

< 논문 >

필라멘트 와인딩 복합재 고압압력용기의 충격저항성 해석

강기원* · 박재범* · 황태경* · 김형근* · 김정규**

(2005년 3월 14일 접수, 2005년 7월 5일 심사완료)

Analysis for Impact Damage Resistance in Filament Wound Composite Pressure Vessel

Ki-Weon Kang, Jae-Beom Park, Tae-Kyung Hwang, Hyoung-Guen Kim and Jung-Kyu Kim

Key Words: Impact Damage(충격손상), Low-Velocity Impact(저속충격), Filament Wound Composites Pressure Vessel(필라멘트 와인딩 복합재 압력용기)

Abstract

To identify damage that develops in filament wound composite pressure vessels subjected to low velocity impact, a series of impact tests was performed on specimens cutting from the full scale pressure vessel. The resulting damages by the three different impactors were assessed by the scanning acoustic and metallurgical microscope. Based on the impact force history and damage, the resistance parameters were proposed and its validity in identifying the damage resistance of CFRP pressure vessel was reviewed. As the results, the impact resistance of the filament wound composites and its dependency on the impactor shape were estimated quantitatively.

1. 서 론

고압의 유체 등을 저장하는 고압 압력용기는 고강성 및 고강도 특성이 요구되므로 고장력강 등이 사용되어 왔다. 그러나 고강도 및 고강성 특성과 더불어 경량화가 크게 요구되는 특수목적용 고압압력용기에는 그 용도상의 특수성으로 인하여 기존의 금속재료를 대체하여 섬유강화 복합재료의 사용이 증가하고 있는 추세이다.^(1,2) 이러한 섬유강화 복합재료를 이용한 고압압력용기 제작에는 원통형 제품의 제작에 적합한 필라멘트 와인딩(filament winding)기법이 많이 적용되고 있

다.^(3,4) 필라멘트 와인딩 기법은 수지혼합물에 젖은 상태의 강화섬유를 회전하는 원통형의 맨드릴에 연속적으로 감기게 하여 제품을 제작하는 기법이다. 이에 사용되는 강화섬유에는 강도 및 강성이 뛰어난 탄소섬유가 주로 사용되며 수지에는 폴리에스테르 또는 에폭시 등이 사용된다. 이와 같이 복합재료를 이용하여 제작되는 필라멘트 와인딩 압력용기는 재래식 금속 압력용기에 비해 무게가 가벼우면서도 같은 용적의 기체를 담을 수 있으며 또한 강한 내식성을 가지고 있기 때문에 장기간 사용에 유리한 특성을 가지고 있다.^(3,4)

그러나 탄소섬유 등에 필라멘트 와인딩 기법을 적용하여 제작된 고압압력용기는 섬유 및 수지의 특성으로 인하여 저속충격(low velocity impact) 등에 의한 충격 손상의 발생 가능성이 높다는 단점이 있다.^(5,6) 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 압력용기의 두께

† 책임저자, 회원, 체육과학연구원
E-mail : kwkang68@daum.net

TEL : (02)970-9550 FAX : (02)970-9502

* 국방과학연구소

** 회원, 한양대학교 기계공학부

가 얇은 경우에는 저속충격에 의한 손상 발생 기구 및 이의 거동이 보고⁽⁷⁾되고 있지만 압력용기의 두께가 두꺼운 경우에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.^(5,6,8) 따라서 제작, 운반 및 보관 등의 과정에서 공구 낙하 등의 충격 상황이 발생할 가능성이 높은 용도에 사용되는 고압압력용기는 충격손상에 대한 해석이 반드시 요구된다.

본 논문에서는 필라멘트 와인딩 기법으로 제작된 고압압력용기에서 채취한 두꺼운 시험편을 대상으로 저속 충격 시험 및 이에 따른 충격손상 평가를 수행하였다. 이를 통하여 충격손상의 정량화를 위한 충격 저항성 평가 인자를 도입하고 또한 충격체의 형상 및 작용 충격에너지에 따른 충격손상의 발생 특성을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 재료 및 시험편

본 논문에서 사용한 고압압력용기는 T700계열의 탄소섬유(carbon fiber)와 #2500계열의 에폭시 수지를 재료로 하여 필라멘트 와인딩 기법으로 제작된 것이다. 사용된 복합재료의 기계적 물성치는 Table 1과 같다. 이와 같이 제작된 고압압력용기로부터 가로 및 세로가 100mm×100mm가 되도록 정사각형 형태의 시험편을 채취하여 총 50개의 시험편을 준비하여 일부는 시험 조건 설정용으로 사용하였으며 약 30개에 대한 충격 및 비파괴 시험과 두께방향 손상 관찰을 실시하였다. 이의 방향은 시험편의 가로 및 세로 방향이 고압압력용기의 원주 및 길이방향과 각각 일치하도록 하였다. 시험편의 총 두께는 12.7mm이다.

Table 1 Mechanical properties of T700/2500

E_{xx} (GPa)	E_{yy} (GPa)	G_{xy} (GPa)	ν_{xy}
181.00	10.30	7.17	0.28

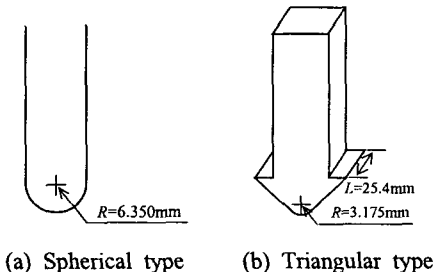


Fig. 1 Impactor type

2.2 저속충격시험

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

충격체의 질량은 10.88kg이며 사용된 충격체(impactor)는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 반원형(spherical) 및 삼각형(triangular)으로서 반원형 충격체의 곡률 반경은 6.35mm, 삼각형 충격체의 곡률 반경 및 전후 폭은 각각 3.175mm 및 25.4mm이다. 또한 삼각형 충격체의 경우 충격체와 표면의 섬유방향사이에는 상대성이 존재하므로 이러한 방향 상대성에 대한 충격손상을 검토하기 위하여 Fig. 2와 같이 충격체가 섬유방향에 평행한 경우와 직각인 경우로 구분하여 시험을 수행하였다. 따라서 충격체는 반원형, 삼각형-평행방향 및 삼각형-직각방향 충격체로 구분할 수 있다. 한편 작용 충격에너지는 고압압력용기의 충돌 조건을 고려하여 30, 60 및 90J로 선정하였다. 이에 따라 본 논문에서 고려한 시험조건은 충격체 3종류 및 작용에너지 3종류, 총 9종류이다.

섬유강화 복합재료에 충격하중이 가해지면 충격손상이 발생하게 되므로 이의 가시화(visualization)를 위해서 초음파 탐상법을 이용한 비파괴 시험을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 초음파 검사기는 초음파 현미경(SONIX, HS1000)으로서 탐촉자(transducer)의 주파수는 15 MHz를 사용하였다.

또한 시험편 두께 방향으로의 충격손상을 평가하기 위하여 각 시험조건을 대표하는 9개의 시험편을 표면의 섬유방향과 평행 및 직각 방향으로

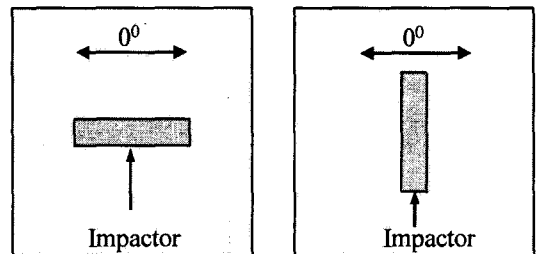


Fig. 2 Relative directions of impactor

절단 및 연마한 후 금속현미경을 이용하여 두께 방향의 충격손상을 관찰하였다. 여기서 시험편을 가로 및 세로방향으로 절단하여 연마 및 관찰한 것은 충격체의 방향 및 시험편 표면의 섬유 방향과 충격손상의 상관관계를 검토하기 위함이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 충격저항성 평가 인자 선정

적층복합재료에 충격하중이 가해지면 모재균열, 층간분리 및 섬유파단 등의 충격손상이 발생하며 이는 구조물의 건전성에 매우 큰 악영향을 미치게 되어 구조물의 안전성 또는 신뢰성은 크게 저하한다.⁽⁹⁾ 이의 해결을 위해서는 구조물의 충격저항성을 향상시켜야 하며 이를 위한 첫 번

째 단계는 충격저항성을 평가할 수 있는 인자의 객관적이고 합리적인 선정에 있다. 이러한 충격저항성 평가 인자는 크게 충격하중선도 기반 인자 및 충격손상 기반 인자의 두 종류로 구분될 수 있다.⁽¹⁰⁾

먼저 충격하중선도 기반 인자의 선정을 위하여 충격손상이 발생하지 않은 경우 및 충격손상이 발생한 경우의 충격하중선도의 예를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 충격손상이 발생하지 않은 경우의 하중선도는 전형적인 사인파의 형태를 보이고 있으나 충격손상이 발생한 경우는 하중의 극대(peak) 및 극소(valley) 현상이 관찰되고 있다. 이와 같이 하중선도상의 극대 및 극소값이 발생하는 현상은 충격손상이 심각하게 발생하여 표면 부위의 하중지지능력이 소멸되어 하중이 급격하게 감소되고 이어서 표면 하중 부위가 하중을 지지하면서 생기는 현상이라고 보고되고 있다.⁽¹¹⁾ 따라서 이러한 충격하중선도의 특성 변화는 충격저항성을 정량화할 수 있는 인자라고 할 수 있으며 이러한 인자들은 다음과 같이 5종류로 구분될 수 있다.

- (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}

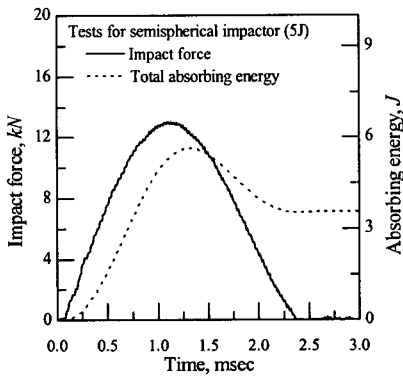
한편 충격손상 기반 인자는 일반적으로 복합재료 구조물 내외부에 발생한 충격손상을 광학적으로 촬영한 후 이를 정량화한 것으로 본 논문에서는 다음과 같은 2종류의 인자를 충격손상 기반 충격저항성 인자로 선정하였다.

- (6) 초음파현미경을 통한 시험편 표면 충격손상
- (7) 금속현미경을 통한 두께방향 충격손상

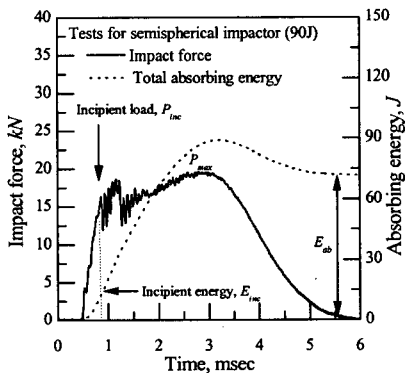
3.2 충격저항성 평가

3.2.1 충격손상 발생 하중

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 충격손상이 발생하지 않은 경우의 매우 매끈한 충격하중선도와는 달리 충격손상이 발생한 경우는 국부적인 진동 및 하중의 저하 현상이 발생하고 있다. 이러한 현상은, 충격손상 발생 부위는 국부적인 불연속부로 생각할 수 있으므로 하중지지능력이 급격히 저하되고 또한 이로 인하여 복합재료 구조물 전체의 강성이 순간적으로 저하 즉, 충격하중이 순간적으로



(a) Impact energy 5.0J



(b) Impact energy 90J

Fig. 3 Impact force histories

감소하여 발생하는 것으로 판단된다. 충격체가 이러한 충격손상 발생부위를 지나 계속해서 구조물에 충격을 가하게 되면 충격손상 발생부위 하단부에 이르게 되고 이 부위는 강성이 저하되지 않았으므로 하중은 다시 증가하게 된다. Fig. 3(b)의 충격손상 발생시의 충격하중선도는 이러한 과정이 반복하여 형성되는 것이다. 이러한 충격손상 및 충격하중선도의 상관관계를 고려할 때, 충격손상이 최초로 발생하는 하중 즉, 충격손상 발생 하중(P_{inc})은 구조물의 충격저항성과 밀접한 관련이 있다. 이러한 충격손상 발생 하중 거동을 명확히 검토하기 위하여 Fig. 4에 충격손상 발생 하중을 충격체의 종류별로 정리하여 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 복합재료 구조물의 충격손상 발생 하중은 세 종류의 충격체 종류의 경우 모두 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이러한 경향은 그 이하에서는 충격손상이 발생하지 않는 에너지 즉, 하한계 에너지(threshold energy) 이상의 에너지가 가해지면 충격손상이 항상 발생하므로 입사충격에너지에 관계없이 항상 일정한 지점 즉, 일정한 하중에서 충격손상의 발생이 시작된다는 개념과 일치하고 있다. 따라서 충격손상 발생 하중은 본 논문에서 다루고 있는 복합재료 구조물 표면층의 충격체 종류별 최대지 하중이라고 할 수 있다.

한편 충격손상 발생 하중은 입사충격에너지에 관계없이 일정한 값을 유지하고 있으나 충격체의 종류에 따라 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 반원형 충격체의 경우는 15kN, 삼각형 충격체의 경우는 약 25kN으로서 이러한 차이가 발생

하는 것은 반원형 충격체의 경우 그 형상으로 인하여 구조물에 보다 집중된 하중이 가해지므로 충격손상의 발생이 타 충격체에 비하여 용이하다고 할 수 있다. 따라서 충격손상 발생하중으로 판단컨대 반원형 충격체의 경우가 가장 심각한 충격손상을 야기한다고 할 수 있다.

3.2.2 충격손상 발생 에너지

충격손상 발생 에너지(E_{inc})는 충격손상 발생 하중과 상당히 유사한 개념으로써 구조물의 하한계 에너지와 밀접한 관계가 있으며 충격손상 발생하중시의 에너지 값을 취하여 구하게 된다. 여기서 하한계 에너지는 구조물에 충격손상이 발생할 수 있는 최대 에너지로서 하한계 에너지 이하의 충격에너지가 작용할 경우에는 구조물에 손상이 발생하지 않는다는 개념이다. 따라서 이러한 충격손상 발생에너지는 구조물의 충격저항성을 나타내는 주요 인자라 할 수 있다. 이러한 충격손상 발생 에너지 거동을 보다 명확히 검토하기 위하여 Fig. 5에 충격손상 발생 에너지를 정리하여 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 충격손상 발생에너지는 입사충격에너지의 크기와 관계없이 일정하게 유지되며 이러한 경향은 세 종류의 충격체에 대하여 모두 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 충격손상 발생하중은 입사충격에너지와 관계없이 일정하게 유지된다는 3.2.1절의 내용과 일치하고 있다. 또한 충격손상 발생 에너지로부터 충격손상이 발생하지 않는 최저 에너지 즉, 하한계에너지는 반원형 충격체의 경우 약 12.7J, 삼각형-평

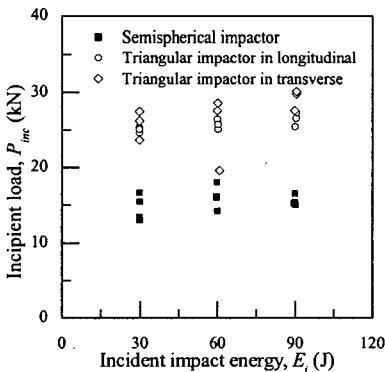


Fig. 4 Incipient load, P_{inc}

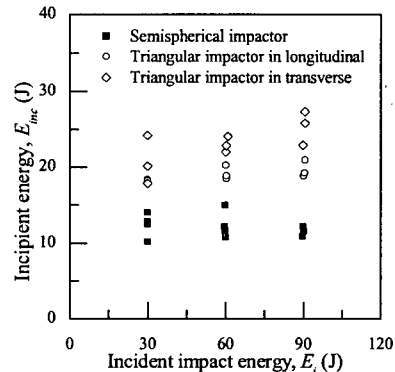


Fig. 5 Incipient energy, E_{inc}

행방향 및 삼각형-직각방향 충격체의 경우는 각각 19.0J 및 21.0J에 해당된다. 이로부터 본 논문의 고압압력용기는 반원형 충격체가 가장 심각한 손상을 야기한다고 판단된다.

3.2.3 최대 충격하중

최대 충격하중(P_{max})은 충격에너지 작용시 복합재료 구조물이 받게되는 충격하중의 최대값으로서 구조물의 굽힘강성, 접촉강성 및 충격손상과 밀접하게 관련된 인자이다. 이러한 최대 충격하중 거동을 명확히 검토하기 위하여 Fig. 6에 최대 충격하중을 정리하여 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 반원형 충격체의 경우 최대 충격하중은 입사충격에너지와 관계없이 거의 일정함을 알 수 있다. 이러한 경향은 반원형 충격체에 의한 충격손상은 30J의 입사충격에너지의 경우에도 매우 심각하게 발생하여 이 이상의 하중을 지지할 능력이 없는 것으로 판단된다. 반면에 삼각형 충격체의 경우 최대 충격하중은 매우 높으며 동시에 입사충격에너지에 따라 점차 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 앞에서도 설명하였듯이 삼각형 충격체의 충격손상은 반원형 충격체에 비하여 상대적으로 미미하며 이에 따라 일정한 양의 하중지지 능력을 보유하고 있기 때문이라고 판단된다. 따라서 최대 충격하중으로 판단한 충격손상의 정도는 역시 반원형 충격체의 경우가 가장 심각하다고 판단된다.

3.2.4 최대 흡수에너지

구조물에 일정한 충격에너지가 가해지면 구조

물에는 막 효과(membrane effect)에 의한 진동, 처짐, 국부 압입(local indentation) 및 충격손상 등과 같은 다양한 현상이 발생하게 되며 이러한 현상들로 인하여 충격에너지는 구조물에 흡수된다. 또한 구조물에 흡수되지 못한 충격에너지의 일부 부분은 충격체의 반동 형식으로 소모되게 된다. 최대 흡수에너지 E_{ab} 는 입사 충격에너지 중에서 진동, 처짐 등의 복합재료 구조물의 탄성거동과 충격손상 등의 소성 거동에 의하여 흡수된 에너지의 합이다. 이러한 최대 흡수에너지 거동을 명확히 검토하기 위하여 Fig. 7에 최대 흡수에너지를 정리하여 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 최대 흡수에너지는 입사충격에너지의 증가에 따라 역시 증가하며 이는 입사충격에너지가 증가하면 이에 따라 충격손상 뿐만 아니라 처짐, 진동 등의 탄성 거동 역시 증가하므로 당연한 결과라고 판단된다. 또한 최대 흡수에너지는 충격체의 종류에 따른 차이가 존재하지 않음을 알 수 있으며 이러한 거동은 반원형 충격체의 경우 충격손상이 심하여 상대적으로 충격손상에 의하여 흡수된 에너지는 많고 진동 등의 탄성 거동에 의해 흡수된 양은 적으나 삼각형 충격체의 경우 역으로 충격손상에 의해 흡수된 에너지는 적으며 탄성 거동에 의해 흡수된 에너지는 많아 충격체에 따른 차이가 존재하지 않는다고 판단된다. 따라서 최대 흡수에너지로는 충격체의 종류에 따른 충격손상 거동의 차이를 구분할 수 없음을 알 수 있다.

3.2.5 소성 흡수에너지

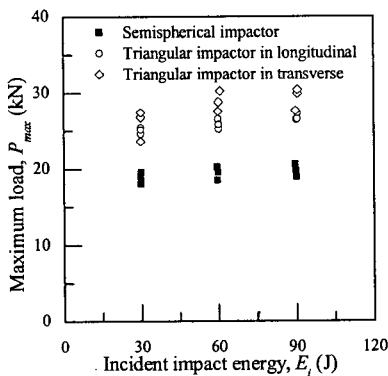


Fig. 6 Maximum load, P_{max}

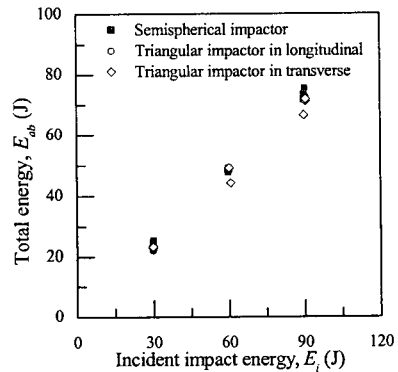
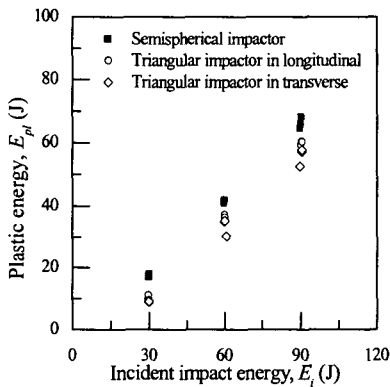
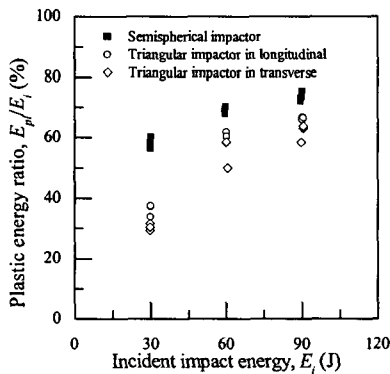


Fig. 7 Total absorbing energy

소성흡수에너지(E_{pl})은 충격손상 등으로 인하여 흡수된 에너지를 지칭하는 것으로써 Fig. 7의 최대 흡수에너지에서 구조물의 진동, 처짐 등에 의해 흡수되는 탄성흡수에너지(elastic absorbing energy, E_{el})를 차감하여 구할 수 있다. 이를 계산하기 위해서는 충격손상이 발생하지 않는 최대 에너지인 하한계 에너지에서 충격시험을 실시하고 이로부터 계산된 최대 탄성흡수에너지를 평가해야 한다. 본 논문에서는 이를 위하여 3.2.2절에서 평가된 충격손상 발생 에너지에서의 시험을 각 충격체에 대하여 추가로 실시하여 탄성흡수 에너지를 구하였다. 이러한 탄성흡수에너지는 반원형, 삼각형-평행방향 및 삼각형-직각방향 충격체에 대하여 각각 약 7.1J, 12.0J 및 14.0J로 평가되었다.



(a) Plastic absorbing energy, E_{pl}

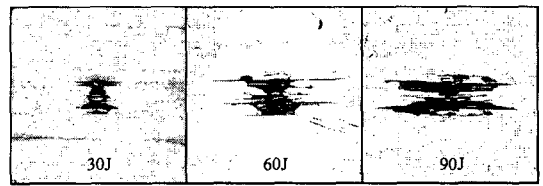


(b) Plastic energy ratio, E_{pl}/E_i

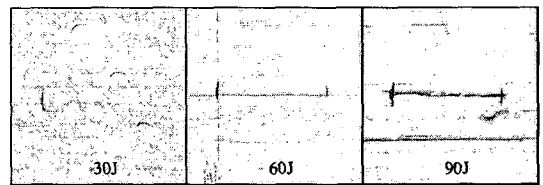
Fig. 8 Plastic absorbing energy

Fig. 8은 이상의 방법을 통하여 구한 소성흡수 에너지 및 소성흡수에너지비(입사 충격에너지에 대한 소성흡수에너지의 비)를 입사충격에너지에 대하여 나타낸 것이다. 소성흡수에너지를 나타낸 Fig. 8(a)에서 알 수 있듯이 입사충격에너지의 증가에 따라 소성흡수에너지는 증가하고 있으며 특히 반원형 충격체의 소성흡수에너지가 타 충격체에 비하여 높음을 알 수 있다. 이는 반원형 충격체에 의한 충격을 받은 복합재료 구조물이 소성 거동에 의해 에너지를 많이 흡수 즉, 충격손상이 심각함을 의미한다. 이러한 경향은 소성흡수에너지비를 나타낸 Fig. 8(b)에서 보다 분명하게 나타나고 있다. 즉, 반원형 충격체의 소성흡수에너지비가 가장 높게 나타나고 이는 입사충격에너지 중에서 충격손상 발생 및 진전에 사용된 에너지가 가장 높은 비율임을 의미한다. 따라서 소성흡수에너지는 입사충격에너지 및 충격체의 종류에 따른 충격손상 거동을 정량적으로 나타낼 수 있는 훌륭한 인자가 됨을 알 수 있다.

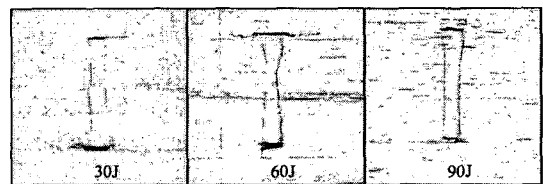
3.2.6 시험편 표면의 충격손상



(a) Spherical impactor



(b) Triangular impactor in longitudinal



(c) Triangular impactor in transverse

Fig. 9 Impact damage by SAM

시험편 표면의 손상 특성을 관찰하기 위하여 각 충격체에 대한 복합재료 구조물의 충격면을 초음파 현미경으로 촬영하였다. Fig. 9는 이와 같이 관찰된 충격손상의 대표적인 예를 입사충격에너지별로 나타낸 것이다.

Fig. 9(a)는 반원형 충격체에 의한 충격손상 양상을 60×60mm의 영역에 걸쳐 초음파 현미경으로 촬영한 후 이를 입사충격에너지별로 나타낸 것으로 입사충격에너지의 증가에 따라 충격손상의 면적 역시 증가함을 알 수 있다. 따라서 반원형 충격체에 의한 충격손상은 초음파 현미경을 이용한 손상 촬영을 통하여 구한 충격손상의 면적으로 정량화가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 9(b) 및 9(c)는 각각 삼각형-평행방향 및 삼각형-직각방향 충격체에 의한 충격손상을 40×40mm의 영역에 걸쳐 초음파 현미경으로 촬영한 후 이를 입사충격에너지별로 나타낸 것으로 충격체의 형상과 유사한 충격손상 양상이 나타나고 있다. 그러나 이의 정량화는 곤란하다고 판단되며 또한 입사충격에너지의 증가에 따른 충격손상의 증가 역시 정량화가 불가능하다고 사료된다. 따라서 삼각형-평행방향 및 삼각형-직각방향 충격체에 의한 충격손상은 초음파 현미경을 통한 정량화가 곤란함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 초음파 현미경을 통한 충격손상 평가는 충격손상 거동 평가에 유용함을 알 수 있었다. 그러나 입사충격에너지에 따른 충격손상의 정량화는 반원형 충격체에 의한 충격손상의 경우에만 가능함을 알 수 있었다. Fig. 10은 이러한 반원형 충격체에 의한 충격손상의 면적을

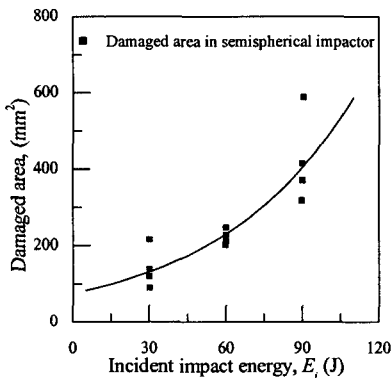


Fig. 10 Impact damage with energy

구한 후 이를 입사충격에너지에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 충격손상 면적은 일부 흠어짐이 존재하지만 입사충격에너지에 대하여 지수 함수적으로 증가함을 알 수 있다. 이로부터 초음파 현미경 촬영을 통하여 구한 충격손상의 면적은 입사충격에너지의 증가에 따른 충격손상의 증가를 표현할 수 있음을 알 수 있다.

3.2.7 두께 방향 충격손상

충격체의 종류와 입사충격에너지에 따른 시험편 두께 방향의 충격손상의 형상 및 분포 특성을 평가하기 위하여 충격손상이 발생한 복합재료 구조물을 표면의 섬유방향에 대하여 평행 및 직각 방향으로 절단하여 이의 단면을 연마한 후 금속 현미경으로 관찰하였다. Fig. 11은 이와 같이 관찰된 충격손상 중에서, 60J의 에너지를 받은 시험편의 표면 섬유방향에 평행한 단면을 대표적으로 나타낸 것이다. 여기서 수직 화살표는 충격 중심점을 나타낸다.

Fig. 11(a)는 반원형 충격체에 의하여 충격손상을 나타낸 것으로서 최상부의 hoop 층이 완전히 파괴된 형상을 보이고 있으며 이러한 충격손상의 종류를 섬유파단, 층간분리 혹은 모재균열 등으로 분리하는 것 자체가 무의미함을 알 수 있다. 특히 충격점에서 일정 거리만큼 떨어진 부분도 섬유가 완전히 파단된 특징을 알 수 있다. 이러한 경향은 30J 및 90J의 충격에너지를 받은 경우 역시 손상의 정도 차이만 존재할 뿐 상당히 유사한 현상이 관찰되었다. 따라서 반원형 충격체의 경우 충격에너지의 크기와 관계없이 표면의 hoop 층은 완전히 파괴되며 또한 충격에너지의 증가에 따라 hoop 층의 하부층 역시 매우 심각한 충격손상이 발생됨을 알 수 있었다.

Fig. 11(b)는 삼각형-평행방향 충격체에 의한 충격손상을 나타낸 것이다. 그림에서 충격점 하단부에서 섬유 다발이 약간 휘어진 현상 및 국부적인 파단이 관찰되고 있다. 또한 hoop 층과 하부층 사이의 경계면의 층간분리 역시 관찰되고 있다. 그러나 이러한 충격손상은 반원형 충격체에 비하여 상당히 미미한 손상이며 특히 Fig. 11(b)의 경우보다 낮은 30J의 에너지가 가해졌을 경우 hoop 층에는 소량의 섬유파손만이 관찰되었으며 또한 충격에너지가 90J에 이르러야 삼각형-평행방향 충격체에 의한 충격손상은 본격적인

발생 및 진전이 관찰되었다. 따라서 삼각형-평행 방향 충격체에 의한 충격손상을 받은 복합재료 구조물은 반원형 충격체의 경우보다 상당한 양의 하중지능력은 보유하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 11(c)는 삼각형-직각방향 충격체에 의한 충격손상을 나타낸 것이다. 그림에서 충격점 우측의 대각선 방향 섬유 파단 현상 및 충격점 인근의 hoop 층 파괴 현상이 나타나고 있다. 또한 충격점 하단부에서 발생한 충격손상이 대각선 방향으로 진전하여 hoop 층과 하단층 사이의 경계면의 층간분리와 연결되고 있음을 알 수 있다. 이

러한 충격손상은 반원형 충격체 및 삼각형-평행 방향 충격체에 의한 충격손상의 중간정도에 해당됨을 알 수 있었다.

이로부터 충격손상의 심각성 측면에서 평가할 경우, 충격손상이 가장 심각하게 나타나고 충격체는 반원형 충격체이며 hoop 층의 섬유 파단 현상이 가장 명확하게 관찰되고 있는 충격체는 삼각형-직각방향 충격체임을 알 수 있다. 또한 두께 방향 충격손상의 관찰을 통하여 입사충격에너지 및 충격체의 종류에 따른 충격손상의 평가가 가능함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 필라멘트 와인딩 기법으로 제작된 고압압력용기에서 채취한 두꺼운 시험편을 대상으로 저속 충격 시험 및 충격손상 평가를 수행하였다. 이를 통하여 충격체의 형상 및 작용 충격에너지에 따른 고압압력용기의 충격손상을 분석하여 충격 저항성 및 손상 발생 특성을 평가하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

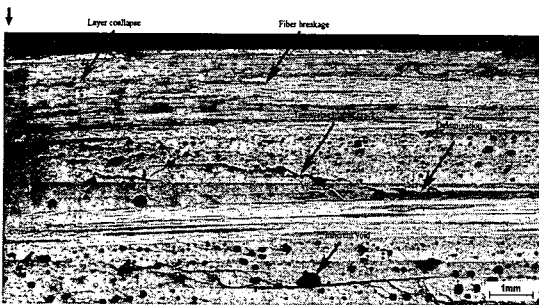
1. 충격하중으로 인하여 복합재료 구조물에 발생하는 충격손상의 심각성을 정량화 하기 위하여 충격저항성 인자를 도입하였으며 이는 크게 (1) 충격하중선도 기반 인자 및 (2) 충격손상 기반 인자로 구분되었다.

2. 이상의 충격저항성 인자를 기반으로 세 종류의 충격체 형상 및 입사충격에너지에 대하여 평가한 결과 본 연구에서 선정한 충격저항성 인자는 복합재료 구조물의 충격저항성을 정량화할 수 있음이 밝혀졌다.

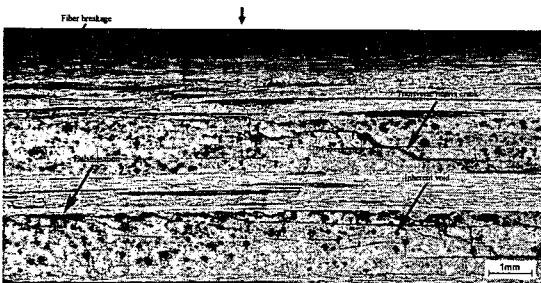
3. 반원형, 삼각형-평행방향 및 삼각형-직각방향 충격체에 대한 충격손상 및 충격저항성을 검토한 결과 반원형 충격체에 의한 충격손상이 가장 심각하며 삼각형-직각방향 충격체의 경우는 표면층의 섬유파단 현상이 가장 심각하다고 판단된다.

참고문헌

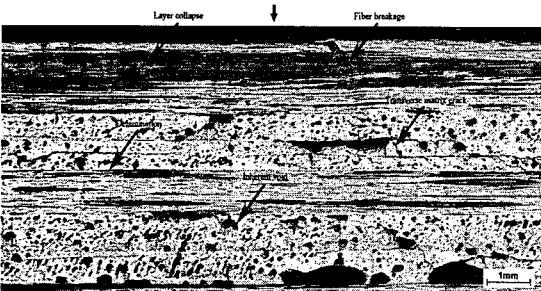
- (1) Peters, S. T., Humphery, W. D. and Foral, R. F., 1991, "Filament Winding Composite Structure Fabrication," SAMPE.
- (2) Mallick, P. K. and Newman, S., 1990, "Composite Materials Technology, Process and



(a) Spherical impactor



(b) Triangular impactor in longitudinal direction



(c) Triangular impactor in transverse direction

Fig. 11 Through-the-thickness damage at 60J

- Properties, Hanser Publishers, pp. 193~210.
- (3) J.H. Kweon, S.G. Joo, C.S. Hong, S.H. Yoon, W.M. Cho, 1992, "Nonlinear Finite Element Analysis of Filament Wound Pressure Vessels," *Journal of KSAS*, Vol. 20, No. 4, pp. 71~81.
- (4) Yoon, Y.B., Cho, S.W. and Ha, S.K., 2002, "Optimal Design of Filament Wound Composite CNG Pressure Vessel," *Transactions of the KSME A*, Vol 22, No. 1, pp. 22~30.
- (5) Highsmith, A. L, Ledbetter, F. E., Nettles, A. and Russel, S. S., 1996, "Low Velocity Impact Damage in Filament-Wound Composite Pressure Bottles," *Journal of Composites Technology & Research*, Vol. 18, No. 2, pp. 109~117.
- (6) Poc Jr., C. C., 1991, "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.
- (7) Toland, R. H., 1973, "Impact Testing of Carbon Fibre Composite Materials," ASTM STP 569, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, pp. 133~145.
- (8) Paris, H. G. 1994, "Assessment of Impact Damage of Composite Rocket Motor Cases," NASA Technical Report NAG-1016.
- (9) Abrate, S., 1991, "Impact on Laminated Composite Materials," *Applied Mechanics Rev.* Vol. 44, No 4, pp. 155~190.
- (10) Lance, D. G. and Nettles, A. T., 1990, "Low Velocity Instrumented Impact Testing of Four New Damage Tolerant Carbon/Epoxy Composite Systems," NASA Technical Report TP-3029.
- (11) Poon, C., Benak, T. and Gould, R., 1989, "Assessment of Impact Damage in Toughened Resin Composites," National Research Council Canada, Report LTR-ST-1695.