

# SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Vinyl-Ester 복합재료의 강화재 입자가 기계적 특성 및 파괴거동에 미치는 영향

김다진솔 · 윤유성\* · 권오현\*\*

국립재난안전연구원 · \*부경대학교 안전공학과

(2017. 1. 31. 접수 / 2017. 4. 25. 수정 / 2017. 6. 13. 채택)

## The Effect of the Reinforced Particles on the Mechanical and Fracture Behaviors of the SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Vinyl-Ester Composites

Da Jin Sol Kim · Yu Seong Yun\* · Oh Heon Kwon\*\*

National Disaster Management Research Institute

\*Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received January 31, 2017 / Revised April 25, 2017 / Accepted June 13, 2017)

**Abstract :** Particle reinforced composites are materials that have enhanced physical properties by adding particle reinforcements to polymer materials and have been applied to a wide range of fields such as the aerospace, bio-technology and automotive industry. In this study, particle reinforced composites were prepared by mixing SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to the vinyl ester as the thermoset resin. The purpose of this study is to evaluate mechanical properties and fracture behavior by the tensile test and single edge notch specimen according to the addition ratio of reinforcement. Addition of 1 and 2 wt% of the particle reinforcement to the vinyl-ester resin was effective for the strength improvement. However, when it was more than 3 wt%, its strength was decreased. Also the highest elastic modulus obtained as 3.19 GPa was found at the 2 wt% addition of reinforcement. Furthermore the fracture toughness was evaluated by the energy release rate and the maximum critical energy release rate was obtained when 1 wt% reinforcement. The results show that the limit of adding of SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for improvement of the mechanical and fracture performance is 2 wt% reinforcement particles.

**Key Words :** digital image correlation, fracture toughness, particle reinforced composite, rule of mixture, strength improvement

### 1. 서론

현대사회에서 지하자원의 고갈을 대비하여 구조용 재료의 경량화가 에너지 절약을 가능하게 함에 따라 복합재료의 사용이 증대되었다. 플라스틱 재료는 강도가 낮아 연속적인 섬유나 단섬유로 강화된 섬유강화복합재료(Fiber Reinforced Plastic, FRP)가 개발되어 사용되고 있다.<sup>1)</sup> 하지만 플라스틱 재료의 경우 산화에 의한 저항성이 적어 산화반응의 화학적 변화가 이루어지고 열이나 자외선 등에 의해 변형, 연화 등의 물리적 변화가 발생한다.<sup>2)</sup> 이를 강화하기 위하여 마이크로 크기의 미세한 입자인 파티클(particle)을 첨가한 입자강화복합재료(Particulate Reinforced Composite)가 개발되었다.

이러한 입자강화재로 보강한 복합재에 대한 기계적

특성과 파괴거동을 규명하기 위하여 다양한 연구가 진행되어 오고 있다. Tjong 등<sup>3)</sup>은 분말야금기술로 제조된 복합재료에 SiC(Silicon Carbide; 이하 SiC)를 입자크기에 따라 첨가하여 고온 영역에서 인장 크리프시험을 수행하였고, Hu 등<sup>4)</sup>은 진공을 이용한 주조법을 사용하여 SiC 입자를 첨가한 알루미늄기지 복합재료에 대하여 인장시험을 수행하였으며 중력주조법보다 기공의 체적과 비율이 감소하고 인장강도 및 신장율이 향상된 것을 보고하였다. Liu 등<sup>5)</sup>은 절삭공구에서 요구되는 조건인 고온에서의 기계적 특성을 확인하기 위하여 SiC 입자가 첨가된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Aluminium Oxide; 이하 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 세라믹스를 고온 환경에서 굽힘강도와 파괴인성을 평가하였고 시험온도가 증가함에 따라 굽힘강도가 증가하는 것을 확인하였으나 일정온도 이상으로 벗어날 시

\* Corresponding Author : Oh Heon Kwon, Tel : +82-51-629-6469, E-mail : kwon@pknu.ac.kr

Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

에는 감소하는 것을 확인하였다. Juliane 등<sup>6)</sup>은 SiC 입자가 첨가된 탄소섬유복합재료(Carbon Fiber Reinforced Plastic, 이하 CFRP)로 SENB(Single-Edge Notch Beam) 시험을 수행하여 파괴거동 및 강도평가를 하였다. Yoon<sup>7)</sup>은 TiO<sub>2</sub> 입자로 강화된 에폭시 고분자복합재료를 입자 크기와 첨가율이 물성에 미치는 영향에 대해 검토하였으며 기존의 에폭시 수지에 비해 TiO<sub>2</sub>를 첨가함에 따라 극한강도 및 충격치가 향상된 것을 확인하였다. 그러나 현재까지 입자강화복합재료의 SiC와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자첨가 비율에 관련하여 연구가 미비하다.

따라서 본 연구에서는 열경화성 수지인 비닐에스테르(Vinyl-ester)에 일반적으로 사용되고 있는 구조용 세라믹계 강화재인 SiC와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자강화재를 혼합하여 VaRTM (Vacuum-assisted Resin Transfer Molding) 공법으로 입자강화복합재를 성형하였으며 입자의 첨가비율에 따른 인장시험과 파괴시험을 수행하여 기계적 특성과 파괴거동을 평가하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 실험재료 및 시험편

본 실험에 사용된 비닐에스테르 수지는 CCP Composites Korea(주)에서 생산되는 Epovia<sup>®</sup> RF-1001 제품이며, 입자강화재로 SiC는 국내 (주)한보월드에서 생산되는 직경 약 1 μm의 GC-#10,000 분말을 사용하였다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 R&B INC.에서 판매하는 직경 약 1 μm의 AP-100 분말을 사용하였다. 재료 성형은 비닐에스테르 수지 단일로 이루어진 것과 각각 1, 2, 3 및 4 wt%의 SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자강화재를 첨가한 경우로 5가지 종류로 성형하였다. Table 1과 2는 성형된 재료의 종류별 각각

Table 1. Ratio of reinforced and matrix by composites type

Product	Particle weight percentage				
	resin	1 wt%	2 wt%	3 wt%	4 wt%
SiC	0	0.5	1.0	1.5	2.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0.5	1.0	1.5	2.0
Vinyl ester	100	99	98	97	96

Table 2. Physical properties of materials

Material	Size (μm)	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Fracture toughness (MPa · m <sup>1/2</sup> )
GC-#10000	1	3.20	138	400	4.6
AP-100	1	3.92	260	370	3.0
Epovia <sup>®</sup> RF-1001	N/A	1.02	79	3.66	N/A

첨가된 입자강화재의 함유량과 연구에 사용된 수지 및 입자강화재의 물리적 특성을 나타낸다.

VaRTM 공법을 이용한 성형방법은 먼저 500 × 500 mm 스테인레스강 판에 자체 제작한 두께 1.6 mm인 가로·세로 250 × 250 mm 성형 틀을 얹어 몰드(mold)를 형성한다. 이때 몰드 내부에 고체왁스로 이형처리를 한 후 수지가 원활히 몰드 내부로 흘러 들어갈 수 있도록 성형 틀 위에 레진 플로우(resin flow)를 깔아준다. 그리고 재료의 성형 틀 외곽으로 약 30 mm 정도 충분한 간격을 두고 실란트(sealant) 테이프를 부착하였다. 그 후 실란트 테이프 양 끝 쪽에 진공호스를 각각 1개씩 설치하여 수지의 입구와 배출구를 형성하였다. 성형 틀 내부가 진공을 형성할 수 있도록 진공비닐을 덮어 실란트 테이프와 압착하였고 수지 배출구 쪽 호스는 진공펌프와 연결하여 진공을 형성하였다. 진공펌프는 수지가 입구호스 쪽에서 흘러들어올 수 있도록 진공을 유지하며 진공펌프 사이에 진공 트랩을 설치하여 수지가 직접적으로 펌프에 들어가지 않도록 하였다. 재료 성형 방법의 개략도는 Fig. 1과 같다.

수지 제작은 Kwon 등<sup>8)</sup>의 연구결과를 참고하여 비닐에스테르에 SiC와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 강화재를 첨가 후, 초음파 분산기(Sonicator)를 사용하여 약 60 분간 분산과정을 거쳤으며 각각 재료의 강화재 첨가비율은 Table 1에 나타내었다. 수지의 경화를 위하여 경화제(BUTANOX M-60) 1 wt%와 촉진제 0.5 wt%를 분산과정이 끝난 혼합액에 첨가한 후 약 10분 간 진공펌프를 이용하여 탈포과정을 거쳤다. 탈포과정까지 완료된 혼합액을 수지 입구호스에 연결하여 진공 백 내부에 주입시킨 후 약 48시간의 1차 경화를 시켜 몰드 내에 경화된 성형판에서 탈착시켰다. 그 후 완전 경화를 위하여 상온에서 약 1주간 2차 경화과정을 거쳐 재료 성형을 완료하였다.

완전 경화된 복합재료 성형판은 기계적 특성치를 평가하기 위해 ASTM D638<sup>9)</sup> 규격을 참고하여 Fig. 2(a)와 같이 인장시험편으로 제작하였다. 시험편은 다이어

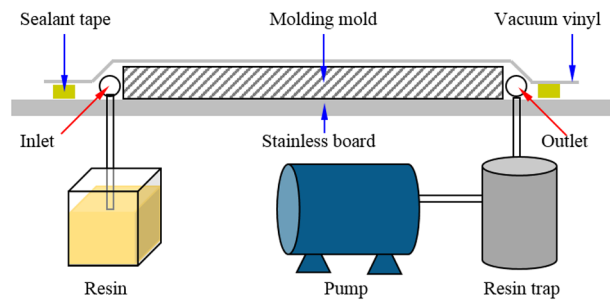


Fig. 1. Schematic diagram of Vacuum-assisted Resin Transfer Molding process(VaRTM method).

몬드 휠 커터를 사용하여 절단·가공하였고 라운드 부위는 밀링 머신(SAKAI, ML-360)을 사용하여 가공하였다.

복합재료의 파괴거동은 편측노치인장(Single edge notched tension: SENT) 시험편을 제작하여 평가하였다. Fig. 2(b)의 형상과 같이 다이아몬드 휠 커터를 이용하여 절단·가공하였으며, 예비균열의 길이는 시험편 폭의 50% 크기( $\frac{a_0}{W}=0.5$ )로 설정하였다. W는 시험편 폭,

$a_0$ 는 초기균열길이이다.  $\frac{a_0}{W}=0.5$ 의 예비균열  $a_0$ 을 삽입하기 위하여 1차로 다이아몬드 휠 커터를 사용하여  $0.48 W$  길이만큼 예비노치를 삽입하였다. 나머지 약 2%의 균열은 예리한 노치 끝단을 형성하기 위하여 현미경 관찰과 함께 커터날(razor blader)을 이용하여 삽입하였다. Table 3과 Table 4는 강화재 첨가비율에 따른 인장 및 파괴시험편의 명칭과 각 시험편 별 삽입된 노치균열 크기를 나타내었다.

## 2.2 실험방법

기존의 비닐에스테르 수지와 비닐에스테르 수지에 강화재를 1, 2, 3 및 4 wt%로 첨가한 인장시험편의 인장강도, 탄성계수, 포아송비 등 기계적 물성치를 획득하기 위하여 시험편 중심부에 1축 스트레인 게이지를 횡방향으로 부착하였다. 스트레인 게이지의 변형률 측정에는 Model 5100B Scanner (V사)를 이용하였고 이 때 얻어진 신호는 전용 변형률 해석프로그램(Strain Smart)을 통하여 분석하였다. 종 방향 변형률은 Extensometer (Tinus Olsen, PS25C)를 시험편에 장착하여 측정하였다.

Table 3. Denomination of tensile and SENT specimen

Material	Tensile specimen type	SENT specimen type
Resin only	RT	RF
1 wt%	PT1	RT1
2 wt%	PT2	RT2
3 wt%	PT3	RT3
4 wt%	PT4	RT4

Table 4. Crack ratio of SENT specimen

Specimen type	Particle weight fraction (%)	W (mm)	$a_0$ (mm)	$a_0/W$
RF	resin	18.44	9.22	0.5
PF1	1 wt%	18.75	9.375	0.5
PF2	2 wt%	18.67	9.335	0.5
PF3	3 wt%	18.55	9.275	0.5
PF4	4 wt%	18.51	9.255	0.5

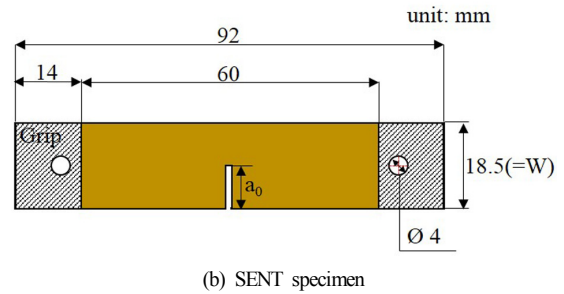
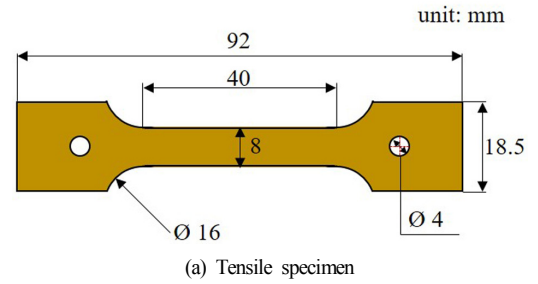


Fig. 2. Specimen configurations.

실험에 사용된 시험기는 중형 인장시험기(Tinus Olsen, H50KS)이며 실험속도는 변위제어 0.1 mm/min로 수행하였다. 파괴시험은 파괴거동을 평가하기 위하여 균열비  $\frac{a_0}{W}=0.5$ 인 SENT 시험편으로 인장파괴실험을 수행하였으며 실험속도는 변위제어 0.05 mm/min로 수행하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 인장시험 결과

SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자강화재의 첨가비율에 따른 인장시험을 수행하여 얻어진 응력-변형률 선도에는 Fig. 3에 나타내었다. 입자강화재 첨가에 관계없이 모두 최대응력에서 급작파괴가 일어났으나 resin 시험편(RT)의 경우 소성이 초기부터 발달되는 것에 비해 강화재가 첨가됨에 따라 탄성역이 점점 높아짐을 알 수 있다. 최대 파단 변형률은 RT 시험편이 약 0.023으로 가장 높았고 강화재 첨가비율이 높아짐에 따라 낮아지는 경향을 확인하였다. 이것은 취성입자인 SiC의 영향이 매우 큰 것을 나타낸다.

인장강도는 1 wt%(PT1)에서 38.24 MPa로 가장 높은 것을 확인하였고 2 wt%(PT2)에서는 33.29 MPa로 PT1보다 낮아졌다. 3 wt%(PT3) 이상으로 강화재가 첨가된 경우에는 RT의 극한강도인 31.36 MPa보다 저하된 것을 확인하였다. 이것은 SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자강화재의 첨가가 강도 향상의 효과를 가져 올 수는 있지만 일정량 이상이 첨가되었을 경우에는 입자의 응집현상에 의하여 강도 저하의 효과를 가져 오는 것으로 판단된다. 이러한 결

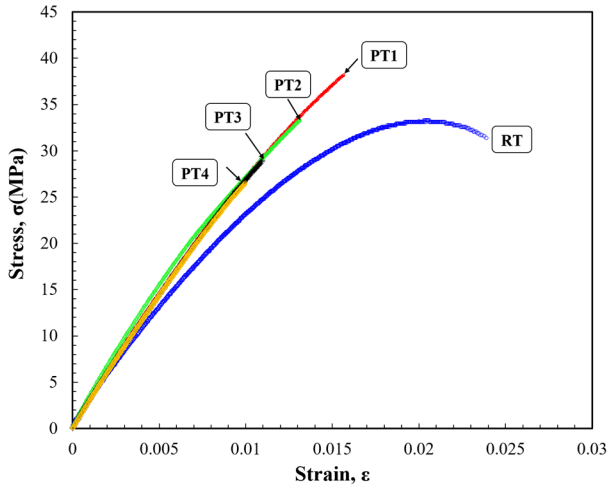


Fig. 3. Relationships of stress–strain acquired from a tensile test according to the reinforced particles ratio.

과는 Yoon<sup>7)</sup>의 연구결과에서도 확인되고 있다. 또한 인장 시험을 통하여 각 시험편에서 소성구간을 확인하였으며 항복강도를 구하기 위하여 오프셋 방법을 사용하였다.

항복강도는 RT, PT1, PT2, PT3 및 PT4 순으로 각각 14.99, 16.53, 18.54, 18.44 및 16.29 MPa로 얻어졌다. 탄성계수 계산은 값의 정밀도를 높이기 위하여 ASTM E111<sup>10)</sup> 규정을 참고하여 평가하였다. 규정에서 요구하는 측정계수  $r^2$  값은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$r^2 = \frac{[\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{K}]^2}{[\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{K}] \times [\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{K}]} \quad (1)$$

$r^2$ 가 1.00에 가까운 응력-변형률 범위에서 탄성계수를 결정하는 것이 바람직하며 Y는 인장응력, X는 응력에 해당하는 변형률, K는 데이터의 수를 나타낸다. 모든 시험에서 측정계수  $r^2$ 가 0.99에 해당하도록 하여 탄성계수를 평가하였다. 탄성계수는 resin 단일 재료에서 강화재가 첨가됨에 따라 증가된 것을 확인하였다. 이는 SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 강화재의 첨가가 재료 강성 향상에 영향을 미치는 것을 나타낸다. PT3와 PT4에서는 PT1과 PT2보다 탄성계수가 떨어지는 경향을 확인하였다. 또한 시험치의 유효성을 확인하기 위하여 ROM(Rule of Mixture) 평가를 실시하였다. Tomota가 제안한 수정 ROM 식<sup>11)</sup>을 사용하였으며 다음과 같이 나타낸다.

$$E = \frac{c_m E_m \frac{q + E_p}{q + E_m} + (1 - c_m) E_p}{c_m \frac{q + E_p}{q + E_m} + (1 - c_m)} \quad (2)$$

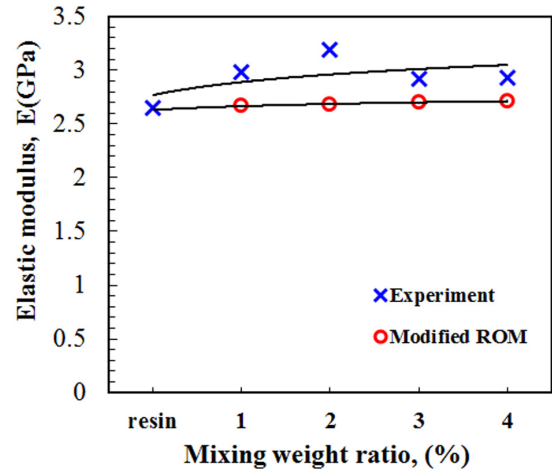


Fig. 4. Relationship of the modified ROM and experiment results for an elastic modulus.

Table 5. Mechanical properties of the tensile specimen

Material type	Ultimate strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio (ν)
RT	31.36	14.99	2.65	0.305~0.330 <sup>*</sup>
PT1	38.24	16.53	2.99	-
PT2	33.29	18.54	3.19	0.354
PT3	28.91	18.44	2.92	0.344
PT4	26.53	16.29	2.93	0.361

<sup>\*</sup>) Information resource with material properties data on MATWEB website

수정 ROM식을 적용한 탄성계수 값은 PT1, PT2, PT3 및 PT4 순으로 각각 2.67, 2.68, 2.7 및 2.71 GPa로 계산되었다. Fig. 4는 SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자강화재의 첨가비율에 따른 실험 결과 값과 수정 ROM 값은 나타내었고 오차는 약 10%로 평가되었으며 시험치의 유효성을 확인하였다. 포아송비는 시험동안 시험편에 부착된 strain gauge와 Extensometer에서 각각 획득한 횡, 종 방향의 strain 값으로 계산하였다. 인장시험을 수행하여 획득한 기계적 특성치는 Table 5에 정리하였다.

### 3.2 파괴시험 결과

강화재 첨가비율에 따른 파괴시험 결과로 하중-변위 선도를 Fig. 5에 나타내었다. SENT시험편의 균열선단 부위에서 하중이 증가함에 따라 균열전진은 관찰되지 않았고 최대하중에서 급작파단이 발생하는 것으로 확인되었다. PF1 시험편에서 최대하중이 146.67 N으로 가장 높았고 PF2에서 최대하중이 143.77 N으로 PF1과 비교하여 매우 근사한 값이 얻어졌다. 한편, PF3 및 PF4에서는 RF의 최대하중인 128.49 N보다 낮은 값으로 각각 122.07 및 117.75 N 값을 확인하였다.

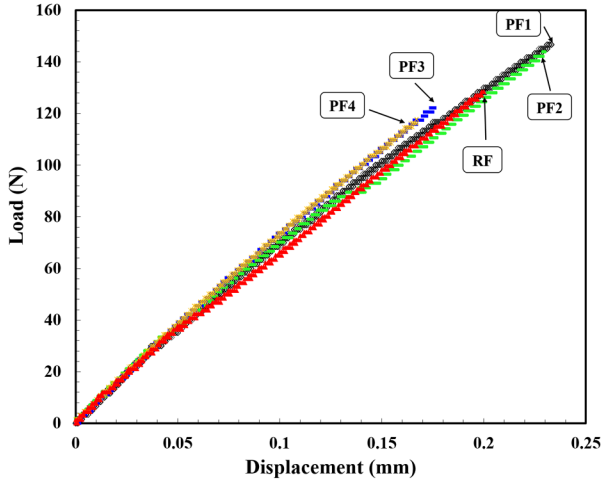


Fig. 5. Relationships of load–displacement from SENT test according to reinforced particles ratio.

파괴거동을 평가하기 위해 사용된 SENT 시험편의 응력확대계수의 식<sup>12)</sup>은 다음과 같다.

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3)$$

여기서, 시험편의 형상계수는

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\sqrt{2 \tan \frac{\pi a}{2W}}}{\cos \frac{\pi a}{2W}} [0.752 + 2.02 \left(\frac{a}{W}\right) + 0.37(1 - \sin \frac{\pi a}{2W})^3] \quad (4)$$

으로 나타낸다. P는 하중, B는 시험편의 두께, a는 균열길이, W는 시험편의 폭을 의미한다. 본 연구에서는 파괴거동 평가를 위하여 에너지해방률을 사용하였으며 다음과 같다<sup>13)</sup>.

$$G = \frac{K_I^2}{E} \quad (5)$$

Fig. 6은 강화재 첨가비율에 따른 임계에너지해방률 값을 나타낸다. RF의 임계에너지해방률은 1.811 kJ/m<sup>2</sup>이며 PF1 및 PF2에서는 RF보다 높은 각각 2.568 및 2.098 kJ/m<sup>2</sup>로 평가되었으며 PF3 및 PF4에서는 각각 1.599 및 1.486 kJ/m<sup>2</sup>로 평가되었다. 이는 비닐에스테르에 SiC와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 첨가비율이 1 wt%일 때 파괴저항치가 가장 높게 평가되었으며 첨가비율이 3 wt% 이상으로 높아질수록 resin보다 파괴저항치는 떨어짐을 알 수

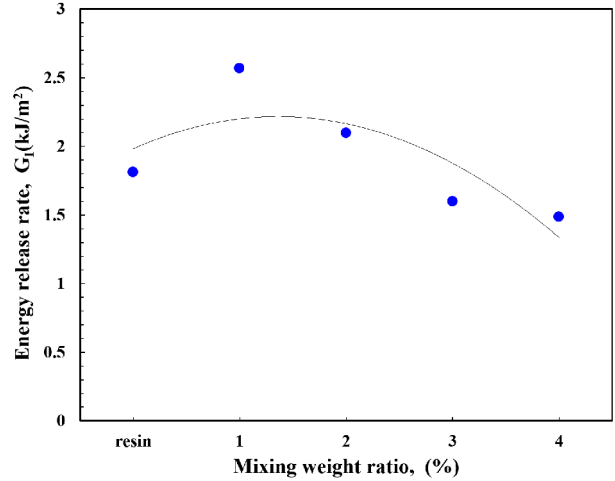


Fig. 6. Energy release rate according to the reinforced particles ratio under SENT specimen loading.

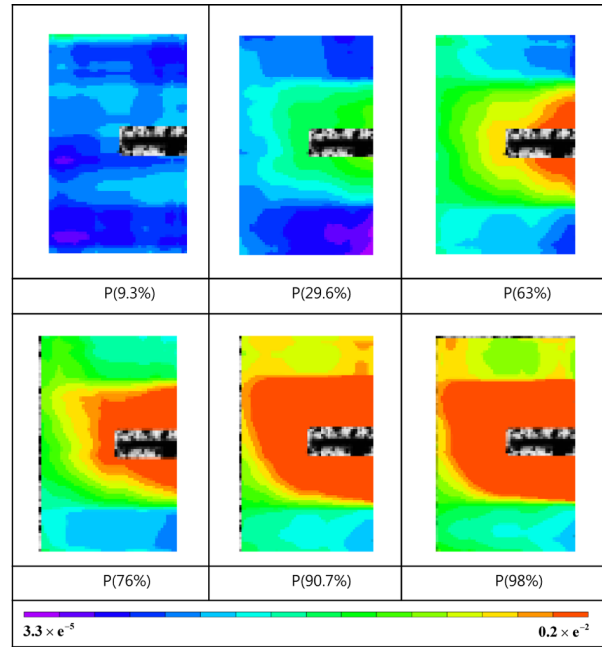


Fig. 7. The strain  $\varepsilon_{yy}$  contours according to the loading increase by using DIC.

있다. 이는 1 wt%의 강화재 첨가가 파괴인성의 증진에 효과적이라 여겨지고 3 wt%이상의 입자강화재 첨가는 재료 내부에 결함 요소로 작용할 것이라 판단된다. 또한 파괴시험 중 이미지 상관관계 기법<sup>14)</sup>인 DIC(Digital image correlation) 방법을 사용하여 변형체의 내·외부에 발생하는 변위 및 변형율을 시험편 전 영역에서 실시간으로 확인하였다. Fig. 7은 PF2 시험편의 파단지점의 최대 하중지점 전까지를 DIC 기법을 평가로 얻어진  $\varepsilon_{yy}$  값의 등고선 분포를 나타낸다. 최대 하중의 98%까지 하중이 증가함에 따라 노치균열주위로 점점 변형율



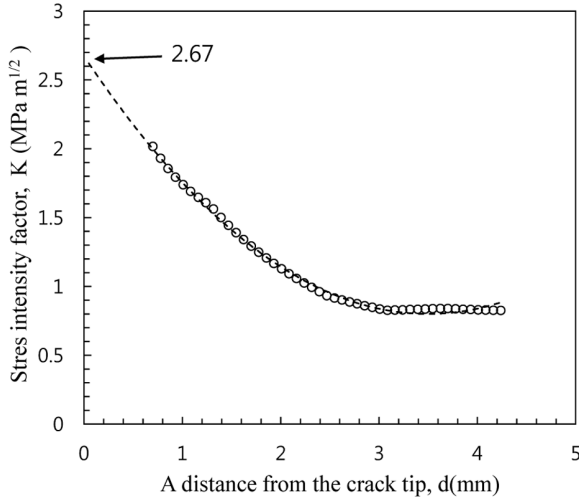


Fig. 8. The stress intensity factor K calculated by the extrapolation in the PF2 specimen.

이 증가하고 있음을 잘 알 수 있다. Fig. 8은 DIC기법을 수행하여 식(6)을 적용한  $K_I$  값을 나타내었다.

$$K_I = \lim_{d \rightarrow 0} \left[ \frac{E}{4(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{d}} u_{yy} \right] \quad (6)$$

균열선단에서의  $K_I$  은 Fig. 8에서 주어진  $K_I$  값에 대하여 외삽법을 이용하여  $2.67 \text{ MPa} \sqrt{m}$  을 얻었다. 이 결과는 식(3)에서 얻어진 응력확대계수  $K_I = 2.58 \text{ MPa} \sqrt{m}$  과 비교하여 볼 때 약 3.3% 차이가 나므로 본 연구에서 실험한 결과의 유효성을 확인할 수 있었다.

### 3.3 미세조직 관찰

전자현미경(SEM : JSM-6490)을 사용하여 인장시험을 수행한 시험편의 파단면을 10,000 배율로 관찰하였다. Fig. 9(a)는 1 wt% 인장시험편의 파단면을 관찰한 사진으로 파면 곳곳에 본 연구에서 사용된  $1 \mu\text{m}$  크기의 강화재 입자들이 분포되고 있는 것이 보이며 입자에서부터 모재가 갈라져 균열이 난 형상이 관찰된다. 또한 입자가 resin에서 탈락한 것으로 보이는 입자크기의 공간 (hole) 들이 관찰되며 입자의 탈락부위가 관찰되었다. Fig. 9(b)는 2 wt% 인장시험편의 파단면을 관찰한 사진으로 파단면이 매끄러운 형태로 관찰된다. 1 wt%에서 보다 파단면이 매끄러운 것은 resin과 입자의 벽계파괴로 인하여 파괴저항 흔적이 적은 것으로 여겨지며 이것은 파괴인성치의 저하에 영향을 미쳤는 것으로 여겨진다. Fig. 9(c)는 3 wt% 인장시험편의 파단면을 관찰한 사진으로 대부분의 입자들이 resin 안에 묻혀있는 형태로 존재한다. 이는 입자들이 파괴저항에

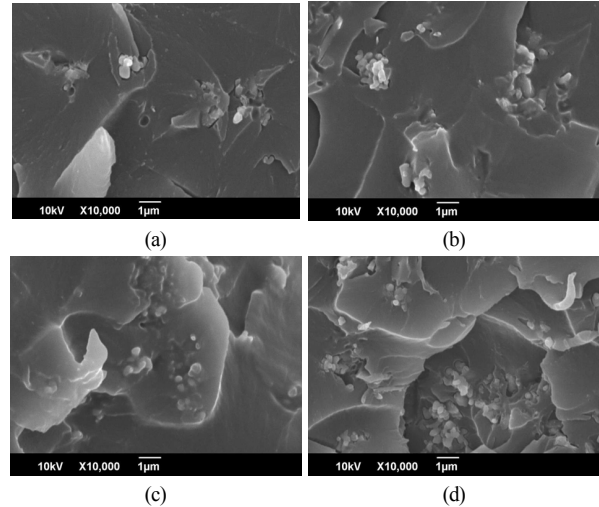


Fig. 9. SEM images of the fracture surface of the tensile specimen.

대해 영향을 못 미친 것으로 판단된다. Fig. 9(d)는 4 wt% 인장시험편의 파단면을 관찰한 사진으로 거친 파단면이 눈에 띄이며 다른 시험편과 비교하여 확연하게 많은 입자들이 분포하고 있는 것이 관찰된다.  $1 \mu\text{m}$  보다 큰 단위로 응집되어 분포하고 있는 것이 관찰되며 이는 재료의 결함요소로 작용하여 입계파괴(intergranular)가 발생하였다고 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 입자강화재로서  $1 \mu\text{m}$  크기의 SiC와  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 를 동일한 중량으로 첨가한 탄화규소/산화알루미늄/비닐에스테르 복합재료를 입자강화재 첨가비율에 따른 인장시험과 파괴시험을 수행하여 기계적 특성 및 파괴거동을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) RT, PT1, PT2, PT3 및 PT4의 극한강도는 각각 31.36, 38.24, 33.29, 28.91 및 26.53 MPa이고 항복강도는 각각 14.99, 16.53, 18.54, 18.44 및 16.29 MPa로 얻어졌다. 극한강도는 PT1에서 최대로 얻었으며 PT2, PT3 및 PT4 순으로 선형적인 감소를 보였고 항복강도는 불규칙한 경향을 나타내었다.

2) RT, PT1, PT2, PT3 및 PT4의 탄성계수는 각각 2.65, 2.99, 3.19, 2.92 및 2.93 GPa로 얻어졌다. 입자강화재의 첨가는 단일재료에 비하여 탄성을 증가시키는 경향이 확인되었고 PT2에서 가장 높은 탄성계수 결과 값을 얻었다.

3) RF, PF1, PF2, PF3 및 PF4의 임계에너지해방률은 각각 1.81, 2.568, 2.098, 1.599 및 1.486  $\text{kJ/m}^2$ 으로 얻어졌다. SiC/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자강화재가 1 wt% 첨가될 경우 단일

비닐에스테르 보다 파괴저항치가 약 41% 증가된 것을 확인하였다.

4) 1 wt% 시험편 파단면에서 관찰된 입자 주위의 갈라짐 형태는 입자가 하중을 부담한 것으로 보이며 4 wt% 시험편의 파단면에서 1 $\mu$ m 보다 큰 형태로 입자들이 응집된 형태가 확인되었다. 이것으로 균일한 입자 강화복합재 성형을 위하여 입자 분산제가 필요할 것으로 여겨진다.

5) 파괴거동 평가로 얻어진  $K_{I} = 2.58 \text{ MPa} \sqrt{m}$  과 DIC 평가로 얻어진  $K_{I}$  값과 비교하여 볼 때 약 3.3% 정도 차이가 나므로 파괴거동 실험 및 DIC에 의한 평가는 매우 적절함을 알 수 있다.

## References

- 1) J. H. Lee, Fiber Reinforced Plastics, Kijeon Pub., pp. 115-112, 2003.
- 2) S. K. Joe, Polymer Additives, Naeha Pub., pp. 5-23, 2001.
- 3) S. C. Tjong and Z. Y. Ma, "High-Temperature Creep Behaviour of Powder-Metallurgy Aluminium Composites Reinforced with SiC Particles of Various Sizes", Composites Science and Technology, Vol. 59, pp. 1117-1125, 1998.
- 4) Q. Hu, H. Zhao and F. Li, "Microstructures and Properties of SiC Particles Reinforced Aluminum-Matrix Composites Fabricated by Vacuum-assisted High Pressure Die Casting", Material Science & Engineering A, Vol. 680, pp. 270-277, 2017.
- 5) X. Liu, H. Liu, C. Huang, B. Zhao and L. Zheng, "High Temperature Mechanical Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based Ceramic Tool Material toughened by SiC Whiskers and Nanoparticles", Ceramics International, Vol.43, pp. 1160-1165, 2016.
- 6) J. Mentz, M. Muller, H. P. Buchkremer and D. Stover, "Carbon-Fibre-Reinforced Carbon Composite Filled with SiC Particles forming a Porous Matrix", Material Science Engineering A, Vol. 425, pp. 64-69, 2006.
- 7) S. H. Yoon, Effect of Particle Size and Content on Mechanical Properties in the TiO<sub>2</sub>/Nanocomposites, Pukyong National University, Master Thesis, 2016.
- 8) D. J. Kwon, P. S. Shin, J. H. Kim, J. M. Park, "A New Mixing Method of SiC Nanoparticle Reinforced Epoxy Composites with Large Concentration of SiC Nanoparticle", The Korean Society for Composite Material, Vol. 29, pp. 223-229, 2016
- 9) Standard Test Method for "Tensile Properties of Plastics" ASTM D 638, 2002.
- 10) Standard Test Method for "Young's Modulus, Tangent Modulus and Chord Modulus", ASTM E 111, 2010.
- 11) Y. Tomota and K. Kuroki, "Tensile Deformation of Two-Ductile-Phase Alloys: Flow Curves of  $\alpha-\gamma$  Fe-Cr-Ni Alloys", Materials Science and Engineering, Vol. 24, pp. 85-94, 1976.
- 12) T. L. Anderson, Fracture Mechanics, pp.52-70, CRC Press, London, 1995.
- 13) G. R. Irwin, "Onset of Fast Crack Propagation in High Strength Steel and Aluminium Alloys", Sagamore Research Conference Proceedings, Vol. 2, pp. 289-305, 1956.
- 14) M. A. Sutton et al., "The Effect of Out of Plane Motion on 2D and 3D Digital Image Correlation Measurements", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 46, pp.746-757, 2008.