

# 음압을 이용한 복합 적층판의 손상평가

김성준<sup>†</sup> · 이상욱\* · 채동철\* · 김성찬\*

## Estimation of damage for composite laminates using sound pressure

Sung Joon Kim · Sang Wook Lee · Dong Chul Chae · Sung Chan Kim

**Key Words :** Sound Pressure, Rayleigh integral equation, Low-velocity impact, Spring-mass model

### Abstract

The radiated sound pressure induced by low-velocity impact is obtained by solving the Rayleigh integral equation. This paper established the sound analysis procedure using impact analysis model. For structurally radiated noise, the sound field is directly coupled to the structural motion. Therefore the impact response should be analyzed. The impact response is computed using the spring-mass model. And the influence of damage on the sound pressure and impacted force history of laminated were investigated. The results show that both radiated sound pressure and impact force history are strongly influenced by damage on laminated.

### 기호설명

$M_I$ : 충격체의 질량,  $M_p$ : 적층판의 질량

$P(r;t)$ : 음압(Sound pressure)

### 1. 서 론

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 동전이나 타격망치들을 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[2]. 본 연구에서는 손상이 없는 복합 적층판에 대한 충격하중이력과

음압(sound pressure)을 계산하여 기본적인 기초자료를 준비하고 복합 적층판의 손상영역의 크기에 따른 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 내부손상이 발생하면, 손상이 발생한 부위의 강성이 감소되는 등의 변화가 발생하고 이로 인해 손상이 있는 구조물은 손상이 없는 구조물과 다른 반응을 보인다[2,4]. 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 1980년대 이후 많은 수의 연구자들에 의하여 시도되었으며, 이러한 연구결과들을 분석하고 연구방법들을 비교 검토한 논문도 상당수가 보고되고 있다[1]. 저속충격문제는 충격

<sup>†</sup> 한국항공우주연구원

E-mail : yaelin@kari.re.kr

TEL : (042)860-2301 FAX : (042)860-2009

\* 한국항공우주연구원,

체와 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.

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

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

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

위의 식(1)과 (2)에서 아래첨자  $r$  과  $p$  는 각각 충격체와 적층판을 의미한다. 본 연구에서는 복합적층판의 저속충격문제를 Choi[1]가 제안한 선형화된 접촉법칙을 사용하여 범용 유한요소해석 코드를 활용해서 해석하였다. Fig.1 은 충격문제를 해석하기 위한 스프링-질량 모델이다. 본 연구에서는 접촉하중과 압입량의 관계를 정의하는 접촉법칙이 적층판의 충격거동 해석결과에 미치는 영향이 작다고 가정하여 선형화된 스프링요소를 사용하여 해석하였다.

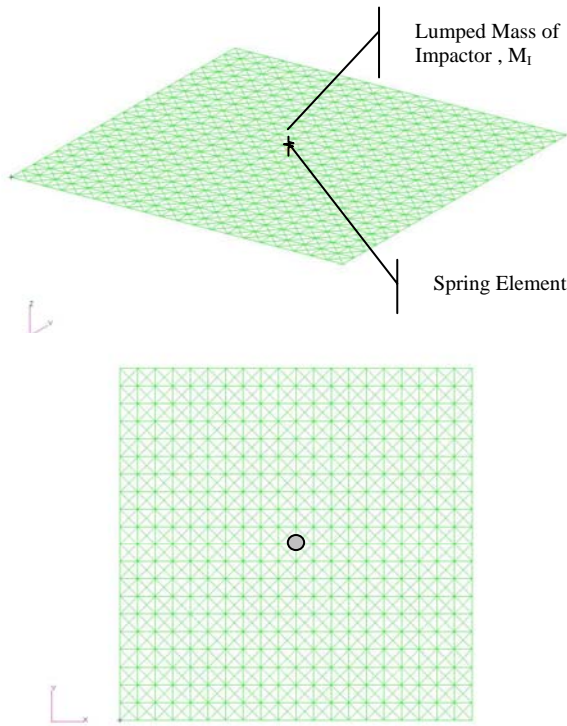


Fig. 1 Spring-Mass element model

2.2 음향해석

구조물의 진동에 의해 방사되는 음압은 다음의

Rayleigh 적분식을 이용하여 표현할 수 있다[3].

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

여기서  $|r-r_0|$ 는 적층판의 임의의 위치로부터 음압이 계산되는 위치까지의 거리이고,  $\rho_a$ 는 공기 밀도,  $c_a$ 는 음속이다. (4)식은 다음과 같이 이산화된다.

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

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  $1.21 \text{ kg/m}^3$ , 음속은  $343.0 \text{ m/s}$  를 적용하였다. 충격 시 발생하는 음압은 충격에 의해 구조물에 야기되는 진동에 의한 가속도 성분과 그 부위의 면적 그리고 음압을 측정하는 위치까지의 거리에 의해 결정된다. 본 연구에서는 충격 시 발생하는 복합적층판의 가속도 성분을 2.1 절에서 언급한 스프링-질량 모델을 이용하여 계산하고, (5)식을 이용하여 각 위치의 가속도성분이 음압에 주는 영향을 고려하여 측정위치에서의 음압을 계산한다.

3. 해석결과 검토

3.1 손상부위 유한 요소모델링

손상을 입은 부위를 Fig.2 와 같이 강성이 저하되는 것으로 단순화하여 가정하였다. 즉 손상된 부위는 두께방향으로 절점(Node)를 공유하면서 요소두께를 손상되지 않는 부위의 절반으로 가정하고, 요소 수를 2 개로 모델링 하였다. 손상된 부위의 면적을 변화시키면서 충격하중이력과 음압의 변화를 분석하였다. 음압 해석의 용이성을 위해 적층판은 삼각형요소를 사용하였다. 적층판의 적층순서는 [0]<sub>8</sub> 이며, 크기는  $15 \times 15 \text{ cm}$  이다[Fig. 3]. 경계조건은 4 단 고정지지이다. Case 1 의 면적은  $1.5 \times 1.5 \text{ cm}$  이고, Case 2 의 면적은  $4.5 \times 4.5 \text{ cm}$  이다.

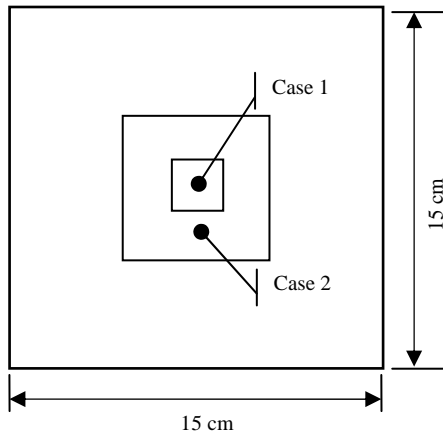


Fig. 2 Configuration of laminate and damage zone

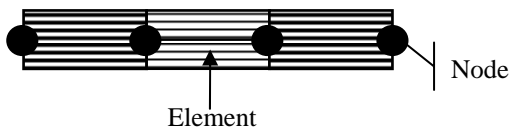


Fig. 3 Simplified Damage Model

3.2 충격거동해석

2.1 절에서 언급한 스프링-질량 모델을 이용하여 복합적층판의 저속충격문제를 해석하였다. 해석에 사용된 적층판의 물성치와 충격체의 물성은 Table 1 에서 보여주고 있다. 해석 은 질량비 35.0( $M_I/M_P$ ) 이고, 충격체의 초기속도가 5.0m/sec 인 경우에 대하여 수행하였다.

Table 1 Material properties [1]

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.4~5 는 손상영역의 크기에 따라 충격하중이력의 변화를 보여주고 있다. 손상영역의 크기가 커질수록 충격하중이 작아지고, 충격체와 복합적층판의 접촉시간이 길어짐을 알 수 있다.

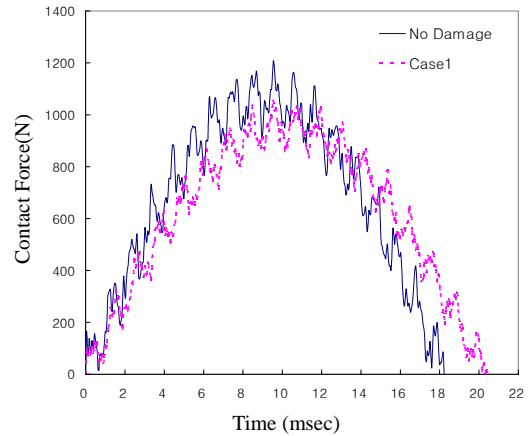


Fig. 4 Impact force histories for Case1

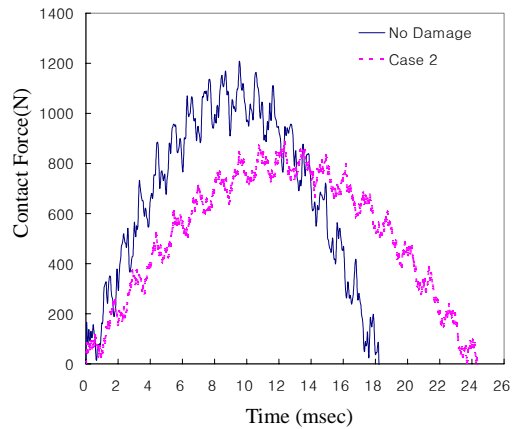


Fig. 5 Impact force histories for damage\_zone2

3.3 음압해석

충격 시 발생하는 음압의 손상영역에 따른 변화를 2.2 절에서 언급한 Rayleigh 적분식을 이용하여 해석하였다. Fig. 6~7 는 손상영역의 크기에 따른 음압의 시간이력을 보여주고 있다. 손상영역이 커질수록 음압의 진폭이 다소 작아짐을 알 수 있다.

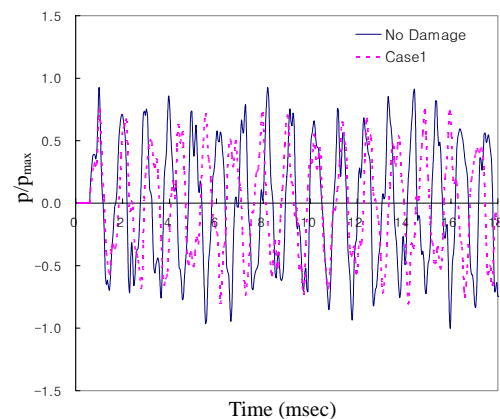


Fig. 6 Sound pressure response for Case1

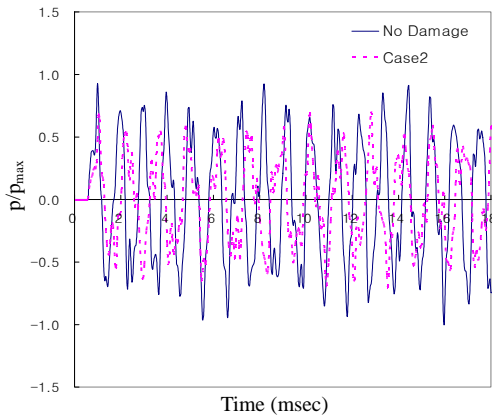


Fig. 7 Sound pressure response for Case2

Fig.8~10 은 음압의 시간이력을 주파수 분석을 한 것으로 손상영역이 커질수록 음압의 주파수가 낮아짐을 알 수 있다. 음압은 충격위치로부터 20cm 높은 위치에서 계산된 값이다.

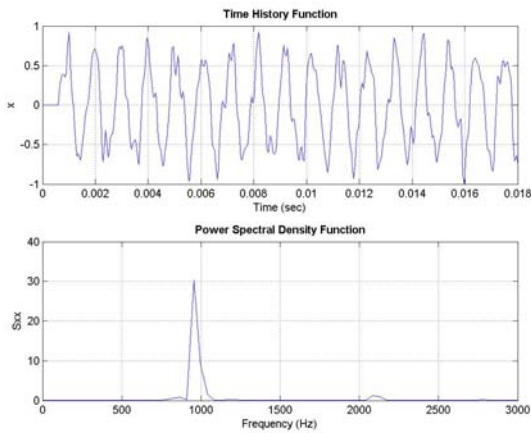


Fig. 8 Response spectra for No damaged laminate

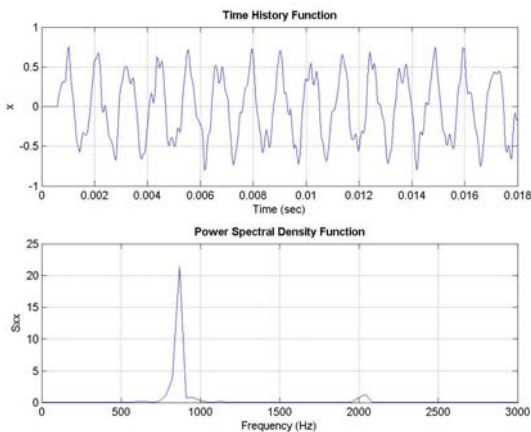


Fig. 9 Response spectra for Case1

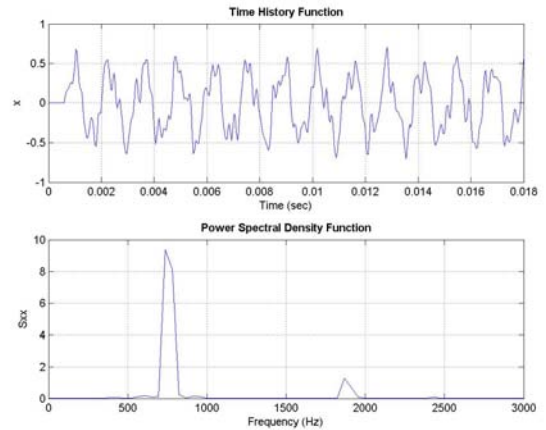


Fig. 10 Response spectra for Case2

Fig.11 에는 음향해석을 수행하는 절차를 정리하였다.

### 3.4 해석 절차 정리

앞 절에서 언급한 음향해석 절차를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 스프링-질량 모델을 이용한 충격해석  
스프링-질량 모델을 이용한 충격해석을 통하여 충격하중이력과 유한요소 각 절점의 가속도 성분을 계산한다.
- 2) 음압 해석  
충격해석을 통하여 얻은 각 절점의 가속도 성분을 이용하여 Rayleigh 적분식을 계산한다. 이 과정에서 음압을 측정하는 위치와 각 절점의 거리 차 때문에 생기는 시간 지연효과를 고려하여야 한다.

## 4. 결론

본 연구에서는 복합적층판이 손상을 입게 되는 경우 충격하중이력의 변화와 음압의 변화에 대하여 고찰하였다. 해석결과 복합적층판이 손상을 입게 되는 경우 충격 시 발생하는 접촉하중이 작아지게 됨을 알 수 있었다. 또한 복합적층판이 손상을 입게 되는 경우 충격 시 발생하는 음압의 진폭이 다소 작아지며, 주파수 분석결과 음압의 주파수 또한 낮아짐을 알 수 있었다. 상기의 결과로부터 적층판의 충격해석을 통하여 구조물의 손상평가가 가능함을 보였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 21 세기 프런티어 사업인 스마트 무인기 기술개발사업의 연구비 지원으로 수행된 결과의 일부이며, 지원에 감사를 표하는 바입니다.

### 참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.