

이동센싱윈도우를 이용한 두꺼운 판 내부의 손상 위치 추정

Damage Localization of a Thick Plate with internal defect Using Moving Sensing-Window

김용한* · 박현우** · 이해성***

Kim, Yong Han · Park, Hyun Woo · Lee, Hae Sung

1. 서론

최근 들어, 센서기술, MEMS기술, 그리고 IT기술 등이 비약적으로 발전하면서 항공우주분야의 경우 고가의 무인전투기와 우주왕복선의 날개판과 접합부분의 손상을 탐지하기 위해 스마트 능동센서(Smart active sensor)로부터 발생하는 Lamb파를 이용하여 미세 균열을 탐지하는 연구를 수행하였다[sun,1995].

판에 발생하는 유도파의 특성은 주파수와 판의 두께의 곱의 크기에 지배적인 영향을 받게 되는데, 초음파 영역에서 토목분야에서 사용되는 두꺼운 판의 경우 Lamb파 이론이 유효한 얇은 판과는 다른 양상을 띄게 된다. 먼저, 판의 경계면에서 얇은 판에서 발생하는 Lamb파가 점근적으로 Rayleigh파로 수렴하는 현상이 발생한다[Rose, 1999]. 다른 한편으로, 반무한체에서 두께 방향으로 파의 감쇠만 표현되는 Rayleigh 파 이론과는 달리, 상하 경계면이 존재하는 상태이므로 두께 방향에 대해서 체적파가 발생하게 된다. 특히, 파의 전달방향으로 무한 경계조건이 주어진 경우, 체적파의 이론적 해가 제시되었지만, 파의 전달방향으로 자유경계조건이 주어진 경우에 대해서 체적파의 이론해가 제시된 바가 없다.

이 연구에서는 두꺼운 판의 표면에 부착된 능동센서로부터 발생하는 판두께 방향의 체적파를 이용한 판 내부의 손상탐지기법을 제안한다. 상하 자유면 경계조건이 주어진 경우에 판 내부에 전달되는 체적파 문제를 풀기 위한 근사해법으로서 유한요소법을 사용하였다. 유한요소법으로부터 구한 탄성과 균들을 기존 탄성과 이론에 접목시켜 반해석적으로(semi-analytical) 분석하였고, 이로부터 탄성과 균들 중 내부 균열에 대해 가장 민감하게 반응하는 파가 가진점으로부터 경사방향으로 진행되는 횡방향 체적파임을 규명하였다.

두꺼운 판의 특성상 판의 상면에 길이방향으로 다수의 능동센서를 배치하게 되는데, 한 센서에서 가진된 체적파가 전달될 수 있는 거리는 체적파 감쇠(attenuation)현상으로 인해 유한하다. 이러한 체적파의 유효 도달 거리를 감안하여, 신호 잡음 대비 식별 가능한 크기까지의 거리를 최대 개소로 가지는 센싱 블록을 정의하여 전방으로 이동시키는 이동센싱윈도우(Moving Sensing-Window)기법을 제안하였다. 센싱 블록은 일정 센싱 개소의 끝단 만 가진 및 수신이 되며, 여러 크기의 센싱윈도우를 이용한 결과를 종합적으로 분석하여 손상이 있을 확률이 가장 높은 블록을 찾는다.

내부에 균열을 가지는 두께 50mm의 판에 대한 수치 예제를 수행하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

*정회원. ㈜유신코퍼레이션 기술개발실 부장. 박사과정. E-mail: yhkim88@yooshin.co.kr -발표자
 **정회원. 한국철도공사 철도연구개발센터 차장. 공학박사. E-mail: hwpark91@snu.ac.kr
 ***정회원. 지구환경시스템공학부 부교수. 공학박사. E-mail: chslee@plaza.snu.ac.kr

2. 두꺼운 판에서의 파 전달

기존연구에서 제시되는 탄성체 파전달 이론에는 크게 두가지로서 첫째는 무한경계면에서의 체적파 전달문제, 둘째는 상하면의 자유경계를 가지며 길이방향으로만 전달되는 유도파(guided waves)문제로 구분된다. 이 연구에서 다루는 두꺼운 판 문제는 상하 자유경계면으로 인해 발생하는 유도파의 특성과 두께 방향으로 전파되는 체적파의 특성을 동시에 가지는 복합적인 문제이며 기본적으로 식(1)과 같이 등방성 탄성문제인 Navier 식으로부터 유도된다 [Fung, 1965].

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot \mathbf{u} + \mu\nabla^2\mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2\mathbf{u}}{\partial t^2} \tag{1}$$

식(1)은 Helmholtz 의 분해방법으로 다음과 같이 두 개의 식으로 분리될 수 있다[Fung, 1965].

$$\nabla^2\phi = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}, \quad \nabla^2\mathbf{H} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2\mathbf{H}}{\partial t^2} \tag{2}$$

여기서, ϕ, c_L 은 각각 종파의 포텐셜과 속도계수이며 \mathbf{H}, c_T 는 각각 횡파의 포텐셜과 속도계수로서 식(2)는 일반적인 쌍곡선형 편미분방정식의 형태를 취하며 무한경계조건에 대한 이론적 해가 제시되어 있다. 상하면의 자유경계면을 가지는 판에서의 파인 유도파의 이론해는 식(2)의 포텐셜 ϕ, \mathbf{H} 를 특수한 형태로 가정함으로써 구할 수 있다. 즉, 포텐셜이 판 두께방향으로 시간과 무관한 함수라는 가정하에 포텐셜을 두께에 대해 일정한 상수 형태로 가정하면 Lamb파가 유도되고, 두께에 대해 지수비율로 감소되는 함수로서 가정하면 Rayleigh파의 해가 도출된다[Rayleigh, 1967]. 반면, 두꺼운 판의 경우 포텐셜이 두께방향에 대해 시간의 함수로 표현되므로, 두께 방향으로의 파 전달과 경계면에서의 반사, 모드 전이 현상을 Lamb파 및 Rayleigh파의 이론 해로부터 표현할 수 없다.

이 연구에서는 유한한 상하 경계면을 가지는 두꺼운 판 내부의 파 전달 특성을 고찰하기 위해 FEM에 의한 수치해석 결과와 기존의 탄성파이론을 접목시키는 반해석적 기법을 사용하였다. 해석 예제로는 평면변형 조건의 2차원 알루미늄 판에서의 파 전달문제로 설정하였다. 판 단면의 제원은 두께 50mm 길이 600mm이고, 가진 및 수신용 PZT센서의 제원은 Piezoceramic사의 PSI-5A4E(두께 0.5mm)을 사용하였다. 입력파는 협대협 신호, 가진 주파수는 400kHz로 작은 파장 8mm에 대한 정확도를 확보하기 위해 유한요소를 1mm Q8 정방요소를 적용하였다. 그림 1은 알루미늄판 단면내에 전파되는 탄성파 군에 대한 Von-Mises 응력도이다.

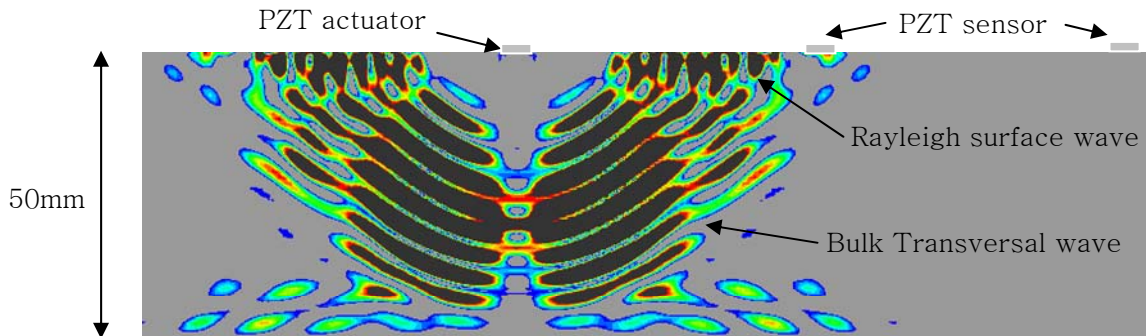


그림 1. PZT센서의 가진에 의한 두꺼운 판 내부의 파 전달 형상

3. 두꺼운 판의 손상 평가

판 내부에 전파되는 체적파는 상하 경계면에 반사되면서 많은 종류의 파로 모드전이 된다. 또한, 파의 크기와 도달시간의 차이에 의한 중첩, 상쇄 현상으로 인해 파군의 분석에 매우 어려움이 따르게 된다.

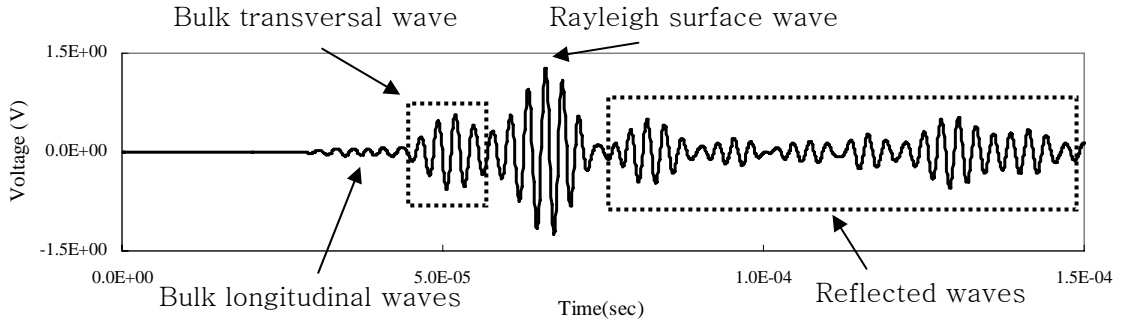


그림 2. 두꺼운 판 내부에 발생하는 파군

그림 2에서 많은 수의 파군이 시간에 따라 직접 혹은 반사되어 모드전이 되면서 전파됨을 알 수 있으며 상대적인 크기를 볼 때 체적 횡파와 랄리 표면파 그리고 반사파중 일부가 확인하다. 이 중 체적 횡파는 판의 하면에서 V형으로 1차 반사되어 온 것으로 파의 진행방향으로 내부균열이 있는 경우 균열에 의한 파의 회절과 반사와 같은 산란현상이 뚜렷하게 일어나는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서, 이 연구에서는 내부 손상진단을 위해 내부균열에 대해 민감하게 반응하는 횡방향 체적파를 사용하였다.

판의 내부에 균열은 식 (3)과 같이 반사로 인한 감쇠된 수신 신호와 감쇠 전 신호의 면적비를 손상인자 I 로 결정하였다.

$$I = 1 - \frac{S_a}{S_b} \quad S_a: \text{손상 전 신호의 면적} \quad S_b: \text{손상 후 신호의 면적} \quad (3)$$

4. 손상 위치 추정

판의 길이가 긴 경우, 판의 전영역에서 손상위치를 추정하기 위해서는 많은 수의 센서를 판의 표면에 설치해야 한다. 이때 판 내부에서의 감쇠현상(attenuation)으로 인해 가진점으로부터 멀어질수록 다른 센서에서 수신되는 횡방향 체적파의 크기는 급격히 감소한다. 이를 위해 파 크기가 분석에 유효한 거리까지의 센서군을 블록단위로 형성하여 센서간 간격 한칸씩 전진시켜 탐색하는 이동센싱원도우 기법을 제안하였다.

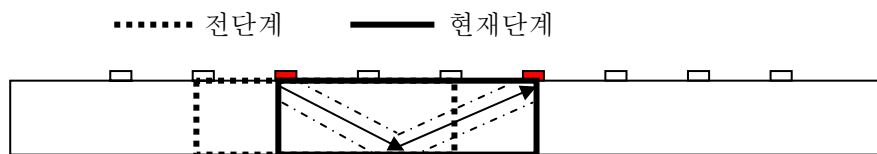


그림 3. 이동센싱창의 개념도

이동센싱창은 한 가진점으로부터 신호식별이 유효한 거리내의 센서까지만 이용하며 탐색 전 영역에 대해 이를 이동시켜 손상 유무를 매 이동단계마다 결정한다. 그림 3처럼 한 센싱창내에서는 창의 양끝단에서만 가진 및 수신을 수행하므로 내부의 체적중과의 이동경로는 항상 V형이 되며 유효탐지 영역(그림 3의 이중쇄선)밖의 비탐지 영역이 발생한다. 이를 위해 여러 개수의 블록을 가지는 센싱윈도우를 정의하여 V의 각도를 다양하게 함으로써 블록내에 비 탐지 영역을 최소화하였다.

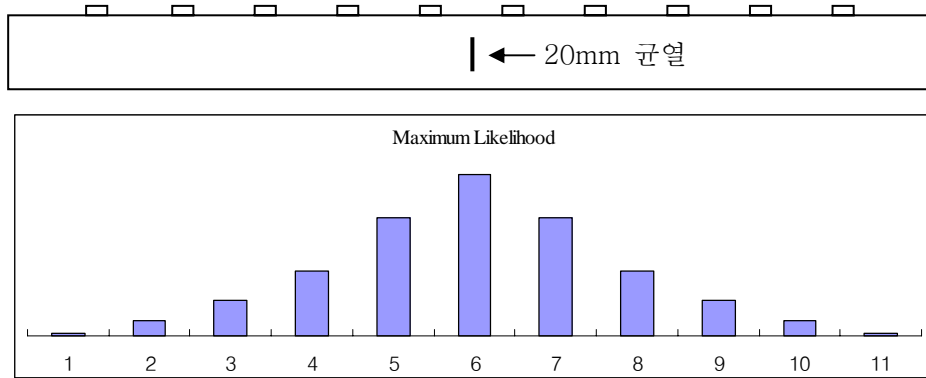


그림 4. 각 이동센싱창의 우도(Likelihood)의 합에 의한 균열 위치 추정 결과

센싱윈도우를 이동시 우도의 값은 블록내 유효탐지영역이 차지하는 비율과 손상지수의 값을 곱하여 계산되며 손상이 없는 블록을 지날 때는 0에 가깝게 된다. 완전히 0이 아닌 이유는 탐색영역 밖의 균열에서 반사되는 파의 영향 때문이다. 우도 분포도는 사용된 센싱윈도우(6개블록까지 적용) 개수만큼 산출되고 그림 4는 이러한 우도분포도들의 합을 나타내며 균열이 위치한 블록에서 최대 우도값을 보이고 있다.

5. 맺음말

토목구조물에 주로 사용되는 두꺼운 판 내부의 손상탐지와 그 위치를 추정하기 위한 연구를 수행하였다. 미소균열을 효과적으로 탐지하기 위해 압전소자형 능동센서를 이용한 직접 파 전파에 의한 방법을 도입하였다. 상하면의 경계조건과 두께 방향으로 전파되는 체적파를 동시에 고려해야 되는 문제를 FEM에 의한 근사 수치해법을 이용하여 풀고 그 결과를 기존 탄성파이론을 접목하여 분석하는 반해석적 기법을 도입하였다. 반해석적 기법을 이용하여 다른 파군과의 식별이 용이하면서 내부 손상에 대해 가장 민감하게 반응하는 파가 횡방향 체적파임을 규명하였다 판의 길이방향으로 손상의 위치를 추정하기 위해 이동센싱윈도우(Moving Sensing-Window)기법을 제안하여 체적파의 감쇠현상을 최소화 하였고 제안된 방법이 효율적임을 수치예제를 통해 입증하였다.

참고문헌

1. I. Viktorov, Rayleigh and Lamb Waves, Plenum Press: New York, 1967.
2. Y.C. Fung, Foundation of Solid Mechanics, Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffs, NJ, 1965.
3. F.P. Sun, Z. Chaudhry, C. Liang, and C.A. Rogers, "Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 6, 134-139, 1995.
4. Joseph L. Rose, Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press 1999.