

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(7), 535-541(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.7.535

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## DIC를 이용한 입자강화 복합재료의 파괴거동 평가

홍상현\*, 이정원\*, 김재훈\*\*, 이상연\*\*\*, 박재범\*\*\*, 정규동\*\*\*

## Evaluation of Fracture Behavior on Particle Reinforced Composite Using Digital Image Correlation

Sang-Hyun Hong\*, Jeong-Won Lee\*, Jae-Hoon Kim\*\*, Sang-Yeon Lee\*\*\*, Jae-Beom Park\*\*\*  
and Gyoo-Dong Jung\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University\*,\*\*  
Agency for Defense Development\*\*\*

## ABSTRACT

In this study, wedge splitting tests were performed to evaluate fracture behavior of particle reinforced composite materials. Crack resistance was evaluated by using CTOD (crack tip opening displacement) and crack tip opening angle (CTOA). The particle reinforced composites were tested under various temperature ( $-60^{\circ}\text{C}$ ~ $50^{\circ}\text{C}$ ) and load speed (5~500mm/min). Also, digital image correlation method (DIC) was used to analyze the strain field at crack tip. Test results showed that the fracture energy increased with decreasing temperature and crack resistance increased with increasing load velocity.

## 초 록

본 연구에서는 입자강화 복합재료의 파괴거동을 평가하기 위해 썬치분열시험을 수행하였다. 균열 저항성을 분석하기 위해 균열선단열림변위(CTOD)와 균열선단열림각도(CTOA)를 이용하였다. 사용된 입자강화 복합재료는 특성상 온도와 하중속도에 영향을 많이 받기 때문에 다양한 온도( $-60^{\circ}\text{C}$ ~ $50^{\circ}\text{C}$ )와 하중속도(5~500mm/min)조건에서 시험을 수행하였다. 또한 균열선단에 대한 변형률장을 분석하기 위해 디지털 이미지 상관법(DIC)을 이용하였다. 시험결과 파괴에너지는 온도가 감소할수록 증가하였으며, 하중속도가 증가할수록 균열저항성이 증가하였다.

**Key Words** : Wedge Splitting Test(썬치분열시험), Fracture Energy(파괴에너지), Digital Image Correlation(디지털 이미지 상관법)

## 1. 서 론

입자강화 복합재료는 단독 재료로 얻을 수 없는 성질이나 특성을 가질 수 있도록 다른 종류의

여러 재료를 결합하여 제작한다. 최근 고분자 및 정밀 화학 기술의 발전으로 인해 입자강화 복합재료는 물리적 성질, 기계적 성질 등 각종 성능 및 제작 공정성이 개선되었다. 입자강화 복합재

† Received : January 22, 2018 Revised : May 25, 2018 Accepted : June 11, 2018

\*\* Corresponding author, E-mail : kimjhoon@cnu.ac.kr

료는 다양한 산업분야에서 사용되고 있어 기계적 특성을 분석하여 제작 공정을 개선하는데 중점을 두고 있다[1].

HTPB(hydroxyl-terminated poly-butadiene)를 기반으로 하는 입자강화 복합재료는 산화제 및 고분자 물질을 결합하여 점탄성 특성을 보이는 재료이다. 이러한 입자강화 복합재료는 제조 과정, 보관 온도, 외부 압력 등에 의해 균열이 발생할 수 있다. 균열은 재료의 내구성, 성능, 안정성 등을 저하시킨다. 한편 입자강화 복합재료의 강도는 철, 알루미늄과 같은 금속이나 콘크리트 등의 준취성 재료에 비해 낮을 뿐만 아니라 점탄성 특성을 지니고 있다. 점탄성 특성은 선형탄성파괴역학을 적용하기 어렵게 한다. 현재까지 점탄성 특성을 보이는 입자강화 복합재료의 파괴인성을 나타낼 수 있는 방법은 정립되지 않았고 여러 방면으로 연구가 진행 중에 있다[2-5]. 따라서 입자강화 복합재료의 기계적 특성은 파괴에너지 개념을 적용시킨 에너지 흡수 능력을 파악하여 분석할 수 있다[4]. 그러나 이 또한 점탄성 특성 때문에 파괴에너지를 결정하는데 많은 어려움이 따른다.

본 연구에서 사용된 재료는 HTPB를 기반으로 하는 입자강화 복합재료이다. 이 재료는 제작, 운반 및 저장 등의 상황에서 균열이 발생할 수 있기 때문에 균열 거동에 대한 파괴역학적 시험 평가는 필수적이다. 파괴역학적 시험은 균열이 있는 재료의 구조를 평가하기 위한 지표가 된다. 파괴역학적인 변수 및 파괴인성의 데이터를 도출하고 온도와 시험 속도의 영향을 분석하는 것이 연구의 목표이다. 파괴역학적 변수를 분석하기 위해 췌기분열시험(wedge splitting test, WST)을 수행하였다. 시험이 진행되는 동안 CCD 카메라로 시험편 표면의 스펙클 패턴(speckle pattern)을 촬영한다. 시험을 수행한 뒤 촬영한 이미지를 기반으로 파괴인성 변수인 CTOD(crack tip opening displacement) 및 CTOA(crack tip opening angle)를 측정하고, 디지털 이미지 상관법(digital image correlation, DIC)을 이용하여 표면 변형률장을 도출하였다. 균열저항특성은 입자강화 복합재료의 특성상 온도와 하중속도의 영향을 크게 받기 때문에 다양한 온도 및 하중속도에서 파괴인성시험을 수행하였다.

## II. 재료 및 실험방법

### 2.1 시험 재료 및 시편

본 연구에 사용된 재료는 HTPB 고분자 바인더에 금속연료 및 산화제가 결합된 입자강화 복

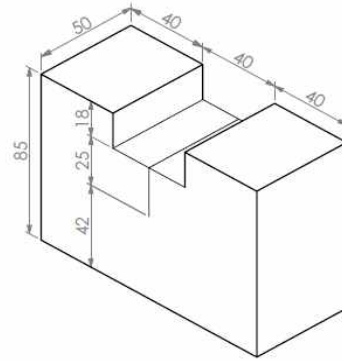


Fig. 1. Configuration of wedge splitting test specimen

합재료로 주물에 의해 제조된다. Fig. 1은 췌기분열시험편의 형상을 나타낸다. 시편의 형상은 파괴인성 실험 규격인 ASTM E399[6]에 제시된 CT시험편을 기반으로 결정되었다. 예비균열 길이는 25mm로 예리한 나이프를 사용하여 삽입하였다. 실험에 사용된 입자강화 복합재료는 일반적인 금속에 비해 강도가 매우 약하기 때문에 시험 치구에 직접적으로 물리면 국부적인 압축변형이 크게 발생하기 때문에 췌기분열시험을 적용시켰다.

### 2.2 췌기분열시험

췌기분열시험은 노치(notch), 그루브(groove), 췌기(wedge) 및 롤러(roller)를 사용하여 하중을 가하는 방식이다[3]. Fig. 2는 췌기분열시험용 지그와 시편의 모습을 보여준다. 췌기가 내려오면 롤러를 양쪽으로 밀어내며 분열하중  $F_s$ 는 식 (1)에 의해 계산된다.

$$F_s = \frac{1}{2 \tan \alpha} F_v \tag{1}$$



Fig. 2. Static system of wedge splitting test

여기서  $F_s$ 는 분열하중,  $F_v$ 는 수직하중,  $\alpha$ 는 썬크의 각도로  $15^\circ$ 이다. 썬크분열시험에서 재료의 변형 크기는 균열입구열림변위(crack mouth opening displacement, CMOD)로 정의할 수 있다. CMOD는 식 (2)를 통해 계산한다. 분열하중과 CMOD의 그래프에서 곡선아래 면적을 이용하여 파괴에너지를 구할 수 있으며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$CMOD = 2\delta', \delta' = \delta'' \tan \alpha \quad (2)$$

$$W_f = \int F_s d(\delta') \quad (3)$$

여기서  $\delta'$ 는 물리의 수평방향 변위,  $\delta''$ 는 썬크의 수직방향 변위이며  $W_f$ 는 파괴에너지를 나타낸다. 썬크분열시험에 사용된 시험장치는 INSTRON 5567 만능시험기와 온도 조건을 맞추주기 위해 INSTRON 3319-409 환경 용기(chamber)를 사용하였다. 입자강화복합재료는 점탄성 특성을 지니고 있기 때문에 시험속도의 영향을 분석하기 위하여 정적 및 동적인 상태에서의 CMOD에 따른 분열하중의 거동을 비교 평가하고자 5, 50, 500 mm/min의 3중으로 선택하였다[7]. 시험 온도는  $60^\circ\text{C}$ , 상온,  $-20^\circ\text{C}$ ,  $-40^\circ\text{C}$ ,  $-60^\circ\text{C}$ 에서 수행하였다. 시험 온도는 보관 온도인  $-55^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$  범위 내 온도에서 4가지를 선정하였으며 유리전이온도와 가까운 온도인  $-60^\circ\text{C}$ 를 결정하였다. 썬크분열시험에는 각 조건당 1회씩 수행하여 15개의 시편을 사용하였다.

### 2.3 디지털 이미지 상관법

DIC 기법은 Fig. 3과 같이 측정하고자 하는 물체의 표면에 스펙클 패턴을 입힌 뒤 이미지 촬영을 하여 변형 전 상태와 변형 후 상태의 상관관계를 분석하여 변형률을 측정하는 기법이다[8, 9]. 본 연구에서는 시편에 흰색 래커(lacquer)를

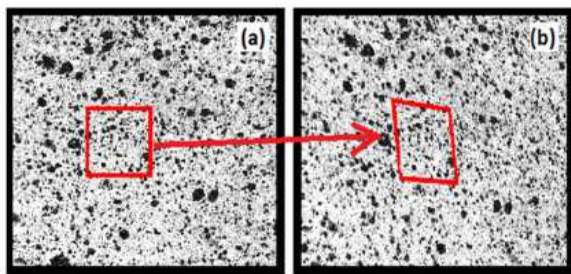


Fig. 3. Speckle patterns of reference and deformed subsets[7]

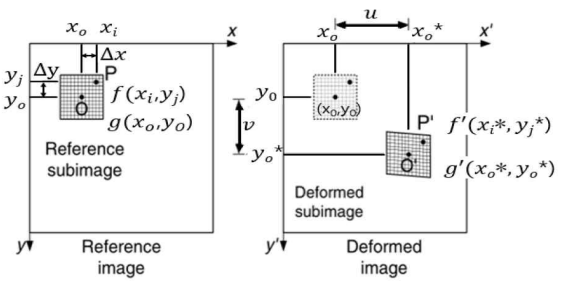


Fig. 4. Schematics of reference and deformed subsets

먼저 도포한 뒤 검은색 래커를 무작위로 분사하여 Fig. 3과 같은 스펙클 패턴을 만들었다. 이미지 촬영은 WST 시험과 동시에 이루어졌으며 CCD카메라를 이용하였다. Fig. 4는 측정영역의 변형 전과 변형 후의 이미지를 보여준다. 식 (4)는 측정된 이미지에서 회색도 값 경로를 계산한 상관관계수  $C(X)$ 를 나타낸 것으로 임의의 두 점에서 위치는 식 (5)와 (6)과 같이 나타낸다[9].  $f(x_i, y_i)$ 는 기존 이미지 좌표에서 점 P에 대한 회색도 값이며,  $f'(x_i^*, y_j^*)$ 는 변형된 이미지 좌표에서 점 P'의 회색도 값이다. 식 (4)에서  $\bar{f}$ 와  $\bar{f}'$ 는 각각  $f(x_i, y_i)$ ,  $f'(x_i^*, y_j^*)$ 의 평균 회색도 값이다.

$$C(X) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}] \cdot [f'(x_i^*, y_j^*) - \bar{f}']}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_j) - \bar{f}]^2 \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f'(x_i^*, y_j^*) - \bar{f}']^2}} \quad (4)$$

$$x_i^* = x_0 + \Delta x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (5)$$

$$y_j^* = y_0 + \Delta y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (6)$$

### 2.4 CTOD 및 CTOA 분석

일반적으로 제시되고 있는 파괴역학적 변수는  $K_{IC}$ ,  $K-R$ 곡선,  $J_{IC}$ ,  $J-R$ 곡선, CTOD 등이 있다. 파괴역학적 변수들은 여러 기관들에 의해 제시되었으며 표준들 간의 내용이나 규정에 약간의 차이가 있다[6,11,12]. CTOA는 최근 광학장치의 발전으로 인해 CTOD에 대체되는 매개변수로 적용이 가능하다. CTOD 및 CTOA는 Fig. 5와 같이 정의되며, CTOD는 균열진전과 함께 DIC에 의해 측정된다. CTOA는 CTOD 및 균열진전길이  $d$ 를 이용하여 계산되며 식 (7)과 같다[10].

$$CTOA = \tan^{-1} \frac{CTOD}{d} \quad (7)$$

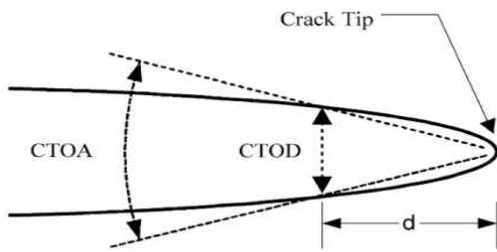


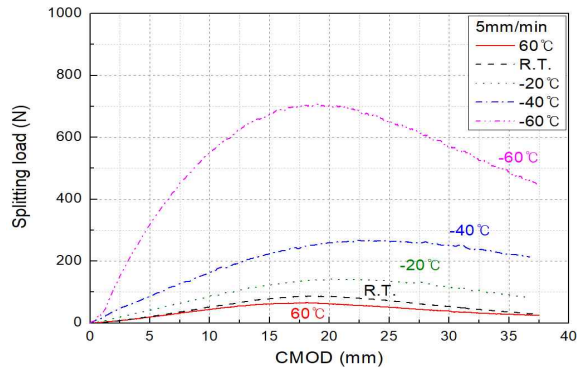
Fig. 5. Definition of CTOD and CTOA[9]

일반적인 금속에서 CTOA는 초기 균열이 진전함에 따라 급격히 증가하다 감소하여 일정한 임계 CTOA값을 가진다. 이는 복잡한 이론이 개입되지 않으며 실험적인 정확성이나 용이함이 우수하다[13]. 본 연구에서는 블런팅과 샤프닝을 반복하여 불연속적인 균열진전을 보이는 입자강화복합재료의 균열진전을 모사하기 위해 분석하였다.

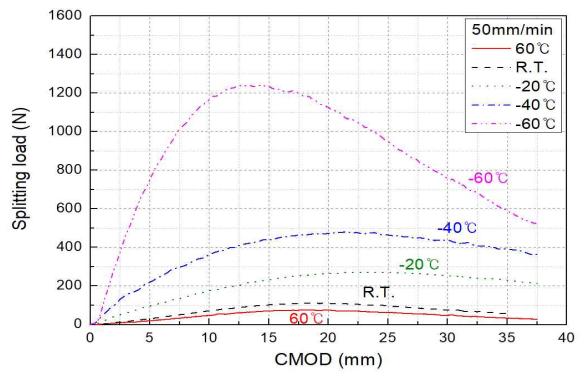
### III. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 썩기분열시험 결과

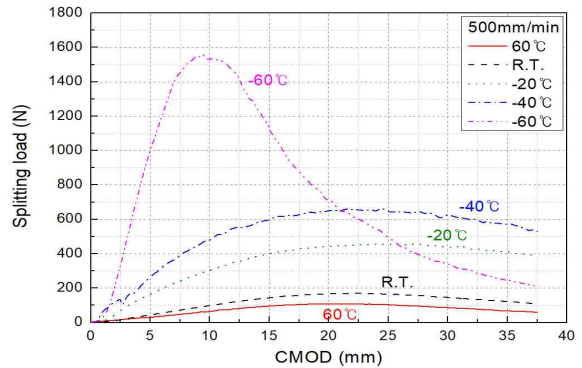
Figure 6은 다양한 시험 온도에서 각각 5, 50, 500mm/min의 시험 속도에 따라 썩기분열시험을 수행하여 얻은 분열하중-CMOD 결과를 정리한 것이다. 분열하중-CMOD 그래프를 보면 모든 조건에서 CMOD가 증가하면 분열하중이 증가하다 최대분열하중에 도달한 뒤 감소하는 경향을 나타내었다. 각 시험 속도에서 온도가 감소할수록 최대분열하중은 증가하는 것을 알 수 있으며 -60℃에서 크게 증가하였다. 이는 온도가 감소할수록 강도가 증가하기 때문이며 서보휘 등[14]이 유사한 재료를 이용하여 파단 후에 SEM 분석한 결과와 같다. 시험 속도 50mm/min일 때 나성현 등[10]의 썩기분열시험 결과와 유사한 경향을 보이며 최대분열하중은 보다 작게 나타났다. 한편 -60℃에서 최대분열하중이 크게 증가하는 것은 유리전이온도에 가까워짐에 따라 유리전이거동에 의한 재료의 물성에 변화가 생겨 취성거동이 나타나기 때문이다. 일반적으로 고분자 물질은 온도가 감소함에 따라 특정 온도영역에서 급격히 굳는 현상이 발생하며 재료의 물성이 크게 변화한다. 유리전이 온도 아래에서는 취성거동을 보이며 높은 온도에서는 점성이 커진다. Bohn 등[15]은 HTPB기반 입자강화복합재료의 DMA(dynamic mechanical analysis) 결과 약 -60℃ 부근에서 유리전이거동을 보인다고 하였다. 또한 시험 속도가 증가할수록 최대 분열하중이 증가하는



(a) The displacement rate, 5 mm/min



(b) The displacement rate, 50 mm/min



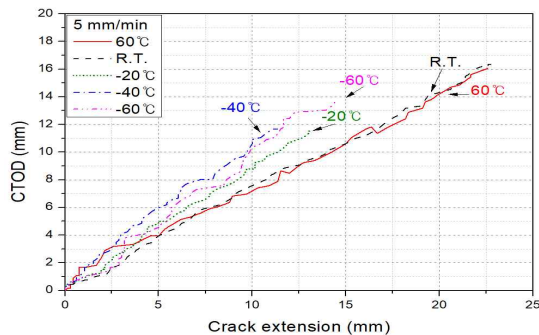
(c) The displacement rate, 500 mm/min

Fig. 6. Splitting load-CMOD curves from wedge splitting test

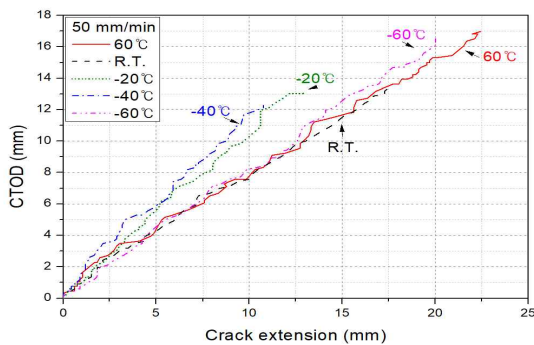
경향을 보이고 있다. 이는 응력완화 현상 때문으로, 응력완화 특성을 가지는 점탄성 재료에 일정한 변형률을 유지시키는 경우 그 응력은 시간이 지남에 따라 점차 감소한다[16]. 따라서 속도가 빠른 경우 낮은 때보다 분열하중이 크게 나타난다. Han 등[5]은 본 연구에서 사용한 재료와 유사한 점탄성 특성을 지닌 HTPB 추진제에 대해 응력완화 영향을 포함하는 Rate-dependent Cohesive Zone Model을 이용하여 파괴 속도 영향을 연구한 결과 실험과 잘 일치하는 것을 확인하였다.

### 3.2 CTOD 및 CTOA 분석 결과

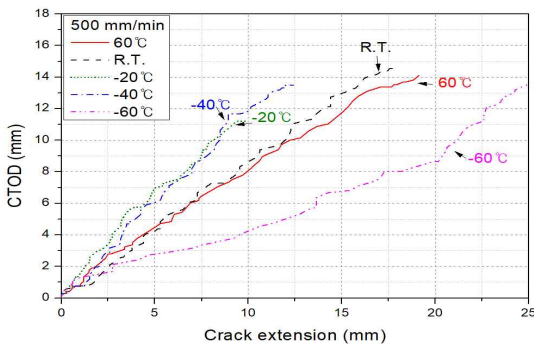
Figure 7은 CCD 카메라로 촬영된 이미지를 기반으로 DIC를 이용하여 도출한 CTOD를 나타낸 것이다. CTOD를 분석한 결과 온도가 감소할수록 동일한 균열길이에서 더 큰 CTOD 값을 볼 수 있다. 이는 온도가 감소함에 따라 균열저항이 증가한다는 것을 나타낸다. -60°C를 제외한 각 온도에서 CTOD 결과를 보면 시험 속도와 상관없이 유사한 CTOD 값을 나타내었으며 나성현 등 [10]의 시험 결과와 비슷하다. -60°C에서 CTOD 값은 시험 속도가 증가할수록 낮아진다. 이는 시험 속도가 빠를수록 유리전이에 의한 취성거동의 영향이 커져 낮은 CTOD 값에서 큰 균열길이를 보인다[10].



(a) The displacement rate, 5 mm/min



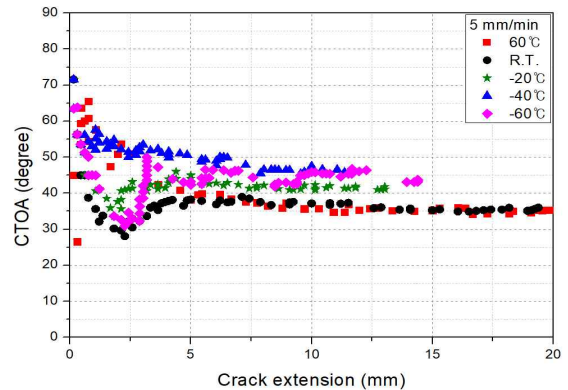
(b) The displacement rate, 50 mm/min



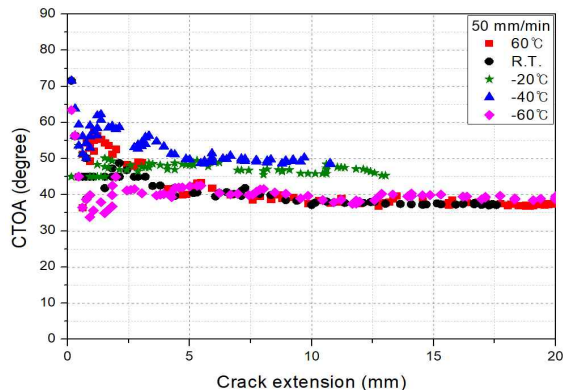
(c) The displacement rate, 500 mm/min

Fig. 7. CTOD-crack extension curves

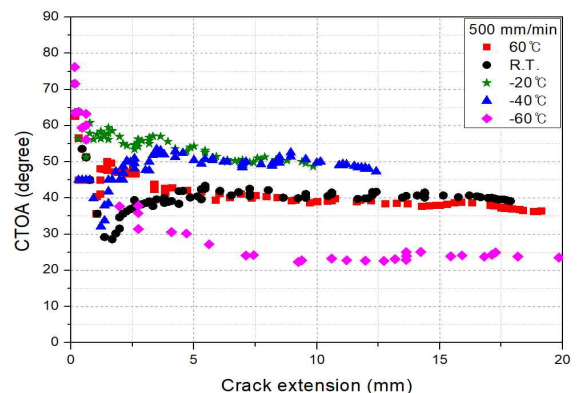
Figure 8은 식 (7)을 통해 CTOA를 분석하여 나타낸 것이다. 분석한 결과를 보면 초기에는 불안정한 영역을 보이며 균열이 약 5mm 진전한 뒤 안정영역으로 수렴되는 것을 알 수 있다. CTOA 결과 값도 CTOD와 유사한 경향을 보였는데 온도가 감소할수록 높은 CTOA 값을 보였으며 시험 속도와 무관하게 비슷한 결과를 보였다. -60°C에서 CTOA의 안정영역 값을 비교해 보면 CTOD 결과와 유사한 경향을 보였다.



(a) The displacement rate, 5 mm/min



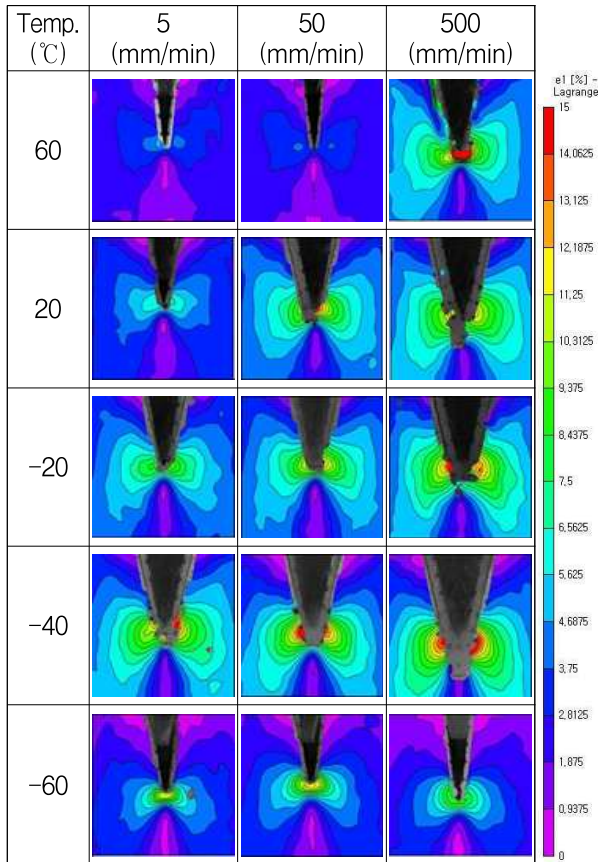
(b) The displacement rate, 50 mm/min



(c) The displacement rate, 500 mm/min

Fig. 8. CTOA-crack extension curves

**Table 1. Results of major strain contour at crack length 3mm**



**3.3 DIC 분석 결과**

DIC기법을 이용하여 각 실험 조건에서 균열길이 3mm일 때 변형률장을 분석한 결과를 Table 1에 도시하였다. Table 1로부터 온도가 감소하면 변형률이 커지는 것을 확인하였으며 이는 같은 균열길이에서 더 큰 균열저항성을 가지는 것으로 판단된다. -60°C에서는 유리전이거동에 의해 취성을 보이기 때문에 변형률이 작게 나타났다. 동일한 온도에서 시험 속도가 증가하게 되면 변형률이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 속도가 빠를수록 점탄성 재료의 특성인 응력완화현상이 감소하여 큰 변형률이 발생하는 것으로 보인다. -60°C에서는 취성거동이 지배적이기 때문에 속도와 무관하게 유사한 변형률장을 보였다.

**IV. 결 론**

본 연구에서는 입자강화 복합재료의 균열저항성을 평가하기 위해 썬치분열시험을 수행하였으며 DIC 분석을 수행하였다. 시험은 다양한 온도와 속도에서 이루어졌으며 분석결과 다음과 같은

결론을 얻었다.

(1) 썬치분열시험 결과로부터 온도가 감소할수록 입자강화 복합재료의 인장강도가 증가하기 때문에 분열하중이 증가하며 -60°C에서 유리전이거동에 의한 취성거동을 보여 분열하중이 크게 증가한다.

(2) 썬치분열시험에서 시험 속도가 증가하면 응력완화현상이 감소하여 시편 내부에 높은 응력이 잔류하기 때문에 분열하중이 증가한다.

(3) CTOD 및 CTOA 분석결과 두 변수는 온도가 감소할수록 증가하며 -60°C에서 취성을 나타내기 때문에 두 변수의 결과가 낮은 값을 보인다. 시험 속도는 두 변수에 큰 영향을 미치지 않으며 유사한 값을 보인다.

(4) DIC 분석결과 온도가 감소하면 변형률이 커지며 -60°C에서 취성거동을 보여 낮은 변형률을 보인다. 시험 속도가 증가하면 변형률이 커지는데 이는 응력완화현상이 감소하기 때문이다.

**References**

- 1) Kim, C. K., Yoo, J. C., Hwang, G. S., and Yim, Y.J., "Properties of HTPB/AP/Butacene Propellants," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 9, No. 2, 2005, pp.40~45.
- 2) Liu, C. T., "Crack Growth Behavior in a Solid Propellant," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 56, No. 1, 1997, pp.127~135.
- 3) Tussiwand, G. S., Saoirna, V. E., Terzenbach, R., and De Luca, L. T., "Fracture Mechanics of Composite Solid Rocket Propellant Grains: Material Testing," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 1, 2009, pp.60~73
- 4) Belrhiti, Y., Pop, O., Germaneau, A., Doumalin, P., Dipre, J. C., Harmuth, H., Huger, M., and Chotard, T., "Characterization of Timber Fracture using the Digital Image Correlation Technique and Finite Element Method," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 35, 2015, pp.823~829.
- 5) Han, B., Ju, Y., and Zhou, C., "Simulation of Crack Propagation in HTPB Propellant using Cohesive Zone Model," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 26, 2012, pp.304~317.
- 6) ASTM, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness

KIC of Metallic Materials, ASTM E399-09, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, Philadelphia, P.A., USA, 2009, pp.1~33.

7) Miller, T. C., "Poisson's Ratio Extrapolation from Digital Image Correlation Experiments (No. AFRL-RQ-ED-TP-2013-154)," Air Force Research Lab Edwards AFB CA Rocket Propulsion DIV., 2013.

8) Na, S. H., Choi, H. S., Oh, K. K., and Kim, J. H., "Evaluation of Crack Resistance Properties on Particulate Reinforced Composite Propellant using Digital Image Correlation," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 19, No. 6, 2015, pp.26~32.

9) Zhang, H., Huang, G., Song, H., and Kang, Y., "Experimental Investigation of Deformation and Failure Mechanisms in Rock under Indentation by Digital Image Correlation," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 96, No. 1, 2012, pp.667~675.

10) Na, S. H., Lee, J. W., and Kim, J. H., "Crack Resistance Behavior Using Digital Image Correlation and Crack Tip Opening Angle on Particulate Reinforced," *Transactions of the Korea Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 40, No. 12, 2016, pp.1021~1026.

11) BSI, Fracture Mechanics Toughness

Tests. Method for Determination of  $K_{IC}$ , Critical CTOD and Critical J values of Metallic Materials, BS 7448-1:1991, British Standards Institution, London, 1991.

12) ASTM, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM E1820-17a, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, Philadelphia, P.A., USA, 2017.

13) Newman, J. C., James, M. A., and Zerbst, U., "A Review of the CTOA/CTOD Fracture Criterion," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, No. 3, 2002, pp.371~385.

14) Seo, B. H., and Kim, J. H., "Effect of Temperature and Thickness on Fracture Toughness of Solid Propellant," *Transaction Korea Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 37, No. 11, 2013, pp.1355~1360.

15) Bohn, M. A., and Elsner, P., "Aging of the Binders GAP-N100 and HTPB-IPDI Investigated by Torsion DMA," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 24, No. 3, 1999, pp.199~205.

16) Seo, B., H., and Kim, J. H., "Estimation of Master Curves of Relaxation Modulus and Tensile Properties for Solid propellant," *Advanced Materials Research*, Vol. 871, 2015, pp.247~252.