

인라인 컴파운딩 기술을 이용한 장섬유강화 플라스틱 자동차 언더커버의 제조에 관한 연구

이규세* · 이경식**†

A Study on Manufacturing of the Long Fiber-reinforced Thermoplastic (LFT) Automotive Under Cover Using the In-line Compounding (ILC) Technology

Kyu-Se Lee*, Kyung-Sick Lee**†

ABSTRACT: We manufactured the long fiber-reinforced thermoplastic prototype of under cover using in-line compounding technology, and investigated the formability, mechanical properties and durability of the prototype of under cover. We manufactured the injection mold for the prototype through injection molding analysis and consideration of weight reduction. We investigated the formability of the prototype by evaluating the residual length and dispersion of fiber, and also tested the mechanical properties such as flexural strength, stiffness and impact strength. We investigated the durability of the prototype by the Key-Life Test(KLT) method which is generally used for the automotive interior parts.

초 록: ILC 기술을 이용하여 장섬유강화 플라스틱 자동차 언더커버 시제품을 제작하고, 시제품의 성형성, 기계적성질 및 내구성을 평가하였다. 언더커버에 대한 사출성형해석과 경량화를 고려하여 시제품을 위한 사출금형을 제작하였다. 보강섬유의 잔존길이 및 분포도를 평가하여 시제품의 성형성을 검토하였고 굴곡강성 및 강도, 충격강도 등의 기계적 성질도 조사하였다. 자동차 내장부품 내구수명 평가 방법인 KLT(Key Life Test)법으로 내구성을 평가하였다.

Key Words: 인라인 컴파운딩(In-line Compounding), 장섬유강화 플라스틱(Long Fiber-reinforced Thermoplastic), 언더커버(Under Cover), 사출성형해석(Injection Molding Analysis), 내구성시험(Durability Test)

1. 서 론

일반적으로 자동차에 사용되는 플라스틱은 금속에 비해 비중이 낮아 경량화에 유리하며, 성형성이 뛰어나 대량생산이 가능하다. 또한, 복합화가 쉽고 내마모성이 좋으며 착색성이 있어 마감용으로 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다[1]. 반면 금속재료에 비해 강도와 강성이 낮아 이런 단

점을 보완하기 위해 개발된 것이 섬유강화 복합소재이다. 섬유강화 복합소재 중 자동차 부품용으로 가장 주목을 받는 소재가 장섬유강화 열가소성플라스틱(LFT)이다. LFT는 일반 플라스틱의 단점인 기계적 강도, 치수안정성을 상당히 개선할 수 있고, 차량 경량화와 직접 관련 있는 비강성, 비강도 측면에서도 금속이나 일반 플라스틱에 비해 우수하다[2]. 자동차 경량화 요구에 맞춰 LFT의 사용은 더욱 더 증

Received 17 October 2017, accepted 28 December 2017

*Hanguk Mold Co., Ltd.

**†School of Mechanical Engineering, University of Ulsan, Corresponding author (E-mail: kslee@ulsan.ac.kr)

가할 것으로 예상되나 지금까지 상업화된 LFT 성형기술로는 다양한 요구조건에 부합하는데 한계가 있다. 특히, 경제성과 한층 복잡해진 형상을 표현하기에는 제조 공정이 복잡하고, 성형 기술 특성상 디자인 측면에서도 제한적인 부분이 많다. 따라서 본래의 경량화 해결뿐만 아니라 경제성을 갖추고, 디자인 측면에서 더 유연할 수 있는 적절한 LFT 성형기술의 개발이 필요한 시점이다.

본 연구에서는 상용중인 다양한 LFT 성형기술 중에서 공정의 일체화 및 LFT의 주요 물성 영향 인자인 보강섬유의 잔존 길이에 가장 유리하고, 제품의 디자인 측면에서 가장 유연한 특성을 가진 ILC 성형공정을 이용하여 대형 자동차 부품인 언더커버 시제품을 제작하고 그 성능을 평가하여 ILC 공정의 적용 가능성을 검토하고자 한다. 이를 위하여 ILC 공정에 맞게 LFT를 구성하는 소재를 최적화하고, 대상 제품으로 선정한 자동차 언더커버에 대한 사출성형해석과 경량화를 고려하여 시작 금형을 제작하고 언더커버 시제품을 제작한다. 제작된 시제품의 보강섬유 잔존길이 및 분포도를 평가하여 성형성을 검토하고, 시제품으로부터 채취한 시험편으로 굴곡강성 및 강도, 충격강도 등의 기계적 성질을 조사한다. 또한 자동차 내장부품 내구성 평가 방법인 KLT(Key Life Test)법으로 내구성을 평가함으로써 대형 자동차 부품에 대한 ILC 성형공정의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

2. 본 론

2.1 LFT 복합소재의 원료 배합

Lee[3] 등은 자동차부품으로 많이 사용되는 유리섬유 강화 폴리프로필렌(PP)의 기계적성질을 최적화하는 원료의 배합을 구하였다. 실험인자로는 Table 1과 같이 기본 수지 종류, 유리섬유 함량, 첨가재인 고무의 종류, 상용화제 종류 등 4가지에 각각 세 수준의 조합 중 9가지의 조합을 다 구찌 실험계획법을 활용하여 구하고 각 조합에 대한 인장강도, 굴곡강도 및 충격강도를 시험한 결과 최적의 원료 배

Table 1. Experimental factors and levels of raw materials

Level	#1	#2	#3
Base PP	Homo-PP	CO-PP (E=6%)	CO-PP (E=12%)
Rubber	EPR	EOR	EBR
Fiber content	10%	20%	30%
Compatibilizer	Type1	Type2	Type3

Table 2. Optimized combination of raw materials

base PP	Rubber	Fiber content	Compatibilizer*
Co-PP (E=6%)	EOR	30%	Type3

*Compatibilizer Type 3: PP-g-MAH(G/R 1.3~1.5 wt%, Mw 120,000)

합은 Table 2와 같다고 발표하였다. 본 연구에서는 Lee[3] 등의 결과를 활용하여 언더커버 시제품을 제작하였다.

2.2 언더커버 시제품의 제작

선정된 언더커버는 대형 자동차 부품이므로 사출 성형을 위한 최적 금형설계를 위하여 먼저 Mold Flow를 이용하여 유동해석을 수행하였다. 게이트의 수와 위치를 변화시키면서 6개의 조합에 대한 유동해석을 수행하여 sink mark, 충진시간, 압력, 체적수축율 및 변형 등을 평가한 결과 게이트 수는 5개로 하고 위치는 Fig. 1과 같이 선정하였다. 그림 중 5개의 짙은 원이 게이트 위치이고 번호는 뒤에 설명할 잔존길이 평가를 위해 시편을 채취한 위치이다.

완성된 시작 금형과 공정 프로세스를 적용하여 1차 시제품 트라이아웃을 진행하였다. 시제품 제작을 위해 사용한 사출기는 독일 Krauss Maffei사의 2300톤급 복합 성형기이다. 유리섬유 함량을 0%부터 30%까지 변화시킨 시제품의 경량화율을 Table 3에 표시하였다.

표에서 알 수 있듯이 유리섬유 함량이 증가할수록 경량화율은 감소한다. 시제품의 강도를 위해서는 유리섬유 함량을 높여야 하지만 경량화를 위해서는 함량을 낮춰야 함을 알 수 있었다. 따라서 적정강도를 유지하면서 경량화율을 높이기 위해 기존 제품의 두께를 0.5 mm 줄이는 방안을 검토하였다. 두께를 줄임으로 인한 부피 감소는 약 14%이

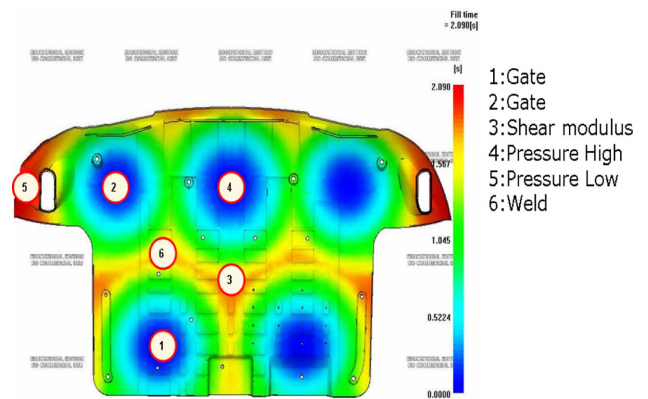


Fig. 1. Results of flow analysis for prototype of under cover

Table 3. Weight-saving rate for the first try out products

G/F content	Average Weight	Lightweight rate	Design Weight
0%	1699 g	23%	2195 g
10%	1850 g	16%	
15%	1923 g	12%	
20%	2000 g	9%	
25%	2083 g	5%	
30%	2148 g	2%	

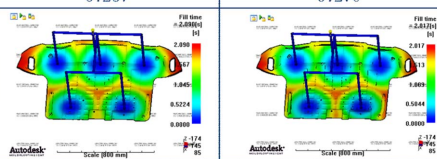
	Before	After
Thickness	2.5mm	2.0mm
Fill time(s)	2.090	2.017
Pressure(MPa)	130.8	133.7
Shrinkage(%)	7.401	7.40
Sink index(%)	0.267	0.270
Test		

Fig. 2. Results of flow analysis for two prototypes of thickness 2.0 and 2.5 mm

다. Fig. 2는 기존제품과 두께를 0.5 mm 줄인 제품에 대한 유동해석 결과를 나타낸다.

전체 충진을 위한 시간이 2.10초가 필요했던 것에 비하여 수정에서는 2.02초로 다소간 시간 단축은 되었으나 전체 부피가 14% 감소한 것에 비해서는 감소폭이 적게 나타났다. 이는 전체 부피가 감소하는 대신 수지가 유동하는 경로가 좁아지고 금형 내부에서의 수지 점도가 상승하게 된 것이 원인으로 여겨진다. 제품 성형 시 금형 내 압력에 대해서는 기존 130.8 MPa 대비 133.7 MPa로 다소 높아지는 결과를 얻었다. 앞서 충진 시간에서 기술한 바와 같이 금형 내 유동을 저해하는 요인이 발생했기 때문에 증가한 것이며 다만, 전체적인 압력 분포는 고르게 나타났다. 수정 전 수축률은 7.4%였던 것에 비하여 수정 후 7.4%로 차이가 없음이 확인되었다. 미고화지수(Sink mark)의 경우 수정 전 0.267%에서 수정 후 0.270%로 값이 증가하는 경향을 나타냈다. 두께 변화에 의한 열용량의 감소분이 사출 후 금형 내 압력 저하 속도보다 많은 것으로 해석할 수 있으나 변화 폭이 크지 않기 때문에 성형에는 무리가 없을 것으로 판단되었다.

2.3 시제품의 기계적 성질 평가

1차 시제품의 유리섬유 함량, 고무 함량, 상용화제 함량에 따른 굴곡탄성계수, 굴곡강도 및 Izod 충격강도의 변화를 Fig. 3~5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 굴곡강도와 강도는 유리섬유 함량과 비례해서 증가하지만 충격강도는 30%에서 약간 감소하는 경향을 보인다. 반면 고무와 상용화제의 함량이 기계적 성질에 미치는 영향은 뚜렷한 경향을 찾기가 힘들었다. 또한 자동차 언더커버에 요구되는 굴곡탄성계수의 값은 2,500 MPa 이상, 충격강도값은 23 kg·cm/cm이므로 유리섬유 함유량은 최소 20% 이상이 되어야 함을 알 수 있다.

경량화를 위해 두께를 감소시켜 성형 가능성을 확인 한 성형해석 결과와 1차 시제품으로 평가한 기계적 물성을 바탕으로 두께를 줄이고, 유리섬유 함량을 예정된 20%를 기준으로 재차 검증을 위해 수정된 금형을 이용하여 2차 시제품을 제작하였다. 제품 두께 2.0 mm, 유리섬유 함량을 15, 20, 25%로 변화시킨 시제품의 중량은 1차 시제품 대비 6~7% 가벼워졌으며, 초기 설계중량 대비 18~23% 가벼워져 약 20%의 경량화를 이루었다.

2.4 유리섬유 잔존길이 및 분산성 평가

시제품에서 잔존 유리 섬유 길이를 살펴보기 위한 ash test를 진행하였다. Fig. 1에서 언급한 바 있는 주요 6개 지점에서 채취한 시편을 연소한 후, 잔존하는 유리 섬유를 대상으로 길이를 측정하여 그 평균값과 표준편차 값을 구했다. 잔존 섬유의 길이는 식 (1)을 이용하여 계산하였다[4].

$$L_i = \frac{\sum L_i N_i}{\sum L_i} \quad (1)$$

여기서, L_i 는 시편에 잔존하는 i 번째 섬유의 길이, N_i 는 L_{i+1}

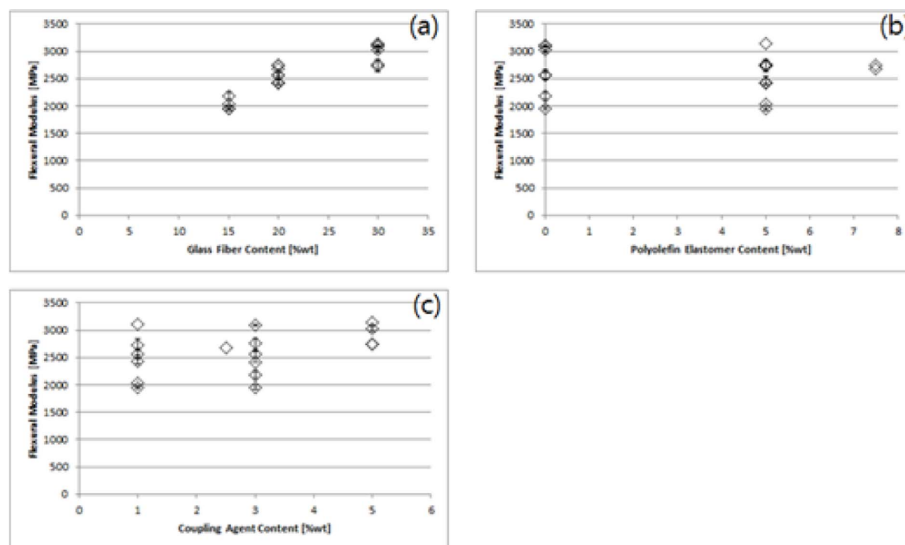


Fig. 3. Variation of flexural modulus according to (a) GF content, (b) elastomer content and (c) coupling agent content

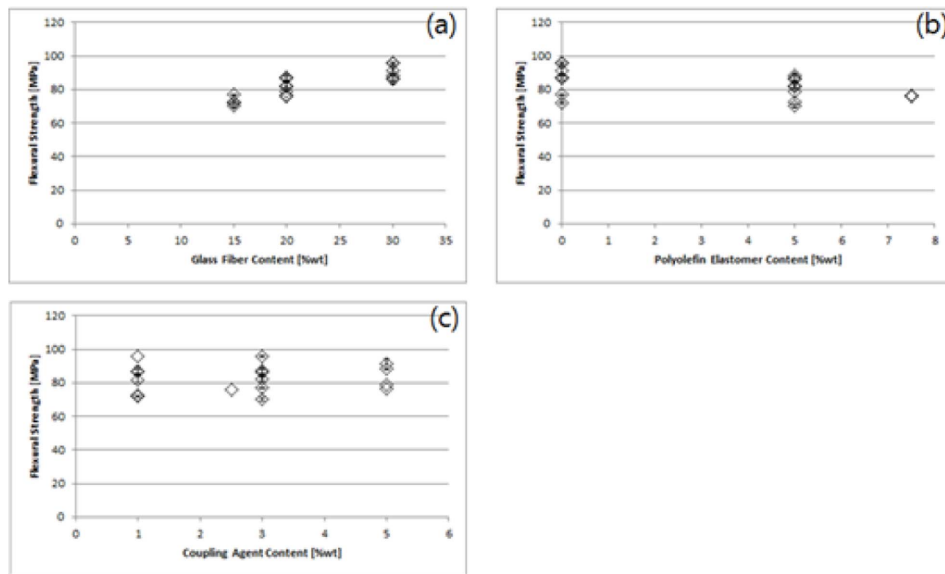


Fig. 4. Variation of flexural strength according to (a) GF content, (b) elastomer content and (c) coupling agent content

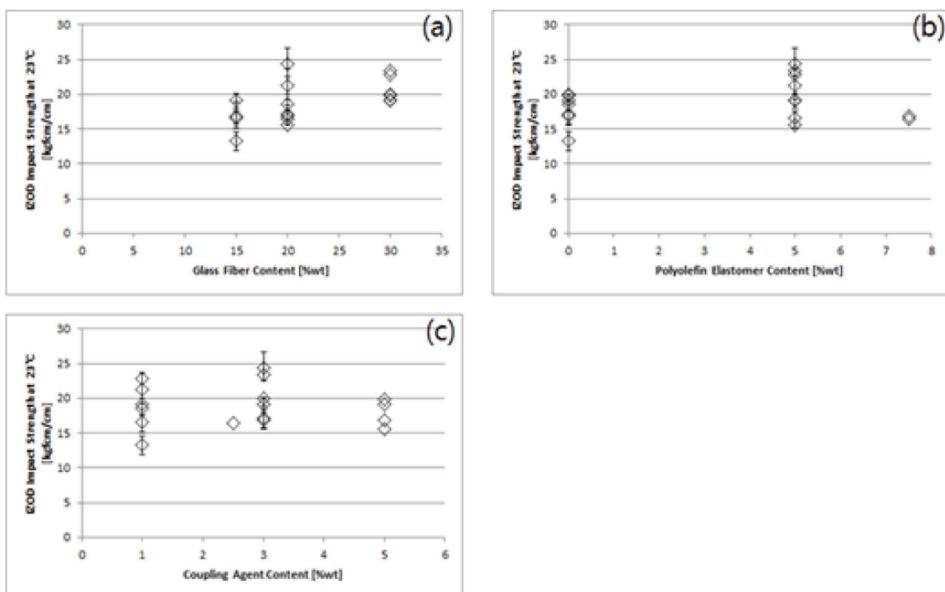
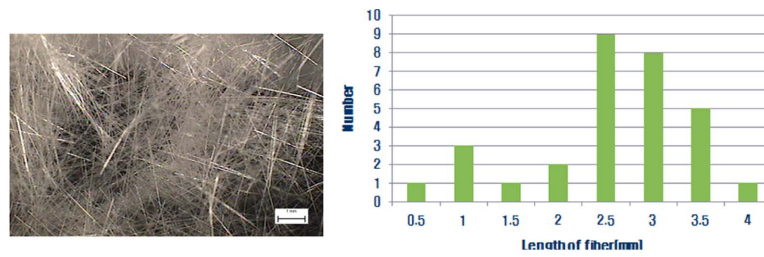


Fig. 5. Variation of Izod impact strength at 23°C according to (a) GF content, (b) elastomer content and (c) coupling agent content.

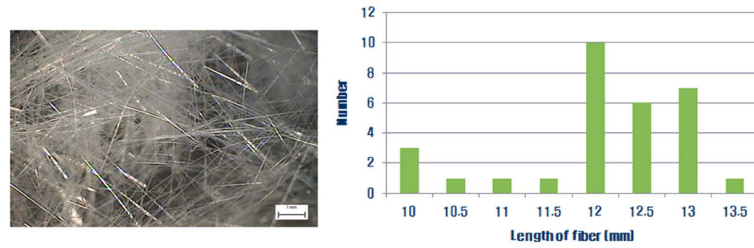
$\sim L_i$ 사이의 섬유 개수이다. Fig. 6은 각 채취 위치에서의 잔존 유리섬유 현미경사진과 잔존 길이 분포를 나타낸다.

시편 채취 위치별 섬유의 잔존 길이는 우선 게이트 위치인 1, 4(게이트이자 압력이 가장 큰 곳)의 경우 약 3.0 mm로 다른 위치에 비해 짧은 데, 그 이유는 용융수지가 금형내로 들어와 유동방향이 큰 각으로 변하는 부위이고, 사출 온도, 압력이 가장 높기 때문으로 추정되며, 5번 위치(압력이 가장 낮고, 모서리 부분)의 경우, 약 2 mm 정도로 이는 이미 수지가 유동할 때 전단응력 등에 의해 파쇄가 일어나다 더 이상 일어나지 않은 상태로 추측된다. 2번 위치(게이트, 스프런너에서 가장 먼 게이트)에서는 12 mm 정도로 조사된

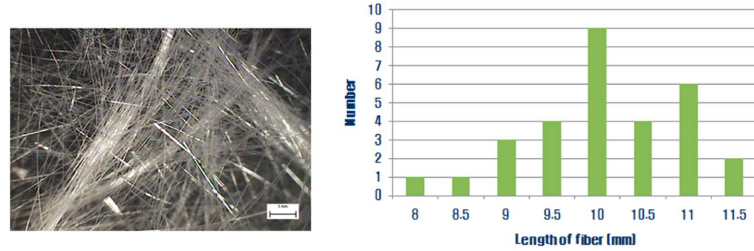
6개의 위치 중에서 가장 길었는데, 이는 제품의 형상이 원만하고, 사출 속도나 압력이 다른 게이트에 비해 비교적 낮은 곳이기 때문에 그럴 것으로 추측된다. 3번 위치의 경우에는 10 mm 정도로 각 게이트에서 주입된 용융수지가 서로 만나는 웰드 라인 부위이자 전단계수가 가장 높은 곳으로, 높은 전단계수가 강한 농도구배를 만들면서 오히려 섬유의 잔존을 도와 준 것으로 판단되며, 6번 위치의 경우 약 3 mm 정도로 이 곳 또한 웰드 라인 부근으로 이미 어느 정도 파쇄가 진행된 후 섬유 클러스터를 이루는 곳이기 때문에 그럴 것으로 추측된다. 조사된 부위의 결과를 토대로 판단할 때, 잔존 섬유의 길이는 최대 12~최소 2 mm로 이는 Kumar[4]가



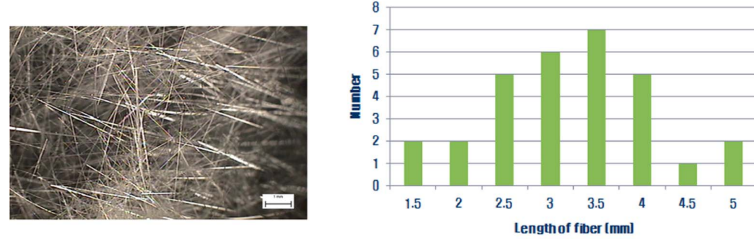
(a) point 1



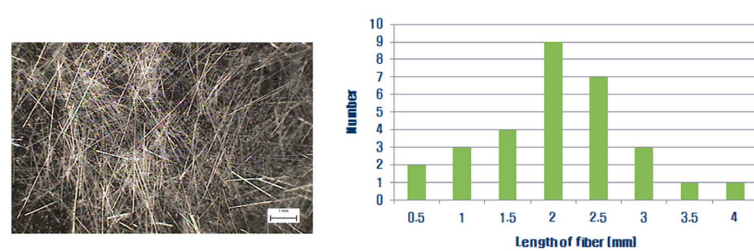
(b) point 2



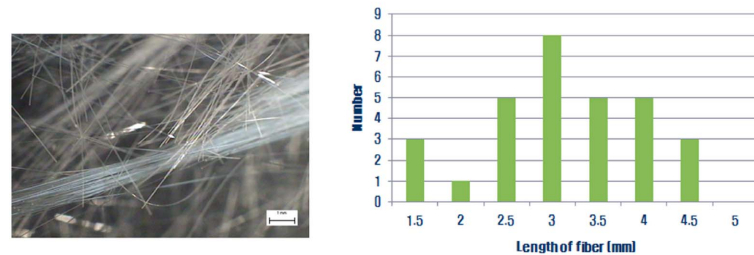
(c) point 3



(d) point 4



(e) point 5



(f) point 6

Fig. 6. Micrographs of residual fiber and distribution of the length of residual fiber at the collecting points of specimen



Fig. 7. Photograph of MAST(MTS model 323.40)

발표한 사출성형 유리섬유강화 PP 복합재의 섬유 임계 길이 1.3~3.1 mm의 범위를 대부분 상회한 값으로 기존의 사출성형공정기술과 비교했을 때, 본 연구에서 적용한 ILC 공정기술이 보강섬유 파쇄를 최소화할 수 있음을 보여주는 결과이며, Biron[5]이 정의한 LFT의 길이 2 mm 이상 유지한 것을 확인할 수 있었다.

2.5 내구성 평가

차량의 주행시 발생할 수 있는 변형에 대한 예측을 위해 내구수명시험을 수행하였다. 크래쉬패드에 적용하는 실험 기준인 Key Life Test(KLT) 실험법에 근거하여 언더커버 제품에 맞게 일부 변형하였다. 실제 시험의 수행은 MAST(Multi Axial Simulation Tester)와 환경 챔버를 이용하여 6축 재현 내구시험을 수행하는 방식으로 실시되었다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 MAST와 시험 장작 모습을 나타낸다.

변위응답 획득 시험조건과 진동시험조건은 각각 Table 4와 Table 5와 같다.

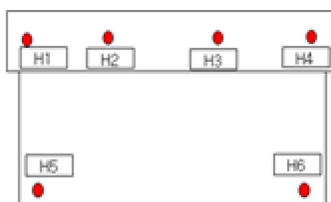


Fig. 8. Photograph showing the check points for torque according to the KLT method

Table 6은 Fig. 8에 표시한 토크 점검위치에서의 토크 경감율을 나타낸다. 표에서 보듯이 전 위치에서 60% 이내의 경감율을 보이고 있어 만족한 수준임을 확인하였다.

진동시험 결과 중 가장 변화가 큰 경우를 Table 7과 Table 8에 정리하였다. pre-test와 post-test 공히 가장 변위가 큰 경

Table 4. Displacement response test conditions

Vibration condition	Sine Sweep	Frequency range	5~50 Hz
Linear Acceleration	0.1g	Velocity	0.166 Hz/Sec

Table 5. Vibration response test conditions

	Items	Remarks
Vibration condition	Test runway	Belgium
	Frequency range	1~50 Hz
	RMS Error	Within $\pm 5\%$
	RSP MAX, MIN Error	Within $\pm 5\%$
Cycle	17 hours/cycle (total 85 hours, 5 cycles)	
Appearances	Check for appearance damage, whitening, distortion, twisting, residue, peeling	
	After disassembling the test product, check all parts for cracks and damage	

Table 6. Torques measured after performing the KLT

Check position	Before Test (kgf-cm)	After Test (kgf-cm)	Decreased Rate
H1	50	25	50%
H2		20	60%
H3		20	60%
H4		40	20%
H5		20	60%
H6		20	60%

Table 7. Displacement measured after performing the KLT (pre test)

Channel	Displacement [mm]	
	Max.	Min.
LH	0.12	-0.12
RH	0.16	-0.19
CTR	0.57	-0.50

Table 8. Displacement measured after performing the KLT (post test)

Channel	Displacement [mm]	
	Max.	Min.
LH	0.14	-0.14
RH	0.17	-0.18
CTR	0.40	-0.38

우는 시제품의 중앙에서 발생하였다. 가장 큰 변위는 pre-test의 CTR점으로 최대값 0.57 mm의 변위를 나타내었다. 이는 관련 제품의 요구 조건인 변위 1.0 mm 이내에 들어 만족하는 결과이다.

KLT 실험 후 파손이나 볼트 풀림 등이 있는 지, 육안 검사를 실시하였으나 이상 징후는 나타나지 않았다. 또한 제품 외관에 대한 파손, 백화, 변형, 비틀림, 잔금 및 박리 여부에 대해 확인한 결과, 어느 곳에서도 그런 징후는 발견되지 않았다.

6. 결 론

ILC 기술을 이용하여 대형 자동차부품인 언더커버를 LFT 소재로 시제품을 제작하고 기계적 성질 및 성능을 평가하였다.

PP+GF 20%로 만들어진 최종 시제품의 기계적 물성에 대해 평가한 결과, 굴곡탄성률은 2,600~2,800 MPa, 충격강도는 23 kg-cm/cm로 언더커버에 요구되는 강성과 충격치를 만족하였다. 경량화를 위해 제품 두께는 기존 2.5 mm에서

2.0 mm로 낮추어 체적을 2,034 cm³에서 1,762 cm³로 약 14% 박막화하였고, 이를 통해 기존 제품대비 20% 경량화하였다.

기계적 물성을 좌우하는 보강 섬유 잔존 길이는 2~12 mm를 보였으며, 평균 3 mm를 유지하였다. 잔존 섬유 무게비 함량은 20.1~21.7 wt%로 한 곳을 제외하곤 채집 위치별로 큰 차이를 보이지는 않았다.

내구 수명 평가의 경우, 우선 체결부위의 토크 경감율에서는 20~60%로 나타나 모두 60% 요구 조건을 만족하였고, 진동에 따른 변위 결과도 CTR부에서 최대 0.57 mm로 규제치 1.0 mm를 만족시켰다. 또한 환경성 평가에서도 모두 만족한 결과를 보였다.

본 연구를 통해 ILC 성형 기술을 이용하여 LFT를 효율적으로 자동차부품에 적용할 수 있는 지 검증하였고, 자동차 내장부품 특성상 원가, 디자인 자유도를 유지하면서 물성을 획기적으로 올릴 수 있는 가능성도 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부가 지원하는 연구과제로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

1. A&D Consultants, *Report on the Technology Trends of Automotive Weight Reduction*, A&D Consultants, 2011, p.507.
2. A&D Consultants, *Report on the Technology Trends of Automotive Weight Reduction*, A&D Consultants, 2012, p.304.
3. Lee, K.S., Jeon, B.J., Cha, S.W., Jeong, K.Y., Han, I.S., Lee, Y.S., Lee, K.S., and Oh, S.M., "A Study on Optimizing the Mechanical Properties of Glass Fiber-Reinforced Polypropylene for Automotive Parts," *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 50, No. 1, 2011, pp. 95-101.
4. Kumar, K.S., Ghosh, A.K., and Bhatnagar, N., "Mechanical properties of injection molded long fiber polypropylene composites, Part 1: Tensile and Flexural properties," *Polymer Composites*, Vol. 28, No. 2, 2007, pp. 259-266.
5. Biron, M., *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*, Elsevier, 2007, p.823.