

음향을 이용한 복합 적층판의 층간분리 예측 Prediction of Delamination for Composite Laminates Using Sound Radiation

김성준* · 채동철**
Sung Joon Kim and Dong-Chul Chae

Key Words : Sound Pressure(음압), Rayleigh integral equation, Low-velocity impact(저속충격), delamination(층간분리)

ABSTRACT

In this paper, the radiated sound pressure induced by low-velocity impact is obtained by solving the Rayleigh integral equation. For structurally radiated noise, the sound field is directly coupled to the structural motion. Therefore the impact response should be analyzed. It is well known that the presence of the delamination in a composite laminate introduces a local flexibility which changes the dynamic characteristic of the structure. The 2-D simplified delamination model is used to analyze the impact response. And the 3-D non-linear finite element model is developed using gap element to avoid the overlap and penetration between the upper and lower sub-laminates at delamination region. Predicted impact response using 2-D equivalent delamination model are compared with the numerical ones from the 3-D non-linear finite element model.

기호설명

M_1 : 충격체의 질량, M_p : 적층판의 질량
 $P(r,t)$: 음압(Sound pressure)

1. 서론

일반적으로 복합재 구조물의 내부손상은 사람의 눈으로 탐지하기가 불가능하므로 비파괴 검사법을 이용하여 탐지한다. 전통적인 비파괴 검사법은 구조진동파를 이용하는 방법과 X-레이 촬영을 통한 방법 등을 들 수 있다. 하지만 이와 같은 방법은 번거롭고 많은 비용이 든다. 한편 숙련된 검사자들은 동진 등을 이용하여 구조물의 내부손상을 파악한다. 타격 테스트를 이용해서 구조물을 검사할 때 손상의 유무를 알려주는 지표로 많이 사용하고 있는 것은 타격체와 구조물 간의 접촉력의 시간이력과 타격 시에 발생하는 타격음(impact sound) 등이다[1]. 본 연구에서는 층간분리 모델을 이용하여 복합적층판의 손상을 모사하여 저속충격 및 음향해석을 수행하였다. 층간분리 모델은 쉘요소를 이용한 등가의 모델을 이용하였다. 사용된 모델의 타당성을 검증하기 위하여 비선형 3 차원 모델을 이용하여 충격거동을 비교하였다. 층간분리가 없는 적층판에 대한 해

석결과를 이용하여 기본적인 자료를 준비하고 층간분리 영역의 크기를 바꿔가면서 충격하중이력과 음압의 변화를 분석하였다.

2. 충격거동 및 음향해석 방법

구조물에 타격을 가했을 경우 발생하는 타격음의 발생과정은 타격에 의한 구조물 표면의 진동체에 의해 음향이 방사되는 것으로 설명할 수 있다. 구조물에 층간분리가 발생하면, 손상이 발생한 부위의 강성이 감소되는 등의 변화가 발생하고 이로 인해 손상이 있는 구조물은 손상이 없는 구조물과 다른 반응을 보인다[1,2]. 그러므로 타격 시 생기는 충격하중이력과 음향을 분석을 통하여 구조물의 손상여부를 평가할 수 있다.

2.1 충격거동해석

구조물의 타격은 복합적층판의 저속충격 거동해석을 통하여 설명될 수 있다. 저속충격을 받는 복합적층판의 거동을 해석적인 방법으로 규명하고자 하는 연구는 1980 년대 이후 많은 수의 연구자들에 의하여 시도되었으며, 이러한 연구결과들을 분석하고 연구방법들을 비교 검토한 논문도 상당수가 보고되고 있다[3]. 저속충격문제는 충격체와 피충격체의 접촉을 통해 이루어지므로 정확한 충격문제를 풀기 위해서는 충격체 및 적층판의 운동방정식(1~2)와 이들 사이의 관계를 연결해주는 접촉법칙(3)을 동시에 풀어야 한다.

* 한국항공우주연구원

E-mail : yaelin@kari.re.kr
TEL : (042)860-2301 FAX : (042)860-2009

** 한국항공우주연구원, *** 한국항공우주연구원

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

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

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

위의 식(1)과 (2)에서 아래첨자 r 과 p 는 각각 충격체와 적층판을 의미한다. 본 연구에서는 복합적층판의 저속충격문제를 choi[4]가 제안한 선형화된 접촉법칙을 사용하여 범용 유한요소해석 코드인 MSC/NASTRAN 을 활용해서 해석하였다. Fig.1 은 충격문제를 해석하기 위한 스프링-질량 모델이다.

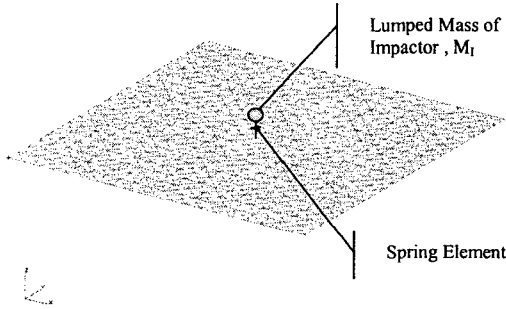


Fig. 1 Spring-Mass element model

2.2 음향해석

구조물의 진동에 의해 방사되는 음압은 다음의 Rayleigh 적분식을 이용하여 표현할 수 있다[5].

$$p(r,t) = -\frac{\rho_a}{2\pi} \int_{(S)} \frac{1}{|r-r_0|} \frac{\partial^2}{\partial t^2} W(r_0, t - \frac{|r-r_0|}{c_a}) dS \quad (4)$$

여기서 $|r-r_0|$ 는 적층판의 임의의 위치로부터 음압이 계산되는 위치까지의 거리이고, ρ_a 는 공기 밀도, c_a 는 음속 그리고 $t - \frac{|r-r_0|}{c_a}$ 는 수음점과 적층판의 거리에 의한 시간지연 이다. (4)식은 다음과 같이 이산화된다.

$$p(r,t) = -\frac{\rho_a}{2\pi} \sum_{l=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} \frac{\Delta x \Delta y}{|r-r_0|} \frac{\partial^2}{\partial t^2} W(t - R_{l,m} / c_a) \quad (5)$$

여기서 $N_x = L_x / \Delta x$, $N_y = L_y / \Delta y$ 이고, L_x, L_y 는 각 변의 길이 이다. 해석 시 공기 밀도는 1.21 kg/m³, 음속은 343.0m/s 를 적용하였다. 충격 시 발생하는 음압은 충격에 의해 구조물에 발생하는 가속도 성분과 그 부위의 면적 그리고 음압을 측정하는 위치까지의 거리에 의해 결정된다. 본 연구에서는 충격 시 발생하는 복합 적층판의 가속도 성분을 2.1 절에서 언급한 스프링-질량 모델을 이용하여 계산하고, (5)식을 이용하여 각 위치의 가속도성분이 음압에 주는 영향을 고려하여 측정 위치에서의 음압을 계산한다.

3. 해석결과 검토

3.1 층간분리 모델 검증

손상을 입은 부위를 Fig.2 와 같이 가정하였다. 손상된 부위는 두께방향으로 절점(Node)를 공유 하면서 층간분리가 존재하는 부위를 기준으로 윗층과 아래층으로 구분하였다. 즉 요소 수를 층간 분리면을 기준으로 두께방향으로 2 개로 모사 하였다. 단순화된 층간분리 모델을 이용한 고유진동수를 해석결과는 시험결과와 잘 일치한다고 보고되었다[6]. 단순화된 층간분리모델에 대한 저속 충격특성을 검증하기 위하여 Fig.3 과 같이 3 차원 비선형 요소를 이용하여 충격해석을 수행하였다. 층간분리된 윗면이 아랫면을 관통하는 현상을 막기 위하여 층간분리면에 갭(gap)요소를 삽입하였다. 갭요소는 압축강성만을 가지고 인장강성은 없도록 하였다.

3.2 층간분리 모델 검토

손상된 부위의 면적을 변화시키면서 충격하중이력과 음압의 변화를 분석하였다. 음압 해석의 용이성을 위해 적층판은 삼각형요소를 사용하였다. 적층판의 적층순서는 [0]₈ 이며, 크기는 15×15cm 이다[Fig. 3]. Case1 의 층간분리 면적은 1.5×1.5cm 이고, Case2 의 층간분리 면적은 4.5×4.5cm 이다.

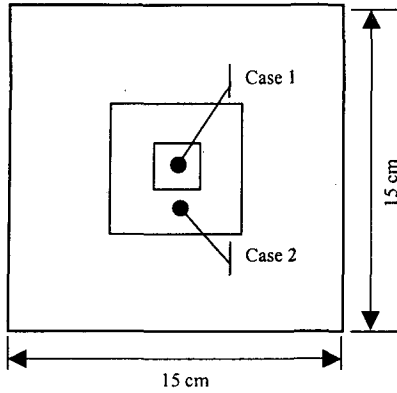


Fig. 2 Configuration of laminate and damage zone

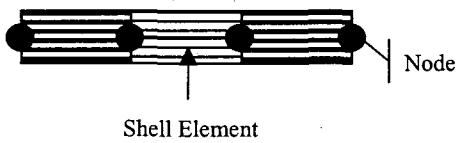


Fig. 3 Simplified Damage Model

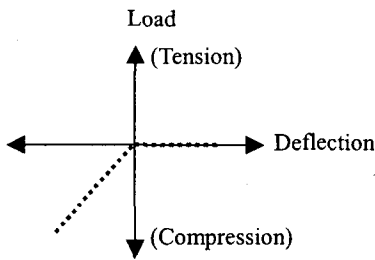
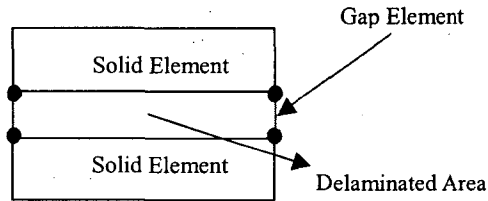


Fig. 4 Laminate with a delamination and gap element stiffness curve used to connect solid element

2.1 절에서 언급한 스프링-질량 모델을 이용하여 복합적층판의 저속충격문제를 해석하였다. 단순화된 층간분리모델과 3 차원 비선형 모델에 대한 해석을 수행하여 충격하중이력을 비교하였다[Fig. 5]. 해석에 사용된 적층판의 물성치와 충격체의 물성은 Table 1 에서 보여주고 있다. 해석은 질량비 35.0(M_I/M_P)이고, 충격체의 속도가 5.0m/sec 인 경우에 대하여 수행하였다.

Table 1 Material properties [3]

Material properties of lamina	$E_1 = 120 \text{ GPa}, E_2 = 7.9 \text{ GPa}$ $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 5.5 \text{ Gpa}$ $\nu_{12} = 0.3$ $\rho = 1582 \text{ kg/m}^3$ Thickness = 0.135 mm
Material properties of impactor	$E = 207 \text{ Gpa}$ $\nu = 0.3$

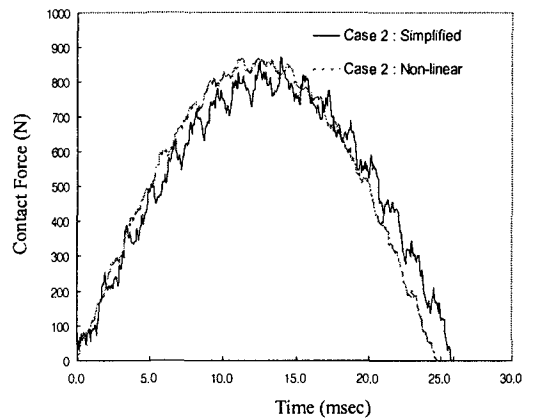


Fig. 5 Impact force histories analyzed using the simplified model and the 3D non-linear model

Fig.5 의 결과로부터 단순화된 층간분리모델은 저속충격 시의 충격거동을 잘 묘사함을 알 수 있었다. Fig.6~7 은 단순화된 층간분리 모델을 이용하여 손상영역의 크기에 따른 충격하중이력의 변화를 보여주고있다. 해석결과로부터 손상영역의 크기가 커질수록 충격하중이 작아지고, 충격체와 복합적층판의 접촉시간이 길어짐을 알 수 있다.

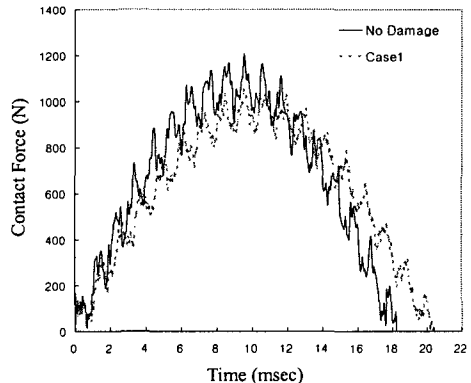


Fig. 6 Impact force histories for case1

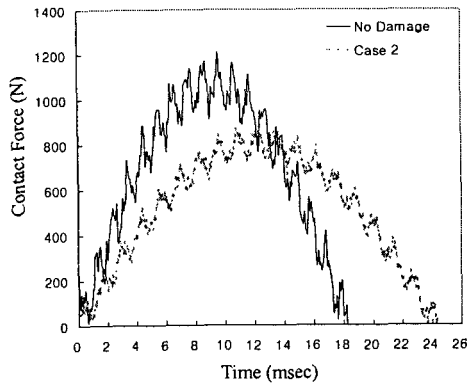


Fig. 7 Impact force histories for case2

3.3 층간분리 평가방법 고찰

동전 등의 작은 중량물에 의한 타격 시 발생하는 충격하중이력 및 타격음을 모사하기 위해 질량 0.074kg 이고, 충격체의 속도가 0.5m/sec 인 조건에 대하여 해석을 수행하였다. Fig.8은 손상영역에 따른 충격하중이력이다. 손상영역이 커질수록 최대충격하중은 작아지고 접촉시간은 길어짐을 알 수 있다. Fig.9는 손상영역의 크기에 따른 음압의 시간이력을 비교한 것이다. 충격 시 발생하는 음압의 손상영역에 따른 변화는 2.2 절에서 언급한 Rayleigh 적분식을 이용하여 해석하였다. 음압을 계산하는 수음점의 위치는 적층판의 중앙에서 0.15m 떨어진 곳 이다. 손상영역이 커질수록 음압의 주파수가 낮아짐을 알 수 있다. 이는 층간분리 영역이 커질수록 적층판의 강성이 작아지기 때문이다. 음압의 크기도 층간분리 영역이 커질수록 대체적으로 작아짐을 보인다.

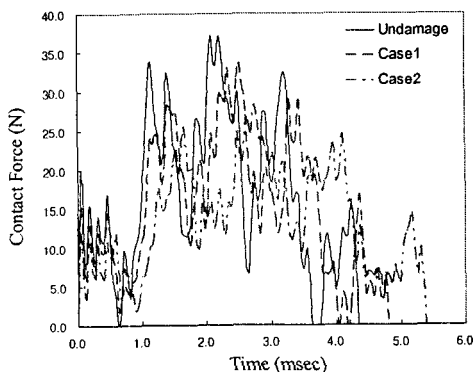


Fig. 8 Comparison of impact force histories

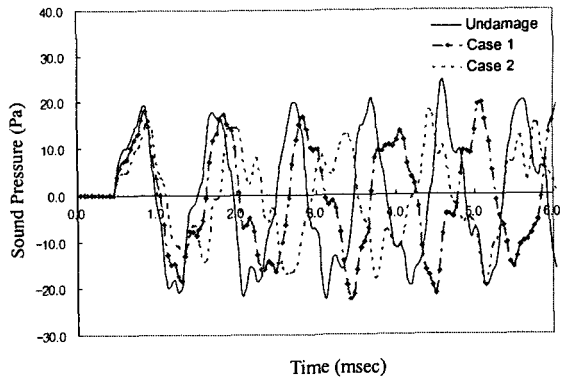


Fig. 9 Comparison of sound pressure histories

3.4 충격위치에 따른 음향변화 분석

층간분리가 있는 적층판(Case2)의 여러 위치(Fig. 10, point 1~3)에 대하여 충격체의 질량이 0.074kg 이고, 속도가 0.5m/sec 인 충격조건에 대하여 음압의 시간이력을 계산하였다.

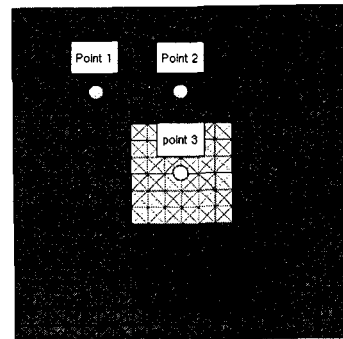


Fig. 10 Impact position

그리고 층간분리가 없는 적층판의 해석결과와 비교하였다(Fig.11~13). Point 3 에 대한 음압의 시간이력이 다른 위치의 해석결과 보다 큰 차이를 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 동전 등을 이용한 타격 시 발생하는 충격하중이력과 음향을 이용하여 복합적층 구조물에 존재하는 층간분리를 평가하는 방법에 대하여 연구를 수행하였다. 스프링-질량 모델을 이용하여 저속충격해석을 수행하였고, Rayleigh 적분식을 이용하여 음압을 계산하였다. 해석결과 복

합적충판에 층간분리가 존재하는 경우 충격 시 발생하는 접촉하중이 작아지고, 접촉시간이 길어짐을 알 수 있었다. 또한 충격 시 발생하는 음압의 진폭이 다소 작아지며 음압의 주파수 또한 낮아짐을 알 수 있었다. 그리고 층간분리가 존재하는 적충판의 여러 위치에 대한 충격 및 음향해석을 수행하여 접촉하중과 음압의 시간이력 특성을 검토하였다. 상기의 결과로부터 적충판의 충격해석 및 음향해석을 통하여 구조물에 존재하는 층간분리의 평가가 가능함을 보였다

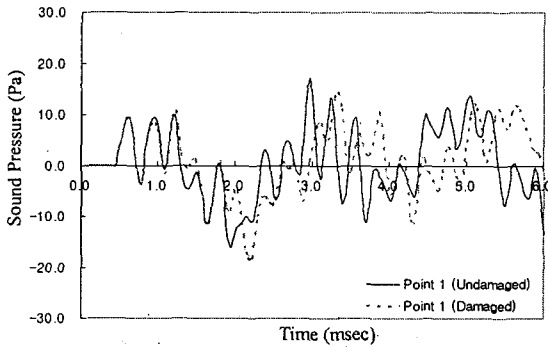
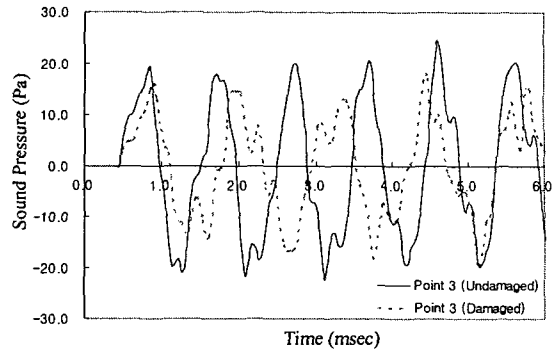


Fig. 11 Sound pressure histories for point 1

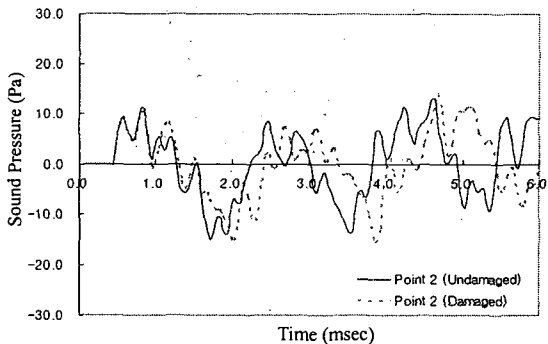


Fig. 12 Sound pressure histories for point 2

참 고 문 헌

- (1) Hwang, J. S., Kim, S. J., 2002, "Comparison of Experiment and Numerical Simulation of Tapping Sound of Laminated Composite Structures," *Proceeding of the Korean Society for Composite Materials*, pp. 165-169.
- (2) Moon, T. C., Kim, H. Y. and Hwang, W. 2003, "Natural-frequency reduction model for matrix-dominated fatigue damage of composite laminates," *Composite Structures*, Vol.62, pp.19~26.
- (3) Choi, I. H., 2003, "Low-Velocity Impact Analysis and Contact Law on Composite Laminates," *J. of the Korean Society for Composite Materials*, Vol.16, No.1, pp. 50~57.
- (4) Choi, I. H., Lim, C. H., 2004, "Low-velocity impact analysis of composite laminates using linearized contact law," *Composite Structures*, Vol.66, pp.125~132.
- (5) Schedin S., Lambourge C. and Chaigne A., 1999, "Transient Sound Fields from Impacted Plates: Comparison between Numerical Simulations and Experiments," *J. of Sound and Vibration*, Vol.221, No. 3, pp. 471~490.
- (6) Kessler, S.S et al., 2002, "Damage detection in composite materials using frequency response methods," *Composites, Part B* Vol.33, pp. 87-95