

자동차 경량화를 위한 단섬유강화 복합재료에서의 섬유생존율이 기계적 물성에 미치는 영향에 관한 연구

Effects of fiber survival rate on Mechanical properties in Light weight short fiber reinforced composites for Automobile Application

최영근*, 이상협**, 이인섭***

Young-Geun Choi*, Sang-Hyoup Lee**, In-Seob Lee***

<Abstract>

In this study, the survival rate of fiber is investigated by nozzle size difference in injection/mold sides. The survival rate of fiber is influenced about the nozzle size differ. Also, The mechanical properties of short carbon glass fiber reinforced polypropylene are experimentally measured as functions of fiber volume fraction and nozzle size difference. These mechanical properties are compared with the survival rate of fiber and fiber volume fraction using image analysis after pyrolytic decomposition. The survival rate of fiber as well as fiber volume fraction is influenced by injection processing condition, the used materials, mold conditions and nozzle sides difference, etc. In particular, the survival rate of fiber is great influenced when injection/mold nozzle sides are different more than that of the same. Consequently, the mechanical properties of short carbon/glass fiber reinforced polypropylene are improved as the nozzle sides are the same in injection mold sides.

Key Words : *Automobile, Light weight, Fiber Volume Fraction, Survival rate, Short fiber*

1. 서론

사출성형은 아주 간단한 제품부터 굉장히 복잡한 형태의 제품에 이르기까지 빠른 시간 내에 제품을 대량으로 생산할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다.⁽¹⁾ 우리 주위의 생활용품에서부터 전기전자 제품, 항공기, 자동차 경량화를 위

한 부품에 이르기까지 폭 넓은 범위에서 이용되고있다. 최근의 유가상승에 따라 에너지의 절약이 요구되고 있는 시점에서, 사용되고 있는 기계부품 및 구조물의 경량화는 필수요건이 되고 있다. 특히 안전성과 경제성을 고려한 자동차 부품의 경량화에 많은 연구가 수행중이다.⁽²⁻³⁾ 섬유강화 복합재료는 자동차 부품의 경

* 정회원 : 구미1대학 차량기계과
** 정회원 : 구미1대학 차량기계과
*** 정회원 : 영남대학교 대학원 기계공학과

* Department of Automotive Mechanics of Kumi College
** Department of Automotive Mechanics of Kumi College
*** Yeungnam University Graduate School

량화에 굉장히 중요한 재료중의 하나이며 중량 대비 비강도, 비강성 등의 우수성을 가진다. 그 중에서도 단섬유강화 복합재료의 발전이 현저하다. 단섬유강화 복합재료의 제작에 사출성형의 이용은 신소재 개발에 큰 발전을 가져왔다. 단섬유강화 복합재료의 제조과정에서 사출성형의 이용은 단섬유가 기지 재료와의 혼합이 쉽고, 기하학적으로 복잡한 형상을 가진 구조물 생산이 용이하므로 많은 연구가 수행되어 왔다.⁽⁴⁻¹⁵⁾ 그러나 실제로 사출성형에서 나타날 수 있는 사출측/금형측 노즐의 크기가 섬유손상에 미치는 영향과, 이러한 섬유손상이 단섬유강화복합재료의 기계적 물성에 어떠한 영향을 주는지에 대한 연구는 미흡하였다.

본 연구에서는 자동차 부품의 경량화를 위한 단섬유강화 복합재료에서 강화된 단섬유의 손상에 사출측/금형측 노즐의 크기가 미치는 영향과, 이러한 섬유손상이 기계적 물성에 어떠한 영향을 주는지에 대해 비교 검토하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 재료는 기지재로 (주)선경의 폴리프로필렌(polypropylene)을, 강화재는 단섬유 형태인 3mm로 일정하게 잘려진 (주)한국 화이버의 탄소섬유(carbon fiber)와 유리섬유(glass fiber)를 이용하였다. 시편제작을 위해서 먼저 폴리프로필렌의 성형수축율(1.2-2.0%)을 고려하여 금형을 제작하였고, 시편의 형태는 ASTM D638(17)에 따라 Fig. 1과 같다.

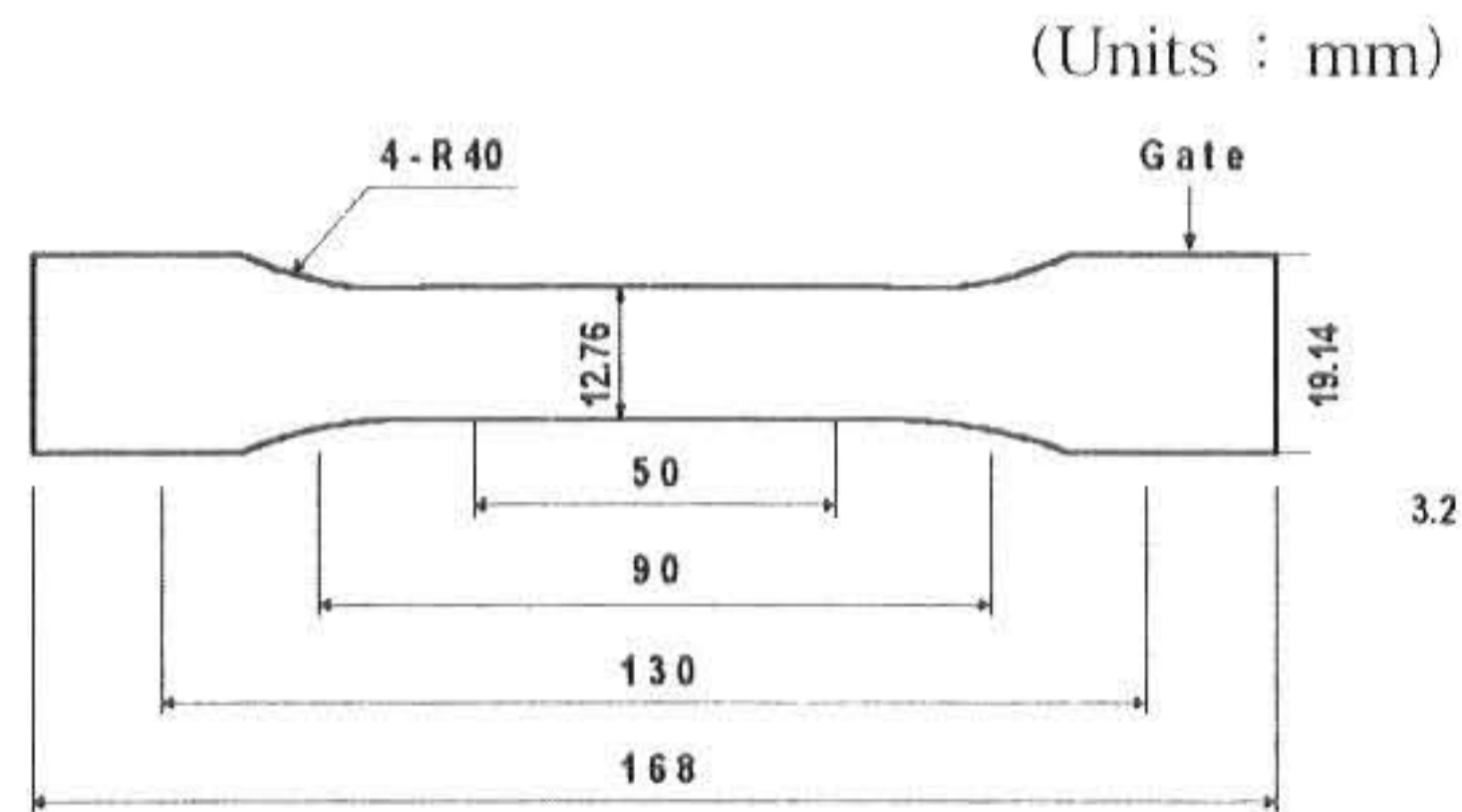


Fig. 1 Geometry of tensile test specimen.

초기 섬유의 길이는 3mm로 일정하며, 기지재와 강화섬유(reinforced fiber)의 배합에 정밀

도 0.001g의 저울을 이용하였다. 먼저 기지재인 폴리프로필렌과 강화재인 탄소/유리 섬유를 같은 형태의 용기2개를 이용하여 각각의 무게비로서 측정하여 담고, 이 두 재료를 또다른 용기에서 임의로 혼합한 뒤 호퍼속에 투입하였다. 일반적으로는 사출성형전 기지재와 강화재의 배합작업이 먼저 이루어지게 되지만, 배합작업수행시 섬유손상에 대한 영향이 크므로, 본 연구에서는 최대한 초기 섬유길이를 일정하게 유지하기 위해서 성형전 별도의 배합은 하지 않았다. 노즐크기 변화에 대한, 실제 섬유 손상정도를 파악하기 위해서, 섬유가 손상을 입지 않는 온도범위인 약400°C에서 90분동안 연소실험을 하였다. 연소후 잔존하는 섬유의 무게를 측정하여 섬유체적비를 구하고, 50배율 컬러 영상현미경을 이용하여 섬유 약300개 이상의 표본을 채취하였다. 채취된 섬유는 Image Pro 3.0에서 손상된 섬유의 길이를 측정하였고, 섬유의 길이를 전체 평균값으로 나타내었다. 인장실험에 사용된 실험장치는 Shimadzu AG 5000을 사용하였으며, 5톤의 Load cell을 이용하였다. 실험에서의 에러율은 0.005%이고, 실험은 실온상태(23 ± 2°C)에서 이루어졌으며, 시험속도는 5mm/min로 ASTM D638에 따랐다. Table 1은 본 연구에서 적용된 사출성형 조건을 나타내었다.

Table 1. Conditions for injection molding.

온도 조건	가 열 실 린 터 부					금 형 부		온도 조건
	N II	II 1	II 2	II 3	II 4	사출측	형체측	
220 ⁰ C	220 ⁰ C	210 ⁰ C	200 ⁰ C	***	20 ⁰ C	20 ⁰ C	***	
사출성형 시간	사 출	냉 각	휴 지		ONE CYCLE			
	10 sec	5 sec	3 sec		18 sec			
압 조건	1차	2차	3차	4차				
	사출압력	사출압력	사출압력	사출압력	***			
속 도	1차	2차	3차	계 량 속 도				
	사출속도	사출속도	사출속도	24 m/s				
노즐	injection side/mold side (9/6,9/9)mm							

3. 실험결과 및 검토

섬유생존율에 사출측/금형측 노즐 크기 변화에 대한 영향과 초기 섬유함유율의 실제 섬유체적비에 대한 결과를 Table 2에 나타내었다.

사출측/금형측 노즐크기 변화에 대해서 초기 성형전 섬유함유율이 성형후 섬유함유율과 일정하지 않았고, 이것은 비중이 서로 다른 재료의 특성과 사출성형조건 및 금형조건이 원인이 될 수 있다. 초기 섬유길이가 카본섬유와 유리섬유 각각3mm로 일정한데 대해, 노즐의 크기를

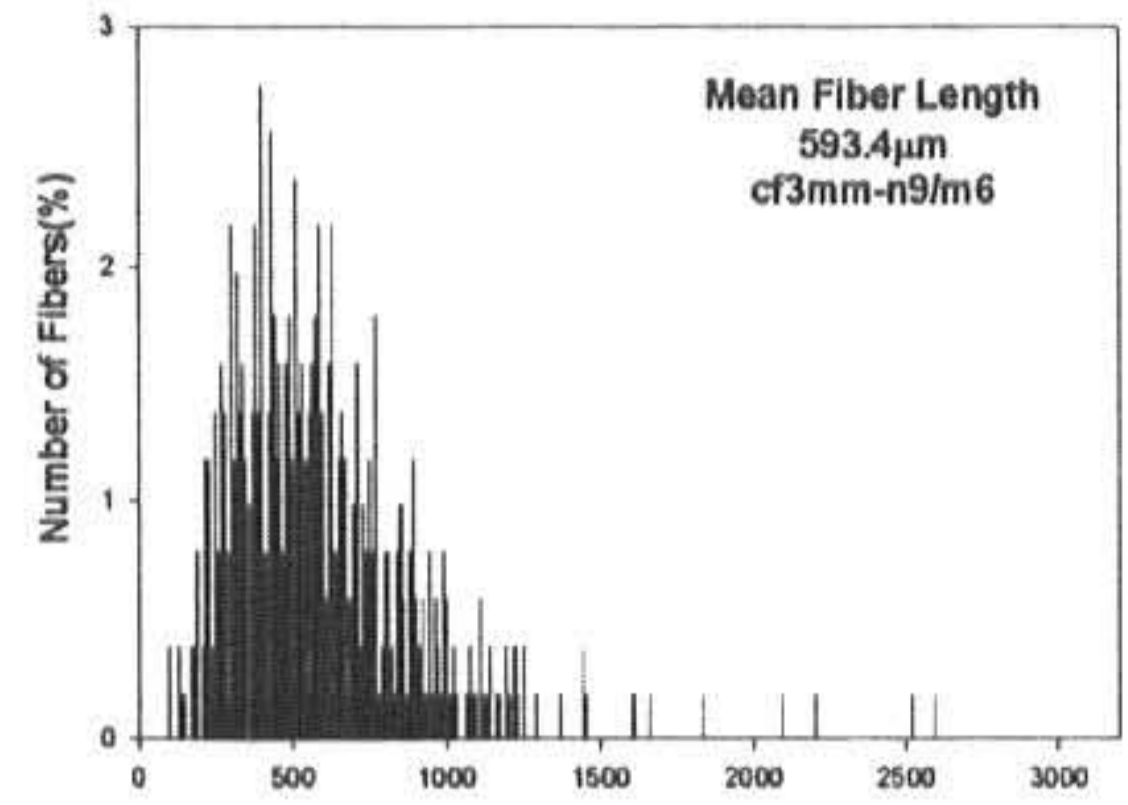
Table 2. The survival rate and fiber volume fraction of after injection molding.

구분 종류	노즐 경 (사출/ 금형)	중형비(L/D)			FRP (g)	연소후 무게 (g)		섬유 무게 비 (%) W_f	섬유 체적 비 (%) V_f
		성 형 전	성 형 후	SR 생 존 율		Matrix	Fiber		
CF	9/6	441	87.3	19.8 %	23	18.1	4.9	21.3	11.9
					21.3	19.7	1.6	7.5	3.9
					21.5	20.9	0.6	2.8	1.42
	9/9	115	26.1 %	22.7	18.1	4.6	20.3	11.3	
				21.8	19.5	2.3	10.5	5.54	
				21.6	20.8	0.8	3.7	1.88	
GF	9/6	219	68.7	31.4 %	24.5	19.4	5.1	20.8	8.5
					22.9	20.2	2.7	11.8	4.52
					21.8	20.7	1.1	5.04	1.84
	9/9	68.1	31.1 %	24.1	19.6	4.5	18.7	7.52	
				22.5	20.4	2.1	9.3	3.5	
				21.8	20.6	1.2	5.5	2.02	

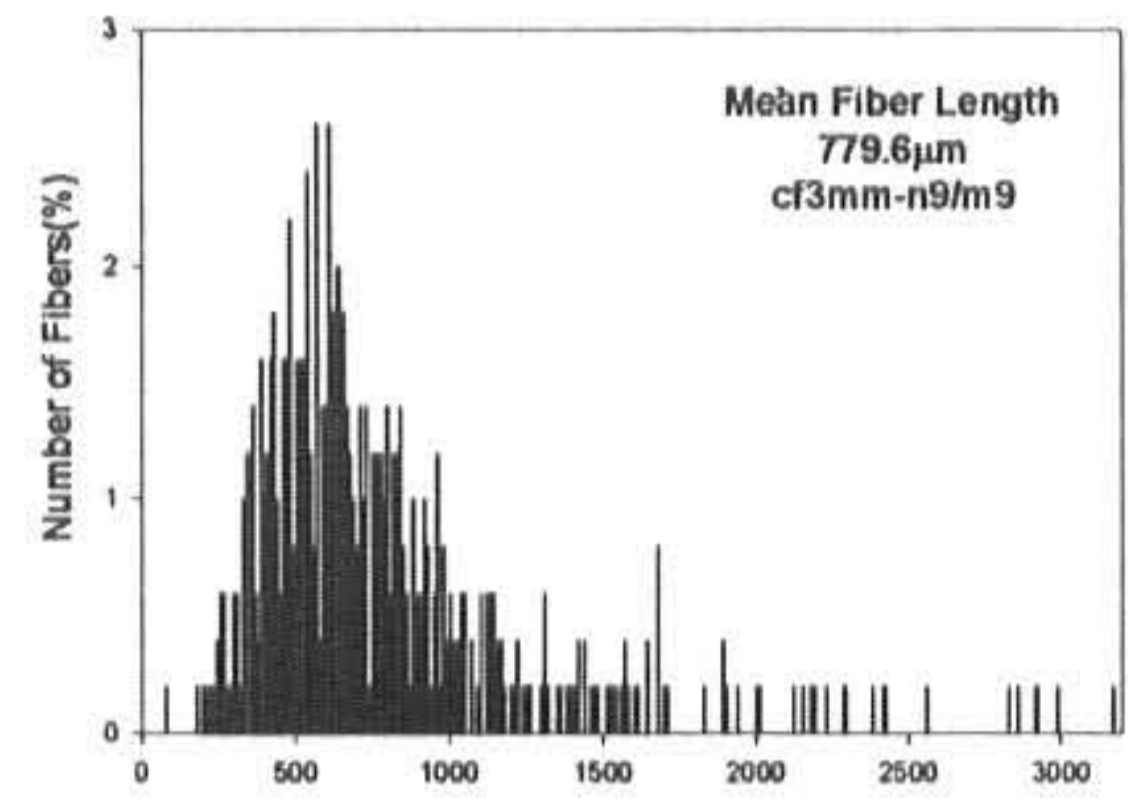
9/6, 9/9(사출측/금형측,mm)로 변화시키면서 사출성형 했을 때 각각의 손상된 섬유길이의 분포상태를 Fig.3과 Fig.4에 나타내었다.

Fig.2는 초기섬유길이가 3mm인 카본섬유의 경우로 노즐의 직경이 9/6, 9/9일 때 섬유평균 길이가 0.5934mm, 0.7796mm로서 섬유생존율이 각각 19.8%과 26.1%를 나타내었다.

Fig.3은 초기섬유길이가 3mm인 유리섬유의 경우로 동일한 노즐 크기의 변화에 대해서 섬유평균길이가 0.9413mm, 0.9324mm로서 섬유생존율이 31.4%와 31.1%를 각각 나타내었다.

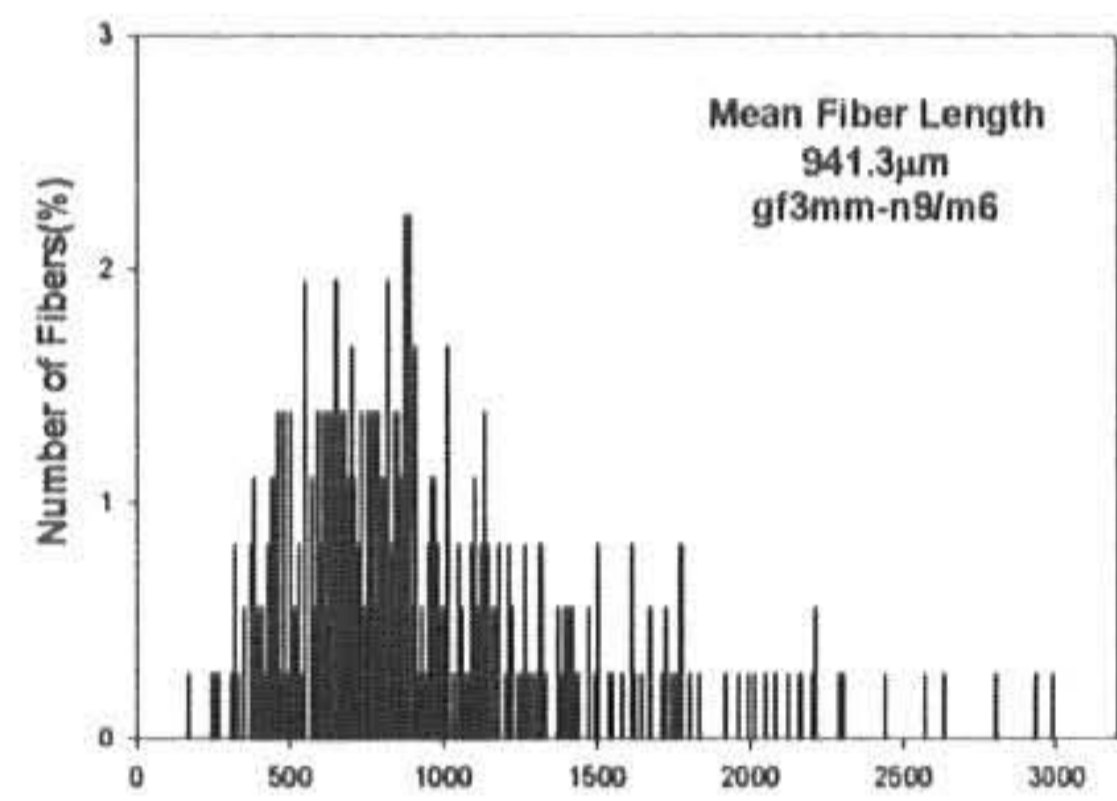


(a) Nozzle size ; 9/6(mm)

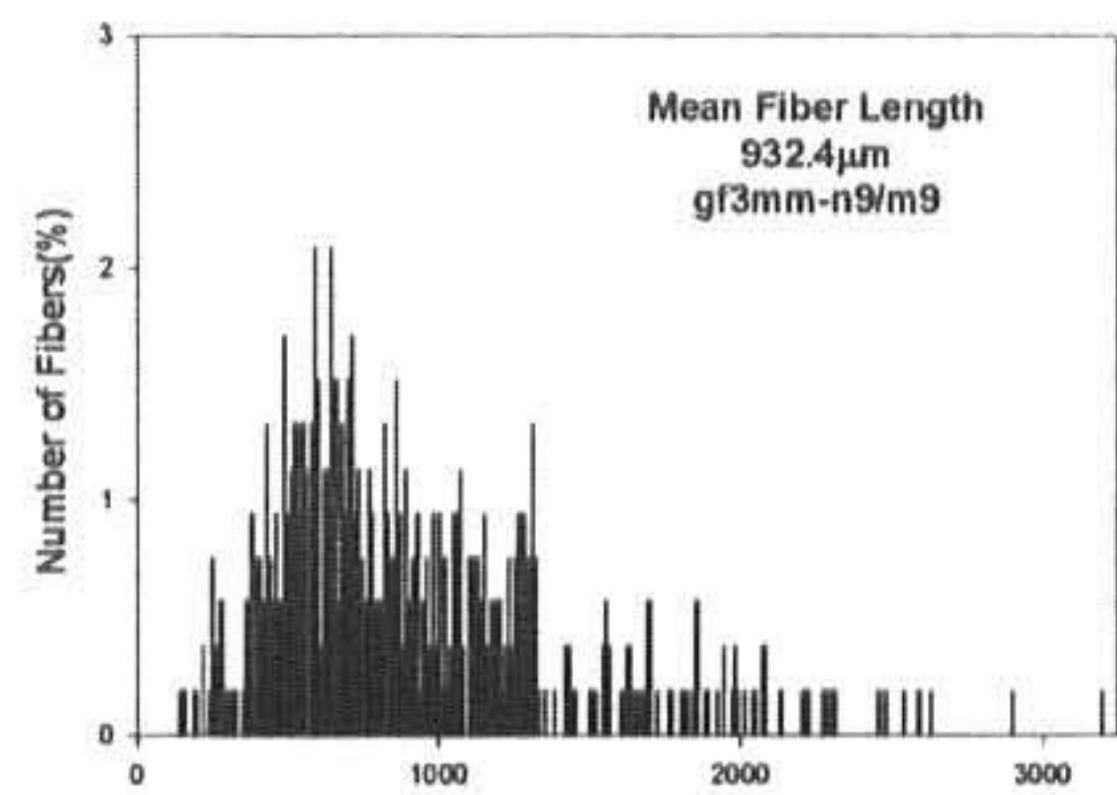


(b) Nozzle size ; 9/9(mm)

Fig. 2 Fiber length distribution in PP/CF composites specimens with each nozzle.



(a) Nozzle size ; 9/6(mm)



(b) Nozzle size ; 9/9(mm)

Fig. 3 Fiber length distribution in PP/GF composites specimens with each nozzle.

노즐크기 변화에 대해서 카본섬유와 유리섬유 모두 섬유손상에 영향을 받고 있었다. 특히 카본섬유가 그 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있었다. 카본섬유가 유리섬유에 비해서 섬유생존율에 노즐크기 차에 의한 영향을 많이 받은 것은 카본의 고강성과 취성적인 성질 및 지름이 작았기 때문이다. 주목할만한 것은 유리섬유는 초기 섬유길이에 비해서 노즐크기가 클 때에는 사출층이나 금형층의 노즐크기 변화차에 상관없이 섬유생존율이 거의 유사한 경향을 보였다. 예전의 실험에서 사출층/금형층 노즐의 크기가 초기 섬유길이 보다 작거나 같았을 때, 섬유생존율이 더욱 낮아졌었다. 분명한 것은 사출성형시 강화섬유가 노즐을 통과할 때, 사출압력과 사출속도에 따른 전단저항력이 노즐의 크기에 큰 영향이 있음을 알 수 있었다. 따라서 자동차 경량화를 위한 단섬유 강화복합재료를 사출성형으로 제작할 때에는, 성형품의 품질에 영향을 주지 않는한 사출층과 금형층 노즐크기를 초기 단섬유 길이보다 크거나 같게두고, 주어진 조건에 맞게 조정할 필요성이 있다.

단섬유강화 복합재료의 인장강도를 구하는 데는 혼합법칙이 적용된 몇 가지 이론적인 식들이 있다. Kelly와 Tyson^(4,7)은 섬유함유율에 따른 복합재료의 인장강도 (σ_c)를 식 (2)와 같이 섬유길이효과, 섬유체적비, 섬유의 배향 등을 고려하여 구하였다.

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \lambda_1 \lambda_2 \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \\ &= \lambda_1 \lambda_2 \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= L - [L_c/2L] \quad (L > L_c \text{ 일 경우}) \\ &= \frac{L}{2L_c} \quad (L < L_c \text{ 일 경우}) \end{aligned} \quad (3)$$

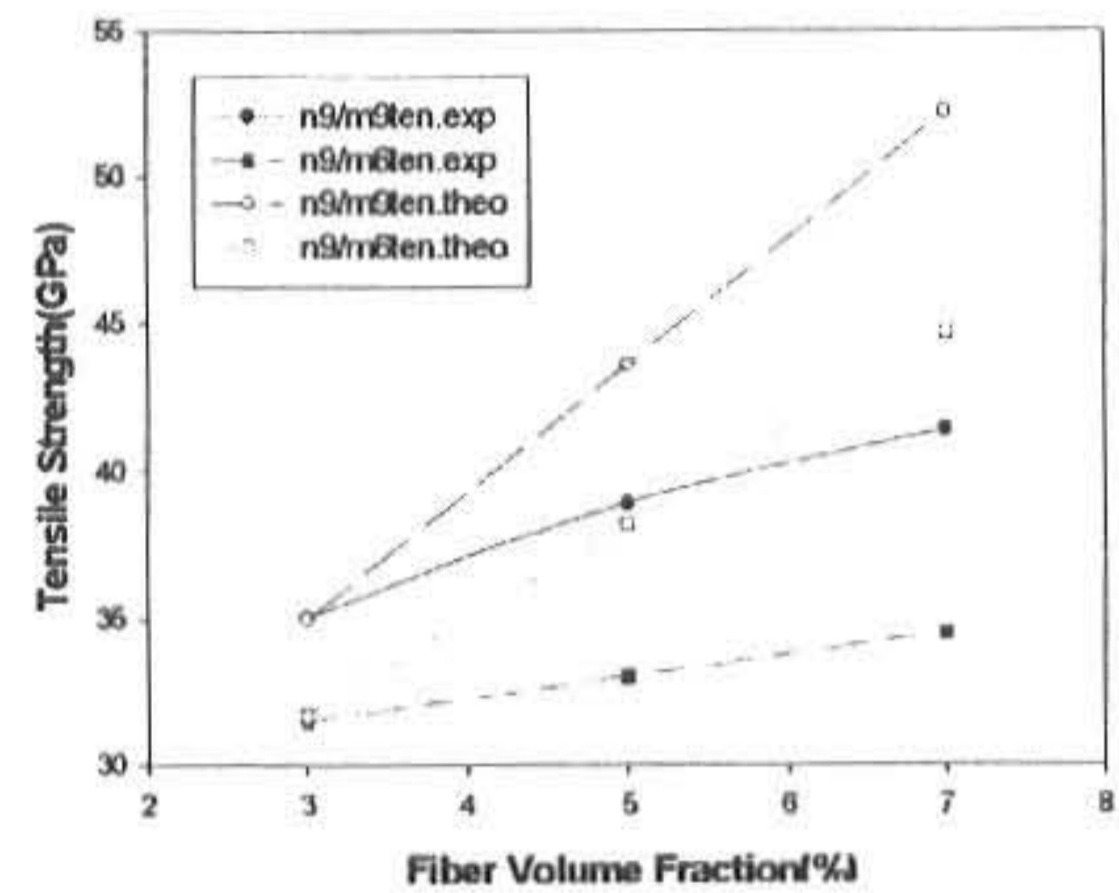
$$L_c = \sigma_f d / 2 \tau \quad (4)$$

여기서, λ_1 은 섬유배향계수(3/8), λ_2 는 섬유길이효과이고, σ_f , σ_m 및 V_f , V_m 은 섬유(fiber)와 기지재(matrix)의 인장강도와 섬유체적비를 각각 나타낸다. L은 평균섬유길이(mean fiber

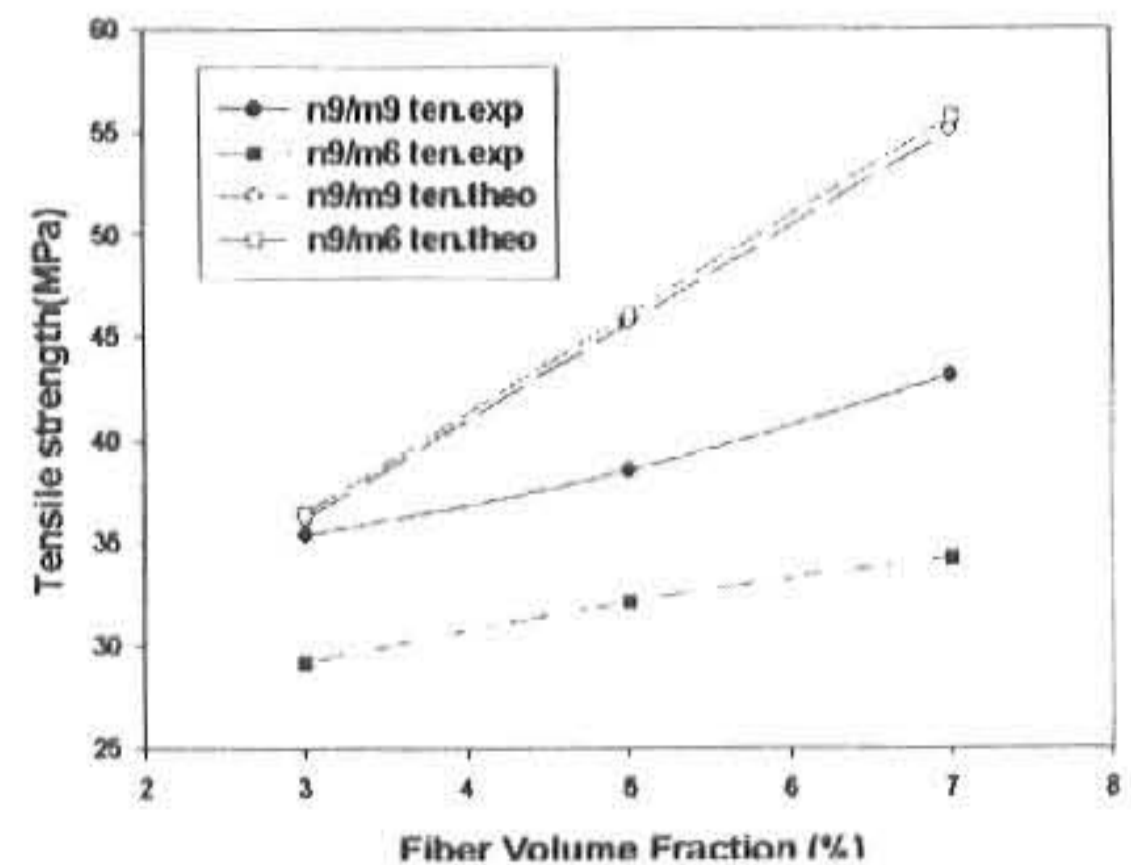
length), L_c 는 임계섬유길이(critical fiber length), τ 는 계면 전단강도, d 는 섬유의 직경이다.

임계섬유길이 (L_c)는 식 (5)와 같이 섬유의 최대 인장강도와 직경 그리고 섬유의 최대변형률에서의 기지재의 강도를 계면전단강도 τ 로 가정하여 구하였고, 카본과 유리섬유 모두 평균섬유길이가 임계섬유길이보다 작다. 임계섬유길이가 일정할 때, 평균섬유길이가 증가할수록 섬유의 길이효과 (λ_2)가 커지게 되고, 인장강도 (σ_c)는 증가하게 된다.

Fig.4는 노즐크기와 섬유체적비의 함수로서 인장강도의 값을 실험값과 이론값을 비교하여, (a)카본섬유와 (b)유리섬유 각각에 대해서 나타내었다. 카본섬유와 유리섬유의 경우 모두 섬유체적비가 증가할수록 인장강도 값이 커짐을 알 수 있었고, 양쪽 노즐의 크기 차가 발생하지 않은 경우가 높은 값을 나타내었다. 이는 노즐크기의 변화가 단섬유의 파손에 영향을 미치고 있음을 증명하는 것이다.



(a) carbon fiber



(b) glass fiber

Fig. 4 Comparison of tensile strength between experimental results and theoretical prediction as functions of fiber volume fraction and nozzle diameter.

Fig.5는 카본섬유와 유리섬유의 인장강도값을 섬유체적비와 노즐크기변화에 대해서 나타내었다. 실험적인 인장강도 값이, 섬유체적비가 7% 일 때 유리섬유가 카본섬유에 비해서 약간 높은 값을 보였다. 물론 섬유체적비가 낮았고, 섬유종횡비가 같지는 않았지만, 유리섬유의 섬유생존율이 높았기 때문이고, 카본섬유에 비해서 비중이 큰 유리섬유가 배향과 분산이 더 잘 이루어졌기 때문으로 보인다. 카본섬유의 경우에는 섬유체적비가 증가할수록 뭉쳐진 형태를 보였고, 이로 인해 내부 기공의 발생이 강도 값을 떨어뜨린 원인이 된 것 같다. 인장강도 값은 이론치가 실험치보다 높은 경향을 나타내었고, 섬유체적비가 증가할수록 이론치와 실험치의 폭이 컸다. 이는 이론치를 구할 때 섬유배향계수를 일정하게 계산했고, 섬유체적비가 낮은 경우 인접한 섬유간의 상호작용을 무시할 수가 있지만 섬유체적비가 증가할수록 무시할 수 없기 때문이다. 즉 섬유체적비가 증가하면 섬유 상호간의 간섭현상으로 섬유생존율이 낮아진다.

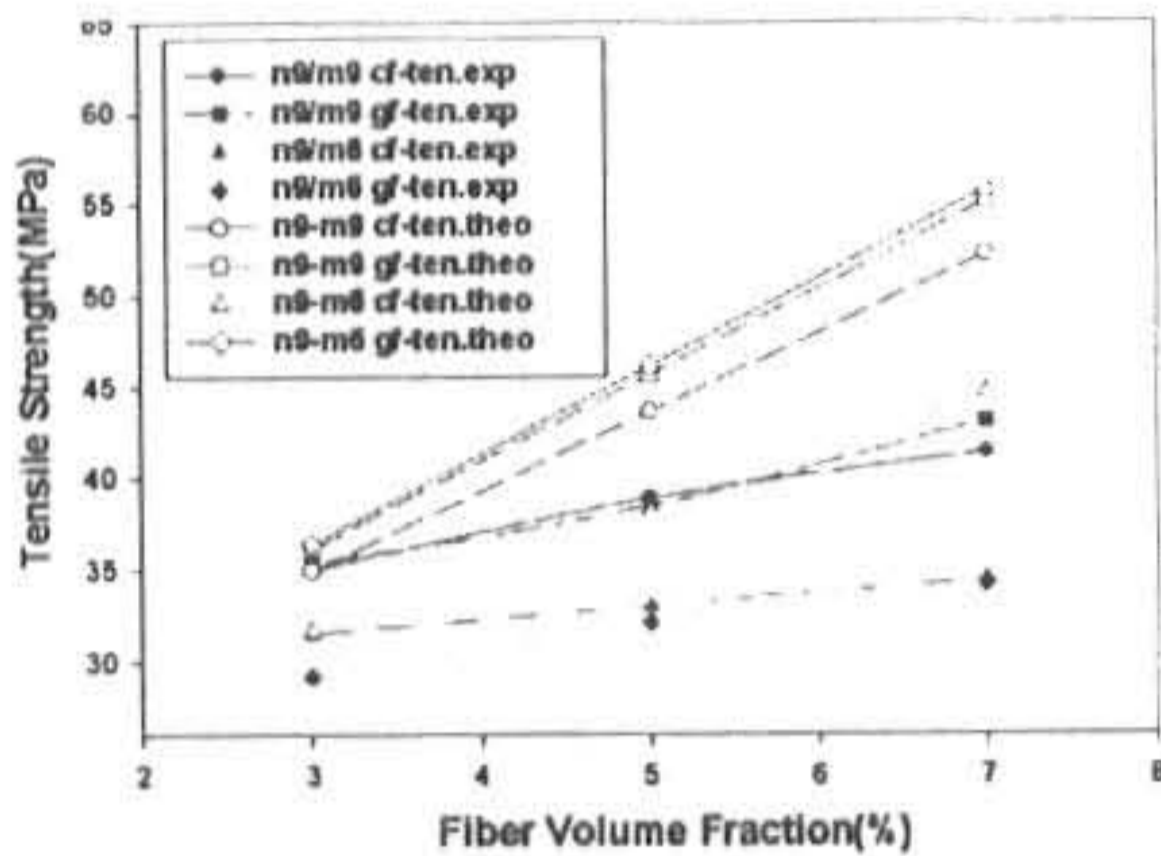


Fig.5 Comparison of tensile strength between carbon fiber and glass fiber.

Fig.6 에서는 카본섬유(a)와 유리섬유(b)의 경우로 사출측/금형측 노즐의 크기가 같을 때와 다를 때, 섬유체적비에 따른 탄성율(modulus ratio)을 나타내었다. 이론적 탄성율은, 단섬유강화 복합재료에서의 섬유의 불규칙 배열 탄성율을 예측하는데 많이 이용되고 있는 Halpin-Tsai의 식을 이용하였고 다음과 같다.

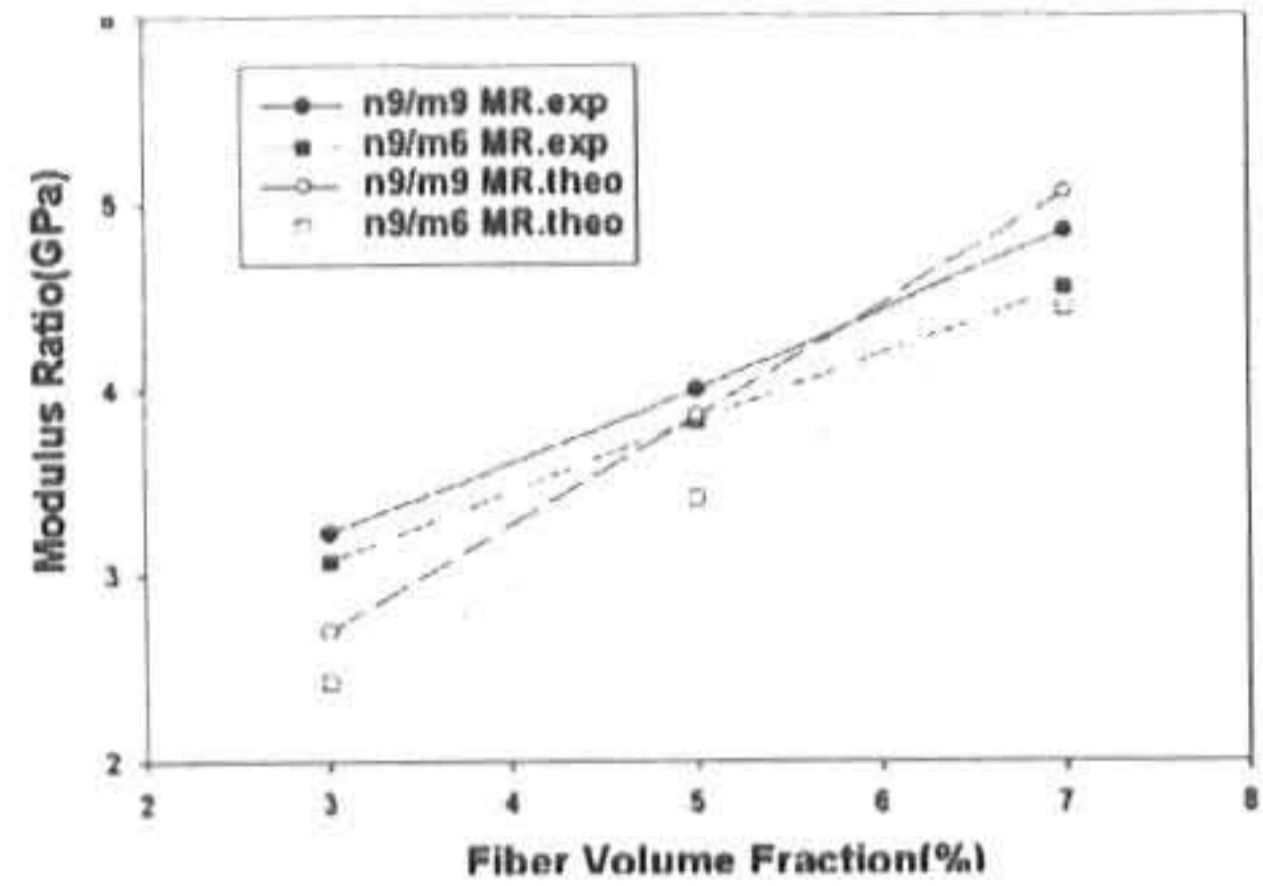
$$\frac{E_L}{E_m} = \frac{1 + 2(L/d) \eta_L V_f}{1 - \eta_L V_f} \quad (5)$$

$$\frac{E_T}{E_m} = \frac{1 + 2 \eta_T V_f}{1 - \eta_T V_f} \quad (6)$$

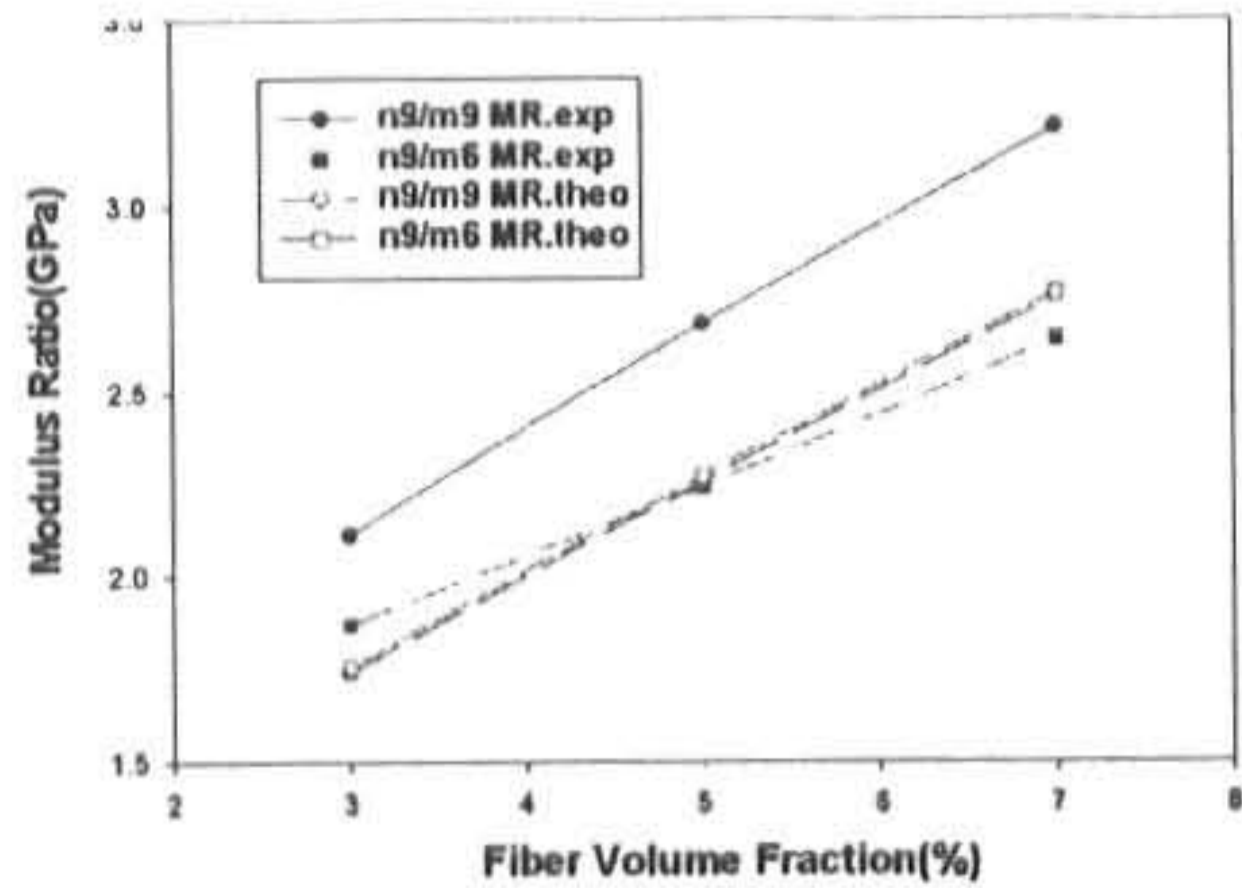
여기서, $\eta_L = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + 2(L/d)}$ (7)

$$\eta_T = \frac{(E_f/E_m) - 1}{(E_f/E_m) + 2} \quad (8)$$

여기서 E_L 과 E_T 는 섬유의 종방향과 횡방향의 탄성계수이고, E_m 은 기지재의 탄성계수이다. η_L 과 η_T 는 종방향과 횡방향의 강화효율이다. E_L 은 섬유종횡비(L/d)의 영향을 받지만 E_T 는 섬유종횡비에 거의 무관하게 된다. E_L 은 섬유종횡비나 섬유체적비가 증가할수록 커진다.



(a) carbon fiber



(b) glass fiber

Fig. 6 Comparison of tensile modulus ratio between experimental results and theoretical prediction as functions of fiber volume fraction and nozzle dia.

강화 섬유가 불규칙하게 배향된 복합재료의 탄성계수 (E_c)를 예측하는데에는 다음과 같은 실험식⁽¹⁴⁾이 이용되었다.

$$E_c = (3/8) E_L + (5/8) E_T \quad (9)$$

응력-변형을 곡선에서 초기 직선 부분에 해당하는 탄성한도 내에서는 Hook의 법칙이 성립되며, 실험적 인장탄성율은 이 구간을 이용하여 구할 수가 있었다. 탄성비는 양측 노즐의 크기가 같을 때와 섬유체적비가 증가할수록 향상되었고, 이론치와 실험치가 유사하였다. 하지만, 양노즐의 크기가 같을 때 유리섬유의 경우 실험치가 이론치보다 조금 높게 나타났다. 이는 유리섬유의 경우, 양노즐의 크기가 같거나 다를 때 섬유파손정도는 거의 유사하지만, 양노즐 크기를 같게 두는 것이 섬유배향과 관련하여 물성을 향상시키는데 바람직함을 보이는 결과로 생각된다.

4. 결론

자동차 경량화를 위한 단섬유 강화복합재료를 사출성형으로 제작할 때, 섬유생존율에 사출측/금형측 노즐의 크기 변화가 섬유생존율에 미치는 영향과, 이러한 섬유생존율이 기계적 물성에 어떠한 영향을 주는지에 대한 연구를 수행하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 성형품의 품질에 영향을 주지 않는한 사출측과 금형측 노즐크기를 초기 단섬유 길이보다 크거나 같게두고, 주어진 조건에 맞게 조정할 필요성이 있다.
2. 카본섬유가 유리섬유에 비해서, 노즐크기 변화에 섬유생존율이 뚜렷한 영향을 보였으며, 이것은 카본섬유가 강성이며 보다 취성적인 성질을 띄기 때문이다.
3. 기계적 물성은 노즐크기가 일정하며 변화가 없을 때와 섬유체적비가 증가할수록 향상되었다. 노즐크기와 섬유체적비가 가장 클때를 작을 때와 비교시, 인장강도와 탄성비가 최대 탄소섬유 20% 6.9%, 유리섬유 25.7% 21.6% 각각 증가하였다.

4. 단섬유 강화복합재료의 기계적 특성은 기지재와 강화섬유의 탄성비(E_f/E_m), 섬유의 종횡비(aspect ratio; l/d), 그리고 섬유체적비(ϕ_f) 등에 의해서 결정되며, 사출성형시 사출측/금형측 노즐 크기 변화에 따른 섬유생존율에 대한 연구는 단섬유 강화복합재료의 물성에 상당히 중요한 문제라고 생각된다.

참고문헌

- 1) William E. Foster : Injection Molding of Thermoplastics, SAE, Inc, No.800689, (1980)
- 2) 김정규 : 複合組織網 과 自動車 輕量化, 대한기계학회지, Vol.22, No.1, pp.2-8, (1982)
- 3) 김정규 : 자동차 경량화 재료의 현황과 특징, 자동차공학회지, Vol. 10, No. 4, pp.29-38, (1988)
- 4) A. Kelly and W. R. Tyson : Tensile Properties of Fiber-Reinforced Metals, Copper/Tungsten and Copper/Molybdenum, J. Mech. Phys. Solids, Vol.13, pp.329-350, (1965)
- 5) R. V. Turkovich and L. Erwin. : Fiber Fracture in Reinforced Thermoplastic Processing, Polym. Eng. Sci, Vol.23, No.13, pp.743-749, (1983)
- 6) D. E. Spahr, K. Friedrich, J. M. Schultz and R. S. Bailey : Microstructure and Fracture Behaviour of Short and Long Fibre-Reinforced Polypropylene Composites, J. Mater. Sci, 25, pp.4427-4439, (1990)
- 7) Z. U. Nabi and S. Hashemi. : Influence of Short Glass Fibres and Weldlines on the Mechanical Properties of Injection-Moulded Acrylonitrile-Styrene acrylate copolymer, J. Mater. Sci, 33, pp.2985-3000, (1998)
- 8) C. M. Landis, M. A. Mcglockton and R. M. Mcmeeking : An Improved Shear Lag Model for Broken Fibers in Composite Materials, J. Composite Material, Vol.33, No.7, pp.667-680, (1999)
- 9) S. Y. Fu, B. Lauke, E. Mader, X. Hu and C. Y. Yue : Fracture Resistance of Short-Glass Fiber-Reinforced and Short-Carbon Fiber-Reinforced Polypropylene under Charpy Impact Load and its Dependence on Processing,

- J. Materials. Processing Technology, 89-90,
pp.501-507, (1999)
- 10) J. P. F. Inberg, P. H. Hunse and R. J. Gaymans. : Long Fiber Reinforcement of Polypropylene / Polystyrene Blends Polym. Eng. Sci, Vol.39, No.2, pp.340-346, (1999)
 - 11) Dong-Joo Lee. : On Studies of Tensile Properties in Injection Molded Short Carbon Fiber Reinforced PEEK Composite, KSME Journal, Vol.10, No.3, pp.362-371, (1996)
 - 12) Gibson, R. F. : Principles of Composite Material Mechanics, McGraw-Hill, pp. 156-189, (1994)
 - 13) C. Y. Hui and D. Shia : Simple Formulae for the Effective Moduli of Unidirectional Aligned Composites, Polym. Eng. Sci, Vol.38, No.5, pp.774-782, (1998)
 - 14) F. Truckenmuller and H. G. Fritz. : Injection Molding of Long Fiber-Reinforced Thermoplastics : A Comparison of Extruded and Pultruded Materials with Direct Addition of Roving Strands, Polym. Eng. Sci, Vol.31, No.18, pp.1316-1329, (1991)
 - 15) 박성순, 윤성운, 조선행, 김이곤 : 사출성형된 섬유강화 플라스틱 복합재의 섬유함유율 분포에 관한 연구”, 한국복합재료학회지, 제10권, 제1호, pp.83-89, (1997)
 - 16) Annual Handbook of ASTM Standard : Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM D638M-93, pp.59-67, (1995)

(2001년 5월 4일 접수, 2001년 8월 22일 채택)