대한기계학회 2000년도 춘계학술대회논문집 A pp. 109~114 KSME 00S019

복합재료 Body Panel의 특성평가

남현욱* · 변현중* · 이용태** · 한경섭***

Characteristics of Composite Body Panel

Hyun Wook Nam, Hyun Joong Pyun, Young Tae Lee and Kyung Seop Han

Key Words: LPMC, Mechanical Properties, Fatigue, Impact

Abstract

A research for development of composite body panel is in progress for lightening tare. In this study, experiments on estimation of mechanical properties of LPMC (Low pressure molding compound) including fatigue and impact characteristics were carried out. The experiments show that LPMC satisfied basic requirements of car body panel. The fatigue life of LPMC was predicted and the material degradation due to fatigue and impact were fined out.

1. 서 론

최근 기존의 바디 프레임과 외장재로 쓰이던 고장력 강판의 대체재로 알루미늄과 섬유 강화 플라스틱이 가장 주목을 받고 있다. 그 중에서도, 고분자 복합재료는 무게가 가볍고 강도와 강성이 우수할 뿐만 아니라 제조단가도 계속 낮아지고 있어서, 그 용도가 내·외장재에서 부품으로까지 확대되어 가고 있다[1]. 이에 국내에서도 현대자동차에서 알루미늄 스페이스 프레임에 차체의 외판을 고분자 복합재료로 대체한 초경량 차체를 개발하고 있다. 이를 위하여, 개발중인 복합재료 외판의 기본적인 물성의 규명, 다양한 하중 조건에서의 기계적 거동 및 여러 환경적 요인에 의한 물성 변화에 대한 평가 분석은 차체의 설계 단계에서 중요한 기초 자료들을 제공할 뿐만 아니라, 복합재료 외판의 내구성과 안정성에 대한 신뢰도를 확보하는 데 반드시 필요하다. 이에 본 연구는 차체 외판으로 개발중인 LPMC 복합재료에 대하여 기본 물성의 평가 및 피로와 충격 특성에 대한 연구를 수행하였다.

*포항공과대학교 기계공학과 대학원
**포항공과대학교 기계공학과 기술원
***포항공과대학교 기계공학과

2. LPMC 복합재료의 특징과 조성

LPMC(Low Pressure Molding Compound) 복합재료는 SMC(Sheet Molding Compound)를 한 단계 발전시킨 재료이다. 우선, SMC는 FRP 압축성형 재료의 일종으로서 불포화 폴리에스터 수지에 충진제, 촉매, 이형제 등을 혼합한 원료를 잘게 썰은 유리섬유(chopped glass strand)에 함침시킨 후 화학적으로 점도를 높여 성형을 한 것이다. 강도면에서는 강판에 비해 성능이 떨어지나, 부식이나 dent에 강하고, 복잡한 형상으로도 성형성이 뛰어나다. SMC는 강성의 허용치를 충족시키기 위해 강판의 4배 정도의 두께가 되어야 함에도 불구하고, 약 30%의 무게절감 효과가 있으며, 재료비는 강판에 비해 비싸지만 성형 비용이 싸기 때문에 오늘날의 다품종 소량 생산 체재에 적합한 장점들을 가지고 있다[2]. 기존의 SMC가 MgO

Table 1 LPMC formulation(% by weight)

Resin System			Reinforcement	Filler	etc.
UPE	Crystalline PE	Stylene	Glass Fiber	CaCO3	Catalyst, Initiator, Releasing Agent
12.5	3.2	5.2			
20.9			27.0	50.1	2.0

를 첨가하여 화학적인 증점을 하는 반면, LPMC 복합재료는 Scott Bader사의 특허 재료인 Crystic Impreg라는 결정질 폴리에스터를 사용하여 물리적 증점을 하므로 장기저장 안정성을 가진다. 따라서 SMC보다 낮은 온도와 압력에서 성형이 가능하여 몰드나 프레스 설비의 투자비용을 낮출 수 있고, 설비의 수명도 연장할 수 있다[3]. 표 1은 개발된 LPMC 복합재료의 조성을 나타낸 것이다.

3. 기본물성의 평가

강도나 강성, 내충격성, 밀도 등의 기본적인 기계적 물성들은 차체 외판으로 쓰일 재료의 선택이나 설계 과정에 기초적인 자료들을 제공하므로, 이러한 기본물성의 평가는 중요한 의미를 가지며 신뢰성 있는 물성 평가가 되어야 한다. 이를 위하여 밀도의 측정, 인장 및 굽힘 시험을 수행하였으며, 자동차 및 공업용 복합재료의 평가를 위한 표준 가이드로 ASTM D4762[4]를 참조하였다. 물성 평가를 위한 원재료는 300×300mm의 두께 3mm인 SMC 복합재료 평판으로 조성은 앞서 기술한 표 1과 같다. 시료의 채취는 세 개의 평판으로부터 재료의 성형시 발생이 우려되는 불균질 부분을 피하기 위해 가장자리 50mm을 제외한 부분에서 각각 3개 이상의 시편을 만들었다.

표 2는 기본물성들에 대한 실험 결과를 나타낸 것이다. 전체적으로 모든 항목들이 GM사의 spec.을 상회하여 차체 외판에의 적용을 위한 기본 요건을 충족시키고 있다. 기존의 차체 외판으로 쓰인 고장력 강판(SPRC 35)의 두께가 0.75mm이고, 개발된 LPMC외판은 3mm로 4배의 두께가 된다. 이때, 인장하중은 두께에 비례하여 강판의 최대하중의 0.7배 정도가 되고, 굽힘 하중에 대해서는 두께의 제곱에 비례하므로 강판의 7.8배의 하중까지 견딜 수 있다. 외판이 받는 하중이 인장보다는 굽힘인 경우가 지배적이므로 LPMC외판으로 대체할 경우, 무게 절감 효과뿐만 아니라 비약적인 안정성의 향상이 기대된다. 한편, 표 3은 LPMC를 구성하는 폴리에스터, 유리섬유, 탄산칼슘의 밀도와 부피분율 및 탄성계수들을 나타낸 것이다. 기본물성들은 이들의 함량과 밀접한 관계가 있다. 유리섬유는 보강재로서 강성이나 강도, 내충격특성을 향상시키지만 비중을 증가시킨다. 충진제인 탄산칼슘은 제품의 단가를 낮추고,

Table 2 Mechanical properties of LPMC tested

Properties	LPMC			GM Spec.	Typical SMC[3]	Steel (SPRC 35)
	Test Method	Average	Std. Dev.			
Specific gravity	ASTM D792	1.910	0.004	1.97 max	1.824	7.75
Tensile strength, MPa	ASTM D638	62.6	7.6	58 min	76.9	359
Tensile modulus, GPa		11.9	1.7	11.3 min		210
Elongation at failure, %		0.97	0.15	-	1.0	38.3
Flexural strength, MPa	ASTM D790	176	15.6	120 min	161	359
Flexural modulus, GPa		12.0	0.79	9.6 min	12.6	210
Izod impact strength (unnotched), J/m	ASTM D256	975	94	950 mim	915	-

Table 3. Typical properties of the components of LPMC

Property	Resin (Polyester)	Fiber (E-Glass)	Filler (CaCO3)
Density, g/cm3	1.20	2.55	2.40
Volume Fraction, %	33.3	20.2	39.9
Young's Modulus E, GPa	3.52	72.5	47.8
Size		l=25.4mm, d=15 μm	3-6 μm particle

성형 과정에서 흐름성을 향상시켜 표면의 흠자국(sink mark)을 없애주는 역할을 하는데, 영률이 커서 탄성 영역에서 강성을 증가시키지만 소성 영역에서는 기지재와의 계면 결합력이 작을 경우에 계면 분리로 인해 결함으로 작용하여 강도를 저하시킨다. 탄산칼슘의 함량은 50%(wt)로 일반 SMC의 40~45%에 비해 많은데, 탄산칼슘의 함량을 어느 정도 낮춘다면, 비중을 감소시키고 인장강도를 증가시켜 좀더 최적화된 물성치를 얻을 수 있으리라 사료된다.

4. 피로 특성 평가

차체 외판은 일교차에 의해 열변형을 주기적으로 받음으로 인한 열 피로나 불규칙한 노면 조건, 코너링 시의 차체의 미세한 변형의 주기적 반복에 의한 피로 등 여러 가지 조건의 피로하중을 받게 된다. 따라서, LPMC외판에 대한 피로 특성에 대한 정보는 차체 설계 단계나 재료의 내구성을 평가하는 중요한 자료 중의 하나이다.

이에 본 연구에서는 LPMC외판에 대한 피로실험을 수행하여 각 응력별 피로수명 및 피로거동 특성을 파악하였다.

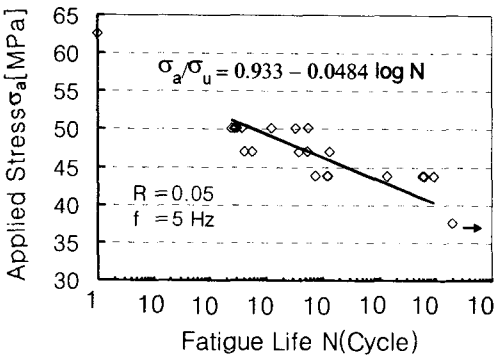


Fig.1 S-N curves for LPMC

피로실험은 인장시험 때의 시편과 동일한 형상의 시편에 대하여 MTS(Materials Test System)를 사용하여 하중제어방식으로 수행하였다. 온도상승으로 인한 시편의 물성변화를 최소화하고 시험기의 용량을 고려하여 5Hz의 정현파로 최소하중과 최대하중의 응력비를 0.05로 유지하여 피로실험을 수행하였다. 가한 응력의 범위는 정적 강도의 60~80%이며, 하중반복수는 2×10^6까지로 제한하였다.

4.1 응력별 피로수명 특성

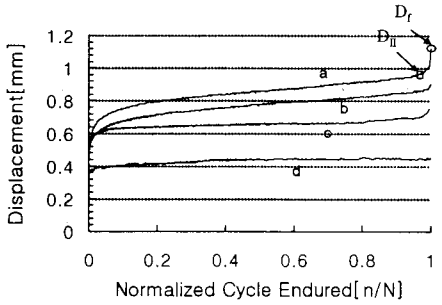
Fig. 1은 응력별 피로수명에 대한 데이터와 S-N 선도를 나타낸 것이다. 가한 응력이 정적강도의 80%, 항복강도의 응력 수준인 50MPa일 때 200~5000 정도의 피로수명을 보이고, 응력 수준이 60%인 38MPa일 때, 2×106 까지 파단이 일어나지 않았다. 금속 재료에 비해, 응력별 피로수명의 편차가 크게 나타나는 데, 이는 복합재료에서 나타나는 일반적인 현상으로, 그 주원인은 재료의 정적 강도의 편차가 금속재료에 비해 큰 데 있다. 피로수명의 데이터로 구한 S-N 선도는 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_u} = 0.933 - 0.0484 \log N \qquad (1)$$

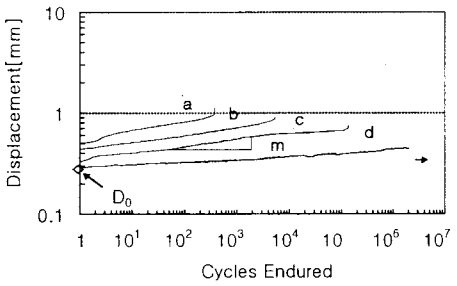
4.2 피로주기에 따른 피로 거동

각 응력 수위에서의 피로주기에 따른 피로거동과 재료의 손상 정도를 파악하기 위해서 시편마다 그립간의 간격을 일정하게 하여 피로 주기에 따른 변위를 측정하였다.

Fig. 2는 각 응력 수위에서의 피로주기에 따른 최대 변위를 나타낸 것이다. 피로주기는 피로수명 N으로 무차원화하여 나타내었으며, 각 응력 수위에서 S-N 선도와 가장 가까운 데이터를 정리



(a) Displacement versus Normalized cycle[n/N]



(b) Log-log scale

Fig. 2 Changes of maximum displacement of LPMC during fatigue loading
a: r=80%, N=375 b: r=75%, N=5353 c: r=70%, N=137590 d: r=60% No failure to 2×106

하여 나타내었다. 피로하중 하에서의 변위나 연신율의 증가는 어떤 피로주기 n에서의 손상정도를 수치화하는 척도로서 사용할 수 있다.

LPMC의 피로주기에 따른 손상 거동은 크게 세 부분으로 특징지어진다. 초기의 I 단계는 소성변형이 빠르게 진행되는 과도기로 상대적으로 강도가 약한 기지재의 균열에 의한 연화과정을 거치며 기지재와 보강 섬유들간의 내부 응력이 재분포된다. 이어서 일정한 비율로 변위의 점진적인 증가를 보이는 II 단계를 거치는 데, 그림에서 보듯이 피로수명의 거의 대부분을 차지하며, 이 구간에서는 I 단계에서 생성된 미시균열들이 안정된 상태로 성장하는 과정으로 볼 수 있다. 마지막 III 단계에서는 다시 불안정하게 변위가 급격히 증가하여 파단에 이르게 된다.

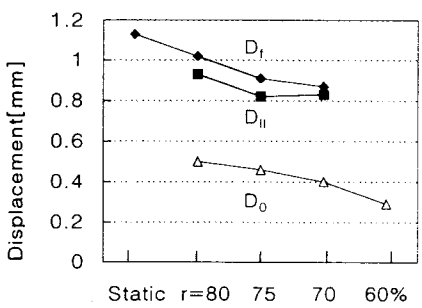
Fig. 2(b) 피로주기와 최대 변위를 로그 눈금으로 나타낸 것이다. 피로주기 종반의 급격한 파단이 일어나는 부분을 제외하면, 기울기 m이 일정한 직선의 형태를 띄고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실로부터 피로주기와 변위 사이에 다음과 같은 경험식을 유도할 수 있다.

$$D = D_0 n^m \qquad (2)$$

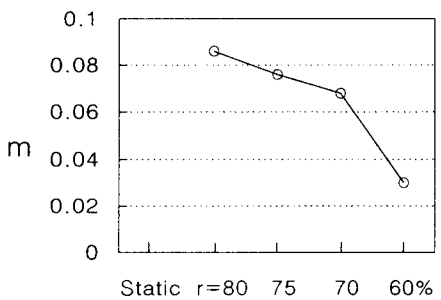
이 때, D와 D_0는 각각 피로주기 n에서의 최대 변위, 첫 번째 피로주기에서의 최대 변위를 나타낸다. 이 때, m의 물리적 의미는 피로 주기의 증가에 따른 재료의 손상율이 되며 m의 값이 클수록 같은 피로 주기의 증가에 있어 손상의 정도가 큼을 나타낸다. 식 (2)에 파단조건을 줌으로써, 피로수명에 관한 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$D_f' = D_0 N^m, \; where \; D_f' \simeq D_{II}, N \simeq N_{II} \qquad (3)$$

이때, D_{II}와 N_{II}는 각각 단계 II에서 단계 III으로 전이될 때의 변위와 피로주기로, 단계 III에서의 피로주기가 전체 피로수명에 극히 짧고 단계 III에서부터 불안전한 파단이 일어나므로, D_{II}를 파단조건으로 하고 그때를 피로수명으로 볼 수 있다. Fig. 3은 D_f, D_{II}, D_0 및 m의 응력 수위에



(a) D_f, D_{II} & D_0 versus applied stress level



(b) m versus applied stress level

Fig. 3 Changes of the parameters determining fatigue life for the variation of applied stress

대한 변화를 나타낸 것으로, 각 점들은 응력 수위별 실험값들의 평균값이다. 위의 변수들은 식 (3)에서와 같이 피로수명에 직접적인 영향을 끼치는 요소들이다. D_0와 m이 낮아질수록, D_f나 D_{II}가 증가할수록 피로수명은 증가하게 된다. Fig. 3에서 응력수위가 낮아질수록 D_0와 m은 감소하는 일반적 경향을 보인다. 한편, D_f와 D_{II}는 응력수위가 낮아질수록 감소하는데, 이는 응력 수위가 낮아질수록 미세 균열들이 강도가 낮은 취약부분에서 집중적으로 성장하여 파손이 일어나기 때문으로 여겨진다.

5. 충격 특성 평가

차체 외판은 가벼운 접촉사고에서 낙석이나 우박, 차체의 충돌 등 여러 조건의 충격 하중을 받을 수 있으며, 이러한 충격 하중에 대한 충격 특성들은 안전성을 고려한 차체 설계에 있어 중요한 자료를 제공한다. 이에 본 연구에서는 계장화된 충격실험기를 사용하여 LPMC외판의 저에너지 충격 특성 및 관통, 파괴시의 충격 특성들을 파악하였다.

충격 실험은 INSTRON사의 GRC8250 충격시험기를 사용하여 평판에 낙하추를 떨어뜨리는 방식의 낙하추 실험을 실시하였는데, 이때, 낙하추의 무게와 충격속도를 변화시켜 충격에너지의 크기에 따른 LPMC외판의 충격 거동을 조사하였다. 충격 하에서 재료가 보이는 충격 거동은 재료가 받은 하중과 변형정도, 재료가 흡수한 에너지 등을 통해 파악할 수 있다. 실험조건과 방법은 ASTM D3763[5]에 의거하였다. 낙하추는 충격을 가하는 부분이 지름 12.7mm인 반구형 강철막대이며, 100mm×100mm의 정사각형 시편과 중앙에 지름 75mm의 원형의 구멍이 있고 구멍주위 12.7mm의 고정단을 경계조건으로 가지는 fixture를 사용하였다.

Fig. 4는 충격에너지의 변화에 대해 시편이 받은 하중-변형 곡선을 충격에너지별로 나타낸 것이다. 크게 완전한 파괴가 일어나지 않고 되튄 (a)-(c)와 낙하추가 시편을 바로 관통한 (d), (e)로 그 거동을 분류할 수 있다. 관통이 된 경우에는 변형이 계속 커지며, 하중은 최대값을 지나서 여러 개의 첨단을 만들며 완만한 감소를 보인다. 되튄 경우에는, 변형과 하중 모두 최대값까지 증가하며 충격에너지가 시편의 변형에너지로 바뀐 후, 시편이 가진 탄성에 의해 다시 변형과 하중이 감소하게 되는데, 이때 변형에너지의 손실이 생긴 비탄성 거동을 보인다. 다시 말하면, 되튄 경우에도 소성 변형을 일으켰으며 이는 시편에 어느 정도의 손상이 발생했음을 의미한다.

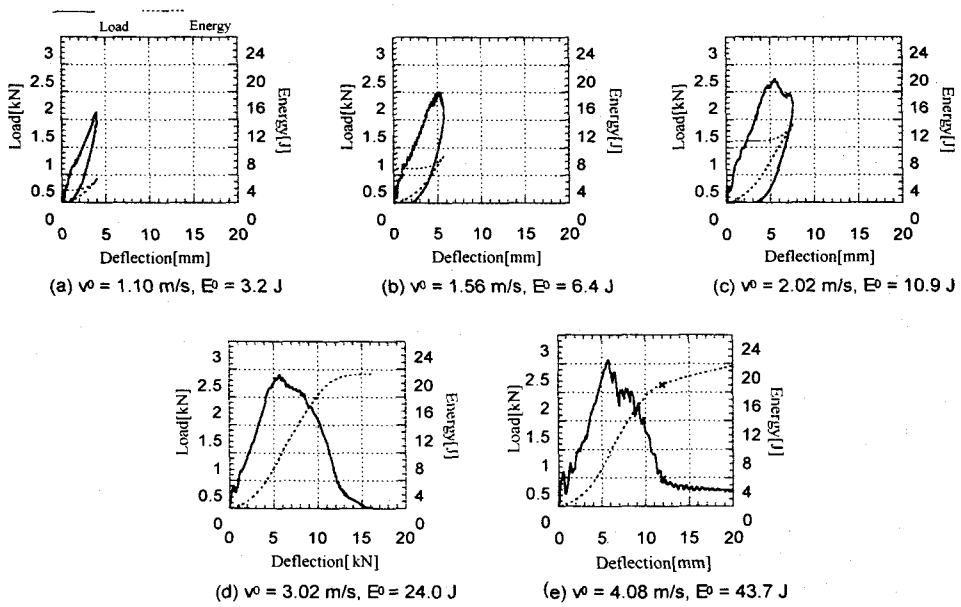


Fig. 4 Load/Displacement curves of LPMC for the variation of impact energy

Fig. 5는 충격에너지의 변화에 대한 하중의 최대값, 그 때의 에너지 및 총에너지를 나타낸 것으로 각각의 점들은 5개 이상의 실험값들의 평균치이다. 관통이 된 경우, LPMC시편이 흡수한 총에너지와 파괴 개시에너지인 최대충격 하중에서의 에너지는 각각 약 17.5J, 7.5J로 일정하나, 최대 충격 하중은 2.3kN에서 2.6kN으로 증가하여, 충격속도에 의한 충격에너지의 증가가 LPMC외판의 충격 강도에 영향을 미침을 알 수 있다. 한편, Fig. 5(b)에서 관통될 때의 에너지 17.5J까지 충격에너지가 증가할수록 총에너지는 증가한다. 총에너지는 충격하에 복합재료 내 기지재의 균열, 보강재와의 분리, 뽑힘 등에 의해 시편이 흡수한 에너지로서, LPMC외판의 손상 정도를 정량적으로 나타낸다.

6. 결론

1. 기본물성의 평가 결과, LPMC외판은 요구기준을 충족하였고, 굽힘 하중에 대해 강판의 7.8배까지 견딜 수 있음을 알 수 있었다.

2. 인장 피로 시험을 통해, LPMC외판의 피로수명과 피로주기에서의 손상정도를 파악할 수 있었다. 피로수명은 정적 강도의 60%인 38MPa에서 2×10^6 이상으로 나타났으며, 응력 수위가 감소함에 따라 파단 변위와 피로 손상율도 감소하는 경향을 보였다.

3. 낙하추 충격 실험을 통해 충격에너지의 크기에 따른 LPMC외판의 충격거동특성을 파악하였다. 관통하는데 드는 에너지는 약 17J이며, 관통시의 최대충격하중은 2.3-2.6kN으로 충격에너지가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한, 되튈 때 LPMC외판의 손상정도를 총에너지로 정량화할 수 있었다.

후기

본 연구는 98년 공업기반기술개발사업 중 차세대자동차기술개발 사업의 위탁과제 (복합재료 Body Panel의 특성평가)로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

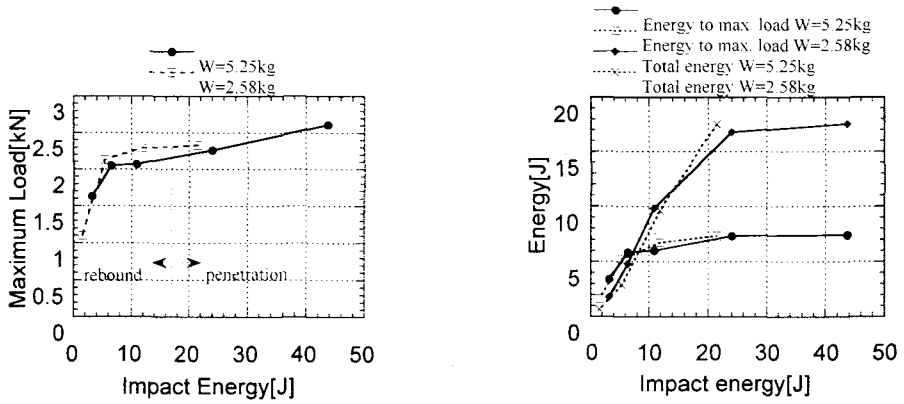
[1] 금종구, 이명구, "자동차용 플라스틱의 현황," 고분자과학과 기술, 제 6권 4호, pp. 307-313, 1995. 8.

[2] Stuart M. Lee, International Encyclopedia of Composites, VCH Publishers, 1991, pp. 93-103.

[3] Technical Paper, "Low cost molding with low pressure molding compound(LPMC)," Jhon A Neat and Warren Robins of National Composites, Inc., Steven P. Harddebeck and Jhon J. Young of Owens-Corning.

[4] ASTM D4762-88, "Standard guide for testing automotive/industrial composite materials, pp. 212-218.

[5] ASTM D3763-86, "Standard test method for high-speed puncture properties of plastics using load and displacement sensors," pp. 174-178.



(a) Maximum load versus Impact energy (b) Energy to max. load & Total energy versus Impact energy

Fig. 5 Changes of maximum load, energy to max. load, total energy for the variation of impact energy