論文

하이브리드 복합재 철도차량 차체 적용 적층판의 저속충격특성 연구

김정석*+, 이재헌*, 정성균**

A Study on the Low Velocity Impact Response of Woven Fabric Composites for the Hybrid Composite Train Bodyshell

Jung-Seok Kim*+, Jae-Hean Lee*, Seong-Kyun Cheong**

ABSTRACT

This paper presents a study on the low velocity impact response of the woven fabric laminates for the hybrid composite bodyshell of a tilting railway vehicle. In this study, the low velocity impact tests for the three laminates with size of 100mm×100mm were conducted at three impact energy levels of 2.4J, 2.7J and 4.2J. Based on the tests, the impact force, the absorbed energy and the damaged area were investigated according to the different energy levels and the stacking sequences. The damage area was evaluated by the visual inspection and the C-scan device. The test results show that the absorbed energy of [fill]8 laminate is highest whereas [fill2/warp2]s is lowest. The [fill]8 laminate has the largest damage area because of the highest impact energy absorption.

초 록

본 논문에서는 하이브리드 복합재 철도차량차체에 적용되는 복합적층판에 대한 저속충격시험을 수행하였다. 이를 위해 2.4J, 2.7J 및 4.2J의 세 가지 충격에너지 조건에서 세 가지의 다른 적층구조를 갖는 적층판에 대한 저속충격시험을 수행하였다. 시험에 적용된 직조된 카본/에폭시 적층판의 크기는 100mm×100mm 이다. 충격시험 후 충격하중이력, 흡수된 에너지 및 손상면적 등이 각 충격에너지와 적층순서에 따라 고찰되었다. 손상면적은 육안검사와 C-scan을 이용하여 동시에 검사하였다. 시험결과 흡수된 에너지는 $[fill]_8$, 적층판이 가장 높았고 $[fill_2/warp_2]_s$ 적층판이 가장 낮았다. 또한 손상면적은 $[fill]_8$, 적층판에서 가장 넓은데 이것은 상대적으로 흡수에너지가 높기 때문이다.

Key Words: 하이브리드 철도차량 차체(hybrid railway vehicle bodyshell), 저속충격(low velocity impact), 층간분리 (delamination), 비파괴 검사 (NDT)

1. 서 론

철도차량(rolling stock)은 철도 시스템(railway system)에서 가장 유지보수(maintenance)가 많이 요구되는 부분이며 또한 유지보수가 무시될 경우 가장 취약한 부분이기도 하다[1]. 비록 유지보수비용은 정기적으로 요구되지만 만약 이 때문에 유지보수를 간과할 경우 추후 막대한 비용이 투입되어야 한다. 만약 유지보수 미흡으로 철도차량이 선로에서 정지할 경우 기존 승용차나 항공기와 다른 철도의 특성상 상당한 시간동안 동일 선로를 이용하는 타 차량의 운

*+ 한국철도기술연구원 선임연구원, 교신저자(E-mail: jskim@krri.re.kr)
* 서울산업대학교 기계공학과 대학원
** 서울산업대학교 기계공학과 교수

행은 불가능해지며 이는 막대한 비용, 시간 손실 및 신뢰성에 치명적인 손상을 가져오게 된다. 특히 신뢰성은 모든 대중교통수단의 성공적인 운영에 있어서 가장 중요한 요소이며, 이러한 신뢰성을 확보하기 위해 적절한 유지보수는 가장 우선순위가 높은 항목이라 할 수 있다. 특히 현재 철도기술연구개발사업에서 개발 중인 한국형 틸팅열차와 같이 금속재의 골조와 직조(woven fabric)형태의 carbon/epoxy를 면재로 갖고 알루미늄 하니콤을 심재로 갖는 샌드위치 구조물이 일체형으로 제작되는 하이브리드(hybrid)형태의 철도차량 차체(body shell)의 경우에는 이전에 제작된 전례가 없기 때문에 이에 대한 유지보수 기법과 절차를 확립하는 것은 하이브리드 복합재 차체의 성공에 있어서 중요한 요인(key factor) 중의 하나라고 할 수 있다.

철도차량의 차체구조는 철도차량이 처음 운행을 시작한 이후 지속적으로 발전해 왔다. 철도차량 차체 제작업체인 Alcan Composites[2]의 자료에 의하면 철도차량 차체의 변화과정은 Table 1과 같다.

Table 1 Design steps for bodyshell of railway coaches

년도	1955	1965	1975	1985	1995
차체형식					
적용기술	Aircraft design	Steel design in Aluminium	Large extrusions	Double wall extrusions without stiffeners	Hybrid design
제작기간(시간)	5,000	1,900	1,200	1,000	800
무게(톤)	5.5	6.5	7.5	7.8	7.0

표 1에서와 같이 금속재와 복합재를 혼합한 형태인 하이브리드형 철도차량 차체의 경우 제작시간이나 무게 측면에서 기존의 강철(steel)이나 알루미늄 압출재(Aluminium extrusion) 차체에 비해 유리한 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 하이브리드형식으로 제작되어 상업운행중인 열차 중에서 차체 전부분에 걸쳐 복합재가 적용된 사례는 없으며 대부분 지붕구조나 사이드 판넬 등 일부 구조물에 복합재가 적용되고 있는 실정이다. 따라서 복합재를 적용한 철도차량 차체의 유지보수에 대한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 연구는 현재 개발 중인 하이브리드형 틸팅열차의 복합재 차체에 대한 유지보수기법 및 절차를 확립하기 위한 연구의 일환으로 복합재 차체를 갖는 철도차량 차체에 가장 심각한 손상을 초래[3-5]할 수 있는 차체 샌드위치 구조물의 면재에 대한 저속충격 하에서 특성을 고찰하였다. 이를 위해 복합재 차체에 적용 예정인 직조된 carbon/epoxy 적층판에 대한 충격시험을 수행하고 충격에너지별 손상영역을 평가하였다.

2. 하이브리드 복합재 차체 적용 적층판의 저속 충격거동 평가

고속 틸팅열차용 하이브리드 복합재 차체는 Fig. 1과 같이 직조된 carbon/epoxy 적층판을 면재로 갖고 알루미늄 하니콤 심재를 갖는 샌드위치 구조를 적용하여 제작된다. 이러한 복합재 샌드위치 구조물은 철재 골조와 혼합되어 차체를 형성하게 된다.

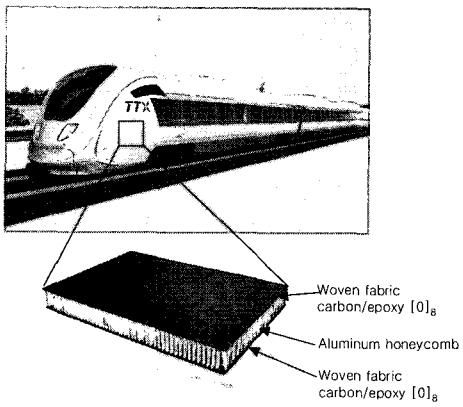


Fig. 1 Hybrid bodyshell of the tilting train.

본 철도차량 차체구조에서 직조형태의 복합재를 적용한 이유 중 하나는 일방향 복합재 (unidirectional composites)에 비해 충격에 대한 저항성이 우수한 것으로 알려져 있기 때문이다. 즉, 일반적으로 직조형태의 복합재는 강화섬유가 서로 직각방향으로 정렬되어있고, 한방형의 섬유는 다른 방향 섬유의 위와 아래 방향으로 엇갈려 짜여져(interlaced) 구조이므로 충격 시 층간분리가 적층판의 두께방향으로 전파하기 위해서는 경사(warp) 또는 위사(fill)방향의 섬유를 절단해야 한다. 만약 충격에너지가 이러한 섬유를 파단시킬 만큼 충분히 크지 못할 경우에는 균열의 성장은 차단된다. 또한 평면(in-plane)상에서도 양방향 섬유가 서로 꼬여 구불구불한(crimped)한 표면을 형성하므로 평면상에서 충격에너지 전파를 차단하여 층간분리의 성장을 제한하게 된다. 또한 충격에 의한 층간분리영역이 국부적으로 존재하기 때문에 잔류압축강도 저하도 상대적으로 낮다. 따라서 직조형태의 복합재는 일방향 복합재에 비해 충격에 대한 저항성이 우수한 것으로 알려져 있다[6-9]. 본 연구에서는 샌드위치 구조물의 면재에 해당하는 직조된 복합적층판에 대한 저속충격시험을 수행하고 충격에너지별, 적층순서별 흡수에너지와 손상면적을 평가하였다. 이렇게 손상이 발생한 적층판은 추후 수지주입(resin injection)과 같은 유지보수기법을 적용하여 강도회복정도를 평가할 예정이다.

2.1 시험편 제작

충격시험에 적용된 시험편은 평직(plain weave)형태의 직조(fabric) 적층판으로 각 플라이의 두께는 0.27mm이다. 본 연구에서 사용된 재료는 한국화이바에서 제작한 직조된 CF3327 카본/에폭시 프리프레그(fabric prepreg)를 사용하였다. 실제 복합재 차체는 hand-layup으로 적층된후 길이 30m와 직경이 5m인 오토그레이브에서 성형될 것이다. 따라서 본 연구에서 제작되는 시험편 역시 실제 차체의 제작공정과 동일한 방법으로 제작되었다.

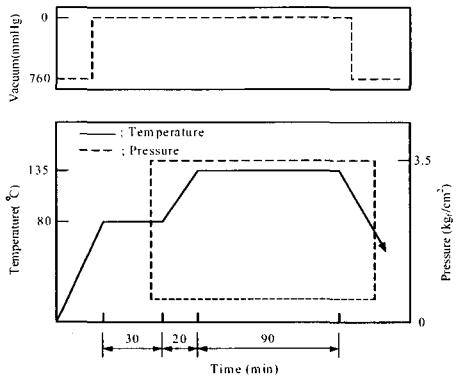
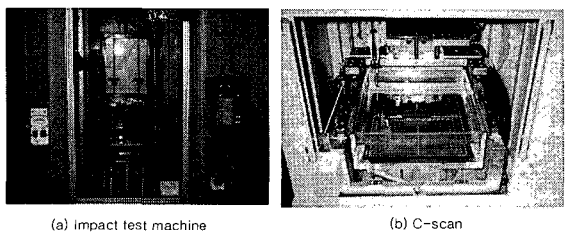


Fig. 2 Autoclave curing cycle.

본 연구에서 적층판의 성형 시 적용된 오토클레이브의 압력과 온도의 이력은 Fig. 2와 같다. 시험편은 성형된 적층판을 다이아몬드 절단기를 이용하여 100mm×100mm로 절단하여 제작하였다.

2.2 충격시험장치

시험편에 대한 저속충격시험은 자유낙하 방식의 충격시험기(INSTRON dynatup 9250HV)를 이용하였으며 시험기 사진은 Fig. 3(a)와 같다. 충격시험기 충격체의 질량은 1.39kg이며 시험편이 시험 중 충격에 의해 움직이는 것을 방지하기 위해 에어클램프로 고정하였다. 또한 충격에너지는 충격체의 낙하높이를 변화시키면서 조절하였다.



(a) impact test machine (b) C-scan

Fig. 3 Impact test machine and damage detection system.

Table 2 Material properties of CF3327 carbon/epoxy

Material properties	Fill	Warp
Tensile modulus (GPa)	48.3	55.5
Tensile strength (MPa)	548.9	642.2
Inplane shear modulus (GPa)	3.65	3.81
Inplane shear strength (MPa)	114.71	123.38
Flexural modulus (GPa)	46.43	48.54
Flexural strength (MPa)	775.64	797.47
Interlaminar shear strength (MPa)	75.28	75.39
Poisson's ratio	0.070	0.099

충격에 의해 발생한 손상영역은 Fig. 3(b)와 같은 25MHz 초음파 C-Scan장비(Mi-scope, Hitachi)를 사용하여 관찰하였다.

본 시험에 적용된 직조 적층판의 경사(warp)와 위사(fill) 방향으로의 물성은 Table 2와 같다. Table 2에서 알 수 있듯이 경사방향의 강성이 위사방향에 비해 약 15%크고 강도도 역시 큰 것을 알 수 있다.

3. 저속충격시험결과

3.1 충격에너지별 충격거동

복합 적층판에 가해지는 외부 충격에너지의 변화에 따른 적층판의 거동을 분석하기 $[fill]_8$ 적층판에 대해 2.4J, 2.7J, 4.2J 세 가지의 에너지 변화에 대해 시험하였다. 일반적으로 저속충격시험에서 하중과 에너지 이력은 손상의 발생과 진전에 대한 중요한 정보를 제공하게 되는데 Fig. 4와 5는 충격에너지증가에 따른 충격하중의 이력과 하중-변위 선도를 나타낸 것이다.

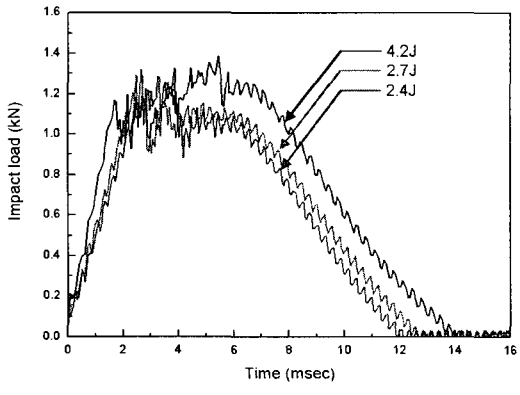


Fig. 4 Impact load history for impact energy of 2.4J.

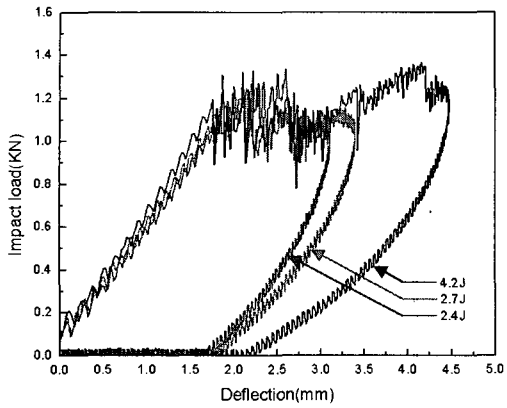


Fig. 5 Impact load and displacement curve.

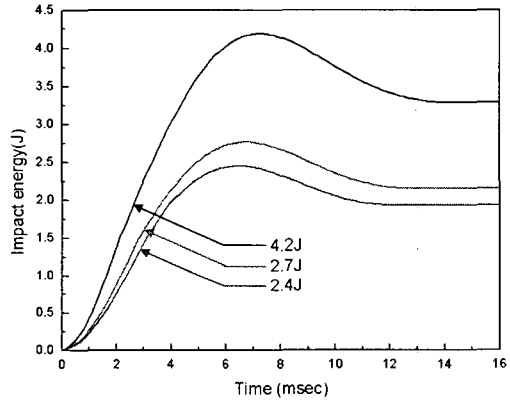


Fig. 6 Impact energy history.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 충격에너지가 증가할수록 하중-시간곡선의 기울기가 증가하는 것을 알 수 있으며 충격체와 적층판의 접촉시간은 12msec, 12.7msec와 14.1msec로 역시 충격하중이 증가할수록 증가하였다. 또한 헤르찌안 파손(Hertzian failure)은 각각 3.8msec, 2.6msec 와 1.7msec에서 발생하였다. 또한 헤르찌안 파손 이후에는 급격한 하중의 급격한 감소가 발생하는데 이것은 적층판에 층간분리나 섬유파손과 같은 손상발생을 의미한다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 하중성분에서 발생하는 고주파 성분을 통해 층간분리와 섬유파손과 같은 손상이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4에서 충격에너지가 2.4J의 경우에는 일차 파손발생이후에는 비교적 균일한 형태로 하중이 감소하지만 충격에너지가 2.7J과 4.2J일 경우에는 일차 파손발생후 하중이 증가한 후 감소하는 경향을 보이는데 이것은 충격에너지의 증가에 따라 증가된 충격에너지를 변형과 2차 파손을 통해서 흡수하기 때문으로 판단된다. 각각의 충격하중에 대한 최대충격하중은 1.3kN, 1.33kN 및 1.39kN이었다. Fig. 5는 충격하중의 이력과 하중-변위선도를 나타낸 것인데 최대변위는 각각 3.11mm, 3.4 mm 와 4.52mm였다. Fig. 6은 각 충격에너지에 따른 충격에너지 이력을 나타낸 것이다. 이 경우 각 충격에너지별 흡수에너지는 Table 3과 같다.

Table 3 Impact and absorbed energy

Impact energy	Absorbed energy	Absorbed energy rate
2.45J	1.90J	77.5%
2.76J	2.15J	77.9%
4.19J	3.29J	78.5%

Table 3에서 알 수 있듯이 각 충격하중조건에 대해서 흡수된 에너지의 비율은 77.5% ~ 78.5% 범위에 있었고 충격에너지가 증가할수록 흡수에너지 역시 증가하고 있었다.

Fig. 7~9는 각 충격 하중 하에서 적층판의 충격을 받은 앞면과 뒷면의 형상을 나타낸 것이다. 충격에너지가 2.4J인 경우 Fig. 7과 같이 충격을 받은 앞면에는 어떠한 압입이 관찰되지 않았으나 뒷면에는 경사와 평행한 방향으로 층간분리와 섬유파단이 관찰되었다. Fig. 8은 충격에너지가 2.7J일 경우로 이 경우에는 앞면에 충격체에 의한 압입이 관찰되었고 뒷면에서도 Fig. 8과 같은 균열이 발생하였다. Fig. 9는 충격에너지가 4.2J일 경우로 이 경우 역시 앞면에 충격체에 의한 압입이 관찰되었고 뒷면에서도 Fig. 9과 같은 균열이 위사와 경사와 평행한 방향으로 열십자형태로 발생하였다.

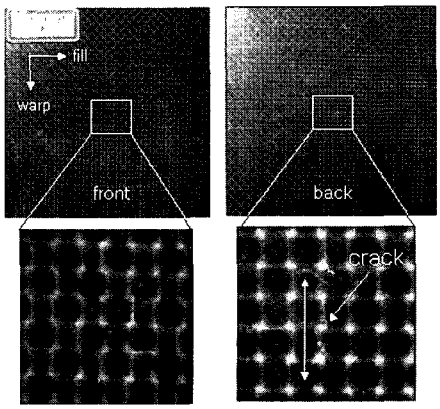


Fig. 7 Images of front and back surface of samples under 2.4J.

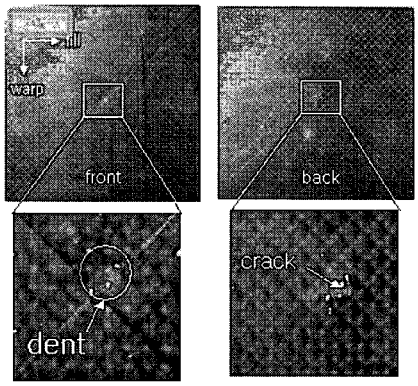


Fig. 8 Images of front and back surface of samples under 2.7J.

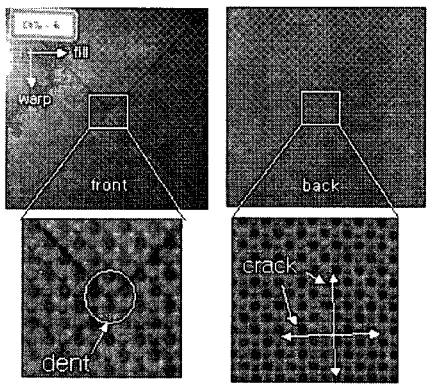


Fig. 9 Images of front and back surface of samples under 4.2J.

Fig. 10은 위의 3가지 충격에너지에 의해 발생한 손상영역을 C-scan을 이용하여 검사한 결과이다. 본 연구에서는 C-scan을 이용하여 적층판 깊이에 따른 층간분리의 분포를 고찰하려고 하였으나 본 시험에 적용된 적층판이 UD와 달리 woven형태이므로 층간분리의 깊이별 분포를 관찰하기는 용의하지 않았다. 따라서 Fig. 10의 형상은 층별층간분리가 서로 겹쳐진 면적을 나타낸 것이다. 충격에너지가 증가할수록 층간분리영역의 형상이 마름모꼴 형상(rhombus shape)에서 열십자 형상(cross-shaped pattern)으로 변하고 층간분리영역 또한 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 10(c)의 층간분리의 형상은 Fig. 9의 적층판 뒷면에서 관찰된 균열의 형상과 일치함을 알 수 있다.

3.2 적층순서에 따른 충격특성

현재 제작중인 복합재 차체의 면재는 제작의 편의상 $[fill]_8$의 적층을 가지고 제작되고 있다. 그러나 Table 2에서 알 수 있듯이 차체에 적용되는 직조된 프리프레그의 경우

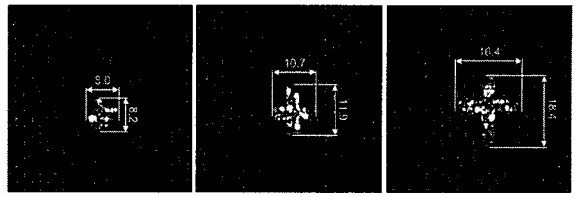


Fig. 10 Delamination area after low velocity impact for $[fill]_8$.

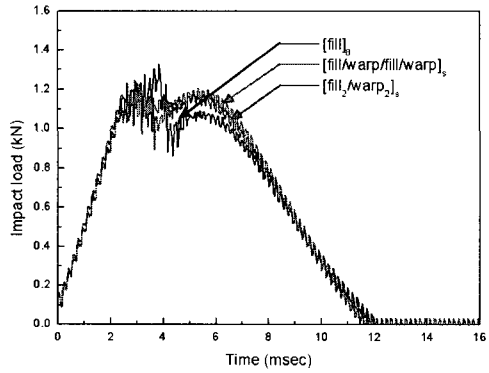


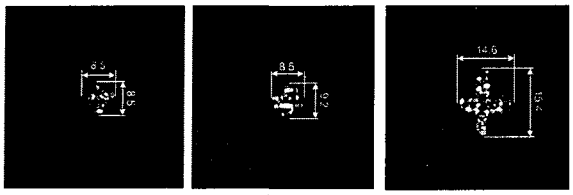
Fig. 11 Impact load history for laminates with different stacking sequence at 2.4J.

경사와 위사방향으로 물성에 차이가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 직조형태의 적층판 특성을 고려하여 $[fill]_8$, $[fill_2/warp_2]_s$ 및 $[fill/warp/fill/warp]_s$ 의 3가지 적층에 대해 충격특성을 비교하였다. 그리고 충격특성의 비교를 위해 충격에너지는 2.4J로 동일한 에너지를 부과하였다. Fig. 11은 각 적층판에 대한 충격하중이력을 나타낸 것이다.

Fig. 11에서 알 수 있듯이 $[fill_2/warp_2]_s$ 와 $[fill/warp/fill/warp]_s$ 는 유사한 하중이력을 보이고 있으나 $[fill]_8$의 경우에는 약간 다른 거동을 보임을 알 수 있다. 즉, $[fill]_8$의 경우 최대충격하중은 약 3.85msec에서 1.33kN 이었으나 $[fill_2/warp_2]_s$ 와 $[fill/warp/fill/warp]_s$ 는 각각 2.99msec에서 1.24kN과 3.11msec에서 1.23kN이었다. 이러한 현상은 위사방향으로만 적층된 적층판과 위사와 경사방향이 동일하게 분포된 적층구조에 기인한 것으로 판단된다. Table 4는 각 적층판에 대한 흡수에너지와 에너지 흡수율을 나타낸 것이다.

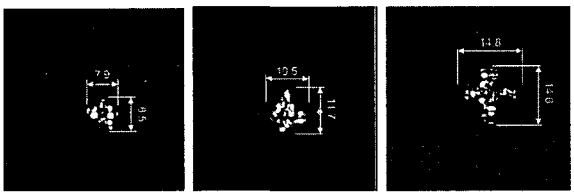
Table 4 Impact and absorbed energy for the different stacking sequence at 2.4J

Laminates	Absorbed energy	Absorbed energy rate
$[fill]_8$	1.90	77.5
$[fill/warp/fill/warp]_s$	1.86	76.1
$[fill_2/warp_2]_s$	1.79	73.2



(a) 2.4J (b) 2.7J (c) 4.2J

Fig. 12 Delamination area after low velocity impact for $[fill_2/warp_2]_s$.



(a) 2.4J (b) 2.7J (c) 4.2J

Fig. 13 Delamination area after low velocity impact for [fill/warp/fill/warp]s.

Table 4에서 알 수 있듯이 $[fill]_8$의 경우가 가장 흡수에너지가 높았으며 $[fill_2/warp_2]_s$ 이 가장 낮은 에너지 흡수율을 나타내었다. 즉 동일한 충격에너지 조건에서 현재적용중인 적층과 동일한 $[fill]_8$의 경우가 가장 파손에 취약하다고 할 수 있다.

이상의 저속충격실험에 의하여 발생한 손상은 C-scan을 이용하여 검사하였으며 Fig. 12과 13은 각 적층순서별 적층판에서 관찰된 층간분리의 형상이다. 층간분리영역은 Fig. 10에서 관찰된 것과 유사한 형상을 보이고 있다.

Table 5 Measurement result of delamination length (unit : mm)

Laminates	Impact energy		
	2.4J	2.70J	4.2J
$[fill]_8$	8.1	11.3	17.4
$[fill_2/warp_2]_s$	8.5	8.85	15
$[fill/warp/fill/warp]_s$	8.2	11.1	14.7

Table 5는 각 적층판에서 검출된 층간분리의 최대길이를 충격에너지별로 요약한 것이다. Table 5에서 알 수 있듯이 충격에너지가 낮을 경우에는 층간분리의 길이가 거의 동일하나 충격에너지가 4.2J로 증가할 경우에는 Table 4의 흡수에너지의 비율과 동일하게 $[fill]_8$의 경우가 가장 층간분리의 길이가 길었고 $[fill_2/warp_2]_s$ 이 가장 짧았다.

4. 결 론

이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 충격에너지에 따른 충격거동

- $[fill]_8$ 적층판의 경우 각 충격하중조건에서 흡수된 에너지의 비율은 77.5% ~ 78.5% 범위에 있었고 충격에너지가 증가할수록 흡수에너지 역시 증가하고 있었다.
- 각 충격에너지 조건에서 적층판의 뒷면에서 균열이 발생하였고 충격에너지가 4.2J일 경우에는 열이 위사와 경사와 평행한 방향으로 열십자형태로 발생하였다.
- 손상에 대한 C-scan을 이용하여 검사한 결과 충격에너지가 증가할수록 층간분리영역의 형상이 마름모꼴 형상에서 열십자 형상으로 변하고 층간분리영역 또한 증가하고 있음을 알 수 있다.

(2) 적층순서에 따른 충격거동

- 적층순서에 따른 충격거동 평가에서 $[fill_2/warp_2]_s$ 와 $[fill/warp/fill/warp]_s$ 는 유사한 하중이력을 보이고 있으나 $[fill]_8$의 경우에는 약간 다른 거동을 보이는 이것은 위사방향으로만 적층된 적층판과 위사와 경사방향이 동일하게 분포된 적층구조에 기인한 것으로 판단된다.
- 충격에너지가 낮을 경우에는 층간분리의 길이가 거의 동일하나 충격에너지가 증가할 경우에는 흡수에너지의 비율과 동일하게 $[fill]_8$의 경우가 가장 층간분리의 길이가 길었고 $[fill_2/warp_2]_s$ 이 가장 짧았다. 이상의 결과를 통해 저속충격의 관점에서는 $[fill_2/warp_2]_s$ 의 적층구조가 가장 우수한 것으로 판단된다. 그러나 실제 제작 상에서는 한 방향으로만 직조가 하는 것이 가능하므로 제작의 편의성과 비용의 측면도 고려하여 적층순서를 선택해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1) http://www.railway-technical.com/train-maint.html.
2) M. Hintermann, "Composite Processing Technologies for Railway Applications," *The COMPOSIT Workshop on Composite Manufacturing for Transportation Applications*, Germany, 2002.
3) S. Abrate, "Impact of Laminated Composites: Recent Advances," *Appl Mech Rev 1994*, Vol. 47, No. 11, pp. 517-544.
4) S. Abrate, "Impact of Laminated Composite Materials: a Review," *Appl Mech Rev 1991*, Vol. 44, No. 4, pp.

155-189.

5) M. 0. W. Richardson and M. J. Wisheart, "Review of Low-Velocity Impact Properties of Composite Materials," *Composites Part A 27A*, 1996, pp. 1123-1131

6) Y. S. Lee, K. H. Kang, O. Park , "Response of Hybrid Laminated Composite Plates Under Low Velocity Impact," *Computer and Structures*, Vol. 65, No. 6, 1997, pp. 965-974.

7) T. W. Shyr and Y. H. Pan, "Impact Resistance and Damage Characteristics of Composite Laminates," Composites Structures, Vol. 62, 2003, pp. 193-203.

8) M .V. Hosur, M. Adbullah and S. Jeelani, "Studies on the Low-Velocity Impact Response of Woven Hybrid Composites," *Composites Structures*, Vol. 67, 2005, pp. 253-262.

9) G. A. 0. Davies and D. Hitchings, "Impact Damage and Residual Strengths of Woven Fabric Glass/polyester Laminates," *Composites Part A 27A*, 1996, pp. 1147-1156.