

## 차량 경량화를 위한 사출성형 유리섬유강화플라스틱의 온도 및 수분 흡수에 따른 기계적 물성 변화<sup>§</sup>

천 두 만<sup>\*†</sup>, 안 성 훈<sup>\*\*</sup>

\* 울산대학교 기계공학부, \*\* 서울대학교 기계항공공학부

### Change of Mechanical Properties of Injection-Molded Glass-Fiber-Reinforced Plastic (GFRP) According to Temperature and Water Absorption for Vehicle Weight Reduction

Doo-Man Chun <sup>\*†</sup> and Sung-Hoon Ahn <sup>\*\*</sup>

\* School of Mechanical Engineering, Univ. of Ulsan, \*\* School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received June 25, 2012 ; Revised October 23, 2012 ; Accepted November 8, 2012)

**Key Words:** Injection Molding(사출성형), Glass Fiber Reinforced Plastics(유리섬유강화플라스틱), Mechanical Property(기계적 물성), Temperature(온도), Water Absorption(수분흡수)

**초록:** 최근 차량 경량화를 통한 에너지 절감을 위해서 무거운 철강재료를 경금속이나 복합재료로 대체하는 연구가 많이 진행되고 있다. 이중, 폴리머 기반의 복합재료는 사출성형을 통해서 복잡한 형상의 제작이 가능하고, 유리섬유나 탄소섬유를 함께 사용하여 철강재료 수준으로 기계적 물성을 높일 수 있는 장점이 있다. 하지만 엔진의 고온과 우기에서의 높은 습도 환경은 폴리머의 기계적 물성을 낮추기 때문에 재료선택 과정에서 반드시 고려해야 한다. 본 연구에서는 사출성형을 통해 만들어진 유리섬유강화플라스틱을 엔진룸 내부 온도와 유사한 85℃ 환경과 우기시의 최대 수분흡수 환경하에서의 기계적 물성변화를 인장시험을 통해 알아보았다. 그 결과, 고온환경에서 최대인장강도가 약 23% 감소를 보였고, 수분에 의해서는 약 30% 감소하였으며, 고온과 수분 모두에 대해서는 약 70% 감소를 확인하였으며 이는 재료 선정시 반드시 고려해야 할 영향으로 판단되었다.

**Abstract:** Owing to the global energy crisis, studies have strongly focused on realizing energy savings through vehicle weight reduction using light metal alloys or polymer composites. Polymer composites afford many advantages including enabling the fabrication of complex shapes by injection molding, and glass and carbon fibers offer improved mechanical properties. However, the high temperature in an engine room and the high humidity during the rainy season can degrade the mechanical properties of the polymer. In this study, the mechanical properties of injection-molded glass-fiber-reinforced polymer were assessed at a temperature of 85°C and the maximum moisture absorption conditions. The result showed a 23% reduction in the maximum tensile strength under high temperature, 30% reduction under maximum moisture absorption, and 70% reduction under both heat and moisture conditions. For material selection during the design process, the effects of high temperature and high humidity should be considered.

- 기호설명 -

$G_M$  : 수분흡수계수  
 $D$  : 확산계수 (mm<sup>2</sup>/sec)  
 $h$  : 시편두께 (mm)  
 $M, M_1, M_2$  : 수분흡수율 (%)  
 $M_m$  : 최대 수분흡수율 (%)

$M_i$  : 초기 수분흡수율 (%)  
 $t_1, t_2$  : 시간 (sec)

#### 1. 서론

최근 운송장비의 경량화를 통한 연비향상을 위해 다양한 부품에 대한 경량화에 대한 연구가 진행 중이다. 기존 철강재료가 되어 있는 부품을 알루미늄 및 마그네슘 합금이나 플라스틱류 또는 복합재료로 바꾸는 연구가 많이 진행되고 있다.<sup>(1-5)</sup> 복

§ 이 논문은 2012년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2012. 6. 26.-27., 대전컨벤션센터) 발표논문임.

† Corresponding Author, dmchun@ulsan.ac.kr

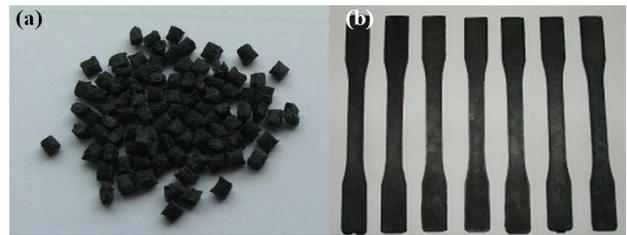
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

합재의 경우 주로 유리섬유/에폭시 적층 복합재가 많이 사용되고 있다.<sup>(6,7)</sup> 여러 가지 차량용 부품 중에서 특히 자동차 엔진부분의 경량화는 전체 자동차의 경량화에 큰 역할을 한다. 엔진 무게의 감소는 엔진을 지지하는 샤시의 무게감소를 가능하게 하고 이러한 자동차 무게의 감소는 브레이크 용량을 줄일 수 있어 엔진 경량화의 파급효과는 크다고 할 수 있다. 이러한 이유로 자동차 엔진용 철강재료 부품의 경우도 경량재료의 적용이 필요하다. 하지만 엔진 부품들의 형상이 복잡해서 판재 형태의 적층 복합재의 사용이 어려워 사출성형이 가능한 순수 폴리머에 대한 연구가 주로 진행되었다.<sup>(8,9)</sup> 기존에 엔진 부품사인 Denso 사 및 완성차 메이커인 현대자동차 등에서 플라스틱 폴리머에 대해 개발 및 평가를 진행하였다. Denso 사의 경우 다섯 가지 일반적으로 사용되는 플라스틱 수지(PF, PA, PAA, PRT, PPS)를 가지고 밀도, 제조정밀도, 강도, 열충격, 내열성, 내화학성, 생산성을 비교하여 내열성이 약한 열가소성수지는 모두 배제하고 열충격, 생산성이 약간 떨어지지만 폐놀수지를 최종 선정하였고, 수치해석을 이용하여 벨트 장력에 의한 폴리 치형부 크랙을 분석하기 위해 최대 벨트장력에 의한 피로해석을 Computer Aided Engineering (CAE)를 통하여 수행하여 만족함을 보였다.<sup>(8)</sup> 또한 현대자동차에서는 쉬운 재활용을 위해 열가소성수지사용을 기본으로 원가절감을 위해 표준 그레이드를 사용하였다. 동적하중에 잘 견디고 긴 내구성을 가지며 엔진룸 내부 온도에 견딜 수 있고 뛰어난 마모 특성을 가진 재료를 선정하도록 하였다.<sup>(9)</sup>

대부분의 경우 자동차의 경량화를 위해 기존 스틸을 플라스틱으로 대체하고 표준조건에서의 기계적인 물성만 고려하여 평가를 진행하였다. 하지만 엔진 부품이 장착되는 위치인 엔진룸의 특성상 사용 온도가 높고 부동액, 세척액, 빗물 등 물과의 접촉 빈도가 많으며 마모, 마찰이 지속적으로 발생하는 환경을 고려하지 않았다. 따라서 일반적인 플라스틱과 사용조건이 다르기 때문에 사용 환경에 대한 플라스틱의 특성변화에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 기계적 물성이 향상된 고온용 유리섬유강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic, 이하 GFRP)을 대상으로 해당 GFRP의 기계적 성질을 저하시킬 수 있는 온도와 습도에 대한 영향을 실험적으로 평가하였다. 특히 기존의 유리섬유/에폭시 적층 복합재가 아닌 사출성형을 통한 복잡한 형상에 적용이 가능하도록 short fiber가 사용된 GFRP를 평가하였다.

**Table 1** Process parameters of injection molding

Name	Value
Nozzle temperature	330 °C
Barrel temperature	320 °C
Mold temperature	150 °C
Clamping force	12000 kg
Injection pressure	6.9kPa (5000 psi)



**Fig. 1** Images of (a) Pellet of GFRP, and (b) injection molded specimen

## 2. GFRP 시편 제작 및 평가

### 2.1 GFRP 시편 제작

사용재료는 EMS사에서 개발한 GRIVORY XE 3844 재료로 성분은 Polyphthalamide가 기본 matrix으로 사용되었고 유리섬유와 여러 가지 미네랄이 함유된 복합재료이다. 특히 열에 대한 내구성이 강화된 재료로써 녹는점이 325°C이고 장시간 사용 가능 온도도 150°C이므로 엔진룸의 고온에 견딜 수 있도록 제작되었다.

온도 및 수분에 대한 기계적 성질 저하를 평가하기 위하여 기계적 성질을 평가하는 시험법 중에서 대표적인 인장시험을 수행하였다. 준비한 시편은 인장시험에 대한 표준인 ASTM D638을 근거로 제작하였다. 시편제작은 대량생산이 적합하도록 사출성형으로 제작되었다. 또한, 사용 환경을 고려하여 시편을 제작하였고, 준비한 시편 수는 하나의 조건에 3개의 시편을 사용하여 상온 인장시험, 85°C 고온 인장시험을 물속에 0, 100, 300, 500 시간 동안 수분을 흡수시킨 후의 시편을 이용하여 인장시험을 진행하였다. Fig. 1은 시편제작에 사용된 pellet 형태의 원재료와 사출성형된 시편이다. Table 1은 인장시험용 시편 제작을 위한 주요 사출 조건을 정리한 것이다.

### 2.2 수분 흡수 평가

시편의 수분 흡수율을 빠른 시간에 높이기 위해서는 고온의 물속에 침전시키는 가속시험을 사용

하였다. 통상적인 엔진룸 온도를 고려하여 시편을  $85 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 온도가 조절되는 환경시험 챔버에 두고 주기적으로 수분흡수율을 측정하였다.

최대 수분 흡수율을 달성하기 위해 총 500 시간 동안 주기적으로 수분흡수율을 측정하였다. 측정 주기는 초기 24 시간까지는 수분흡수율이 빠르게 변화하므로 1 시간 또는 3 시간단위로 측정하였고 이후에는 12 시간 또는 24 시간 단위로 측정하였다. 측정방법은 표면에 있는 물기를 제거한 후 0.001g의 정밀도를 갖는 저울로 무게를 측정하여 초기 물속에 넣기 전의 무게와 비교하여 흡수율을 계산하였다. 측정시 발생할 수 있는 수분흡수율의 하락을 최소화 하기 위해 3 개의 시편을 돌아가면서 측정하여 해당 측정주기를 최소화하였다. Fig. 2는 측정한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 초기에 급격히 수분흡수율이 증가하다가 300 시간이 넘어가자 약 1.7%에서 수렴하는 것을 확인하였다. 이때 확산계수를 이용하여 시간에 따른 수분흡수에 대한 식을 실험데이터와 비교하였다. 시편의 확산계수는 식 (1)과 같이 수분흡수율과 시편두께 및 최대 수분흡수율로 구할 수 있다.<sup>(10)</sup>

$$D = \pi \left( \frac{h}{4M_m} \right)^2 \left( \frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (1)$$

$$M = G_M (M_m - M_i) + M_i \quad (2)$$

$$G_M = 1 - \exp \left( -7.3 \left( \frac{Dt}{h^2} \right)^{0.75} \right) \quad (3)$$

확산계수를 구할 때 구간을 임의로 선정하여 값을 구해보면 구간에 따라 확산계수의 값이 달라진다. 따라서 측정값이 많고 일정한 경향성을 보이는 0에서 100 시간 이내의 값을 구해서 사용하였다. 이렇게 구한 확산계수를 이용하여 시간에 따른 수분흡수율 함수를 구하면 식 (2)와 (3)을 이용하여 구할 수 있다.<sup>(10)</sup> 이때 초기 수분 흡수율은 0으로 두고 계산하였다. 여기서 구한 수분흡수율 함수를 기존 실험치와 비교해 보면 Fig. 2에서처럼 유사한 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 500 시간 동안 거의 100%의 수분흡수를 확인할 수 있었다.

### 2.3 인장시험을 통한 기계적 물성 평가

수분에 의한 기계적 성질변화를 살펴보기 위해 인장시험을 실시하였다. 전체 실험은 Fig. 3에서와

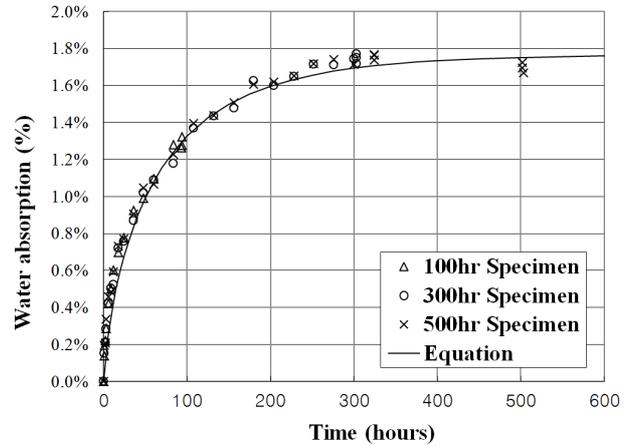


Fig. 2 Experimental result of water absorption result and estimated water absorption curve

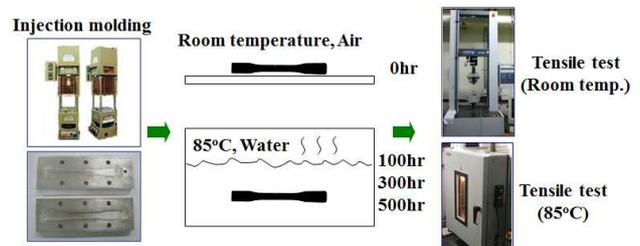


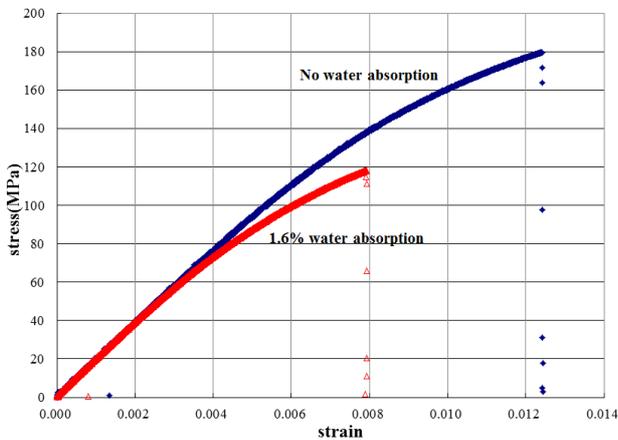
Fig. 3 Experimental procedure for the effect of humidity and heat to mechanical properties of GFRP

같이 수분흡수가 거의 없도록 물속에 두지 않은 시편과 100 시간, 300 시간, 500 시간 동안 물속에 둔 시편에 대한 상온 및 고온에서의 인장시험을 실시하여 기계적 물성변화를 서로 비교하였다. 총 실험에 사용된 시편의 조건은 Table 2에 정리하였고, 이때 조건당 3 개의 시편을 평가하였다. 물속에 두지 않은 시편은 사출직후 가급적 빠른 시간에 인장시험을 수행하였고, 물속에 둔 시편의 경우 대기 중에서 수분손실을 최소화하기 위해 표면의 물기만을 제거하고 즉시 인장시험을 실시하였다.

인장시험은 시편에 Strain gauge를 부착하여 푸아송 비와 영률을 측정하였다. 측정장비는 LabView의 Strain gauge 모듈을 사용하였고 인장시험기는 Instron 5582를 사용하여 측정하였다. Strain gauge가 고온에서 오차가 많이 발생하여 측정값은 상온 인장시험에만 활용하였다. Fig. 4는 수분이 전혀 없을 때와 최대 수분 흡수량 (물속 500 시간 이후) 일 때의 대표적인 Stress-Strain 그래프이다. 그래프에서 알 수 있는 바와 같이 영률 (그래프의 기울기)은 큰 변화가 없었으나 최대인장강도의 값은 아주 큰 차이를 보였다. 또한 3 개의 시편에서의 푸아송 비를 비교해보면 수분이 없을 때에는 평균적으로 0.367이었고 최대수분

**Table 2** Tensile test condition and time for water absorption

Tensile test condition	Time for water absorption (hour)	Number of specimen
Room temperature	0	3
	100	3
	300	3
	500	3
85°C	0	3
	100	3
	300	3
	500	3

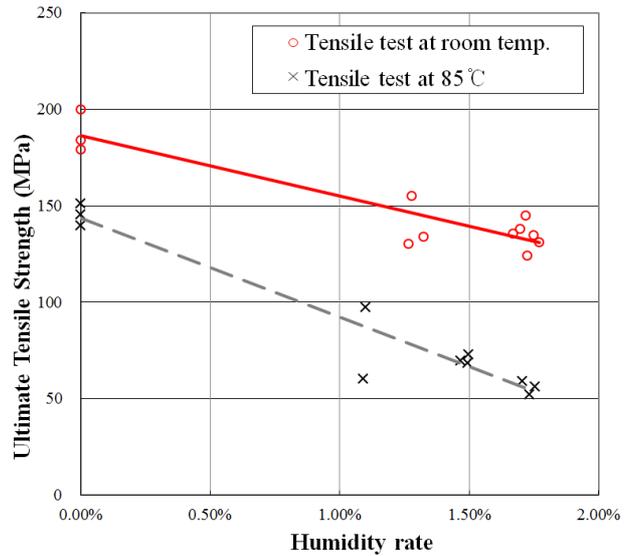


**Fig. 4** Stress-strain curves for no water absorption and 1.63% water absorption

흡수일 때는 0.376 으로 큰 차이가 없었다. 영률은 18.8GPa 에서 16.2GPa 로 감소를 확인할 수 있었다. 하지만 최대인장강도는 180MPa 에서 119MPa 로 아주 큰 감소를 확인할 수 있었다.

최대인장강도의 고온 영향을 분석하기 위해 고온에서 인장실험을 실시한 결과를 살펴보면 열에 의해서는 최대인장강도가 약 23% 감소하였고, 열과 최대 수분흡수에 의해 70% 감소가 발생하였다. 수분흡수와 온도에 대한 영향은 Fig. 5 에 정리하였다. 수분흡수율에 의해서 선형적으로 최대인장강도의 하락을 확인할 수 있었고, 고온 환경하에서는 수분에 의한 기계적 물성의 하락폭이 더욱 증가됨을 확인할 수 있었다.

이러한 결과의 원인을 살펴보기 위해서 Fig. 6 에서 보이는 바와 같이 파단된 시편을 살펴보았다. 수분흡수가 없을 때의 상온 및 고온인장시험의 결과를 보면 파단면이 길이방향에 수직이 아닌 사선으로 진행된 것을 볼 수 있었다. 이것은 일반적인 인장시험에서는 잘 관찰되지 않는 것으로 Short fiber 가 사용된 복합재료에서 관찰이 가능하며 fiber



**Fig. 5** Result of tensile strength with/without heat and water absorption

를 피해 resin 이 파단되는 Crack avoidance mode 특성을 보이며 파단면이 사선으로 전파될 수 있다.<sup>(11)</sup>

이러한 경향은 수분흡수가 있는 상온인장시험의 경우에서도 관찰되었다. 다만, 300 시간 및 500 시간 수분흡수의 경우 일부 시편에서 일반적인 형태인 시편에 수직인 파단면이 관찰되었다. 이러한 현상은 수분흡수에 따라 fiber 와 matrix 사이의 경계면에서의 마이크로채널 크기가 증가되어 결합력을 약화시키는 현상이 원인으로 판단된다.<sup>(12)</sup> 그리고 수분흡수가 있는 시편의 고온인장시험의 경우는 모든 경우에 시편에 수직인 파단면이 관찰되었다. 가장 주된 원인으로서는 수분 및 고온에 의해서 matrix 의 기계적 물성이 하락하였고 이와 함께 matrix 와 short fiber 의 결합력이 낮아져서 fiber 의 파단이 아닌 matrix 와 fiber 의 분리가 발생되었을 것으로 판단되었다. 또한, matrix 와 fiber 의 결합력이 강하더라도 fiber 주변의 matrix 는 결합되어 있는 상태에서 matrix 간의 결합이 약해져서 fiber 주변 matrix 이 파단될 수도 있을 것이다.

이와 같은 원인을 관찰하기 위해서 500 시간의 수분함유 시편의 상온 및 고온 인장시험 시편의 파단면을 Fig. 7 에서와 같이 전자현미경으로 관찰하였다. 파단면을 보면 유리섬유가 그대로 뿔혀진 단면을 확인할 수 있었다. 그림에서 부착되어 있는 유리섬유와 유리섬유가 뿔혀진 자리를 확인할 수 있었다. 또한 수분만 있는 상태보다 고온까지 있는 환경에서 matrix 의 파단면이 더 불규칙한 것이 관찰되었고 유리섬유 주변의 matrix 가 일부 부착되어 있는 경우를 함께 관찰할 수 있었다. 이는 matrix

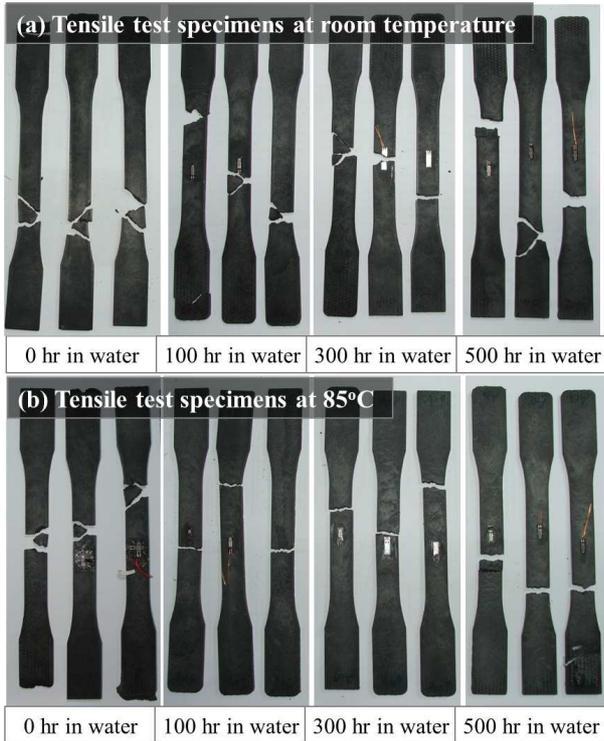


Fig. 6 Specimens after tensile test (a) at room temperature, and (b) at 85°C

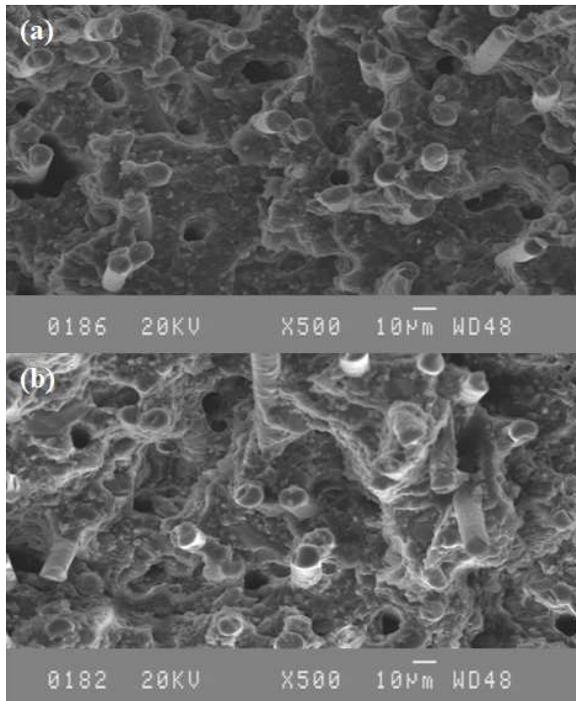


Fig. 7 Cross-section views of fractured specimens : (a) 1.6% water absorption at room temperature, and (b) 1.6% water absorption at 85°C

가 열에 의해서 약해져서 발생한 것으로 보여진다. 따라서 사출성형으로 제작된 GFRP 의 경우 많은

수분흡수 및 고온에 의해서 matrix 의 기계적 물성 하락으로 유리섬유가 보강재의 역할을 제대로 수행할 수 없었음을 단면사진을 통해 확인할 수 있었고, 이는 최대인장강도 하락의 메커니즘으로 추정할 수 있다.

### 3. 결론

지금까지 엔진룸의 사용조건을 고려하여 열과 수분에 의한 플라스틱 폴리용 재료의 기계적 성질 변화를 인장 시험을 통해 알아보았다. 본 실험을 통하여 알 수 있었던 결론은 다음과 같다.

- (1) 섬유강화플라스틱을 고온, 다습한 환경에 노출하였을 경우 최대인장강도의 급격한 감소를 인장 실험을 통하여 확인할 수 있었다.
  - (2) Long fiber 형태가 아닌 Short fiber 형태의 보강재료는 온도와 수분에 의해서 fiber 가 보강재의 역할을 제대로 수행하지 못함을 확인할 수 있었다.
  - (3) 특히, 온도 또는 수분의 개별적인 영향보다 동시에 주어졌을 때 기계적 물성하락이 아주 큰 것을 확인할 수 있었다.
  - (4) 고온과 수분의 영향으로 short fiber 와 matrix 사이의 결합력이 급격히 낮아져서 기계적 물성하락을 야기시킴을 추정할 수 있었다.
- 이러한 수분흡수율과 최대인장강도 실험결과를 바탕으로 적용 환경에서의 수분흡수에 대해 적절한 최대인장강도를 추정할 수 있는 자료를 제시하였고, 이를 통하여 사출성형을 이용한 Short fiber GFRP 를 이용한 설계과정에서 CAE 를 통한 해석시 환경을 고려한 적절한 최대인장강도 값을 제시하여 적합한 재료선정에 중요한 데이터로 활용될 수 있을 것이다. 또한, 온도와 수분의 영향으로 낮아지는 결합력을 보다 정량적으로 확인하기 위해서는 온도 및 수분흡수율에 따른 short fiber 의 결합력을 별도로 측정하는 연구가 필요하다고 판단된다.

### 후 기

이 논문은 2011 년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음

### 참고문헌

- (1) Cole, G. S. and Sherman, A. M., 1995, "Light Weight Materials for Automotive Applications," *Materials Characterization*, Vol.35, No. 1, pp. 3~9.

- (2) Mustafa, K. K., 2008, "Magnesium and its alloys Applications in Automotive Industry," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 39, No. 9-10, pp., 851~865.
- (3) Shanmughasundaram, P. and Subramanian, R., 2011, "Aluminium - Fly Ash Composites as Light Weight," *Materials for Automotive Industry*, Paper Number: 2011-28-0009.
- (4) Friedrich, K. and Almajid, A. A., 2012, "Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications," *Applied Composite Materials*, (in print) DOI: 10.1007/s10443-012-9258-7.
- (5) Goede, M., Stehlin, M., Rafflenbeul, L., Kopp, G. and Beeh, E., 2009, "Super Light Car—lightweight Construction Thanks to a Multi-Material Design and Function Integration," *European Transport Research Review*, Vol. 1, No. 1, pp. 5~10.
- (6) Jeon, K. W., Shin, K. B. and Kim, J. S., 2011, "An Evaluation of Fatigue Life and Strength of Lightweight Bogie Frame Made of Laminate Composites," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 8, pp. 913~920.
- (7) Ko, H. Y., Shin, K. B. and Kim, J. S., 2010, "A Study on Improving the Fatigue Life for a Woven Glass Fabric/Epoxy Laminate Composite Applied to Railway Vehicles," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 2, pp. 203~209.
- (8) Oka, H., Tabuchi, Y. and Yazawa, H., 2002, "Development of Plastic Pulley for Automotive Air Conditioner Compressor," *SAE Technical Paper 2002-01-0603*.
- (9) Tho, Y. C., Lim, T. W., Kim, N. H., Chung, W. and Kim, G. P., 1998, "Developing the Thermoplastic Water Pump and Power Steering Pulley for a Passenger Car," *SAE Technical Paper 980736*.
- (10) Maggana, C. and Pissis, P., 1999, "Water sorption and diffusion studies in an epoxy resin system," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. 37, No. 11, pp. 1165~1182.
- (11) Huang, H. and Talreja, R., 2006, "Numerical Simulation of Matrix Micro-cracking in Short Fiber Reinforced Polymer Composites: Initiation and Propagation," *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 1, pp. 2743~2757.
- (12) Tsenoglou, C. J., Pavlidou, S. and Papaspyrides, C. D., "Evaluation of Interfacial Relaxation due to Water Absorption in Fiber-Polymer Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 1, pp. 2855~2864.