

자동차 측면 도어의 섬유금속적층판을 적용한 임팩트 빔의 수치해석에 의한 성능 평가

박으뜸* · 김정* · 강범수* · 송우진**†

Numerical Study on Performance Evaluation of Impact Beam for Automotive Side-Door using Fiber Metal Laminate

Eu-Tteum Park*, Jeong Kim*, Beom-Soo Kang**, Woo-Jin Song**†

ABSTRACT: The fiber metal laminate is a type of hybrid materials laminated thin metallic sheets with fiber reinforced plastic sheets. The laminate has been researched or applied in automotive and aerospace industries due to their outstanding impact absorbing performance in view of light weight aspect. Specially, the replacement of side-impact beam as the fiber reinforced plastic has been researched actively. The objective of this paper is the primitive investigation in the development of side-door impact beam using the fiber metal laminate. First, the three-point bending simulations were conducted to decide the shape of impact beam using the numerical analysis. Next, two cases impact beam (pure DP 980 and fiber metal laminate) were installed in the side-door, and then the bending tests (according to FMVSS 214S) were simulated using the numerical analysis. It is noted that the side-door impact beam can be replaced with the fiber metal laminate sufficiently based on the numerical analysis results.

초 록: 섬유금속적층판은 금속 판재와 섬유 강화 플라스틱을 적층한 하이브리드 소재 중 하나다. 섬유금속적층판은 부품 경량화 측면을 고려했을 시, 뛰어난 충격흡수능력을 가지고 있기 때문에 자동차 및 항공우주 산업에서 적용 및 연구를 진행하고 있는 추세다. 특히, 자동차의 측면 도어 임팩트 빔의 경우, 기존의 금속소재에서 복합재료로 대체하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구에서는 자동차의 측면 도어 임팩트 빔을 금속소재와 자기 강화형 폴리프로필렌을 적층한 섬유금속적층판으로 대체하는 것이 목표다. 3가지 종류의 임팩트 빔의 3점 굽힘 시험 수치해석을 통해 단면적 대비 굽힘 저항력의 크기를 비교하였다. 그 후, 제작 실현성을 고려하여 굽힘 저항력이 우수한 이중모자형 임팩트 빔을 순수 DP 980과 섬유금속적층판으로 제작하여 자동차 측면 도어에 설치된 모델을 상정하고 충돌 해석을 수행하였다. 결과적으로 섬유금속적층판을 사용한 임팩트 빔은 기존의 DP 980 보다 무게 대비 충격 에너지 흡수 능력이 약 7배 높음을 알 수 있었다.

Key Words: 섬유금속적층판(Fiber metal laminate), 자동차 측면 도어 임팩트 빔(Side-door impact beam), 3점 굽힘 시험(Three-point bending test), 자동차 측면 도어 굽힘 시험(Side-door bending test)

Received 8 December 2016, received in revised form 31 March 2017, accepted 22 April 2017

*Department of Aerospace Engineering, Pusan National University

**Graduate School of Convergence Science, Pusan National University

**†Graduate School of Convergence Science, Pusan National University, Corresponding author (E-mail: woodysong@pusan.ac.kr)

1. 서 론

자동차 도어는 가동부품으로써, 다른 구조물에 비해 소재를 폭 넓게 사용할 수 있으며, 디자인 변경에 용이하다. 따라서, 자동차의 경량화 기술, 성능 향상 기술 등이 우선적으로 적용되는 핵심 모듈 중 하나다[1]. 자동차 도어를 구성하는 부품 중에서 자동차 측면 도어 임팩트 빔(side-door impact beam)은 자동차 도어에 장착되어 측면으로부터의 충격을 감쇠시켜, 탑승객의 안전을 보장하는 역할을 한다. 따라서, 임팩트 빔은 강성(stiffness)이 우수해야 하며, 충격 흡수 능력이 뛰어나야 한다. 이러한 기계적 성질을 만족하기 위하여 최근까지 다양한 공법을 사용한 금속 소재를 사용하고 있는 실정이다. 하지만, 엄격해진 배기 가스에 대한 환경 규제로 인해, 자동차의 경량화가 대두되면서, 섬유 강화 플라스틱으로 대체하기 위한 연구가 진행 중이다[2,3].

최근 자동차 측면 도어 임팩트 빔은 압출 공법을 사용한 튜브형 빔을 사용하는 것이 보편적이며[4], 이러한 튜브형 빔의 하중 및 비선형 거동 특성에 대한 연구가 이론적, 실험적으로 진행되고 있다[5,6]. 그 밖에도 비교적 공정 시간이 짧은 스탬핑(stamping) 공법을 사용한 판재형 임팩트 빔의 개발에 대한 연구가 진행되며[7], 판재형 임팩트 빔의 형상에 따른 하중 거동 분석 및 최적 설계 등이 연구되고 있는 실정이다[8,9]. 또한, 차량 구조물의 경량화를 극대화하고자, 섬유 강화 플라스틱을 사용한 임팩트 빔 개발 및 성능 평가에 관한 연구가 진행 중이다[10,11].

본 연구에서는 DP 980과 자기 강화형 폴리프로필렌(self-reinforced polypropylene, SRPP)을 적층한 섬유금속적층판을 사용하였다. 섬유금속적층판은 기존의 복합재료와 금속 소재가 적층된 하이브리드 소재로서, 복합재료의 단점인 금속소재와의 물리적 체결 문제를 해결할 수 있으며, 충격 하중에 의한 손상 저항이 우수하다는 장점을 가지고 있다[12,13]. 또한, 적층하는 복합재료와 금속소재의 특성에 따라 목적에 맞는 기능을 가진 섬유금속적층판을 제작할 수 있는 이점을 가지고 있다. 본 연구에서 사용한 자기 강화형 폴리프로필렌은 우수한 충격 흡수능력을 가지고 있으며, 섬유와 수지가 동일한 폴리프로필렌이기 때문에 재활용성이 탁월하다. 이러한 장점을 적용한 임팩트 빔을 사용할 경우, 연료 소모를 줄일 수 있으며, 폐기물 처리로 인한 환경 문제 및 비용 문제를 줄일 수 있으리라 판단된다. 기존의 연구에서는 섬유금속적층판의 성능 분석에 관한 기초연구가 주를 이루고 있지만[14-16], 자동차 임팩트 빔 개발 및 제품의 성능평가에 관한 연구가 미비한 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 섬유금속적층판을 임팩트 빔에 적용하여 기존의 금속 소재와 반력-변위, 흡수 에너지 등을 비교함으로써, 대체 가능성을 평가하였다. 먼저, 임팩트 빔의 단면 형상을 결정하기 위해, 세 가지 형태의 임팩트 빔을 모델링하여 삼점 굽힘 시험을 수치해석적으로 모사하였다.

반력-변위 그래프를 비교하여 임팩트 빔의 단면 형상을 결정하였으며, 결정된 임팩트 빔에 DP 980과 섬유금속적층판을 적용하여 FMVSS 214S(Federal Motor Vehicle Safety Standard) 규격에 따라 자동차 측면 도어 굽힘 시험을 수치해석적으로 수행하였다.

2. 임팩트 빔의 단면 형상 결정

2.1 유한요소모델링

자동차 측면 도어 임팩트 빔의 단면 형상을 결정하기 위해 삼점 굽힘 시험을 수치해석적으로 수행하였다. 단면 형상은 Fig. 1과 같이 원통(cylinder)형, 모자(hat)형, 이중모자(double-Hat)형으로 선정하였다. 모자형과 이중모자형의 두께는 2.3 mm이며, 임팩트 빔의 길이는 1,000 mm이다. 세 가지 형상의 임팩트 빔은 동일 소재인 DP 980을 사용하였으

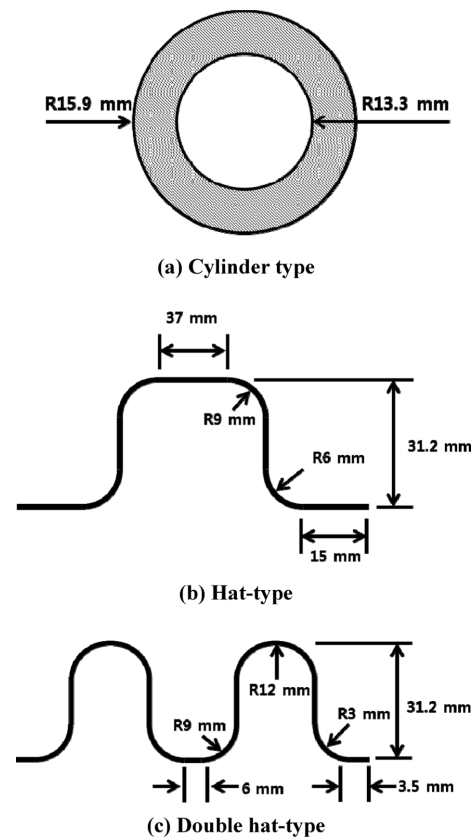


Fig. 1. Configurations of side-door impact beam

Table 1. Material properties of DP 980

Properties	Value
Young's modulus [GPa]	210
Yield stress [MPa]	937
Density [kg/m ³]	7860
Elongation	0.05

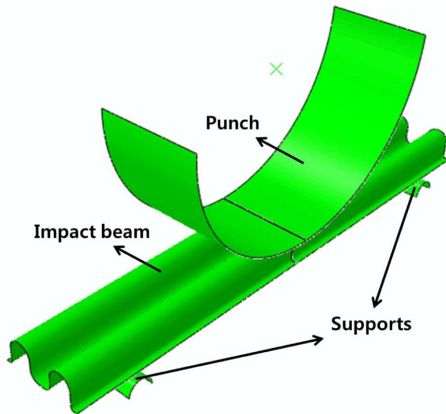
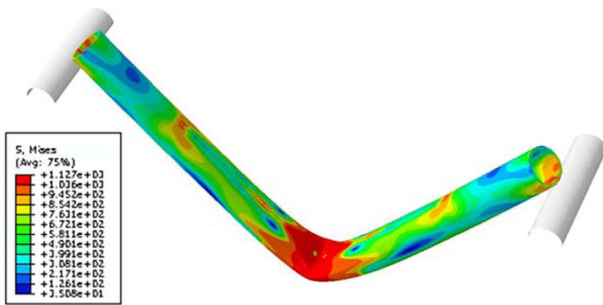
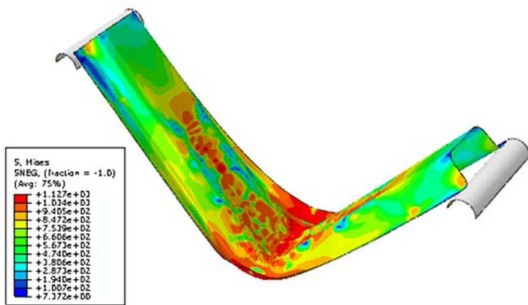


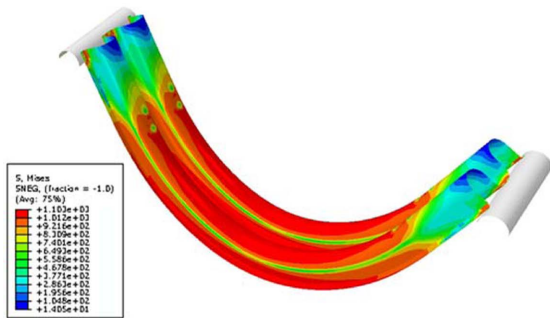
Fig. 2. Numerical model for three point bending of an impact beam



(a) Cylinder-type



(b) Hat-type



(c) Double hat-type

Fig. 3. Numerical results for three point bending of impact beams

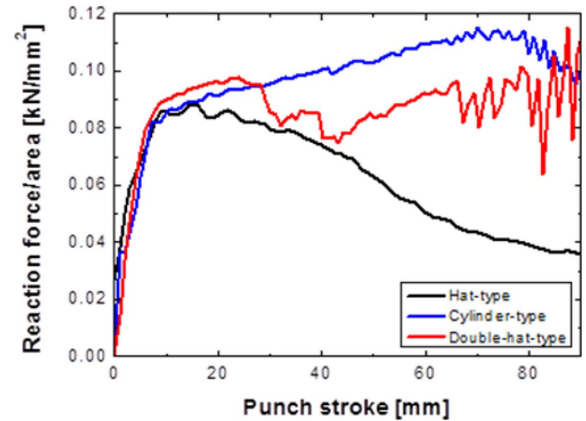


Fig. 4. Reaction forces divided by cross-section area of impact beams from numerical analysis

며, 물성치는 Table 1과 같다. 원통형 임팩트 빔의 경우, 8 절점 사면체 요소(8-node brick element)를 사용하였으며, 모자와 이중모자형 임팩트 빔의 경우, 4 절점 쉘 요소(4-node shell element)를 사용하였다. 굽힘 시험에 사용된 펀치(punch)와 지지대(support)는 Fig. 2와 같으며, 각각의 반지름은 152 mm, 12.7 mm다. 또한, 펀치와 지지대는 강체요소(rigid element)를 사용하였다.

2.2 3점 굽힘 시험 해석 결과

본 연구에서는 상용 프로그램은 Abaqus/explicit을 사용하여 삼점 굽힘 시험에 대한 유한요소해석을 수행하였으며, 각 형상에 따른 임팩트 빔은 Fig. 3과 같이 변형됨을 알 수 있다. 또한, 임팩트 빔의 단면적 대비 반력-변위 그래프는 Fig. 4와 같으며, 원통형 임팩트 빔의 하중 저항이 가장 높음을 알 수 있다. 모자형의 경우, 임팩트 빔의 중심부에 국부적으로 접힘(folding) 현상이 발생하는 것을 알 수 있으며, 이로 인해 하중 저항이 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 하지만 원통형과 이중모자형 임팩트 빔의 경우, 국부적인 접힘 현상이 발생하지 않고 있으며, 이로 인해 모자형 임팩트 빔에 비해 높은 단면적 대비 굽힘 저항을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한, 원통형 임팩트 빔의 경우, 기존의 섬유고속 적층판으로 제작하기 어려운 단점을 가지고 있다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 이중모자형 펙트 빔 모델을 사용하여 자동차 측면 도어 굽힘 시험을 수치해석적으로 수행하였다.

3. 자동차 측면 도어 해석

3.1 굽힘 시험 개요

자동차의 측면 충돌에 대한 안정성을 평가하기 위해 일반적으로 기둥(pole)에 의한 충돌과 차대차(side to side car)

Table 2. Requirement of car door bending resistance forces according to FMVSS

Displacement [mm]	Required resistance load [kN]
Initial(155)	10.2
Intermediate(310)	15.8
Peak(460)	31.6

에 의한 충돌 환경에서 안정성을 평가한다. 본 연구에서는 정적 하중 조건에서의 충돌 시험을 평가하기 위해 FMVSS 214S를 참고하였으며[17], 자동차 측면 도어의 굽힘 저항력을 측정하여 자동차 측면 도어의 안정성을 평가하였다. Table 2는 FMVSS에서 제시한 자동차 전면과 후면 도어의 굽힘 저항력의 통과 기준이며, 해당 기준 이상의 굽힘 저항력을 만족해야 임팩트 빔으로서 적합성 여부를 평가할 수 있다.

3.2 재료특성

DP 980은 기존의 자동차에 널리 사용되고 있는 소재로써, 페라이트(ferrite)와 마르텐사이트(martensite)로 구성되어 있는 강이다. DP 980은 기존의 금속 대비 가공이 용이하며, 높은 강도를 제공한다[18].

자기 강화형 폴리프로필렌은 섬유와 수지가 폴리프로필

Table 3. Material properties of SRPP

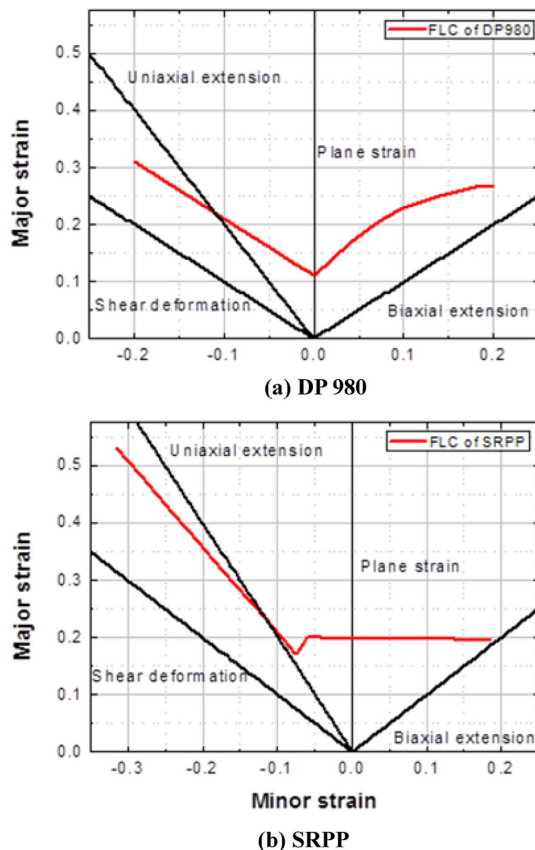
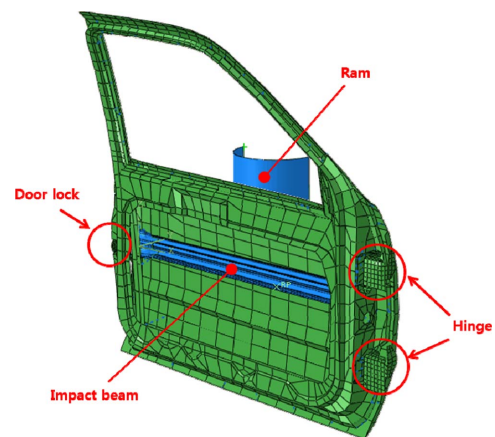
Properties	Value
Young's modulus [GPa]	3.24
Yield stress [MPa]	20
Density [kg/m ³]	920
Elongation	0.14

렌인 열가소성 복합재료로써, 연신률이 기존의 열경화성 복합재료보다 비교적 높으며, 충격 흡수 능력이 탁월한 것으로 알려져 있다[19]. 또한, 섬유와 수지가 동일한 열가소성 소재로 이루어져 있기 때문에 기존의 복합재료와 달리 재활용성이 우수하다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 자동차 옆문의 충격 시험을 수치해석 기법을 활용하여 모사하기 때문에, 소재의 대변형 및 파괴거동을 충분히 고려할 필요가 있다. DP 980은 성형한계선도(forming limit curve) 파괴 모델을 사용하였으며, 성형한계선도는 Fig. 5(a)와 같다[20]. 자기 강화형 폴리프로필렌은 Table 3과 같은 물성치를 사용하였으며, 파괴 거동을 고려하기 위해 Fig. 5(b)와 같은 성형한계선도(forming limit curve) 파괴 모델을 사용하였다[19]. 또한, 본 연구에서 사용한 섬유금속적층판의 DP 980과 자기 강화형 폴리프로필렌에 대한 층간분리가 굽힘거동에 큰 영향을 주지 않는다고 판단하여, DP 980과 자기 강화형 폴리프로필렌은 완전접착상태(perfect bonding state)라고 가정하였다.

3.3 유한요소모델링

본 연구에서는 미국 NCAC(National Crash Analysis Center)에서 제공한 Chevrolet C2500 모델의 자동차 도어를 사용하였다. 이때, 자동차 도어의 형상은 Fig. 6과 같다. 또한, 자동차 측면 도어 굽힘 시험을 통한 섬유금속적층판의 대체 가능성을 판단하기 위해, 동일 형상의 DP 980과 섬유금속적층판을 사용한 임팩트 빔을 설치하여 비교 분석하였다. 섬유금속적층판은 Fig. 7과 같이 DP 980 판재와 교차

**Fig. 5.** Forming limit curves of DP 980 and SRPP**Fig. 6.** Numerical model of side-door bending test

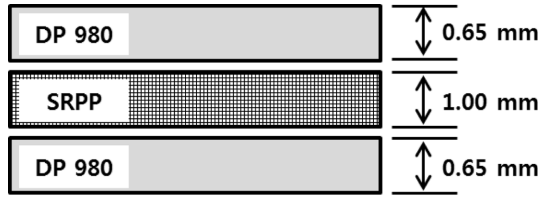


Fig. 7. Schematic diagram of fiber metal laminate

(woven)상태의 자기 강화형 폴리프로필렌이 적층된 구조를 가지고 있다. DP 980과 섬유강화 플라스틱 적층판을 사용한 임팩트 빔은 해석 시간의 단축을 위해 연속체 쉘 요소(continuum shell element)를 사용하였다. 이때, 램은 강체요소를 사용하였으며, Fig. 6에서의 도어 락(door lock)과 도어 힌지(door hinge)를 완전 구속하였다. 유한요소해석은 Abaqus/explicit으로 수행하였으며, 램으로부터 반력과 변위 그래프를 측정하였다.

3.4 자동차 측면 도어 해석 결과

굽힘 시험에 의한 자동차 측면 도어의 변형은 Fig. 8과 같다. 이중모자형의 임팩트 빔은 개방형 구조이기 때문에 굽힘 하중이 가해질 시, 임팩트 빔의 중심에서 바깥 방향으로 인장되는 형태로 변형된 것을 알 수 있다. Table 4는 FMVSS 214S에서 기준한 변위로부터의 측정 하중을 나타내며, 두 소재 모두 초기, 중간 변위까지의 요구 하중을 만족시키는 것을 알 수 있다. 하지만, Fig. 9(a)와 같이 최대 변위인 460 mm에 도달하기 전, 도어 락이나 힌지에서 파단이 일어

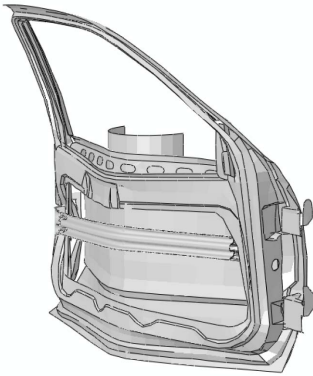
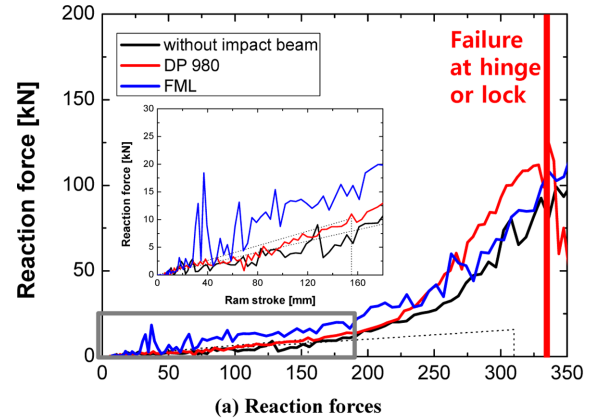


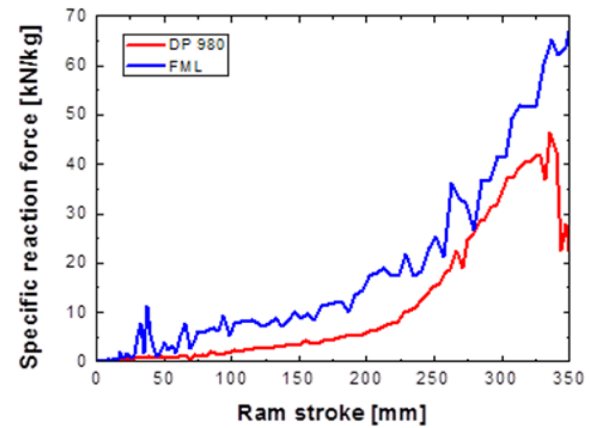
Fig. 8. Deformation of the car side-door with double-hat type impact beam

Table 4. Numerical results for the side-door impact beams

Displacement [mm]	Resistance load [kN]	
	DP 980	FML
Initial(155)	11.0192 (Pass)	16.1599 (Pass)
Intermediate(310)	100.0630 (Pass)	81.4997 (Pass)
Peak(460)	-	-



(a) Reaction forces



(b) Specific reaction forces

Fig. 9. Reaction forces of car-doors with impact beams

Table 5. Specific reaction forces at 150 mm (ram stroke)

Impact beam	Specific reaction force [kN/kg]
DP 980	3.4782
FML	8.6267

Table 6. Specific absorbed energy at 150 mm (ram stroke)

Impact beam	Specific absorbed energy [kJ/kg]
DP 980	0.2290
FML	1.6330

나 요구 하중과의 비교가 불가능함을 알 수 있었다. 이는 자동차 도어를 지지할 수 있는 차체 프레임이 포함이 되지 않은 순수한 자동차 도어 굽힘 시험이기 때문에 최대 변위 이전에 파단이 일어나는 것으로 판단된다. 임팩트 빔의 무게 대비 반력은 Fig. 9(b)와 같으며, 섬유강화 플라스틱이 DP 980보다 비교적 높은 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 좀더 수치적으로 확인하기 위해 Table 5와 6과 같이 임팩트 빔의 무게 대비 하중과 흡수 에너지를 비교하였다. Table 5의 경우, 섬유강화 플라스틱이 DP 980에 비해 약 2.5배 높은 것을 알 수 있으며, Table 6의 경우, 약 7.1배 높은 것을 알 수 있다. 이

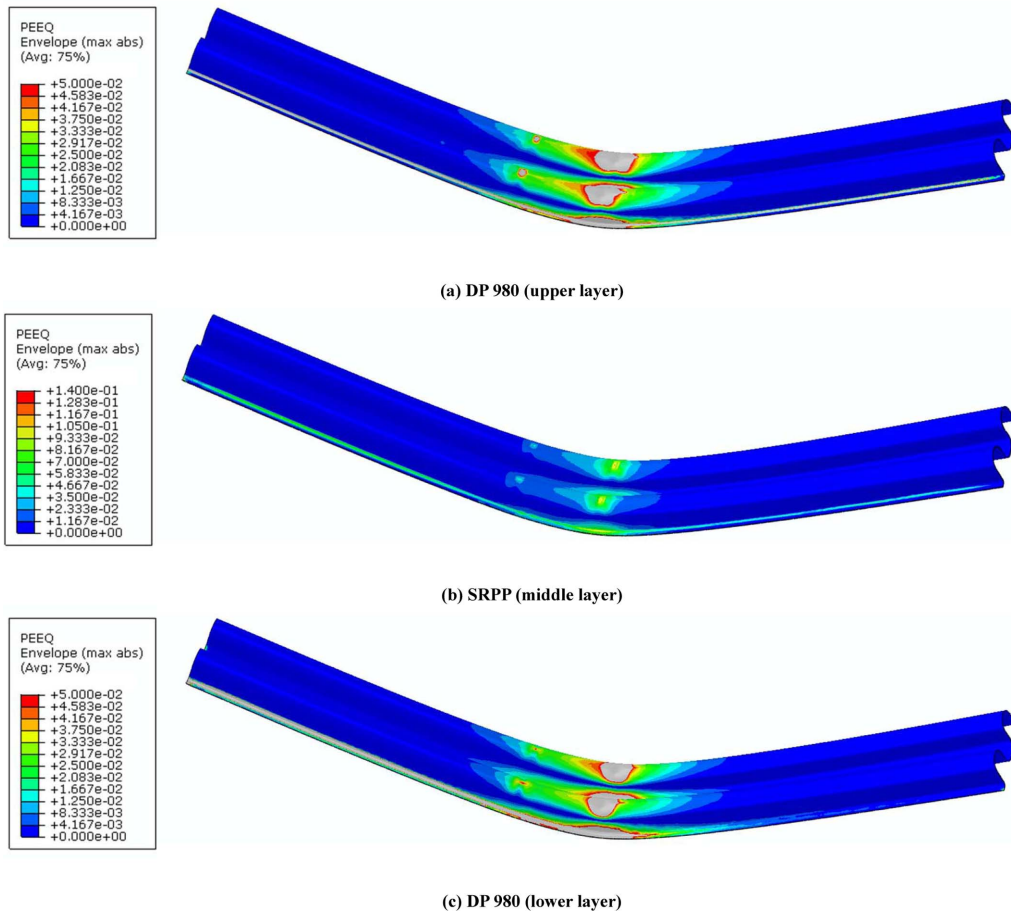


Fig. 10. Distributions of plastic strain for impact beam using FML (at 350 mm ram stroke)

는, 자동차 도어의 임팩트 빔을 섬유금속적층판으로 충분히 대체 가능함을 알 수 있으며, 이러한 결과는 차체 경량화에 충분히 기여할 수 있음을 알 수 있다.

섬유금속적층판을 사용한 임팩트 빔의 국부 변형은 Fig. 10과 같으며, 접힘 현상없이 굽힘 변형을 일으키는 것을 알 수 있다. 또한, 소성 변형률을 미루어 볼 때, 임팩트 빔의 중앙부와 모자 부분, 모서리 부분의 DP 980이 먼저 파단되며, 자기 강화형 폴리프로필렌은 파단되지 않음을 알 수 있다. 특히 Fig. 1(c)의 반경 3 mm인 모서리 부근에 높은 변형이 발생하는 것을 알 수 있으며, 파단 시 임팩트 빔의 전체적인 성능 저하를 야기할 수 있으리라 판단된다. 따라서, 실제 임팩트 빔을 제작하기 전에 해당 부위를 보강할 수 있는 대책을 마련해야 한다.

4. 결 론

본 연구는 섬유금속적층판을 사용한 임팩트 빔의 적용 가능성을 확인하는 것이 목표다. 먼저, 임팩트 빔 형상을 결정하기 위한 삼점 굽힘 시험을 수치해석적으로 수행하였으며, 원통형과 이중모자형의 임팩트 빔은 중심부의 국부

접힘 현상이 상대적으로 적게 발생하기 때문에 단면적 대비 굽힘 하중이 모자형보다 높음을 알 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 DP 980과 섬유금속적층판을 사용한 이중모자형의 임팩트 빔을 모델링하여 자동차 도어에 부착하였다. 그 후, 임팩트 빔이 설치된 자동차 도어는 FMVSS 214S 규격에 따라 자동차 측면 도어 굽힘 시험을 수치해석적으로 수행하였다. 결과적으로, 섬유금속적층판은 FMVSS 214S 규격을 만족하며, 충분히 임팩트 빔으로써 사용이 가능함을 보였다. 뿐만 아니라, 기존 DP 980에 비해 무게 대비 흡수 에너지가 높아, 측면 충돌 시 안전성을 충분히 확보할 수 있으리라 판단된다. 이러한 특성을 가진 섬유금속적층판은 자동차 차체 구조물 뿐만 아니라 항공기 구조물에 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No. 2012R1A5A1048294)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

1. Lee, I.C., Lee, T.K., and Jang, D.H., "Development Process of Side Impact Beam for Automotive Light-Weighting Door using Sheet Type," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 24, No. 2, 2015, pp. 130-137.
2. Erzen, S., Ren, Z., and Anzel, I., "Analysis of FRP Side-door Impact Beam," *Total Vehicle Technology*, Vol. 1, No. 1, 2002, pp. 1-12.
3. Lim, T.S., and Lee, D.G., "Mechanically Fastened Composite Side-Door Impact Beams for Passenger Cars Designed for Shear-Out Failure Modes," *Composite Structures*, Vol. 56, No. 2, 2002, pp. 211-221.
4. Ayhan, A.O., Genel, K., and Eksi, S., "Simulation for Nonlinear Bending Behavior and Geometric Sensitivities for Tubular Beams with Fixed Supports," *Thin-Walled Structures*, Vol. 51, 2012, pp. 1-9.
5. Tanabe, H., Miyasaka, A., Yamazaki, K., Iwasaki, T., and Akada, H., "High-Strength Steel Tubes for Automobile Door Impact Beams," *Nippon Steel Technical Report*, Vol. 64, 1995, pp. 55-61.
6. Calonghi, A., *Alternative Design of Front Door Side Impact Beam for Nissan Navara*, MSc Thesis, Cranfield University, UK, 2006.
7. Lee, H.W., Hwang, J.B., Kim, S.U., Kim, W.H., Yoo, S.J., Lim, H.W., and Yum, Y.J., "Construction of Vehicle Door Impact Beam using Hot Stamping Technology," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 34, No. 6, 2010, pp. 797-803.
8. Hui, T.Y.J., Ruan, H.H., and Yu, T.X., "Dynamic Characteristics of Scaled-Down W-Beams under Impact," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 4, No. 1, 2003, pp. 31-40.
9. Djojodihardjo, H., Khai, S.L., and Malaysia, P., "Modeling, Analysis and Comparative Study of Side Impact Beam," *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, Vol. 3, No. 5, 2013, pp. 283-292.
10. Warrior, N.A., Wilson, M.J., Brooks, R., and Rudd, C.D., "Modeling of Glass Reinforced Thermoplastic Composite Side-Impact Structures," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 6, No. 4, 2001, pp. 553-550.
11. Basavaraju, D.H., Design and Analysis of a Composite Beam for Side Impact Protection of a Sedan, Ph.D Thesis, Wichita State University, US, 2005.
12. Kang, D.S., Lee, B.E., Park, E.T., Kim, J., Kang, B.S., and Song, W.J., "Numerical Study for the Improvement of Tapered-hole Clinching Joint Strength of Fiber Metal laminate and Aluminum 5052 using the Taguchi Method," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 24, No. 1, 2015, pp. 37-43.
13. Vlot, A., Kroon, E., and La Rocca, G., "Impact Response of Fiber Metal Laminate," *Key Engineering Materials*, Vol. 141, 1997, pp. 948-957.
14. Lee, B.E., Park, E.T., Ko, D.C., Kang, B.S., and Song, W.J., "Evaluation of Fracture Behavior of Adhesive Layer in Fiber Metal Laminate Using Cohesive Zone Models," *Composites Research*, Vol. 29, No. 2, 2016, pp. 45-52.
15. Kil, M.G., Park, E.T., Song, W.J., and Kang, B.S., "Study on Enhancement for Interfacial Energy Release Rate of Adhesive Layer in Fiber Metal Laminate Using Taguchi Method," *Composites Research*, Vol. 29, No. 5, 2016, pp. 249-255.
16. Shi, Y., Kim, S.H., Kim, B.S., and Song, J.I., "Impact Behavior of Fiber/Metal Laminates (FMLs) under Low Velocity," *Composites Research*, Vol. 23, No. 1, 2010, pp. 8-16.
17. US Department of Transportation, *National Highway Traffic Safety Administration Laboratory Test Procedure for FMVSS 214S (static) Side Impact Protection*, US Department of Transportation, Washington DC, US, 1992.
18. Choi, J.K., Kang, M.J., Cho, J.H., and Kim, C.H., "Laser Welding Characteristics of Ultra High Strength Steel for Automotive Application," *Journal of Welding and Joining*, Vol. 27, No. 5, 2009, pp. 1-4.
19. Lee, B.E., Kang, D.S., Park, E.T., Kim, J., Kang, B.S., and Song, W.J., "Numerical and Experimental Investigation on Impact Performance of Fiber Metal Laminates Based on Thermoplastic Composites," *Transactions of Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 24, No. 5, 2016, pp. 566-574.
20. Autosteel, *AHSS Data Utilization - DP 980*, Retrieved from <http://www.autosteel.org>