

## 論文

## 손상이 있는 복합적층판의 충격거동 해석

김성준\*, 홍창호\*\*

## Impact Behavior Analysis on Composite Laminate with Damages

Sung Joon Kim\* and Chang Ho Hong\*\*

## ABSTRACT

To detect the damage in composite structure, nondestructive evaluation techniques are widely used. Tapping test is perhaps the most common technique used for the detection of damage in composite laminates. The method is accomplished by tapping the inspection area with light hammer-like device. The tapping test has the ability that indicates damages in a structure due to a localized change of stiffness. The change in vibration signature may be detected by measurement of the dynamic contact force during impact. In this study, it has been shown that the characteristics of impact force histories from a structure during tapping are changed by the presence of damage such as surface crack and delamination. And impact response analysis has been performed on composite rotor blade with crack to investigate the effect of damage.

## 초 록

복합재 구조물의 손상을 탐지하기위해 비파괴 검사법이 폭넓게 사용되고 있다. 태핑 시험은 복합적층판의 손상을 탐지하는데 가장 일반적으로 사용하는 방법이다. 이 방법은 가벼운 해머 같은 장치를 이용하여 검사부위를 두드리고, 국부적인 강성변화를 이용하여 구조물의 손상을 평가한다. 진동신호의 변화는 동적인 접촉하중을 측정하여 탐지할 수 있다. 본 연구에서는 구조물에 층간분리나 표면균열 등의 손상이 존재하는 경우 태핑 시 충격하중이력의 특성이 변하는 것을 보였다. 그리고 손상의 영향을 검토하기위해 균열이 있는 복합재 로터블레이드에 대한 충격해석을 수행하였다.

**Key Words** : Impact Response(충격 거동), Delamination(층간분리), Crack(균열)

## 1. 서 론

일반적으로 복합재료 구조물은 적층판 형태의 얇은 구조물로 라미나(lamina)를 적층하여 제작한다. 그러므로 제작 시 불량이나 운용 중에 발생하는 충격 등에 의한 손상이 발생할 수 있다. 복합재료 주구조물 내부의 손상은 사람의 눈으로

탐지하기가 불가능함으로 비파괴 검사법을 이용하여 탐지한다. 항공기 등의 구조물은 시각적으로 손상을 검사하는 방법이 통상적으로 사용되어 왔다. 이 방법은 시스템을 중단하고 해체하는 작업이 요구된다. 그러나 이러한 해체작업을 통한 검사가 어려운 원자력 발전소, 항공기 구조물, 다리 같은 경우에는 쉽게 분해할 수 없는 방법으로 결합되어있다. 이러한 경우 정기적으로 데이터를 측정하고 분석하여 손상을 알려주는 건전성 모니터링(health monitoring system)이 필요하다. 1950년대부터 다양한 형태의 구조물에 대한 손상 검출 연구가 선행되어 왔다. 그리고 1980년대 말

† 2009년 7월 29일 접수 ~ 2009년 12월 3일 심사완료

\* 정희원, 한국항공우주연구원

교신저자, E-mail : yaelin@kari.re.kr

대전광역시 유성구 어은동 45

\*\* 정희원, 충남대학교 항공우주공학과

부터는 구조물의 손상의 크기와 위치를 찾아내는 여러 방법들이 연구되어 왔다. 이러한 연구결과들 중에서 손상의 크기에 따라 구조물의 동특성이 변화한다는 것을 이용하여 구조물의 손상을 검출하기 위한 기법들이 여러 참고 문헌에 소개되고 있다[1]. Kim 등은 태핑 시 발생하는 충격음을 이용하여 구조물의 손상을 판단하기 위한 해석적인 방법을 제시하고 실험결과와 비교하였다[2]. 본 연구에서는 동전이나 타격망치 등을 이용하여 구조물을 두드렸을 때 발생하는 접촉력의 시간이력을 이용하여 구조물의 손상을 검출하기 위해 복합적층판에 손상이 있는 경우에 대한 충격해석 및 실험을 수행하였다. 이를 바탕으로 향후 태핑 시 발생하는 충격거동을 이용하여 구조물의 손상을 평가하려한다.

## II. 충격해석 및 시험평가

### 2.1 충격해석방법 검토

태핑테스트는 저속충격 거동해석을 통하여 설명될 수 있다. 저속충격문제는 충격체와 피충격체의 접촉을 통해 이루어지므로 정확한 충격문제를 풀기 위해서는 충격체 및 적층판의 운동방정식과 이들 사이의 관계를 연결해주는 접촉현상을 동시에 해석해야 한다. LS-DYNA 등의 충격전용 프로그램은 충돌 시의 접촉면을 계산하면서 충격체와 피충격체의 운동방정식을 동시에 계산한다. 이보다 조금 단순한 방법은 아래의 식 (1)~(3)과 같이 충격체와 피충격체의 접촉하중이 함수의 형태로 주어지는 경우이다. 식(1)과 (2)에서 아래첨자  $r$ 과  $p$ 는 각각 충격체와 적층판을 의미한다.

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

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

$$F = f(\alpha) \tag{3}$$

Tan과 Sun은 유한요소법을 이용하여 저속충격문제를 해석하였다. 적층판은 2차원 평판요소를 사용하고 충격체는 1차원 보요소를 사용하였으며 접촉법칙을 이용하여 두 방정식을 연결하였다[3]. Choi[4]는 선형화된 접촉법칙을 이용한 스프링-질량모델을 이용하여 저속충격해석을 수행하였다. 이 모델은 충격체와 적층판의 압입현상을 스프링요소로 대체함으로써 적층판과 충격체의 거동 및 압입현상을 하나의 문제로 통합하여 해석을 수행하는 것이다. 본 연구에서는 접촉법칙을 선형 스프링요소로 모사하고, 4절점 판 요소

를 이용하여 복합적층판을 모사하였다. 해석은 lumped mass에 초기속도(충격속도)를 부여하는 조건으로 동적해석을 수행하였다. Shivakumar 등[5]은 유한요소법을 사용하지 않고 스프링-질량 모델을 이용하여 효과적으로 충격하중이력을 예측하였다. 이 연구에서는 접촉에 의한 국부적인 압입(indentation)과 횡 방향의 전단변형 에너지 및 굽힘 에너지를 고려하였으며, 두께가 얇은 적층판은 저속충격 시 접촉에너지를 무시할 수 있음을 보였다. 그러나 그들의 연구는 횡 방향으로 등방성(isotropic) 재료물성을 갖는 원형 적층판에 제한되었다. 본 논문에서는 범용유한요소 프로그램인 MSC/NASTRAN을 이용하여 충격문제를 해석하였다.

### 2.2 단순화된 충격해석

복잡한 형상의 충격체에 대한 충격해석의 경우 스프링-질량모델을 이용하여 충격해석을 하는 경우 모델링 및 계산에 많은 시간이 소요된다. Fig. 2는 Fig. 1의 충격체를 3차원 요소로 모델링한 형상이다. 본 연구에서는 Kim[2] 등이 제안한 등가질량을 이용하여 충격해석을 수행하였다. 등

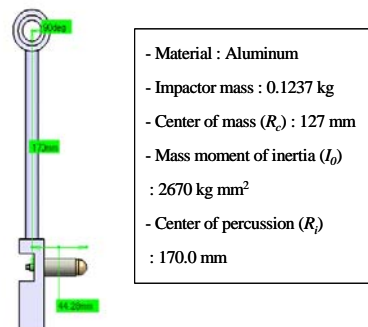


Fig. 1. Configuration of type A impactor

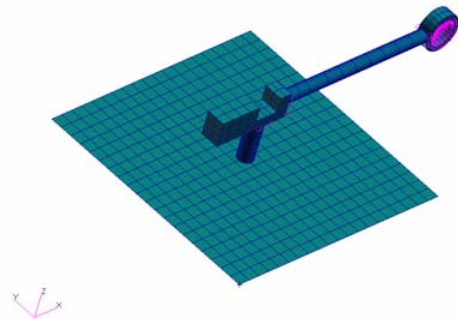


Fig. 2. Detailed finite element model for impact analysis

Table 1. Material properties

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| Material properties of lamina   | $E_1 = 132.0 \text{ GPa}, E_2 = 8.0 \text{ GPa}$           |
|                                 | $G_{12}=G_{13}=3.74 \text{ GPa}, G_{23}= 1.87 \text{ GPa}$ |
|                                 | $\nu_{12} = 0.3$   |
|                                 | $\rho = 1605 \text{ kg/m}^3$                               |
|                                 | Thickness = 0.143 mm                                       |
| Material properties of impactor | $E = 207 \text{ GPa}$                                      |
|                                 | $\nu = 0.3$  |

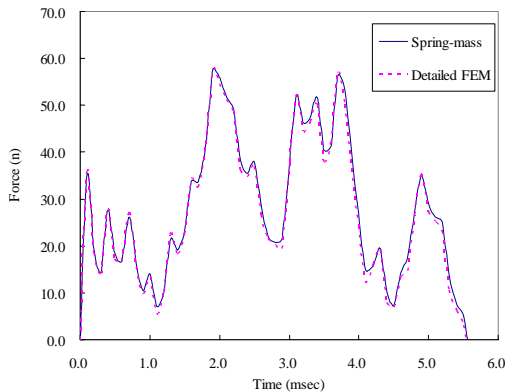


Fig. 3. A comparison of impact force histories between detailed FEM model and simplified spring - model when the impact velocity is 0.954 m/sec

가 질량을 이용한 저속충격해석 모델의 타당성을 평가하기 위하여 Fig. 1의 충격체를 수직면으로부터 30° 각도에서 낙하시키는 경우 발생하는 충격하중이력을 앞서 언급한 두 가지 모델을 이용하여 해석하였다. 해석 대상은 시편의 형상은  $19.0 \times 19.0 \times 0.114 \text{ cm}$  이고, 적층순서는  $[0/90]_{2s}$ 이다. 경계조건은 고정지지 조건이며 해석에 사용한 재료의 물성은 Table 1과 같다.

Fig. 3은 충격거동해석을 수행한 후 충격체의 끝단에서 충격하중이력을 비교한 결과이다. 두 모델의 결과가 일치함을 알 수 있다.

Fig. 3의 결과로부터 등가질량을 이용하여 저속충격해석을 수행하는 경우 복잡한 충격체를 모델링할 필요가 없으며 전체 모델의 자유도가 작아지므로 해석시간이 단축됨을 알 수 있다.

### 2.3 기하학적 비선형 효과 검토

적층판의 두께가 얇고 충격체의 질량이 비교적 큰 경우 복합적층판의 충격거동문제는 전단변형과 대치짐을 동시에 고려한 비선형(nonlinear)

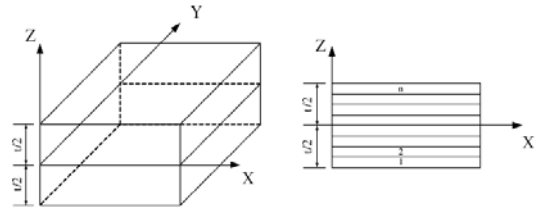


Fig. 4. A reference laminate coordinate

해석을 해야 한다. 만일 얇은 판의 충격거동해석에서 대치짐을 고려하지 않고 전단변형만을 고려하여 선형해석을 할 경우 적층판의 박막효과(membrane effect)가 무시되어 충격하중이 작게 평가되며 적층판의 내부에 작용하는 응력에 대한 평가도 작게 된다. 1차 전단변형(first order shear deformation theory) 판이론의 변위장은 적층판이 Fig. 4와 같다면 다음과 같이 정의된다.  $u, v, w$ 는  $x, y, z$ 방향의 변위이며,  $u^0, v^0, w^0$ 는 각 방향의 중립면의 변위이다. 또한  $\theta_x, \theta_y$ 는 각각  $x, y$ 축에 수직인 단면의 회전을 의미한다.

$$u(x, y, z) = u^0(x, y) + z\theta_x(x, y) \quad (4)$$

$$v(x, y, z) = v^0(x, y) + z\theta_y(x, y)$$

$$w(x, y, z) = w^0(x, y)$$

변형률-변위 관계식은 다음과 같다.

$$\epsilon = \epsilon_m + z\epsilon_b \quad (5)$$

$$\epsilon_b = \left\{ \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \quad \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \quad \frac{\partial \theta_x}{\partial y} + \frac{\partial \theta_y}{\partial x} \right\}^T \quad (6)$$

$$\epsilon_m = \epsilon_m^0 + \epsilon_t$$

$$\epsilon_m^0 = \left\{ \frac{\partial v_0}{\partial x} \quad \frac{\partial v_0}{\partial y} \quad \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right\}^T \quad (7)$$

$$\epsilon_t = \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \quad \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right\}$$

여기서  $\epsilon_t$ 는 기하학적 비선형 항이다.

비선형효과를 검토하기 위하여 4변이 고정지지 조건이고, 시편의 크기는  $19.0 \times 19.0 \times 0.114 \text{ cm}^3$ , 적층순서  $[0/90]_{2s}$ 인 경우에 대하여 저속충격해석을 수행하였다. 충격조건은 Type B의 충격체가 회전 중심을 기준으로 수직면에서 15° 위치에서 자유 낙하하여 적층판과 충돌하는 경우이다[Fig. 5].

Fig. 5에서는 충격하중이력에 기하적인 비선형성이 나타나는다. 정적해석을 통하여 기하학적인

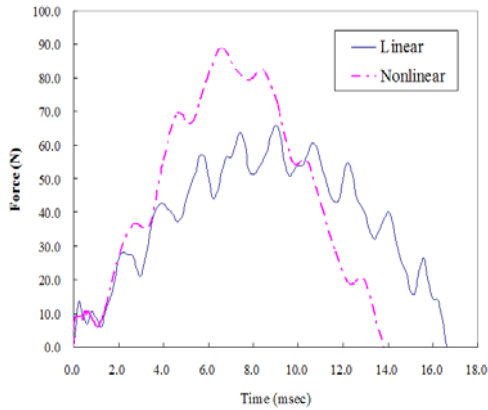


Fig. 5. Comparison of impact force histories between nonlinear and linear analysis for  $[0/90]_{2s}$  laminate

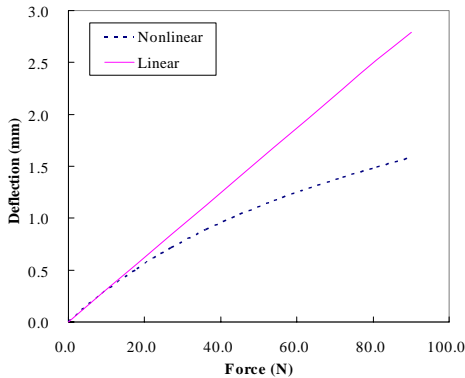


Fig. 6. Comparison of deflection between linear and non-linear analysis

비선형효과를 검토하기 위하여 충격 시 발생하는 최대하중인 90.0 N의 집중하중을 충격이 되는 절점에 가하고 최대변위를 해석하였다.

저속충격 문제 중 충격체의 질량이 적층판의 질량보다 크고 접촉시간이 비교적 긴 경우 최대 정적하중을 이용한 선형해석결과를 이용하여 충격 시의 변위를 평가할 수 있다. Fig. 6은 선형해석과 비선형해석 결과를 비교한 것이다. 적층판의 두께는 1.14 mm이고, 최대 처짐량은 1.58 mm 이다. 정적해석 결과로부터 기하학적인 비선형효과가 나타남을 확인할 수 있다.

### 2.4 해석 및 실험 결과분석

손상이 없는 시편에 대한 저속충격해석을 등가질량을 이용한 스프링-질량모델을 이용하여 해

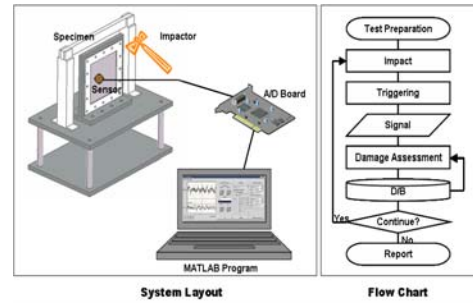


Fig. 7. Systematic diagram of tapping test system

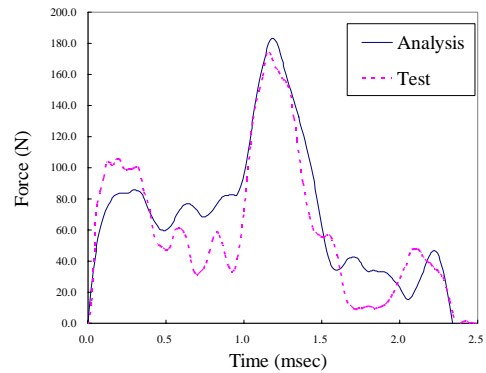


Fig. 8. Comparison of impact force histories between test and analysis for Type A impactor for  $[0/45/0/-45/0/-45/0/45/90]_s$  laminate

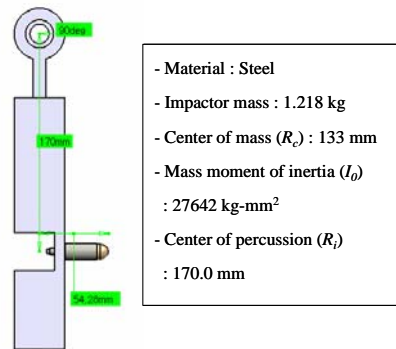


Fig. 9. Configuration of type Type B impactor

석하고 이를 시험결과와 비교하였다. Fig. 7은 테핑시험 장비의 개략도이다. Fig. 8은 Type A의 충격체가 초기속도 0.954 m/sec의 속도로 적층판과 충돌했을 경우 해석결과와 시험결과를 비교한 것이다. 실험을 수행한 적층판의 크기는 19.0 × 19.0 cm이고, 적층순서는  $[0/45/0/-45/0/-45/0/45/90]_s$

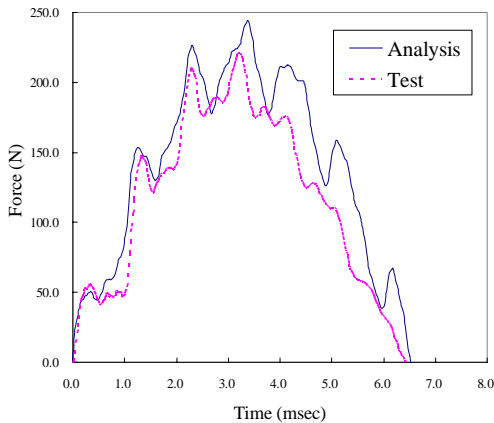


Fig. 10. Comparison of impact force histories between test and analysis for Type B impactor for  $[0/45/0/-45/0/-45/0/45/90]_s$  laminate

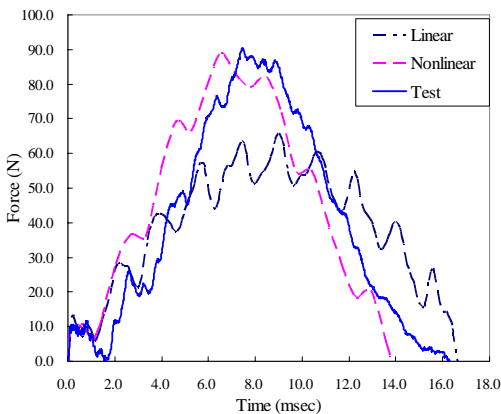


Fig. 11. Comparison of impact force histories between test and analysis for Type B impactor for  $[0/90]_{2s}$  laminate

이다. Fig. 10은 Fig. 9의 Type B 충격체가 초기 속도 0.478 m/sec로 적층판과 충돌했을 경우 해석결과와 시험결과를 비교한 것이다.

Fig. 11은 시편의 적층순서가  $[0/90]_{2s}$ , 4변이 고정지지 조건인 경우 충격체가  $15^\circ$  회전한 후 충돌하는 조건을 해석 및 시험을 수행하여 비교한 결과이다.

해석 및 실험결과로부터 적층판이 얇은 경우 충격하중이 작더라도 기하학적 비선형효과가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 실험결과와 비선형해석결과가 차이를 보이는 것은 고정지지 경계조건을 구현하기 위해 시편을 볼트를 이용하여 치

구에 고정을 시키게 되는데, 이는 실험상의 시편의 경계조건이 이론적인 해석상의 경계조건을 만족시키지 못하기 때문으로 생각된다. 즉 비선형 해석의 경우에는 박막효과(굽힘 변형이 면내변형률에 미치는 효과)를 고려하기 때문에 고정지지 조건의 경우에 경계 단에서의 면내변위의 고정이 중요한 의미를 지니게 되는데, 실제 실험상에서는 볼트를 이용하여 시편을 고정하기 때문에 시편과 고정장치 사이의 마찰력만으로 시편의 면내변위를 방지할 수 없기 때문이다[6].

## 2.5 손상이 있는 적층판의 충격거동

### 2.5.1 층간분리가 있는 적층판의 거동

$5.0 \times 5.0 \text{ cm}^2$ 의 층간분리가 적층판의 중앙에 있는 경우에 대한 충격해석 및 실험을 수행하였다. 적층판의 적층순서는  $[0/90]_{2s}$ , 4변이 고정지지 조건이고 층간분리는 두께방향으로 중립면에 위치한다. 충격해석은 Kim[2] 등이 사용한 층간분리 모델과 등가질량 모델을 이용하여 수행하였다.

Fig. 12는 type B의 충격체를  $15^\circ$  회전시킨 후 낙하시켜 적층판에 충돌시키는 조건에 대한 결과이다. 층간분리가 있는 경우 적층판의 국부적인 강성이 감소하므로 최대 충격하중은 작아지고 접촉시간이 길어짐을 확인할 수 있다.

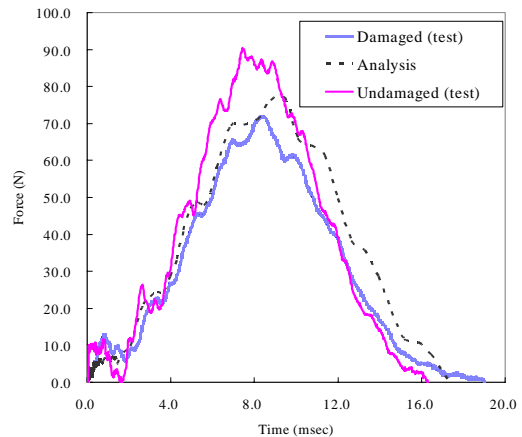


Fig. 12. Comparison of impact force histories between damaged and undamaged results

### 2.5.2 균열이 있는 적층판의 거동

Fig. 13은 적층판에 존재하는 균열을 모사하기 위한 모델이다. 균열이 있는 부위의 절점(node)을 분리하여 균열을 모델링하였다[7]. 적층판의 크기는  $19.0 \times 19.0 \text{ cm}$ , 균열의 길이는 38.0 mm

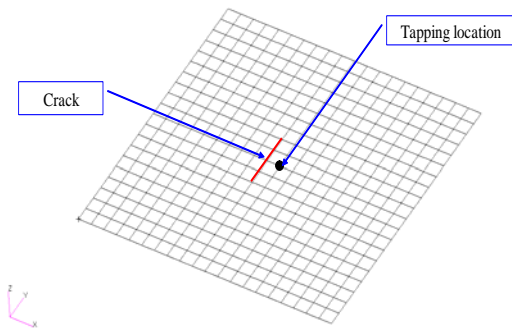


Fig. 13. Finite element model for crack

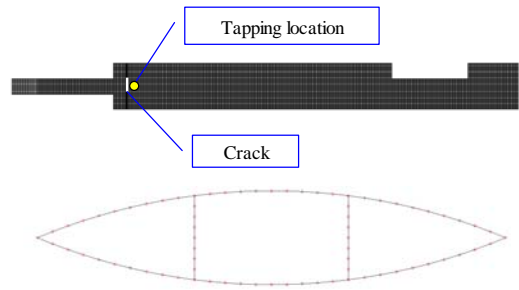


Fig. 15. A composite rotor blade shows cross section and crack location

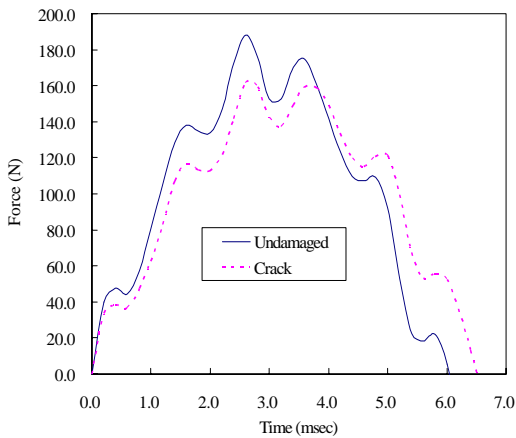


Fig. 14. Comparison of impact force histories for cracked and undamaged laminate

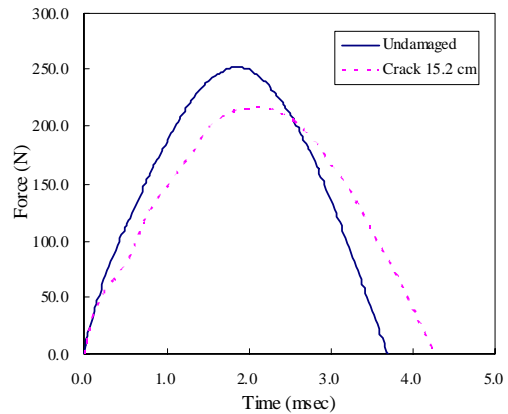


Fig. 16. Comparison of impact force histories for cracked and undamaged laminate of rotor blade

이다. 해석 시의 경계조건은 4번 고정지지 조건이며 적층순서는  $[0/45/0/-45/0/-45/0/45/90]_s$ 이다.

Fig. 14는 type B의 충격체를 이용하여 타격 시의 속도가 0.337 m/sec인 경우에 대하여 균열이 존재하는 경우와 없는 경우에 대한 해석결과이다. 균열이 존재하는 경우에도 국부적인 강성이 작아지므로 최대 충격하중이 작아지게 된다.

Fig. 15는 단순화된 복합재 로터블레이드에 대한 유한요소모델이다. 로터 블레이드의 스패น(span) 방향의 길이는 9.45 m이고, 코드방향의 길이는 0.46m이다. 모델에 사용한 요소는 2차원 평판요소이며, 총 요소 수는 51,644개이고 절점 수는 50,614개이다. 적층판의 적층순서는  $[0/45/0/-45/0/-45/0/45/90]_{2s}$ 이다.

Fig. 16은 로터에 15.2 cm 길이의 균열이 있는 경우와 없는 경우 정의된 tapping location에 type B의 충격체를 15° 회전시킨 후 낙하시켜 적층판에 충돌시키는 조건에 대한 해석결과이다.

경계조건은 허브부위를 고정지지하였다. 앞서 해석한 적층판의 결과와 유사하게 최대 충격하중이 감소하였다. 그러나 적층판의 해석결과와는 다르게 충격하중이력에 고차의 모드가 나타나지 않는다. 이는 경계조건의 영향에 의한 것으로 판단된다.

### III. 결 론

본 논문에서는 동전 및 해머(hammer) 등을 이용한 타격 시 발생하는 충격하중이력을 이용하여 층간분리를 검출하는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 일반적인 형상의 충격체를 유효질량 개념을 사용한 스프링-질량 모델을 사용하여 해석할 수 있음을 보였으며, 층간분리와 균열이 충격하중이력에 작용하는 영향을 검토하였다. 또한 충격해석 시 기하학적 비선형효과를 검토하였으며

충간분리 모델을 이용하여 충격하중이력을 예측하고 실험결과와 비교하였다. 실험 및 해석결과로부터 복합적층판에 충간분리나 균열이 존재하는 경우 태핑 시 발생하는 충격하중이 작아지고 접촉시간이 늘어남을 알 수 있었다. 그리고 복합재 로터 블레이드를 이용한 충격해석을 통하여 실제 구조물에도 적용 가능함을 보였다. 상기의 결과로부터 태핑 시 발생하는 충격하중이력을 이용하여 구조물의 손상평가가 가능함을 보였다.

## 후 기

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술연구원에서 위탁 시행한 항공안전기술 개발사업으로 수행된 연구임

## 참고문헌

- 1) 황호연, "고유진동수비 측정에 기초한 구조물 손상탐지", 한국항공우주학회지, 제 35권 제 8호, 2007, pp. 726~734.
- 2) 김성준, 홍창호, "태핑음을 이용한 복합적층판의 손상검출", 한국항공우주학회지, 제 37권 제 11호, 2009, pp. 1089~1095.
- 3) Tan TM, Sun CT. "Wave propagation in graphite/epoxy laminates due to impact", NASA CR 168057 1982.
- 4) 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.
- 5) Shivakumar, K. N., and Elber, W., "Prediction of impact force and duration due to low-Velocity impact on circular composite laminates", *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 52, 1985, Sept., pp. 674-680.
- 6) 최익현, "저속충격을 받는 복합적층판의 거동과 손상에 대한 연구", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1994.
- 7) Saito, A., Castanier, M. P., Pierre, C., "Estimation and veering analysis of nonlinear resonant frequencies", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 326, Issues 3-5, 2009, pp. 725-739.