

論文

탄소/에폭시 복합재 적층판과 강판의 저속충격 거동에 관한 비교 연구

공창덕^{*,+}, 김영광^{*}, 이승현^{*}

Comparative Study on Low-velocity Impact Behavior of Graphite/Epoxy Composite laminate and Steel Plate

Changduk Kong^{*,+}, Yeonggwang Kim^{*}, Seunghyeon Lee^{*}

ABSTRACT

This study was performed to make a comparison on low-velocity impact behavior between graphite/epoxy composite laminate and steel plate. In order to validate the proposed scheme for the impact behavior of the plate, the Karas's impact model was used.

The impact models for this comparative study are the graphite/epoxy composite plate having [0/90/45/-45/-45/45/90/0]_{ss} laminate sequence and the steel plate with a steel ball impactor. The low-velocity impact behaviors for two types of plates were comparatively investigated and performed by considering different impactor velocities and weights respectively. In this investigation, it was found that the composite laminate has impact energy absorption effect due to more flexible behavior than the steel plate, and also it has better characteristics on impact damage and weight.

초 록

본 연구에서는 탄소/에폭시 복합재 적층판과 강철평판의 저속충격 거동에 관한 비교 연구를 수행하였다. 각각의 평판의 해석을 위한 판의 충격거동의 타당성을 검증하기 위해 Karas 모델을 사용하여 해석 검증을 하였다.

충격거동 비교연구를 위한 모델은 Karas 모델과 동일한 두께의 강철평판을 모사하였고, 같은 두께의 복합재 적층판을 모사하기 위하여 [0/90/45/-45/-45/45/90/0]_{ss} 적층각을 이용하여 모델링 하였다. 각각의 판에 대한 저속충격 거동을 비교하기 위해 일정한 속도로 낙하하는 충격체 무게별 해석과 일정한 무게를 가진 충격체의 속도변화에 따른 해석 결과를 비교 연구하였다. 연구결과 복합재 적층판과 강철평판의 물성치로 인하여 접촉하중과 판의 변위에서는 결과값의 차이를 보였으나 복합재 적층판의 경우가 판의 유연한 특성으로 충격완화 효과가 보였으며 강철평판 보다 무게비와 충격손상에 대한 우수성을 확인하여 볼 수 있었다.

Key Words : 저속충격(Low-velocity Impact), 충격거동(Impact Behavior), 복합재 평판(Composite Plate), 강철평판(Steel Plate)

1. 서 론

복합재료는 재료의 효율적인 조합에 의하여 일반 금속재료에 비해 높은 무게비 강도 및 강성도를 가져 항공기, 자동차,

선박 및 스포츠 분야에 이르기까지 다양하게 응용되고 있다. 그러나 복합재료는 탄성 변형 에너지를 초과하는 하중을 받으면 소성 변형이 거의 없기 때문에 곧바로 손상을 발생시키며 기계적 성질이 급격히 저하된다. 이러한 복합재 구조는 압축강

* 조선대학교 항공우주공학과

*+ 조선대학교 항공우주공학과 교신저자(E-mail:cdgong@chosun.ac.kr)

도에 약한 특성이 있어서 손상이 발생하였을 때 재료 고유의 강도를 저하시키며 이로 인하여 복합 적층판으로 구성되는 구조물의 수명 감소나 미소 결함의 진전으로 인해 예기치 못한 문제를 야기 시키게 된다. 또한 복합재 적층판은 구조체의 제조, 수리 혹은 정비중의 공구낙하나 항공기의 경우 이착륙시의 FOD(Foreign Object Debris)에 의한 저에너지 충돌시 표면에서는 거의 관찰할 수 없는 층간분리, 모재균열에 의해 내부손상이 발생하게 되고, 충격에너지에 의해 손상이 증가하게 되면 구조체로서의 역할을 수행할 수 없게 된다[3-5]. 따라서 복합재 구조체가 충격하중에 대한 보다 신뢰성 있고 안전한 설계방안을 확립하기 위하여 충격손상거동에 대한 체계적인 연구를 필요로 한다. 충격에 의한 손상 중에서도 앞에서 언급한 저속충격(저에너지 충격)에 의한 손상이 아주 흔하고 일반적이다.

이러한 대부분의 저속충격 문제는 실험적으로 구한 정적압입 법칙을 사용하여 왔고, 수정된 Hertz의 접촉법칙[6]을 이용한 해석적인 방법 등이 계속 연구되어져 왔으며, 국내에서는 최익현이 선형화된 접촉법칙을 적용하여 충격거동해석을 고유 해석프로그램 개발 없이 범용 유한요소해석 프로그램으로도 복합재 적층판의 저속충격거동을 해석하여 결과값의 타당성을 보인바 있다[5].

따라서 본 연구에서는 MSC. Dytran 유한요소해석 프로그램을 이용해 수치 해석적인 방법으로 각각 다른 저속 충격량에 의한 복합재 적층판의 거동을 확인하고, 같은 충격량 범위 내에서의 강철판 구조물의 거동 및 변형상태 등에 대한 비교를 통하여 복합재료 적층구조에 대한 저속충격 문제를 해결하기 위한 기초적인 자료제시를 위한 연구를 수행하였다.

2. 해석모델의 타당성 입증

평판에 대한 저속충격해석에 있어서 해석 대상 문제는 선행 연구된 Karas[2,6]의 예제를 사용하여 본 연구에서 사용되어진 MSC. Dytran 유한요소 프로그램으로 해석한 결과와 비교하여 본 방법의 타당성을 검증해 보았다.

2.1 Karas 예제와의 해석결과 비교

Karas[4]는 가장자리 네번이 고정되어 있는 가로세로 길이가 $0.2 \times 0.2\text{m}$ 이고 두께가 0.008m 인 강철평판에 반지름이 0.01m 인 강철구를 충격체로 하여 1m/s 의 속도로 저속충격을 받는 강철평판의 거동을 그가 고안한 해석적인 방법으로 접근하였다.

본 논문에서는 MSC. Dytran 유한요소 프로그램을 사용하여 같은 크기 및 같은 두께의 의 강철판을 2-D 4절점 쉘 요소(Shell Element)를 사용하고, 강철구는 고체요소(Solid Element) 3-D 4절점 사면체 요소(Tetra Element)를 사용하여 강철판 요소수는 5401개, 강철구의 요소수는 129개로 모델링하였다. 이때 판의 요소는 하중지점에 가까울수록 세밀해지는 Fig. 1에서 보여주는 것과 동일한 형상으로 하였다.

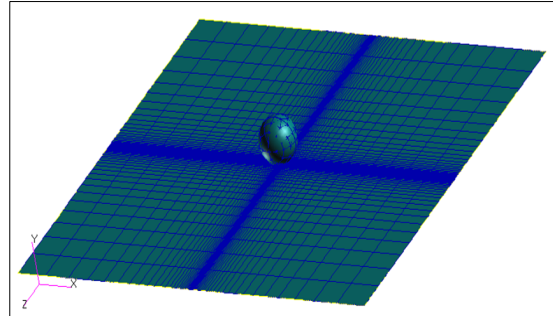


Fig. 1 Finite Element Model of 2-D Shell Plate and Steel Rigid Ball.

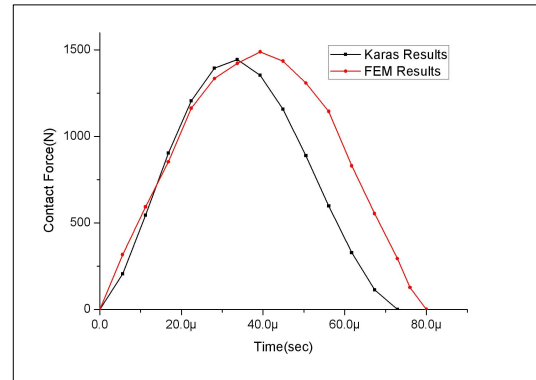


Fig. 2 Contact Force VS. Time (Karas Example).

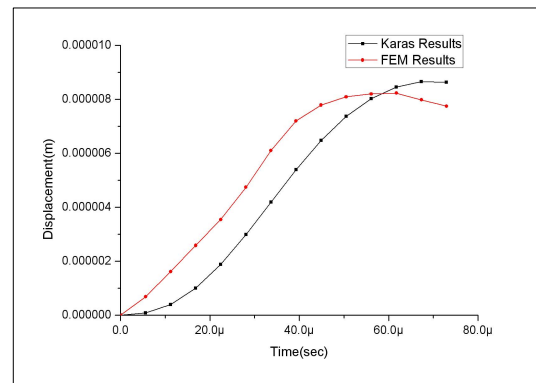


Fig. 3 Displacement VS. Time (Karas Example).

참고문헌에서 수행되어진 해석결과와 MSC. Dytran 유한요소 프로그램을 이용하여 계산된 해석결과 비교에서 접촉하중과 충격부위 두께방향 변위는 Fig. 2, Fig. 3의 결과를 통하여 알 수 있었으며, 두 결과의 비교를 통해 접촉하중의 오차율은 약 3.1%, 변위의 전체 오차율은 약 5.1%를 확인할 수 있었다.

Karas의 해석결과와 본 연구에서 수행 되어진 결과치의 비교는 상당한 오차라고 생각되나 수식계산에 의한 값과 유한요소 프로그램을 통한 계산 값의 오차라 판단되었다. 이에 따라 Karas 예제의 해석 결과와 그래프의 형상이 상당히 유사하고, 매우 짧은 시간에 일어나는 충격해석에 있어서 접촉 지속시간의 오차 또한 미소하다 판단되어, 본 연구에서 적용한 유한요소 해석방법이 타당성이 있다고 판단된다. Table 1과 Table 2는 각각의 결과 값을 표로 나타낸 것이다.

Table 1 Contact Force VS. Time Table

| Time(sec) | Karas Results(N) | FEM Results(N) |
|-----------|------------------|----------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 5.611E-06 | 205.02 | 22.27 |
| 1.122E-05 | 544.81 | 592.48 |
| 1.683E-05 | 904.62 | 852.99 |
| 2.244E-05 | 1206.61 | 1222.80 |
| 2.806E-05 | 1395.60 | 1335.12 |
| 3.367E-05 | 1444.78 | 1422.42 |
| 3.928E-05 | 1354.27 | 1489.30 |
| 4.489E-05 | 1157.24 | 1466.13 |
| 5.050E-05 | 889.66 | 1309.15 |
| 5.611E-05 | 598.59 | 1174.71 |
| 6.172E-05 | 327.35 | 1026.33 |
| 6.733E-05 | 113.42 | 683.74 |
| 7.294E-05 | 0 | 498.49 |
| 7.602E-05 | 0 | 33.19 |
| 8.000E-05 | 0 | 136.33 |

Table 2 Displacement VS. Time Table

| Time(sec) | Karas Results(m) | FEM Results(m) |
|-----------|-------------------|-------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 5.611E-06 | 8.6000E-08 | 6.8510E-07 |
| 1.122E-05 | 3.9500E-07 | 2.2171E-06 |
| 1.683E-05 | 9.9800E-07 | 3.0865E-06 |
| 2.244E-05 | 1.8860E-06 | 4.7590E-06 |
| 2.806E-05 | 2.9890E-06 | 5.5044E-06 |
| 3.367E-05 | 4.1980E-06 | 6.1698E-06 |
| 3.928E-05 | 5.3990E-06 | 7.5882E-06 |
| 4.489E-05 | 6.4830E-06 | 8.0937E-06 |
| 5.050E-05 | 7.3700E-06 | 8.2062E-06 |
| 5.611E-05 | 8.0330E-06 | 8.2338E-06 |
| 6.172E-05 | 8.4620E-06 | 8.1465E-06 |
| 6.733E-05 | 8.6580E-06 | 7.9823E-06 |
| 7.294E-05 | 8.6310E-06 | 7.7530E-06 |
| 7.602E-05 | 8.6310E-06 | 7.4471E-06 |
| 8.000E-05 | 8.6310E-06 | 7.1240E-06 |

3. 저속충격해석 비교

3.1 동일 두께 판에서의 충격체 무게별 저속충격 해석

강철평판 해석의 경우 앞에 소개한 Karas의 예제와 동일한 판을 사용 하였으며 판의 경계조건 또한 동일하게 네변을 고정 시켰다. 충격체인 강철구의 낙하 속도는 1m/s로 일정하며, 무게를 0.5kg부터 5.0kg까지 0.5kg씩 변화 시키면서 해석을 반복 수행하였다. 본 연구는 충격체가 아닌 피충격체인 판의 거동 비교를 목표로 하고 있으므로 충격체인 강철구의 거동은 고려하지 않았고, 시간 간격은 1 μ s로 하여 계산하였다.

강철평판의 해석모델과 동일한 조건하에서 복합재 적층판의 거동을 비교하기 위하여 복합재 적층판의 충격해석을 수행 하였다. 이때 복합재 적층판의 경우 두께가 0.008m인 강철평판과 같은 두께와 함께 등방성 재질에 준하는 준등방성을 모사하기 위하여 적층각을 [0/90/45/-45/-45/45/90/0]_{8s} 하여 64ply 적층판을 모사하여 해석을 진행하였다.

동일한 두께에서의 충격체 무게에 의한 충격하중을 변화시킨 강철평판과 복합재 적층판의 두 가지 해석결과에 대해 비교 분석한 결과 복합재 적층판의 경우가 강철평판에 비하여 최대 변위와 충격체 접촉시간에 있어서 대략 두 배 정도의 차이를 보이며, 충격하중에 대해서는 강철평판의 경우가 복합재 적층판에 대하여 대략 두 배 정도의 차이를 보임을 알 수 있었다. 이러한 접촉지속시간과 변위의 결과를 통하여 복합재 적층판의 유연한 특성이 충격완화에 효과가 있는 것으로 판단 되었다. Fig. 4, 5와 Fig. 6, 7은 각각의 판에서의 시간에 대한 변위와 충격하중을 나타낸 그래프이다.

또한 Fig. 8과 Fig. 9의 그래프 결과를 통하여 알 수 있듯이 각 케이스별 평판 에너지가 대부분 복원 되는 것으로 보이나 복합재 적층판의 경우 3.5kg의 충격체에서부터 그 이상의 충격체 무게에 대하여 조금씩 에너지가 회복 되지 않는 것으로 보이며 그에 따른 복합재 적층판의 손상으로 판단되었다. Table 3에 본 연구에서 적용된 강철평판의 물성치와 복합재 적층판의 물성치를 명시하였다.

Table 3 Material Properties of Steel and Graphite/Epoxy

| Steel | Graphite/Epoxy |
|--------------------------------|--|
| E = 210GPa | E ₁ = 135.4GPa |
| ν = 0.3 | E ₂ = E ₃ = 9.6GPa |
| ρ = 7850kg/m ³ | G ₁₂ = G ₁₃ = 4.8GPa |
| - | G ₂₃ = 3.2GPa |
| - | ν = 0.31 |
| - | h = 0.125mm |
| - | ρ = 1580kg/m ³ |

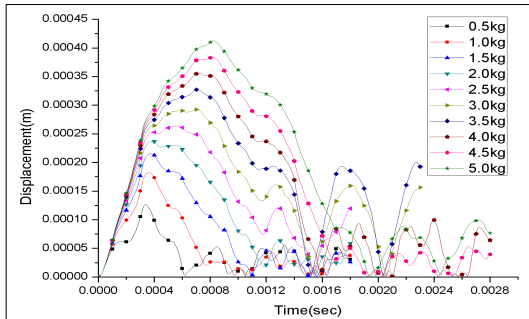


Fig. 4 Plate Displacement VS. Time of Steel Plate.

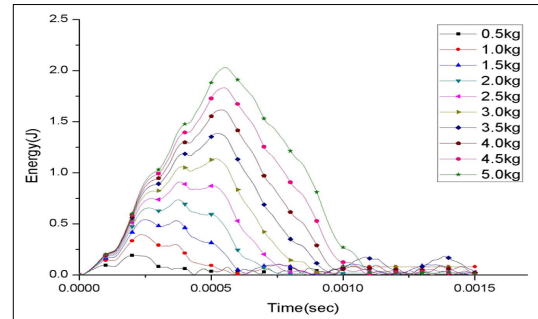


Fig. 8 Plate Energy VS. Time of Steel Plate.

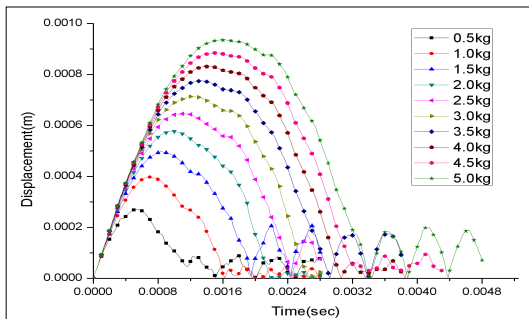


Fig. 5 Plate Displacement VS. Time of Composite Plate.

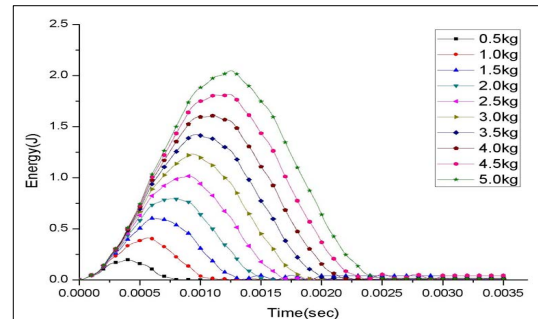


Fig. 9 Plate Energy VS. Time of Composite Plate.

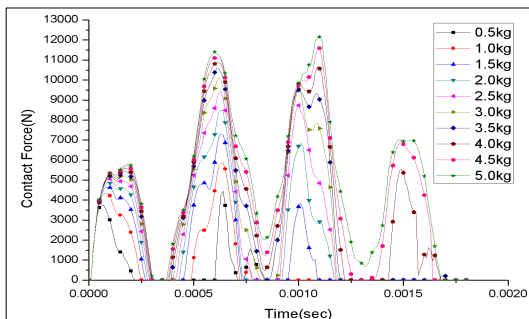


Fig. 6 Contact Force VS. Time of Steel Plate.

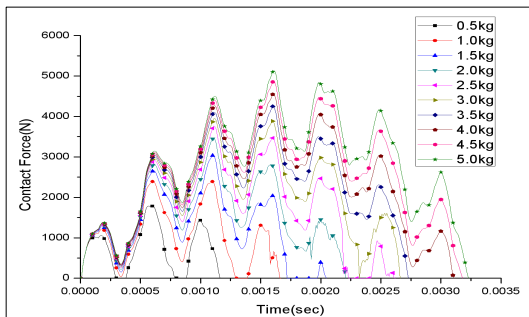


Fig. 7 Contact Force VS. Time of Composite Plate.

3.2 동일 두께 판에서의 충격체 속도별 저속충격 해석

앞의 충격체 무게별 저속충격해석에 있어서 강철평판과 복합재 적층판의 비교에서는 재료의 물성치에 의한 접촉하중과 판의 변위차이에 대한 현상을 관찰할 수 있었고, 복합재 적층판의 경우 3.5kg 이상의 충격체 무게에서 손상여부를 발견하여 복합적층판에서 표현할 수 있는 가장 일반적인 준등방성 8ply(1mm)와 16ply(2mm) 복합재 적층판을 모사하고, 같은 두께의 강철평판을 모델링하여 해석을 반복 수행 하였다. 이때 복합재 적층판의 적층순서는 8ply 판의 경우 [0/90/45/-45]_s로 모사하였고, 16ply 판의 경우 [0/90/45/-45]_{2s}로 모사하였다. 본 해석과정에서는 최대충격하중을 고려하지 않은 관계로 본 연구에서 사용된 최대 무게인 5kg의 강철구를 충격체로 하여 속도 1m/s부터 5m/s까지의 경우에 대한 추가 해석을 반복 수행하였다.

해석결과 복합재 적층판의 에너지가 5kg의 강철구를 3m/s의 속도로 충격을 가하였을 경우를 기점으로 8ply 적층판의 경우 판의 손실 에너지가 급격히 증가함을 알 수 있었다. 각각의 속도에 대한 피충격체인 판의 손실 에너지 값은 Table 4와 5에 명시하였고, Fig. 10, 11은 두께 1mm 판의 에너지 변화 그래프이며, Fig. 12, 13은 두께 2mm 판의 에너지 변화 그래프이다.

Table 4 Impact Energy Loss of the Plate (1mm, 8ply)

단위 : J

| | Steel | Composite |
|-------|--------|-----------|
| 1 m/s | 0.0257 | 0.0105 |
| 2 m/s | 0.0497 | 0.0615 |
| 3 m/s | 0.1198 | 1.8090 |
| 4 m/s | 0.1597 | 5.1956 |
| 5 m/s | 0.2732 | 16.8080 |

Table 5 Impact Energy Loss of the Plate (2mm, 16ply)

단위 : J

| | Steel | Composite |
|-------|--------|-----------|
| 1 m/s | 0.0923 | 0.1284 |
| 2 m/s | 0.2303 | 0.2283 |
| 3 m/s | 0.3752 | 0.3296 |
| 4 m/s | 0.5752 | 0.4772 |
| 5 m/s | 0.6665 | 0.7267 |

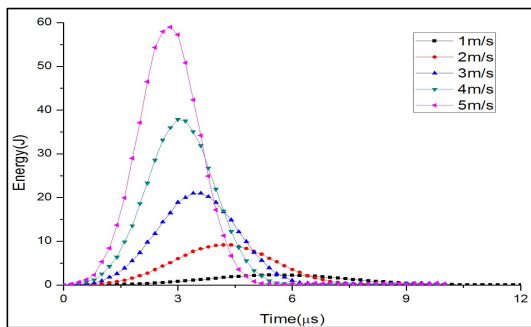


Fig. 10 Plate impact Energy VS. Time of Steel Plate (1mm).

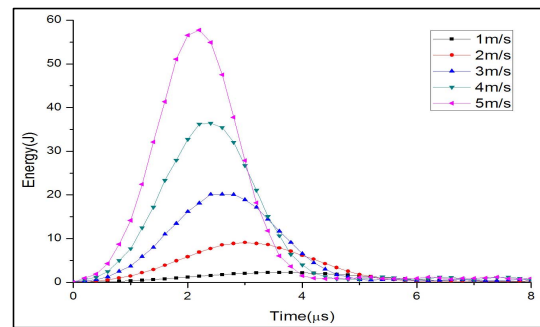


Fig. 12 Plate impact Energy VS. Time of Steel Plate (2mm).

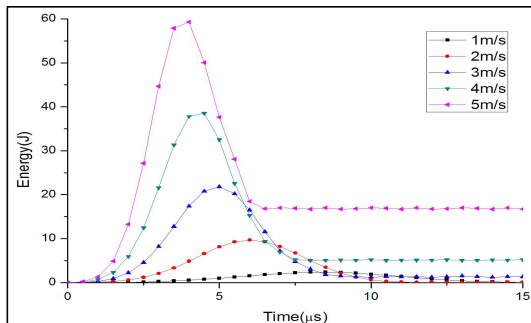


Fig. 11 Plate impact Energy VS. Time of Composite Plate (8ply).

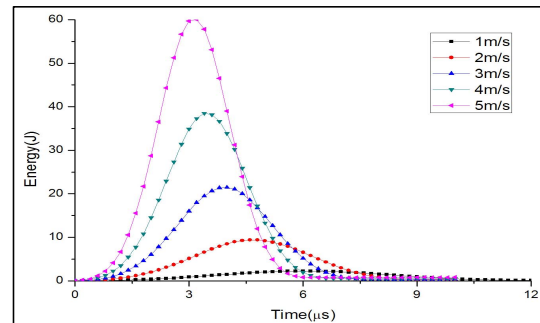


Fig. 13 Plate impact Energy VS. Time of Composite Plate (16ply).

본 해석을 통하여 동일 하중에 대한 판의 충격거동 특성으로 8ply의 적층판의 경우 충격체 속도가 3m/s에서 충격에너지가 22.5J에 해당하는 충격하중에서 손상이 일어남을 판단할 수 있었다. 또한 두 판 모두 각각의 속도에서 아주 미소한 판의 내부에너지는 복원되지 않았으나, 8ply 적층판의 경우 충격체의 속도가 3m/s인 경우에서 충격에 의한 영향이 판의 손상, 파손 등으로 발전하여 소모된 에너지로 인하여 판의 손실 에너지가 급상승한 것으로 판단하였고, 이 결과를 바탕으로 판의 내부에너지가 충격 후 모두 복원되지 않음을 판단함으로써 판의 손상, 파손 등을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

16ply 적층판의 경우는 그래프를 통하여 알 수 있듯이 충격체와 피충격체의 접촉시간과 충격체에 의한 판의 변위, 접촉하중에서는 차이를 보이지만 복합재 적층판의 판에너지가 강철평판과 비슷한 값의 손실에너지를 보이며 대부분이 복원된 것을 알 수 있었다. 이러한 사실로 복합재 적층판의 경우가 강철평판에 비하여 무게비 충격손상에 대하여 우수하다고 판단하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 강철평판과 Graphite/Epoxy 복합재 적층판의

저속충격에 대한 거동에 관하여 MSC. Dytran 유한요소 프로그램을 이용한 수치해석 연구를 수행하였다. 본 연구에서 사용되어진 유한요소 프로그램의 해석결과에 대한 타당성을 선행 연구된 Karas[4] 예제를 통하여 확인 검증하였고, 검증된 방법에 따라 동일 두께의 각 판에서의 무게변화와 속도 변화에 따른 접촉하중별 판의 거동을 확인하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

Karas[4] 예제와 동일한 8mm 두께 강철평판과 복합재 적층판에 대한 해석은 피충격체가 손상을 입은만한 최대충격하중을 고려하지 않아 손상에 대한 결과를 도출하기는 힘들었으나 각기 다른 충격하중에 의한 판의 변위차이가 강철평판에 비하여 복합재 적층판이 약 두 배 정도의 차이를 보였으며, 이러한 현상은 복합재 적층판의 유연한 특성이 충격완화에 효과가 있는 것으로 판단되었다. 또한 준등방성 재질을 모사한 8ply 적층판과 16ply 적층판에서는 본 연구에서 사용된 최대 무게의 충격체에 대하여 8ply 복합재 적층판은 22.5J에 해당하는 충격에너지에 손상의 거동을 확인할 수 있었으며, 동일한 충격에너지에 대하여 16ply 복합재 적층판은 접촉하중, 변위 그리고 접촉지속시간에 대해서는 변화를 보였으나 손실에너지 측면에 대해서는 비슷한 양상을 보여 강철평판과 복합재 적층판의 충격에 대한 비교를 통하여 복합재 적층판의 무게비 충격완화에 대한 우수성을 확인할 수 있었다.

추후 본 연구의 타당성을 명확히 증명하기 위한 실험을 통한 결과 비교가 이루어져야 하고, 최대충격하중을 고려한 피충격체의 손상예측에 대한 연구가 이루어져야 하겠다.

후 기

본 연구는 건설교통기술연구개발과제인 “신에너지 저장 굴절 차량 유지 보수 시스템 개발” 사업과 2007년도 교육 인적 자원부이 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) W. J. Stronge, “Impact Mechanics,” *Cambridge University Press*, 2000.
- 2) K. Karas, “Platten Unter Seitlichem Stob,” *Ingeieur Archiv*, Vol. 10, 1939, pp. 237-250
- 3) 고종인, 홍창선, 이인, “저속충격에 의한 복합 적층판의 손상해석,” 한국항공우주학회지, 제19권, 제1호, 1991, pp. 35-40.
- 4) 최익현, 홍창선, “복합적층판의 저속충격 손상영역 평가,” 한국항공우주학회지, 제22권, 제4호, 1994, pp. 78-88.
- 5) 최익현, “복합적층판에 대한 저속충격해석과 접촉법칙,” 한국 복합재료학회지, 제16권, 제1호, 2003, pp. 50-57.

- 6) 박정, 박훈철, 윤광준, 구남서, 이재화, “가정변형률 슬리드 요소를 이용한 복합재 샌드위치 평판의 저속충격 해석,” 한국항공우주학회지, 제30권, 제7호, 2002, pp. 44-50.