

# 필라멘트 와인딩 복합재 압력용기의 충격저항성에 미치는 표면 고무 보호재료의 영향

강기원<sup>†</sup> · 김용수<sup>\*</sup> · 이미애<sup>\*</sup> · 최 린<sup>\*</sup>  
체육과학연구원 · \*서울산업대학교 안전공학과  
(2005. 8. 18. 접수 / 2005. 11. 29. 채택)

## The Effect of Surface Protective Material on the Impact Resistance in Filament Wound Composite Pressure Vessel

Ki-Weon Kang<sup>†</sup> · Young-Soo Kim<sup>\*</sup> · Mee-Hae Lee<sup>\*</sup> · Rin Choi<sup>\*</sup>

Korea Institute of Sport Science

<sup>†</sup>Department of Safety Engineering, Seoul National University of Technology

(Received August 18, 2005 / Accepted November 29, 2005)

**Abstract** : One area in which composites have been used rather extensively is for fabricating pressure vessel. These structures can be readily manufactured by filament winding, which is, as far as composite fabrication techniques are concerned, a relatively inexpensive method for producing composite structures. Unfortunately, the higher strength material and fabrication costs are not the only disadvantages of fiber-reinforced polymer composites when they are compared to metals. Additionally, these materials tend to exhibit brittle behavior. This is of particular concern when they are subjected to a low-velocity impact during routine handling, a significant amount of structural damage can be introduced into the composites.

The goals of this paper are to understand the impact damage behavior and identify the effect of surface coating materials on impact resistance in filament wound composite pressure vessels. For these, a series of low velocity impact tests was performed on specimens cutting from the full scale pressure vessel by the instrumented impact testing machine. The specimens are classified into two types with and without surface protective material. The visualization for impact damage is made by metallurgical microscope. Based on the impact force history and damage, the resistance parameters were employed and its validity in identifying the damage resistance of pressure vessel was reviewed. As the results, the impact resistance of the filament wound composites and its dependency on the protective material were evaluated quantitatively.

**Key Words** : filament wound composites pressure vessel, low velocity impact, impact damage, impact resistance

### 1. 서 론

섬유강화 복합재료를 이용하여 제작되는 필라멘트 와인딩 압력용기는 기존의 금속재 압력용기에 비해 경량이면서도 동일 체적의 기체를 저장할 수 있으며 또한 강한 내식성을 가지고 있기 때문에 장기간 사용에 유리한 특성을 가지고 있다<sup>1,3)</sup>.

그러나 탄소섬유 등에 필라멘트 와인딩 기법을 적

용하여 제작된 고압압력용기는 섬유 및 수지의 특성으로 인하여 저속충격 등에 의한 충격 손상의 발생 가능성이 높다는 단점이 있다<sup>4,6)</sup>. 이러한 충격손상은 육안으로 판별하기가 곤란하고 또한 이를 비파괴 기법 등을 통하여 판별 또는 식별 가능하더라도 누설 등의 위험성으로 인하여 이러한 손상의 허용 여부 평가는 매우 곤란한 실정이다. 특히 폭발성 기체를 내부에 보관하는 용도에 사용되는 고압압력용기의 경우, 충격손상으로 인한 누설량이 매우 미미할 경우라도 폭발의 위험성이 매우 높을 수밖에 없다. 따라서 보관 기체의 특성상 폭발의 위험성이 상존하는

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
kwkang68@daum.net

경우에 사용되는 고압압력용기의 충격저항성을 극대화시키기 위한 연구가 반드시 요구된다.

본 논문에서는 충격저항성 향상을 위하여 고무 재질의 보호재료를 표면에 접착한 필라멘트 와인딩 복합재 고압압력용기에서 채취한 두꺼운 시험편을 대상으로 저속 충격 시험 및 이에 따른 충격손상 평가를 수행하였다. 이에 충격저항성의 정량화를 위한 충격 저항성 평가 인자를 도입하여 충격저항성에 대한 고무 표면 보호재료의 영향을 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 재료 및 시험편

본 논문에서 사용한 고압압력용기는 한국화이버(주)에서, T700계열의 탄소섬유와 #2500계열의 에폭시 수지를 재료로 하여 필라멘트 와인딩 기법으로 제작된 것이다. 사용된 복합재료의 기계적 물성치는 Table 1과 같다. 또한 표면 보호용 재료로 사용된 고무는 대륙화학(주)에서 제작한 NRSBR 계열의 고무로서 이의 두께는 약 1mm이다. 에폭시 계열의 상온경화 접착제를 이용하여 고무재료를 압력용기에 접착하여 제작된 압력용기로부터 가로 및 세로가 100mm×100mm의 시험편을 채취하였다. 이에 따라 시험편의 종류는 고무 보호재료의 부착여부에 따라 기본 및 고무부착 시험편의 경우로 분류하였다. 이의 방향은 시험편의 가로 및 세로 방향이 고압압력용기의 원주 및 길이방향과 각각 일치하도록 하였으며 시험편의 두께는 12.7mm이다.

### 2.2. 저속충격시험

채취된 시험편에 대한 저속충격시험은 낙하충격 시험기(Dynatup, 9250HV)를 사용하여 수행하였다. 시험편은 공압식 시험편 고정장치에 고정되었으며 이의 개구부는 원형으로서 직경은 76.2mm이다. 여기서 시험편과 직접 접촉하여 이를 고정하는 상부 및 하부 플레이트는 원통형 압력용기에서 채취된 시험편의 곡률을 고려하여 제작하였다.

충격체의 질량은 10.88kg이며 사용된 충격체는 반원형으로서 반원형 충격체의 반경 r은 6.35mm이다. 한편 작용 충격에너지는 고압압력용기의 충돌 조건을 고려하여 60J로 선정하였다. 시험편 두께 방향으로의 충격손상을 평가하기 위하여 시험편 표면의 섬유방향과 평행 및 직각 방향으로 절단 및 연마한 후 급속현미경을 이용하여 두께 방향의 충격손상을 관찰하였다.

Table 1. Mechanical properties of T700/2500

$E_{xx}$ (GPa)	$E_{yy}$ (GPa)	$G_{xy}$ (GPa)	$\nu_{xy}$
181.00	10.30	7.17	0.28

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 충격하중선도

섬유강화 복합재료에 충격하중이 가해지면 그 내부에는 모재균열, 층간분리 및 섬유파손 등과 같은 다양한 충격손상이 발생하게 된다<sup>7)</sup>. 그러나 이러한 충격손상 거동은 복합재료 구성요소(섬유 및 모재)의 성질, 적층순서, 이의 두께 등과 같은 경계조건에 따라 매우 상이하게 된다.<sup>7)</sup> 특히 본 논문에서와 같이 충격저항성 향상을 위하여 표면에 고무 등의 이중재료를 접착한 경우 이의 충격손상 거동은 매우 상이해질 수 있다. 이의 확인을 위하여 먼저 표면 고무 보호재료가 부착되지 않은 경우와 부착된 경우의 충격하중선도를 비교하기 위하여 이의 대표적인 예를 Fig. 1에 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 고무 보호재료가 부착되지 않은 기본 시험편의 경우와 보호재료가 부착된 고무 부착 시험편의 경우 전체적인 충격하중선도의 거동은 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나 고무 부착 시험편의 경우 전체적인 하중선도의 시간 지연 효과 즉, 최대충격하중 시점 등이 기본 시험편에 비하여 늦게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 충격체가 표면의 고무 보호재료와 접촉하고 이를 완전히 관통함에 있어 시간이 소요되어 발생하기 때문이라고 판단된다. 이러한 시간 지연 현상은 충격저항성

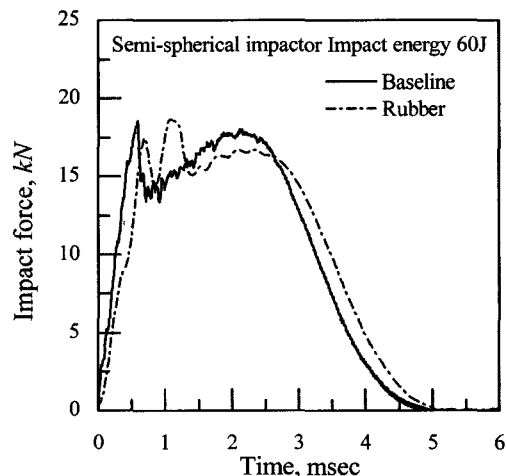


Fig. 1. Impact force history.

평가에 중요한 요소가 되는 충격손상 발생 하중 및 에너지에 영향을 미치게 된다. 따라서 표면 고무 보호재료가 부착된 시험편의 충격저항성을 평가하기 위해서는 복합재료 구조물의 충격저항성 평가에 유용하다고 보고되고 있는 충격저항성 평가 인자<sup>8,9)</sup>를 도입하여 종합적으로 평가할 필요가 있다. 참고문헌<sup>8,9)</sup>에 보고된 충격저항성 평가인자는 총 7종이지만 본 논문의 경우 초음파 현미경을 통한 촬영이 불가능한 관계로 (1) 충격손상 발생 하중,  $P_{inc}$  (2) 충격손상 발생 에너지,  $E_{inc}$  (3) 최대 충격하중,  $P_{max}$  (4) 최대흡수에너지,  $E_{ab}$  (5) 소성흡수에너지,  $E_{pl}$  및 (6) 급속현미경을 통한 두께방향 충격손상 등 총 6종의 충격저항성 평가 인자를 도입하여 이의 충격저항성을 평가하였다.

### 3.2. 충격저항성 평가

#### 3.2.1. 충격손상 발생 하중

복합재료 구조물에 충격하중이 가해질 경우 이의 표면 또는 내부에 충격손상이 발생하면 충격하중 선도의 국부적인 진동 및 하중의 저하 현상이 발생함이 보고되고 있다<sup>9,10)</sup>. 이는 충격손상 발생에 따른 구조물의 강성 저하현상으로 인한 충격하중의 감소에 기인한다고 판단되고 있다. 이로부터 충격손상이 최초로 발생하는 하중 즉, 충격손상 발생 하중 ( $P_{inc}$ )은 구조물의 충격저항성과 밀접한 관련이 있다. 이의 거동을 명확히 검토하기 위하여 Fig. 2에 기본 시험편 및 고무 부착 시험편에 대한 충격손상 발생 하중을 정리하여 나타내었다.

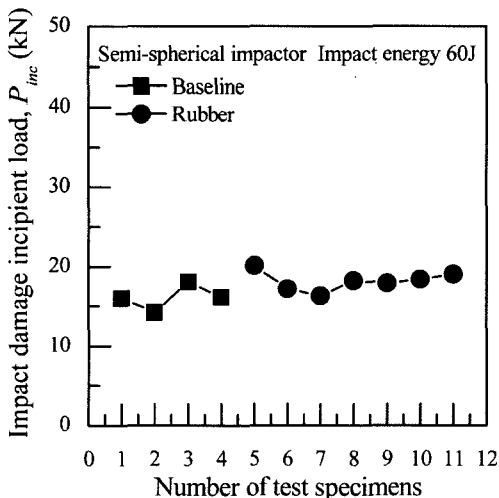


Fig. 2. Impact damage incipient load,  $F_{inc}$ .

그림에서 알 수 있듯이 복합재료 구조물의 충격손상 발생 하중은 시험편의 종류별로 일부 흠여짐 현상이 발생하고 있지만 전체적으로 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 그 이하에서는 충격손상이 발생하지 않는 에너지 즉, 하한계 에너지 (threshold energy) 이상의 에너지가 가해지면 충격손상이 항상 발생하므로 일정한 하중에서 충격손상의 발생이 시작된다는 개념과 일치하고 있다. 또한 충격손상 발생 하중은 시험편의 종류에 따라 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 기본 시험편의 경우는 14.7kN, 고무 부착 시험편의 경우는 약 18.4kN으로서 이러한 차이는 고무 보호재료의 충격흡수효과 때문이라고 판단된다.

#### 3.2.2. 충격손상 발생 에너지

충격손상 발생 에너지( $E_{inc}$ )는 충격손상 발생 하중과 유사한 개념으로써 구조물의 하한계 에너지와 밀접한 관계가 있으며 충격손상 발생하중시의 에너지 값을 취하여 구하게 된다. 따라서 이러한 충격손상 발생에너지는 구조물의 충격저항성을 나타내는 주요 인자라 할 수 있다. 이러한 충격손상 발생 에너지 거동을 보다 명확히 검토하기 위하여 Fig. 3에 충격손상 발생 에너지를 정리하여 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 충격손상 발생에너지 역시 일부 흠여짐 현상이 관찰되고 있지만 시험편 종류별로 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 충격손상 발생하중에 대한 3.2.1절의 내용과 일치하고 있다. 또한 충격손상 발생 에너지로부터 충격손상이

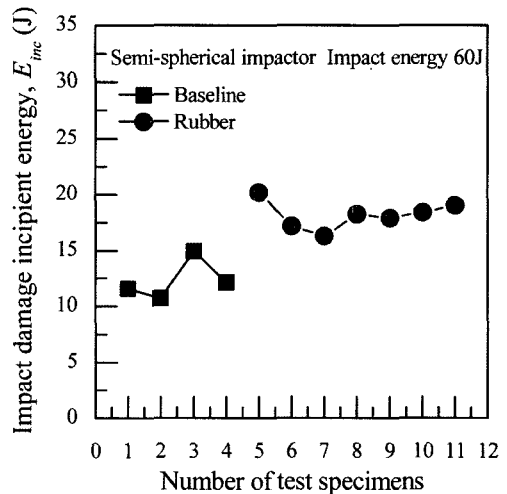


Fig. 3. Impact damage incipient energy,  $E_{inc}$ .

발생하지 않는 최저 에너지 즉, 하한계에너지는 기본 시험편의 경우 약 12.7J, 고무 부착 시험편의 경우는 약 18.9J에 해당된다. 이로부터 고무 부착 시험편의 경우 상당한 충격저항성 향상이 있다고 판단된다.

### 3.2.3. 최대 충격하중

최대 충격하중( $P_{max}$ )은 복합재료 구조물이 받게되는 충격하중의 최대치로서 구조물의 굽힘강성, 접촉강성 및 충격손상과 밀접하게 관련된 인자이다. 이러한 최대 충격하중 거동을 명확히 검토하기 위하여 Fig. 4에 최대 충격하중을 정리하여 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 기본 및 고무 부착 시험편의 종류와 관계없이 최대 충격하중은 거의 일정함을 알 수 있다. 이와 같이 표면에 고무 보호재료를 부착한 경우에도 표면 보호재료가 없는 경우와 동일한 현상이 나타나는 것은 고무 보호재료가 충격 초기의 보호에만 효과가 있으며 또한 필라멘트 와인딩 압력용기 자체가 60J에서 발생하는 충격하중 이상의 하중을 지지할 능력이 없는 것으로 판단된다.

### 3.2.4. 최대 흡수에너지

구조물에 충격에너지가 가해지면 진동, 처짐, 충격점에서의 국부 압입 및 충격손상 등과 같은 현상이 발생하며 이로 인하여 충격에너지는 구조물에 흡수된다. 최대 흡수에너지  $E_{ab}$ 는 입사 충격에너지 중에서 진동 등의 탄성거동과 충격손상 등의 소성 거동에 의하여 흡수된 에너지의 합이다. Fig. 5는 최대 흡수에너지를 입사충격에너지  $E_i$ 로 정규화하여 나타낸 것이다.

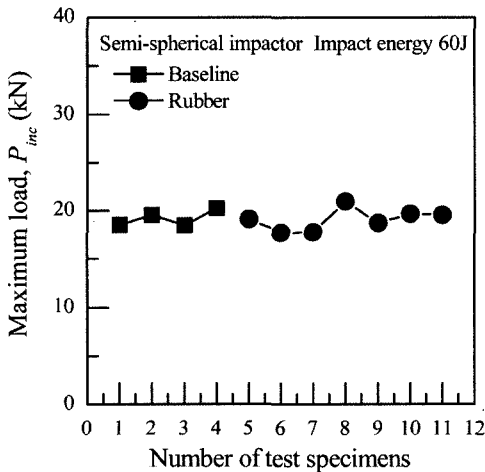


Fig. 4. Maximum load,  $P_{max}$ .

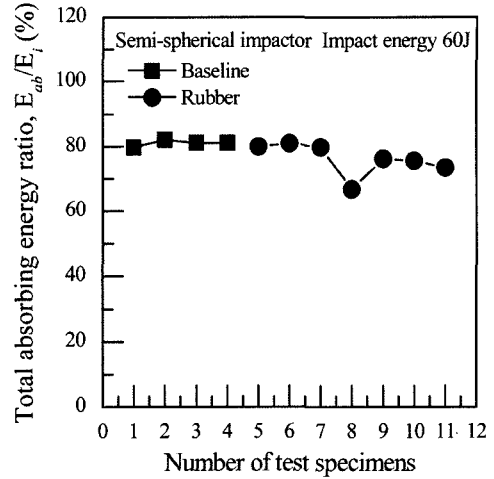


Fig. 5. Total absorbing energy ratio,  $E_{ab}/E_i$ .

그림에서 알 수 있듯이 최대 흡수에너지는 고무 부착 시험편의 경우 상당한 흠어짐 현상이 관찰되지만 전체적으로 시험편 종류별로 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 특히 고무 부착 시험편의 경우 기본 시험편에 비하여 약간 낮은 수준의 최대 흡수에너지를 보이고 있지만 그 차이는 미미하다. 따라서 최대 흡수에너지로는 시험편 종류에 따른 충격손상 거동의 차이를 구분할 수 없음을 알 수 있다.

### 3.2.5. 소성 흡수에너지

소성흡수에너지( $E_{pl}$ )은 충격손상 등으로 인하여 흡수된 에너지를 지칭하는 것으로써 Fig. 5의 최대 흡수에너지에서 구조물의 진동, 처짐 등에 의해 흡수되는 탄성흡수에너지( $E_{el}$ )를 차감하여 구할 수 있다. 이를 위해서는 충격손상이 발생하지 않는 최대 에너지인 하한계 에너지에서 충격시험을 실시하고 이로부터 계산된 최대 탄성흡수에너지를 평가해야 한다. 본 논문에서는 이의 해결을 위하여 3.2.2절에서 평가된 충격손상 발생 에너지에서의 시험을 각 충격체에 대하여 추가로 실시하여 탄성흡수에너지를 구하였다. 이러한 탄성흡수에너지는 기본 및 고무 부착 시험편에 대하여 각각 약 7.1J 및 14.3J로 평가되었다.

Fig. 6은 이상의 방법을 통하여 구한 소성흡수에너지비(입사 충격에너지에 대한 소성흡수에너지의 비)를 나타낸 것이다. 그림에서 기본 시험편의 경우에 비하여 고무 부착 시험편의 소성흡수에너지비는 매우 낮게 나타나고 있으며 이는 표면의 고무 보호재료로 인하여 고무 부착 시험편의 내부에 발생한

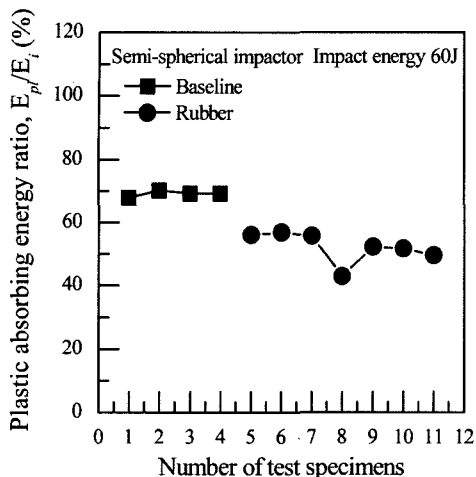


Fig. 6. Plastic absorbing energy ratio,  $E_{pl}/E_i$ .

충격손상의 정도가 기본 시험편에 비하여 미미하기 때문이라고 판단된다. 따라서 소성흡수에너지는 시험편의 종류에 충격손상 거동을 정량적으로 나타낼 수 있는 훌륭한 인자가 됨을 알 수 있다.

### 3.2.6. 두께 방향 충격손상

고무 부착 시험편 두께 방향의 충격손상을 평가하기 위하여 충격손상이 발생한 복합재료 구조물을 표면의 섬유방향에 대하여 평행 및 직각방향으로 절단하여 이의 단면을 연마한 후 금속현미경으로 관찰하였다. Fig. 7은 시험편의 표면 섬유방향에 평행한 단면을 대표적으로 나타낸 것이며 Fig. 8은 Fig. 7의 주요 부위를 확대하여 촬영한 것이다. 여기서 수직 화살표는 충격 중심점을 나타낸다.

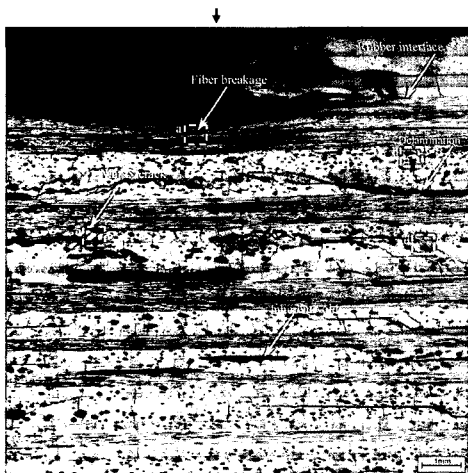


Fig. 7. Overall through-the-thickness damage at 60J.

강기원 등<sup>9)</sup>이 보고한 기본 시험편의 충격단면 사진인 Fig. 9를 관찰하면 기본 시험편의 경우 최상부의 hoop 층이 완전히 파괴된 형상을 보이고 있으며 특히 충격점에서 일정 거리만큼 떨어진 부분도 섬유가 완전히 파단된다고 보고되고 있다. 그러나 고무 부착 시험편의 단면을 나타낸 Fig. 7을 살펴보면 최상부의 hoop 층은 일부만이 파괴된 형상을 보이며 또한 충격점 하단부의 섬유 다발이 충격체로 인하여 휘어진 현상이 관찰되고 있다. 이러한 현상 외에도 Fig. 8의 확대 사진에서도 볼 수 있듯이 층간분리, 모재균열 등과 같은 다양한 손상이 관찰됨을 알 수 있다. 그러나 이러한 고무 부착 시험편의 충격손상을 기본 시험편의 충격손상과 비교하면 고무 부착 시험편의 충격손상은 상대적으로 미미한 편으로서 특히 최상부 hoop 층의 충격손상이 작게 관찰되고 있다. 이로부터 표면의 고무 보호재료는 상당한 충격손상 완화효과가 있음을 알 수 있다.

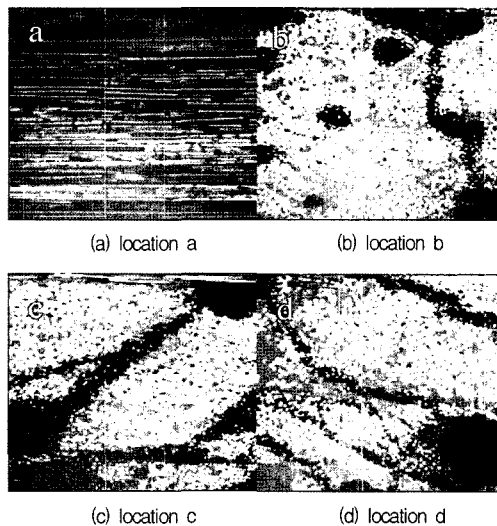


Fig. 8. Detail through-the-thickness damage at 60J.

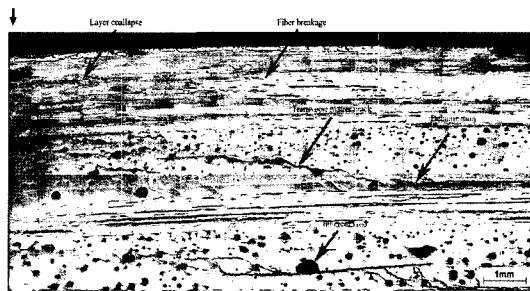


Fig. 9. Impact damage of baseline specimen at 60J<sup>9)</sup>.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 복합재료 구조물의 충격저항성 평가를 위하여 고무 재질의 보호재료를 표면에 접착한 필라멘트 와인딩 복합재 고압 압력용기에서 채취한 두꺼운 시험편을 대상으로 저속 충격 시험 및 금속현미경을 이용한 충격손상 관찰을 수행하였다. 이에 복합재료 구조물의 충격저항성의 정량화를 위한 충격저항성 평가 인자를 도입하여 충격저항성에 대한 고무 보호재료의 영향을 평가하였다. 이상의 과정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 충격하중선도, 충격에너지선도 및 충격손상에 기반을 둔 총 6종류의 충격저항성 평가 인자를 도입하여 기본 및 고무 부착 시험편의 충격저항성을 평가한 결과 본 논문에서 도입한 충격저항성 평가 인자는 복합재료 구조물의 충격저항성 및 이의 향상 효과를 정량화할 수 있음이 밝혀졌다.

2) 표면에 고무 보호재료가 부착된 시험편에 대한 충격손상 및 충격저항성을 검토한 결과 기본 시험편에 비하여 상당한 충격저항성 향상 효과가 있음이 밝혀졌다.

#### 참고문헌

- 1) Peters, S. T., Humphery, W. D. and Foral, R. F., "Filament Winding Composite Structure Fabrication", SAMPE, 1991.
- 2) Mallick, P. K. and Newman, S., "Composite Materials Technology, Process and Properties", Hanser Publishers, pp. 193~210, 1990.

- 3) 윤영복, 조성원, 하성규, "필라멘트 와인딩 복합재 CNG 압력용기의 최적설계", 대한기계학회논문집 A권, 제26권, 제1호, pp. 23~30, 2002.
- 4) Highsmith, A. L, Ledbetter, F. E., Nettles, A. and Russel, S. S., "Low Velocity Impact Damage in Filament-Wound Composite Pressure Bottles," Journal of Composites Technology & Research, Vol. 18, No. 2, pp. 109~117, 1996.
- 5) Poc Jr., C. C., "Impact Damage and Residual Tension Strength of a Thick Graphite/Epoxy Rocket Motor Case", Journal of Spacecraft & Rockets, Vol. 29, No. 3, pp. 394~404, 1991.
- 6) Paris, H. G., "Assessment of Impact Damage of Composite Rocket Motor Cases", NASA Technical Report NAG-1016, 1994.
- 7) Abrate, S., "Impact on Laminated Composite Materials", Applied Mechanics Rev. Vol. 44, No 4, pp. 155~190, 1991.
- 8) Lance, D. G. and Nettles, A. T., "Low Velocity Instrumented Impact Testing of Four New Damage Tolerant Carbon/Epoxy Composite Systems", NASA Technical Report TP-3029, 1990.
- 9) 강기원, 박재범, 황태경, 김형근, 김정규, "필라멘트 와인딩 복합재 고압압력용기의 충격저항성 해석", 대한기계학회 논문집 A권, 제29권, 제8호, 1109~1117, 2005.
- 10) Poon, C., Benak, T. and Gould, R., "Assessment of Impact Damage in Toughened Resin Composites", National Research Council Canada, Report LTR-ST-1695, 1989.