Fiessler, B. (1978). "Structural reliability under combined random load sequences." *Comput. Struct.*, Vol. 9, No. 5, pp. 489-494.

Shin, D. K., Kim, C. Y., and Paik, I. (2006). "Reliability analysis of composite girder designed by LRFD method for positive flexure." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 26, No. 3A, pp. 539-546 (in Korean).

8. 부 록

부록에는 유로코드(CEN, 2002)의 철근과 콘크리트의 재료 통계특성을 바탕으로 RC부재의 부재강도의 통계특성을 추정하기 위해 MCS를 수행한 내용을 정리하였다. 단면의 크기, 각 재료의 강도 등과 같은 물리량의 절대적인 크기에 영향을 받지 않는 일반화된 MCS를 수행하기 위해, RC부재의 휨강도와 압축강도를 다음과 같이 공칭휨강도와 공칭압축강도로 표준화하였다.

$$\begin{aligned}
 \hat{M} &= \frac{M}{M_0} \\
 &= \frac{\rho_{fl} b d^2 f_y (1 - a \rho_{fl} f_y / f_{ck})}{\rho_{fl} b d^2 f_{y,0} (1 - a \rho_{fl} f_{y,0} / f_{ck,0})} \\
 &= \hat{f}_y \frac{(1 - a \rho_{fl} \hat{f}_y / \hat{f}_{ck})}{(1 - a \rho_{fl})}
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

$$\begin{aligned}
 \hat{P} &= \frac{P}{P_0} \\
 &= \frac{A_g (0.85 f_{ck} (1 - \rho_{cp}) + f_y \rho_{cp})}{A_g (0.85 f_{ck,0} (1 - \rho_{cp}) + f_{y,0} \rho_{cp})} \\
 &= \frac{(0.85 \hat{f}_{ck} (1 - \rho_{cp}) + \hat{f}_y \rho_{cp})}{(0.85 (1 - \rho_{cp}) + \rho_{cp})}
 \end{aligned} \tag{8.2}$$

식(8.1)과 (8.2)에서 M 과 P 는 각각 휨강도와 압축강도를 지칭하며, M_0 와 P_0 는 4장에서 설명한 바와 같이 공칭휨강도와 공칭압축강도를 지칭한다. 이어서 수행할 MCS에 대하여 f_y 와 f_{ck} 는 확률변수로 취급되므

로, 이를 공칭값과 구분하기 위해 f_y 와 f_{ck} 의 공칭값은 각각 $f_{y,0}$ 와 $f_{ck,0}$ 로 나타내었다. 기호 \wedge 로 표시된 확률변수는 각 공칭값으로 표준화된 확률변수를 의미한다. r 은 강도비라 칭하며 $f_{y,0}/f_{ck,0}$ 로 정의된다. 식(8.1), (8.2)과 같이 공칭강도로 표준화된 강도의 평균은 곧 편심계수를 의미하며, 따라서 식(8.1), (8.2)과 같은 표준화를 통해 공칭강도를 특정하지 않은 일반적인 상황에 대하여 편심계수를 계산할 수 있게 된다.

일반화된 단면에 대하여 MCS를 수행하기 위해 강도비와 철근비를 임의 추출하여 MCS를 수행하였다. 강도비와 철근비를 임의 추출하는 과정은 철근의 항복강도와 콘크리트의 압축강도를 임의 추출하는 과정과 분리하여 독립적으로 수행하였다. 강도비와 철근비는 100만 번 임의 추출하였으며, 임의 추출된 강도비와 철근비별로 철근의 항복강도와 콘크리트의 압축강도를 다시 100만 번씩 임의 추출하였다. 이러한 과정을 통해 휨강도와 압축강도 각각에 대해 100만 개의 편심계수와 100만 개의 변동계수를 계산하였다.

강도비와 철근비는 표8.1과 같이 최소값과 최대값을 가지는 균등분포로 가정하고 임의 추출을 하였다. 철근의 항복강도와 콘크리트 압축강도의 통계특성은 표4.3의 재료저항의 통계특성을 적용하였다. 표4.3에 따라 철근의 항복강도와 콘크리트 압축강도는 모두 대수정규분포를 따르는 것으로 가정하였다.

철근과 콘크리트의 통계특성을 바탕으로 휨강도와 압축강도의 통계특성에 대하여 MCS를 수행한 결과는 표8.2에 정리하였다. 휨강도는 일

반적으로 철근의 항복강도가 지배하게 되므로 표준화된 휨강도의 통계특성은 철근의 항복강도의 통계특성과 비교해볼 수 있다. 표16에 따르면 표준화된 휨강도의 경우, 편심계수의 평균값은 1.083으로 계산되었다. 이는 철근 항복강도의 편심계수인 1.070보다 높은 값이다. 이러한 결과가 나타난 이유는 각 확률변수의 평균값을 식(8.1)의 표준화된 휨강도에 대입해봄으로써 확인할 수 있다. 임의 추출에 사용한 각 확률변수의 평균값을 식(8.1)에 대입해보면 약 1.085로 나타나는데, 이는 편심계수의 평균 정도로 생각할 수 있으며, MCS 결과로 나타난 값 1.083과 유사한 것을 확인할 수 있다. 휨강도의 변동계수의 평균값은 0.065로 계산되었으며, 이는 철근의 변동계수인 0.069보다 작은 값이다. 이러한 결과가 나타난 이유는 표준화된 휨강도 식에서 철근 항복강도의 2차항과 1차항이 서로 부호가 반대로 나타나, 휨강도의 변동성을 줄이는 방향으로 작용했기 때문이라 판단된다.

일반적으로 RC부재의 압축강도는 콘크리트의 압축강도가 지배하게 되므로 표준화된 압축강도의 통계특성은 콘크리트의 압축강도의 통계특성과 비교해볼 수 있다. 표8.2에 따르면 표준화된 압축강도의 편심계수의 평균값은 1.262로 나타나며, 이는 콘크리트의 압축강도의 편심계수인 1.290보다 작은 값이다. 노말라이즈된 휨강도의 편심계수의 경우와 마찬가지로 노말라이즈된 압축강도에 각 확률변수의 평균값을 대입해보면 약 1.261로 계산되며, 이는 MCS 결과로 나타난 1.262와 유사함을 확인할 수 있다. 노말라이즈된 압축강도의 변동계수의 경우엔 평균값이 0.148로 나

타났으며, 이는 콘크리트 압축강도의 변동계수인 0.166보다 작은 값이다. 이러한 결과는 물리적으로 생각해보았을 때, 변동성이 작은 철근의 항복강도의 영향이 추가됨에 따라 RC부재 압축강도의 변동성이 콘크리트 압축강도의 변동성보다 작아지는 것으로 이해할 수 있다.

표8.1 강도비와 철근비의 범위

확률변수	최소값	최대값	분포종류
r	8	12	균등분포
ρ_{ft}	0.005	0.020	균등분포
ρ_{cp}	0.005	0.020	균등분포

표8.2 표준화된 휨강도와 압축강도의 통계특성에 대한 MCS 결과

강도	통계특성	평균	표준편차	최솟값	최댓값	최빈 범위
휨강도	편심계수	1.083	0.005	1.072	1.097	1.082~1.083
	변동계수	0.065	0.001	0.062	0.069	0.064~0.065
압축강도	편심계수	1.262	0.009	1.239	1.283	1.263~1.264
	변동계수	0.148	0.006	0.133	0.162	0.146~0.147

Abstract

Most of the current bridge design codes including Korean Highway Bridge Design Code(Limit State Design) are based on load-resistance factor design which is founded on reliability theory. In load-resistance factor design, which is founded on reliability theory, the safety level is expressed as a reliability index, and the target reliability index should be secured for all the members constituting a structure. However, the reliability indices secured by the load-resistance factors of current Korean Highway Bridge Design Code(Limit State Design) is much higher than the target reliability index. Therefore, in this paper, a load-resistance factor determination method based on optimization is proposed. For the applicability of load-resistance factors to various structural types and load effects, the limit state function is standardized by the total nominal load effect and the concept of load ratios is introduced. The load-resistance factors, which secure the target reliability index uniformly, are calculated by using the objective function that minimizes the error between the required nominal strength calculated by the load-resistance factor and the target strength that accurately secures the target reliability index.

Korean Highway Bridge Design Code(Limit State Design) applies the material factor to the design of reinforced concrete members. It is confirmed that the reliability indices secured by the load-material factors of the Korean Highway Bridge Design Code(Limit State Design) for reinforced concrete members are significantly higher than the target reliability index. Therefore, a method to

determine the material factors based on optimization is proposed. For the flexural and compressive members, the objective function minimizing the errors between the equivalent resistance factor calculated by the material factors and the target resistance factor is constructed and the optimum material factors are calculated. It is confirmed that the calculated load-material factors secure the target reliability index uniformly. It is understood that the calibrated load-resistance and material factors should always be used together. In addition, the concept of calculating the material factor of the Eurocode is understood and some problems are pointed out in the process of the calculation. Solving these problems, the material factors for the Korean Highway Bridge Design Code(Limit State Design) are calculated by the method of the Eurocode and the fundamental problems of the method are pointed out.

Finally, load-resistance and material factors suitable for Korean Highway Bridge Design Code(Limit State Design) are proposed by the optimization-based method described above. It is confirmed that the reliability indices secured by the proposed load-resistance and material factors are approximated to the target reliability index uniformly.

Keywords : Load-Resistance factors, Material factors, Optimization, Reliability index, Korean Highway Bridge Design Code, Eurocode, Code-calibration

Student Number : 2017-26785