

저속충격 태핑음을 이용한 복합적층판의 손상검출

Damage Detection in Composite Laminates using Tapping Sound of Low Velocity Impact

김성준[†]·장문호*·안석민**·염찬홍***

Sung Joon Kim, Moon Ho Jang, Seok Min Ahn and Chan Hong Yeom

1. 서 론

구조물 충격시 발생하는 타격음은 구조물 표면의 진동에 의한 것으로 설명할 수 있다. 구조물에 내부손상이 발생하면, 손상이 발생한 부위의 강성이 감소되는 등의 변화가 발생하고 이로 인해 손상이 있는 구조물은 손상이 없는 구조물과 다른 반응을 보이므로 타격 시 생기는 충격하중이력과 음향을 분석을 통하여 구조물의 손상여부를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 태핑 시 발생하는 태핑음 이용하여 구조물의 손상을 평가하는 지표로 사용하고자 한다.

2. 충격해석 및 태핑음 해석

2.1 충격해석

저속충격문제는 충격체와 피충격체의 접촉을 통해 이루어 지므로 정확한 충격문제를 풀기 위해서는 충격체 및 적층판의 운동방정식(1~2)과 이들 사이의 관계를 연결해주는 접촉법칙(3)을 동시에 풀어야 한다. 위의 식(1)과 (2)에서 아래 첨자 r과 p는 각 각 충격체와 적층판을 의미한다.

$$[M]_r \{\ddot{x}\}_r + [K]_r x_r = F_r \quad (1)$$

$$[M]_p \{\ddot{x}\}_p + [K]_p x_p = F_p \quad (2)$$

$$F = f(a) \quad (3)$$

유한요소법(finite element method)을 이용하여 복합적층 구조물의 충격거동을 동역학적인 문제로 해석하는 경우 많은 계산시간이 소요된다고 알려져 있다. Choi[5]는 선형화된 접촉법칙을 이용한 스프링-질량모델을 이용하여 저속충격해석을 수행하였다. 이 모델은 충격체와 적층판의 압입현상을 가상의 스프링요소로 대체함으로써 적층판과 충격체의 거동 및 압입현상을 하나의 문제로 통합하여 해석을 수행하는 것이다. 본 연구에서는 접촉법칙을 선형 스프링요소로

모사하고, 4절점 판 요소를 이용하여 복합적층판을 모사하였다. 해석은 lumped mass에 초기속도(충격속도)를 부여하는 조건으로 동적해석을 수행하였다.

2.2 태핑음(tapping sound) 해석

일반적인 음장의 지배방정식은 파동방정식이며, 이는 음파의 전파과정을 나타내는 지배방정식으로 주어진 압축성 매질 내의 연속방정식, 운동량방정식 그리고 상태방정식으로부터 얻어진다. 잘 알려진 기하학적인 형태 및 좌표계에 대하여는 해가 해석적으로 구하여질 수 있으나, 임의의 형상에 대해서는 해석적으로 구하기 어려움으로, Green 함수를 도입하여 임의의 위치에서 음압을 Helmholtz 적분방정식으로 표현한다. 무한대에서 모든 방사음과 산란파가 바깥으로 진행해야 한다는 Sommerfeld 방사조건을 적용하면 다음과 같은 Kirchhoff-Helmholtz 적분식으로 표현된다.

$$c(\gamma)t(\gamma) = \int_{s_o} \left[\frac{\partial G(r, r_o)}{\partial n} t(r_o) - G(r, r_o) \frac{\partial t(r_o)}{\partial n} \right] dS \quad (4)$$

여기서 $G = \frac{e^{-jkR}}{4\pi R}$, $R = |r - r_o|$ 이며, $\frac{\partial}{\partial n}$ 은 음장 내부로의 법선방향 미분을 나타내고, r_o 는 표면위의 한 점을 의미한다. 계수 $c(\gamma)$ 은 현재 관심있는 또는 계산되는 위치에 따라 다른 값을 갖게 된다. Kirchhoff-Helmholtz 적분식은 표면의 속도 및 가속도에 의존하는 식으로 표현될 수 있는데, 이를 Rayleigh 적분식이라고 한다. 진동하는 판으로부터 방사되는 음압은 아래의 Rayleigh 적분식을 적용하여 계산할 수 있다.

$$t(r, t) = -\frac{\rho_a}{2\pi} \int_{(s)} \frac{1}{|r - r_o|} \frac{\partial^2 W(r_o, t - \frac{|r - r_o|}{c_a})}{\partial t^2} dS \quad (5)$$

여기서 $|r - r_o|$ 는 적층판의 임의의 위치로부터 음압이 계산되는 위치까지의 거리이고, ρ_a 는 공기의 밀도, c_a 는 음속이다. (5)식은 다음과 같이 이산화 된다.

$$t(r, t) = -\frac{\rho_a}{2\pi} \sum_{m=1}^{N_x} \sum_{n=1}^{N_y} \Delta x \Delta y \frac{\partial^2 W(t - \frac{|r - r_o|}{c_a})}{\partial t^2} \quad (6)$$

여기서 $N_x = \frac{l_x}{\Delta x}$, $N_y = \frac{l_y}{\Delta y}$ 이고, l_x, l_y 는 각 변의 길이이다. 해석 시 공기의 밀도는 1.21 kg/m^3 , 음속은 343.0 m/sec 를 적용하였다. 충격 시 발생하는 음압은 충격에 의해 구조물에 야기되는 진동에 의한 가속도 성분과 그 부위의 면적 그리고 음압을 측정하는 위치까지의 거리에 의해 결정

[†] 교신저자; 한국항공우주연구원
E-mail : yaelin@kari.re.kr
Tel : (042) 860-2301, Fax : (042) 860-2604

* 한국항공우주연구원
** 한국항공우주연구원
*** 한국항공우주연구원

된다. 본 연구에서는 충격 시 발생하는 복합 적층판의 가속도 성분을 스프링-질량 모델을 이용하여 계산하고, (6)식을 이용하여 각 위치의 가속도성분이 음압에 주는 영향을 고려하여 측정위치에서의 음압을 계산한다.

2.4 시편에 대한 해석 및 시험평가

손상이 없는 적층판의 저속충격해석 시 적층판의 중앙으로부터 수직으로 15.0 cm 떨어진 위치에서 음압을 측정하였다. 실험을 수행한 적층판의 크기는 19.0 × 19.0 cm²이고, 적층순서는 [0/45/0/-45/0/-45/0/45/90]s, 실험은 충격체가 15°각도에서 회전한 후 적층판과 충돌하도록 하였다.

2.7 층간분리를 고려한 태핑음 해석 및 실험

적층판에 층간분리가 존재하는 경우 태핑음 해석을 통하여 층간분리가 없는 적층판과의 차이점을 평가하였다. 층간분리가 있는 부위는 두께방향으로 절점(Node)을 공유하면서 요소두께를 손상되지 않는 부위의 절반으로 모사하고, 요소 수를 2개로 모델링 하였다. 해석모델은 앞 절의 손상이 없는 시편의 중앙에 5.0 × 5.0 cm²의 층간분리가 시편의 중앙에 두께방향으로 중립면에 존재한다고 가정하였다.

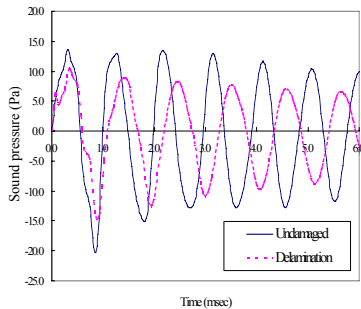


Fig. 1 Comparison of sound pressure histories between undamaged and delaminated case results

Fig. 1은 해석을 통하여 구한 층간분리가 있는 경우와 없는 경우의 태핑음을 비교한 것이다. 두 결과 모두 적층판의 손실계수는 3%로 가정하였다. 층간분리가 있는 경우 전체적인 음압이 감소하고 주파수도 작아짐을 알 수 있다.

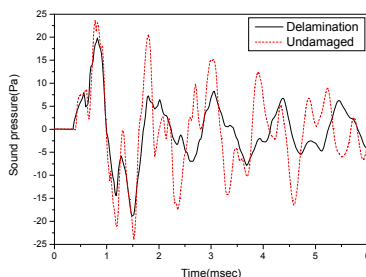


Fig. 2 Comparison of sound pressure histories between undamaged and delaminated case results (fixed condition)

Fig. 2에서 보는 바와 같이 실험을 수행한 결과 층간분리가 있는 경우 전체적인 음압이 감소하고 주파수도 작아짐을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 동전 및 해머(hammer) 등을 이용한 타격 시 발생하는 태핑음을 이용하여 층간분리를 검출하는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 충격 시 발생하는 타격음을 Rayleigh 적분식을 적용하여 해석하였으며, 실험결과와 비교하였다. 또한 해석적인 방법으로 층간분리가 태핑음에 미치는 영향을 검토하였다. 향후 손상이 있는 시편의 태핑실험결과와 해석적인 결과를 비교하고 층간분리가 태핑음에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

후 기

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설 교통기술연구원에서 위탁 시행한 항공안전기술 개발사업으로 수행된 연구임

참고문헌

- 1) 황준석, 김승조, “ 태핑음 비파괴 검사법을 위한 수치 모델링의 실험적 접근,” 한국항공우주공학회 2003년도 춘계 학술발표회 논문집, pp. 207-210.
- 2) Moon, T. C., Kim, H. Y. and Hwang, W., "Natural-frequency reduction model for matrix-dominated fatigue damage of composite laminates," Composite Structures, Vol.62, 2003, pp.19~26.
- 3) Cawley P, Adams R. D., "The mechanics of the coin-tap method of non-destructive testing," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 122, 1988, pp. 299-316
- 4) Schedin S., Lambourge C. and Chaigne A., "Transient Sound Fields from Impacted Plates: Comparison between Numerical Simulations and Experiments," *J. of Sound and Vibration*, Vol.221, No. 3, 1999, pp. 471~490.
- 5) Choi, I. H., "Low-Velocity Impact Analysis and Contact Law on Composite Laminates," *J. of the Korean Society for Composite Materials*, Vol.16, No.1, 2003, pp. 50~57.