

슬래그 입자의 크기 및 체적비에 따른 슬래그 입자강화 복합재료의 기계적 특성 연구

남지훈* · 전흥재**† · 홍익표**

Effect of Slag Particle Size and Volume Fraction on Mechanical Properties of Slag Reinforced Composite

Ji-Hoon Nam*, Heoung-Jae Chun**†, Ik-Pyo Hong**

ABSTRACT: This study demonstrated that a slag, an industrial solid waste, can be used as a structural reinforcement. The mechanical properties(tensile strength and Elastic modulus) of slag reinforced composite(SRC) was investigated as functions of slag particle size (8~12 μm and 12~16 μm) and volume fraction (0-40 vol.%). In order to investigate the interface and a degree of particle dispersion which have an effect on mechanical properties, optical microscopic images were taken. The results of tensile tests showed that the tensile strength decreased with an increase in slag volume fraction and particle size. The elastic modulus increased with an increase in slag volume fraction and particle size except for 30 vol.% SRC. The tensile strength decreased with an increase in slag particle size. The microscopic picture showed SRC has fine degree of particle dispersion at low slag volume fraction. SRC has a good interface at every volume fraction. However particle cluster was incorporated with an increase in slag volume fraction.

초 록: 본 연구에서는 제강 과정의 부산물로 발생하는 슬래그의 구조용 충전제로써의 사용 가능성을 검토하였다. 고분자 기지 슬래그 복합재료를 제작하여 슬래그 입자의 크기(8~12 μm and 12~16 μm), 체적 비(0-30 vol.%)에 따른 슬래그 복합재료의 기계적 특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 복합재료 물성에 영향을 주는 요인인 입자 분산도와 계면상태를 고찰하기 위해 각각 시편에 대하여 조직사진을 촬영하였다. 인장 시험 결과 슬래그 복합재료의 재료강성은 슬래그 체적비가 증가할수록 증가하였고 인장 강도는 체적비가 증가할수록 감소하였다. 슬래그 복합재료의 재료강성은 슬래그 입자의 크기의 변화에 따른 뚜렷한 경향성을 띄지 않았고 인장강도는 입자의 크기가 작을수록 높은 값을 가졌다. 조직 사진 촬영 결과 슬래그 복합재료가 양호한 계면상태를 보였고, 낮은 체적 비에서는 좋은 분산도를 나타냈지만 체적비가 높아지면 입자들의 뭉침 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다.

Key Words: 슬래그 입자강화 복합재료(slag reinforced composite, SRC), 재료강성(Young's modulus), 인장강도(tensile strength), 입자 뭉침 현상(particle dispersion)

1. 서 론

철강 산업은 그 제조공정의 특성상 다량의 원료와 에너지를 사용할 뿐 만 아니라 다양한 종류의 부산물과 폐기물

을 필연적으로 발생시킨다. 그 중에서 가장 많은 양을 차지하는 부산물이 철강슬래그이다. 철강슬래그는 철광석, 코크스, 석회석 등을 원료로 하여 고로에서 선철을 만들어내는 제선 공정에서 발생하는 고로슬래그, 전로에서 선철을

접수: 2013년 5월 11일, 수정: 2013년 8월 12일, 게재승인: 2013년 8월 14일

*연세대학교 기계공학과 기계공학 전공 대학원

**†연세대학교 기계공학과 교수, Corresponding author (E-mail: hjchun@yonsei.ac.kr)

**공주대학교 전자공학과 교수

강으로 제조하는 제강 공정 중에 발생하는 전로슬래그, 고철을 주원료로 사용하여 강을 제조하는 전기로에서 발생하는 전기로 슬래그로 나눌 수 있다. 철강슬래그는 CaO와 SiO₂가 주 성분이며 고로슬래그의 경우는 알루미늄과 마그네시아를, 전로슬래그는 산화철, 마그네시아, 산화망간 등을 함유하고 있다. 또한 제철의 원료인 철광석 중에는 Cu, Cr 등의 중금속 성분은 거의 함유되어 있지 않기 때문에 환경상 문제가 되는 중금속 등의 유해물질이 슬래그에 함유되어 있지 않다. 이와 같이 철강슬래그는 재활용이 가능한 유효 자원을 다량 함유하고 있고 환경상의 문제 또한 일으키지 않는 귀중한 재활용 자원이라는 면에서 철강산업뿐만 아니라 국가적인 차원에서도 관심이 증대되고 있다. 근래에 에너지 절약과 환경 문제가 대단히 큰 관심사로 대두되면서 각종 폐기물을 다른 산업의 원료로 재활용 하는 연구가 다양한 분야에서 진행되고 있는 실정에서 철강 슬래그의 재활용에 관한 연구의 확장이 요구되고 있다[1,2]. 그러나 슬래그를 첨가한 복합재료의 기계적인 성능을 평가한 연구 결과가 미비한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 철강슬래그를 고분자 기지에 분산하여 경화시킨 슬래그 입자강화 복합재료를 제작하여 슬래그의 구조용 충전재로서의 성능을 검토하였다. 슬래그의 입경과 체적 비를 달리한 시편을 제작하고 인장 시험을 수행하여 슬래그 입자의 크기와 체적비가 복합재료의 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 입자강화 복합재료는 제작 시 입자의 분산이 재료 물성에 중대한 영향을 주기 때문에 광학 현미경을 통해 조직 사진을 촬영하여 입자의 분산 도와 계면상태를 확인하여 결과 분석에 활용하였다.

2. 실험

2.1 실험 재료

시편에 사용된 기지재료는 에폭시 YD-127(국도화학), 경화제 HN-2200(국도화학)과 촉진제 BDMA(국도화학)를 사용하였다. 재료의 배합 비는 100:80:2(기지재료:경화제:촉진제)의 질량비로 하였다. 충전제는 입경 8~12 μm(영진 슬래그)와 입경 12~16 μm(한국기초소재)의 두 가지 슬래그를

사용하였다. 각 슬래그의 구성성분은 Table 1과 같다.

2.2 시편 제작

Fig. 1의 시편제작 순서는 다음과 같다. (a) 에폭시, 경화제, 촉진제를 배합 비에 따라 보울에 넣고 슬래그를 첨가하여 (b) 믹싱기로 교반하였다. (c) 데시케이터를 통해 교반 과정에서 발생한 기포를 제거한 뒤, (d) 용액을 테프론 몰드에 부었다. (e) 몰드 뚜껑을 덮고 압력을 가하여 여분의 슬래그가 빠져 나가게 하였다. (f) 몰드 밑면에 배킹 필름을 깔고 실린트를 부착한 뒤 (g) 진공펌프와 연결되어 있는 호스를 설치하였다. (h) 배킹 필름으로 몰드를 덮고 공기가 빠져나갈 수 없도록 실린트로 배킹 필름을 접착 시켰다. (i) 진공 펌프로 배킹필름의 공기를 제거하여 몰드를 압착 진공시켰다. 압착진공 된 몰드를 오븐에 넣고 120도에서 3시간, 130도에서 4시간 동안 경화시켰다.

경화 과정 중 슬래그 입자의 침강 현상 때문에 Fig. 2(a)와 같이 시편이 휘는 현상이 발생하였다. 이를 방지하기 위해 몰드를 압착 진공한 뒤 주기적으로 뒤집어 주었다. 입자의 침강 현상을 해결하여 제작한 시편은 Fig. 2(b)와 같다.

시편의 두께는 2 mm로 제작하였다. 각각의 직경 별로 10%, 20%, 30% 체적 비의 시편을 제작하였다. 제작한 시편은 Fig. 3과 같다.

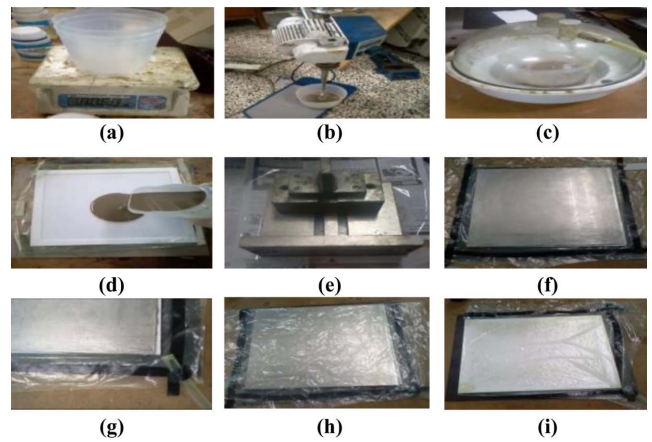


Fig. 1. SRC fabricating process.

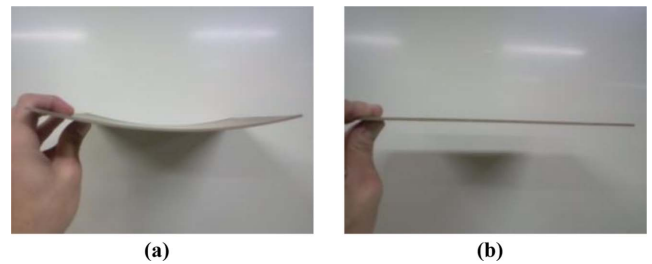


Fig. 2. (a) Bent specimen due to particle sedimentation (b) Flat specimen.

Table 1. Constituents and properties of slag

	Particle size 8~12 μm	Particle size1 12~16 μm
Density (g/cm ³)	2.8 이상	2.8 이상
Specific surface area (cm ² /g)	4000~6000	4000~6000
Flow value ratio (%)	95 이상	95 이상
MgO(%)	10.0 이하	10.0 이하
SO ₃	4.0 이하	4.0 이하
Ignition loss	3.0 이하	3.0 이하
Chloride ion	0.02 이하	0.02 이하



Fig. 3. SRC specimens.

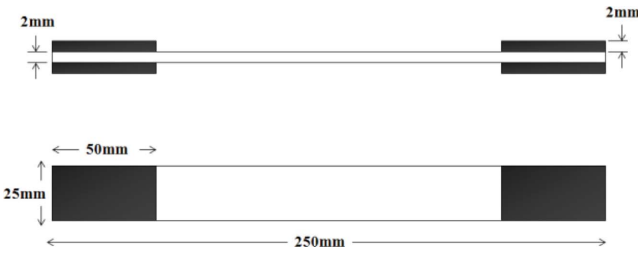


Fig. 4. Configuration of test specimen.



Fig. 5. (a) Microscopic image specimen (b) Polishing process.

2.3 기계적 물성 측정

제작한 시편을 인장시험용 시편으로 가공하여 인장시험을 수행하였다. 인장 시편의 모양과 치수는 Fig. 4와 같다. 시편에 변형률계(Extensometer)를 부착하고 MTS(Material Test System)로 인장시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 강성과 강도를 구하였다.

2.4 조직 사진 촬영

입자강화 복합재료의 물성은 강화 입자의 분산도와 계면 상태에 영향을 받는다. 분산도와 계면 상태를 고찰하기 위해 조직사진 촬영용 시편을 제작하여 폴리싱 머신으로 표면을 연마한 뒤 조직사진을 촬영하였다. 조직사진 촬영용 시편의 사진은 Fig. 5(a)와 같고 연마하는 사진은 Fig. 5(b)에 나타나있다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 6, Fig. 7은 시편에 함유된 슬래그 체적 비에 따른 인장시험 결과의 응력 - 변형률 선도를 입경 별로 나타낸 것

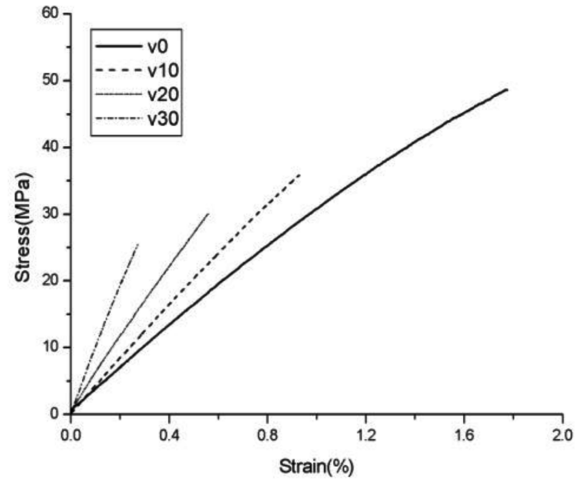


Fig. 6. Tensile test result of 8~12 μm slag reinforced composite.

Table 2. Tensile test results of 8~12 μm slag reinforced composites

	Vs 0%	Vs 10%	Vs 20%	Vs 30%
Elastic modulus (GPa)	3	4.2	5.9	10
Tensile strength (MPa)	48.6	36.2	30.1	25.4

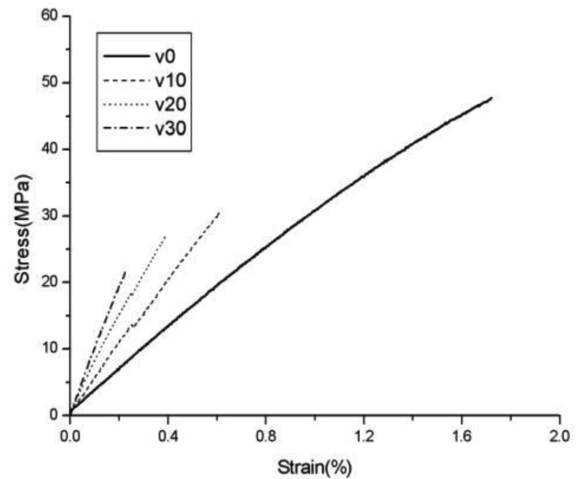


Fig. 7. Tensile test results of 12~16 μm slag reinforced composites.

Table 3. Tensile test results of 12~16 μm slag reinforced composites

	Vs 0%	Vs 10%	Vs 20%	Vs 30%
Elastic modulus (GPa)	3	5.5	7.8	9
Tensile strength (MPa)	48.6	30.5	27.3	21.7

이다. 인장시험 결과 슬래그 체적비가 증가하면 재료강성 (Elastic modulus)은 증가하고 인장강도(Tensile strength)는 감소하는 경향을 나타내었다.

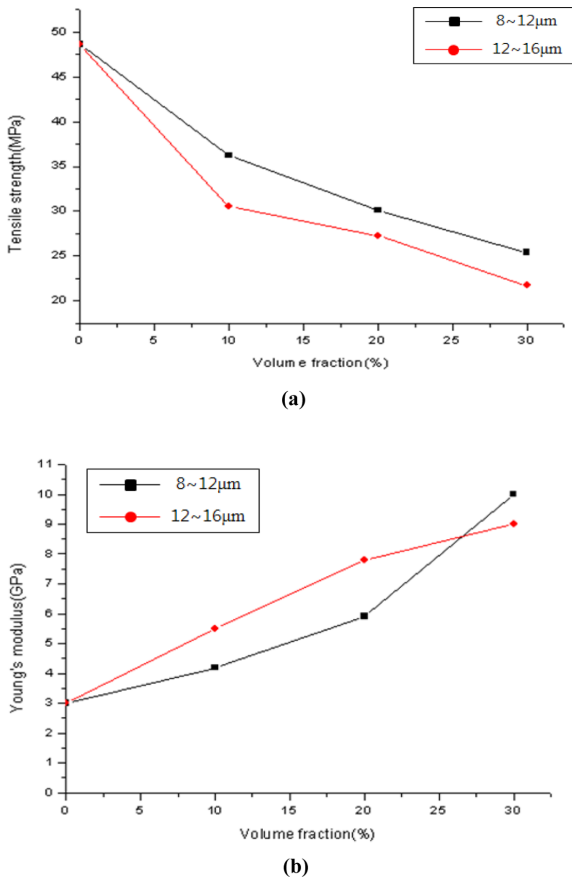


Fig. 8. Comparison data of two different diameter SRC in (a) Tensile strength and (b) Elastic modulus.

Fig. 8의 (a)와 (b)는 슬래그 입경이 8~12 μm와 12~16 μm 인 두 슬래그 복합재료의 재료강성과 인장강도를 체적 비에 따라 비교하여 나타낸 그래프이다. 체적 비가 10%, 20% 인 슬래그 복합재료의 재료강성은 슬래그 입자의 크기가 클수록 높은 값을 나타냈다. 그러나 체적비가 30%인 슬래그 복합재료에서는 슬래그 직경이 작은 시편의 재료강성이 더 높은 값을 나타내는 역전된 결과를 보였다. 재료강도는 체적 비가 10%, 20%, 30%인 슬래그 복합재료 모두 직경이 작은 시편이 높은 값을 가졌다.

일반적으로 단단한 무기물 충전제가 기지재료 보다 높은 재료강성을 갖기 때문에 복합재료의 재료강성은 충전제의 체적 비에 비례한다. 실제적인 경계조건들을 고려하여 유도된 이론적인 식들도 재료 강성과 체적 비가 비례관계에 있음을 나타내고 있다[3]. 본 논문에서 수행된 실험 또한 슬래그의 체적비가 증가함에 따라 복합재료의 재료강성이 증가하는 결과를 나타냈다.

입자의 크기와 재료강성과의 관계에 대한 기존의 연구들에서 입자 크기 30 nm 이상의 무기물 충전제의 경우, 입자의 크기가 재료강성과 독립적이라는 실험결과가 지배적이다[6-11]. 본 논문의 실험 결과 또한 입자의 크기의 변화

에 따른 재료 강성의 변화가 일정한 경향성을 나타내지 않았다.

그러나 슬래그 입자의 크기가 8~12 μm와 12~16 μm로 그 차이가 크지 않기 때문에 슬래그 복합재료의 재료강성과 슬래그 입자크기 사이의 독립성을 단정지을 수는 없다. 슬래그 복합재료의 재료강성과 슬래그 입자 크기 사이의 독립성을 규명하려면 입자크기 대비가 뚜렷한 두 슬래그로 추가적인 시험이 수행되어야 한다.

복합재료의 인장강도는 충전제 입자의 직경, 요소간 계면 접합력, 충전제의 체적 비의 세가지 인자의 영향을 받는다. 충전제 입자의 직경이 작을수록, 요소간 계면 결합력이 클수록 인장강도가 높다[12-15]. 이는 입자의 크기가 클수록 응력 집중이 크게 발생하여 강도저하를 심화시키고, 입자의 표면적이 넓고 계면간 결합력이 크면 요소 간 응력 전달이 효과적으로 일어나 강도 저하를 감소시키기 때문이다. 본 논문의 실험 결과 또한 슬래그 입자의 크기가 작은 복합재료가 높은 인장 강도를 나타냈다.

인장강도에 미치는 체적 비의 영향을 조사하기 위한 시편 제작 시, 입자의 체적 비가 증가함에 따라 입자 뭉침 현상이 발생하여 입자들의 유효 직경이 증가한다. 따라서 인장강도에 미치는 입자의 체적비만의 영향을 고려하여 실험을 수행하는데 한계가 있다. 이론적으로 입자의 체적비가 증가하면 복합재료 내 응력집중이 발생하는 부위가 늘어나게 되고 재료의 인장강도를 약화시킨다. 그러나 입자가 복합재료에서 발생한 크랙의 전파를 막고 경화 도중 발생한 잔류응력이 인장응력을 상쇄시키는 역할을 하기도 하며 입자와 모재 간의 계면 결합력이 높을 경우 응력 분산이 잘 일어나, 체적비가 증가함에 따라 인장강도가 높아지는 연구 결과도 존재한다. 본 논문에서는 슬래그 입자의 체적비가 증가할수록 인장강도가 감소하는 결과가 나타났다. 이는 인장강도에 미치는 입자의 크랙 전파 저항과 잔류응력의 영향보다 응력 집중의 영향이 크며, 입자와 기지재료 간의 계면 결합력이 낮음을 의미한다. 조직사진 촬영 결과 (Fig. 9, Fig. 10) 양호한 계면 상태와 분산 도를 나타냈으나 체적비가 높아질수록 입자들의 뭉침 현상이 심화되는 것

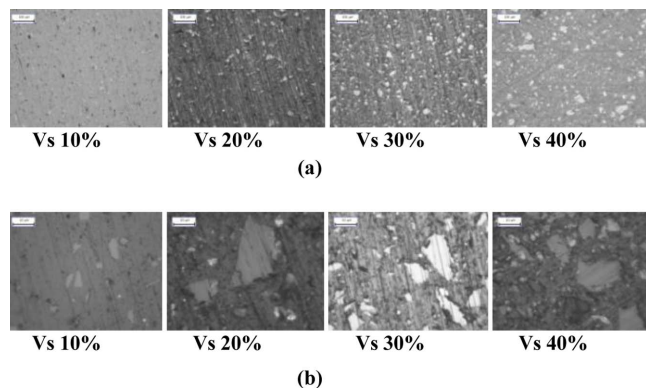


Fig. 9. Optical microscopic images of 8~12 μm slag reinforced composite. (a) 10X magnification (b) 1000X magnification.

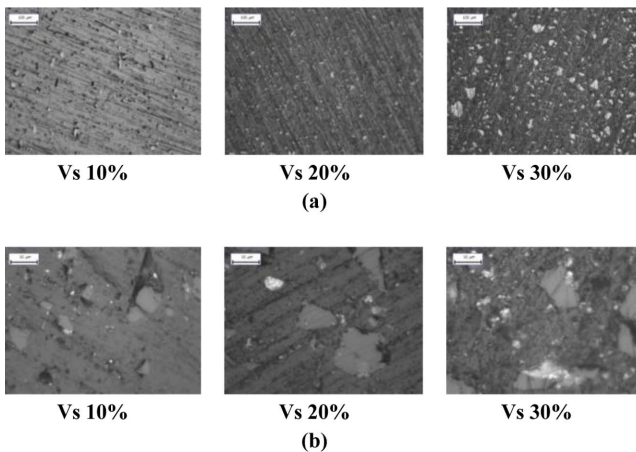


Fig. 10. Optical microscopic images 12~16 μm slag reinforced composite. (a) 10X magnification (b) 1000X magnification.

을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 고분자 기지에 슬래그를 분산하여 경화시킨 슬래그 입자 강화 복합재료를 제작하여 인장시험을 수행하고 조직사진을 촬영하였다. 슬래그 입경과 체적 비를 변수로 총 7종류의 시편을 제작하여 시험을 수행하고 각각의 시편에 대해 조직사진을 촬영하여 입자 분산도와 계면 상태를 확인하였다. 인장시험 결과 슬래그 체적비가 증가하면 재료강성은 증가하고 인장강도는 감소하는 경향을 나타내었다. 재료강성은 입자의 크기와의 뚜렷한 연관성을 찾아볼 수 없었고 인장강도는 입자의 크기가 작을수록 높은 값을 가졌다. 슬래그 체적 비 30%인 시편에서 3배 이상의 재료강성향상을 보인 점을 착안할 때 슬래그의 강성강화 충전제로써의 활용을 기대해 볼 수 있다.

조직사진 촬영 결과 체적 비가 높아지면 입자 뭉침 현상이 발생하여 기계적 특성을 악화시키는 것으로 사려되며 향후에 입자의 뭉침 현상을 감소시키는 연구가 추가적으로 진행되어야 한다.

참고문헌

- Choi, S.W., Kim, V., Chang, W.S., and Kim, E.T., "The Present Situation of Production and Utilization of Steel Slag in Korea and Other Countries," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 6, 2007, pp. 28-33.
- Francis, A.A., "Conversion of Blast Furnace Slag into New Glass-ceramic Material," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, No. 9, 2004, pp. 2819-2824.
- Fu, S.Y., Feng, X.Q., Lauke, B., and Mai, Y.W., "Effects of Particle Size, Particle/Matrix Interface Adhesion and Particle Loading on Mechanical Properties of Particulate-polymer composites," *Journal of Composite Part B*, Vol. 39, No. 6, 2008, pp. 933-961.
- Einstein, A., "Ueber die von der molekularkinetischen fluesigkeit suspendierten teilchen," *Annalen Der Physik*, Vol. 332, No. 8, 1905, pp. 549-560.
- Einstein, A., *Investigation on Theory of Brownian Movement*, Dover, New York, USA, 1956.
- Radford, K.C., "The Mechanical Property of an Epoxy Resin with a Second Phase Dispersion," *Journal of Master Science*, Vol. 6, No. 10, 1971, pp. 1286-1291.
- Spanoudakis, J., and Young, R.J., "Crack Propagation in a Glass Particle-Filled Epoxy-Resin," *Journal of Master Science*, Vol. 19, No. 2, 1984, pp. 473-486.
- Nakamura, Y., Yamaguchi, M., Okubo, M., and Matsumoto, T., "Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Epoxy Resin Filled with Angular-Shaped Silica," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 44, No. 1, 1992, pp. 151-158.
- Xie, X.L., Zhou, X.P., and Mai, Y.W., "Dispersion and Alignment of Carbon Nanotubes in Polymer Matrix: A Review," *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 49, No.4, 2005, pp. 89-112.
- Zhang, Q., Tian, M., Wu, Y., Ling, G., and Zhang, L., "Effect of Particle Size on the Properties of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -Filled Rubber Composites," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 94, No. 6, 2004, pp. 2341-2346.
- Lazzeri, A., Thio, Y.S., and Cohen, R.E., "Volume Strain Measurements on CaCO_3 /Polypropylene Particulate Composites: The Effect of Particle Size," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 91, No. 2, 2004, pp. 925-935.
- Pukanszky, B., and Voros, G., "Mechanism of Interfacial Interactions in Particulate Filled Composites," *Journal of Composite Interface*, Vol. 1, No. 5, 1993, pp. 411-427.
- Giannelis, E.P., "Polymer Layered Silicate Nanocomposites," *Journal of Advanced Materials*, Vol. 8, No. 1, 1996, pp. 29-35.
- Reynaud, E., Jouen, T., Gauthier, C., Vigier, G., and Varlet, J., "Nanofillers in Polymeric Matrix : a Study on Silica Reinforced PA6," *Journal of Polymer*, Vol. 42, No. 21, 2001, pp. 8759-8768.
- Sumita, M., Shizuma, T., Miyasaka, K., and Ishikawa, K., "Effect of Reducible Properties of Temperature, Rate of Strain, and Filler Content on the Tensile Yield Stress of Nylon 6 Composite Filled with Ultrafine Particles," *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, Vol. 22, No. 4, 1983, pp. 601-618.
- Leidner, J., and Woodhams, R.T., "Strength of Polymeric Composites Containing Spherical Fillers," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 18, No. 6, 1974, pp. 1639-1654.