

디지털 화상관련법 및 균열선단열림각도를 이용한 입자강화 복합재료의 균열저항거동[§]

나성현* · 이정원* · 김재훈*†

* 충남대학교 기계공학과

Crack Resistance Behavior Using Digital Image Correlation and Crack Tip Opening Angle on Particulate Reinforced Composite

Seong Hyeon Na*, Jeong Won Lee* and Jae Hoon Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received May 13, 2016 ; Revised September 20, 2016 ; Accepted October 10, 2016)

Key Words: Digital Image Correlation(디지털 화상관련법), Crack Tip Opening Angle(균열선단열림각도), Particulate Reinforced Composite(입자강화 복합재료), Wedge Splitting Test(썰기분열시험)

초록: 본 연구는 점탄성을 가진 HTPB 입자강화 복합재료의 균열저항에 대하여 썰기분열시험 및 균열선단열림각도를 이용하여 평가하였다. 일반적으로 균열진전 함수로서 균열선단열림각도는 파괴저항을 결정하기 위해 사용되며, 수치적으로 일정한 값을 가진다. 디지털 화상관련법은 임계 균열선단열림각도를 도출하기 위하여 균열선단열림변위 및 균열진전길이를 측정하기 위해 사용되었다. 본 연구의 시험 결과에서 입자강화 복합재료의 임계 균열선단열림각도는 균열초기 진전 후 일정한 값을 가진다. 임계 균열선단열림각도는 50℃에서 -40℃로 온도의 감소에 따라 증가한다. 이러한 임계 균열선단열림각도는 입자강화 복합재료의 파괴역학 파라미터로 사용될 수 있다.

Abstract: In this study, crack resistance is evaluated by the crack tip opening angle (CTOA) using a wedge splitting test (WST) on a viscoelastic particulate reinforced composite based on an HTPB binder. Generally, CTOA, as a function of crack extension, is used in order to determinate fracture resistance and has a steady state relative angle. Digital image correlation (DIC) is used to measure the crack tip opening displacement (CTOD) and crack extension for the critical crack tip opening angle (CTOAc). In these results, the CTOAc value of a particulate reinforced composite tends to approach a constant angle after a small amount of crack extension. The CTOAc value increases with decreasing temperature, from 50°C to -40°C. These CTOAc values may be used to measure fracture mechanics parameters for particulate reinforced composite.

1. 서 론

입자강화 복합재료는 미사일이나 항공기의 추진제로 사용되는 재료이다. 그 중 HTPB(hydroxyl-terminated polybutadiene)를 기반으로 하는 입자강화 복합재료는 다른 입자강화 복합재료와 비교하

여 높은 비추력과 낮은 기계적 성질을 가지고 있다. 이러한 입자강화 복합재료의 손상은 아주 작은 균열에서부터 시작한다. 아주 작은 균열은 운용 중에 점차 성장하여 결과적으로 기계적인 문제를 일으킬 수 있다. 이러한 입자강화 복합재료에 대한 연구는 많은 연구자들을 통해 이루어지고 있으며, 그 중 균열저항 파라미터(parameter)를 정립하려는 노력이 계속되고 있다. 입자강화 복합재료는 점탄성 거동을 나타내기 때문에 선형탄성 파괴역학 파라미터인 K를 규정짓기 어렵다.

§ 이 논문은 2016년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2016.4.7.-8., 서귀포 KAL호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, kimjhoon@cnu.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

점탄성 재료에 대한 K 나 J 적분은 균열이 성장하는 동안 변화하는 값이기 때문에 이 값에 의존하여 균열저항상수의 임계값을 결정하는데 문제점이 있다. 또한 J 와 $CTOD$ 결정은 실험이나 이론에서 경험적인 측면에 의존적인 요소가 개입될 우려가 있다고 알려져 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 본 연구에서는 균열선단열림각도 (crack tip opening angle, 이하 $CTOA$)를 통해 균열성장 파라미터를 도출하였다. 균열성장 파라미터는 균열성장 저항함수에 의존하며, 균열개시는 $CTOD$ 에 기초로 한다. 균열성장 저항함수는 임계 균열선단열림각도(critical crack tip opening angle, 이하 $CTOA_c$)로 표시되며, 재료의 특성에 따라 일정한 재료상수로 존재한다.

현재까지 입자강화 복합재료의 기계적 특성 평가에 적합한 이론이나 명확한 시험 규격이 없기 때문에 많은 연구자들은 일반적인 파괴역학적 접근방법을 통한 실험을 진행하고 있다.

입자강화 복합재료에 관련된 연구동향을 살펴보면, Tussiwand 등⁽¹⁾은 AP 산화제 및 HTPB 바인더로 구성된 입자강화 복합재료를 이용하여 썬기 분열시험(wedge splitting test, 이하 WST)의 시험편을 제작하였다. WST 시험은 선형탄성 파괴역학을 기초로 하여 다양한 온도에서 수행하였다.

균열성장 파라미터인 $CTOA$ 에 관련된 연구동향을 살펴보면, Newman 등⁽²⁾은 여러 연구자들의 알루미늄 합금을 이용하여 $CTOA$ 및 $CTOD$ 파괴기준을 통합하여 분석하고, 일정한 $CTOA$ 를 통해 파괴기준을 제시하였다. Lacroix 등⁽³⁾은 디지털 화상관련법(digital image correlation, 이하 DIC)를 이용하여 용접된 용융 금속에 대하여 $CTOA$ 를 분석하였다. 또한 Zenkun 등⁽⁴⁾은 균열진전의 불안정성을 예측하기 위하여 $CTOA$ 및 $CTOD$ 를 이용하여 재료의 파괴저항을 묘사하였다.

본 논문에서는 HTPB를 기반으로 하는 입자강화 복합재의 균열저항 파라미터인 $CTOA$ 를 분석하였다. 파괴시험은 WST 시험편을 이용하여 다양한 온도에서 수행하였다. 시험 온도는 $50 \sim -60^\circ\text{C}$ 범위에서 진행하였고, 시험 결과를 통해 입자강화 복합재의 균열진전거동을 파악하였다. CCD 카메라를 이용하여 시험 표면에 도포된 지점을 이용하여 $CTOD$ 를 도출하고, 도출된 $CTOD$ 를 이용하여 $CTOA$ 를 계산하였다. 다양한 온도에서 $CTOA_c$ 를 예측하여 입자강화 복합재료의 파괴 파

라미터를 제시하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험 재료 및 방법

본 연구에서 사용된 시험 재료는 점탄성 거동을 나타내는 HTPB 고분자 바인더, AP 산화제 및 Al 연료 입자들로 구성된 입자강화 복합재료이다. Fig. 1은 입자강화 복합재료를 이용하여 제작된 WST 시험편의 형상이다. 시험편은 높이 85 mm, 폭 120 mm, 두께 50 mm로 구성되어 있다. 그루브를 장착할 수 있는 노치는 깊이 18 mm, 폭 40 mm로 제작하였다. 예비균열은 25 mm의 깊이로 예리한 나이프를 사용하였다. WST 시험편을 이용한 이유는 입자강화 복합재료의 특성상 일반 금속에 비해서 강도가 매우 약하기 때문에 시험 치구에 직접적으로 물리면 짓눌려버리는 현상을 보완하기 위해서이다. 식 (1)은 분열하중에 대한 계산식이다.

$$F_s = \frac{1}{2 \tan \alpha} F_v \quad (1)$$

여기서, F_s 는 분열하중, F_v 는 썬기가 물리를 통과할 때 가해진 수직하중, α 는 썬기의 각도로 15° 이다. 썬기분열시험에서 재료의 변형 정도를 나타내는 컴플라이언스(compliance)는 단위 하중에 대한 균열입구개구변위(crack mouth opening displacement, $CMOD$)로 정의된다.⁽¹⁾

시험 장비는 INSTRON 5567과 온도를 조절해주는 환경용기(chamber)를 사용하였다. 시험 온도는 재료의 구조물에 사용되는 작동 온도 범위인



Fig. 1 Static system of WST specimen

50℃, 25℃의 상온, -10℃, -40℃ 및 취성거동을 나타내는 T_g 온도인 -60℃로 선정하였다. 시험 속도는 50 mm/min로 변위제어 방식으로 시험하였다. CCD 카메라(charge coupled device camera)는 시험편의 균열진전 길이를 관찰하며, 측정하는데 사용하였다. 디지털 화상관련법의 분석은 GOM사의 ARAMIS 소프트웨어를 사용하였다.

2.2 디지털 화상관련법

디지털 화상관련법은 시편 표면에 변위를 도출하는 비접촉식 변위 측정기술이다. 디지털 화상관련법의 개념은 변형 전 상태와 변형 후 측정영역의 상관관계를 패턴의 분석을 통해 얻어지는 방법이다. 또한 이러한 방법은 수치적인 매핑과 상호 상관계수 $C(X)$ 를 이용하여 변형 후에 측정된 영역의 작은 사각형 서브셋(subset)을 매칭하여 수행된다. Fig. 2는 측정 영역의 변형 전과 후의 측정영역을 보여준 것이다. 여기서, $f(x_i, y_j)$, $g(x_o, y_o)$ 는 변형 전 측정영역 좌표의 회색도 값이고, $f(x_i^*, y_j^*)$, $g(x_o^*, y_o^*)$ 는 변형 후 측정영역 좌표의 회색도 값을 나타낸 것이다. 식 (2)는 상관계수 $C(X)$ 를 나타낸 것으로 디지털 화상관련법을 통해 변형 전과 후 측정영역의 회색도 값의 경로를 계산하여 나타낸다. 변형 전과 후 측정영역 서브셋 사이의 유사도를 측정하기 위해 상관계수 $C(X)$ 를 사용한다.

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

여기서, \bar{f} 와 \bar{g} 는 $f(x_i, y_j)$, $g(x_i^*, y_j^*)$ 의 평균 회색도 값을 나타낸 것이다. 식 (3), (4)는 변형 후 측정영역의 좌표 x^* , y^* 를 나타낸 것이다.

$$x^* = x_0 + \Delta x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (3)$$

$$y^* = y_0 + \Delta y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (4)$$

식 (5)는 6개의 변형 성분을 벡터 X로 나타낸 것이다. 벡터 X의 6개 성분이 정확하게 측정되면 상관계수 값은 하나로 결정될 것이다.^(5,6)

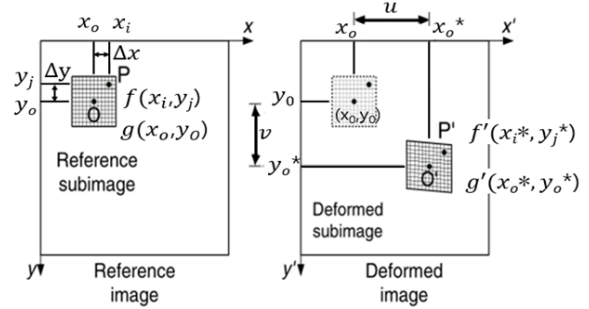


Fig. 2 Schematics of reference and deformed subsets

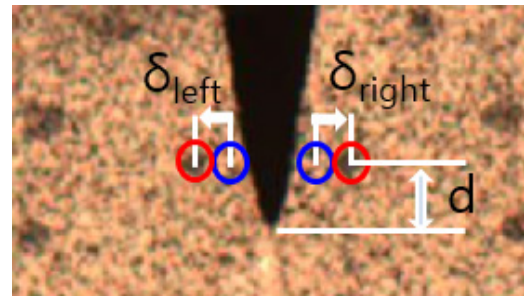


Fig. 3 Determination of CTOD

$$X = \left(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5)$$

변형 전과 후의 측정영역에 대한 정보를 분석하기 위하여 백색과 흑색의 래커를 무작위로 분사하여 격자무늬(speckle patterns)를 시험편 표면에 만들었다.

2.3 균열선단열림각도(CTOA) 결정

균열선단열림변위, CTOD는 균열진전에 대한 파괴저항을 모사하기 위해 파괴 파라미터로 사용된다. Fig. 3은 CTOD를 나타낸 것으로 균열선단에서 일정한 거리에 찍힌 두 점을 이용하여, 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

$$CTOD = \delta_{left} + \delta_{right} \quad (6)$$

여기서, δ_{left} 는 균열선단 왼쪽의 2.5 mm 만큼 떨어진 한 점에서 -x 방향으로 이동한 변위를 나타낸 것이다.

δ_{right} 는 균열선단 왼쪽의 2.5 mm 만큼 떨어진 한 점에서 +x 방향으로 이동한 변위를 나타낸 것이다. 또한 a는 균열길이를 나타낸 것이다. CTOD는 이러한 변위의 합을 통해 도출할 수 있다.

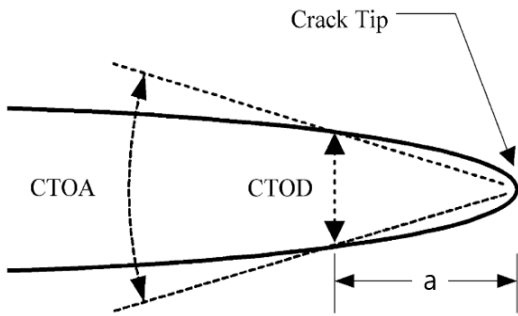


Fig. 4 Determinations of CTOA, CTOD, a

Fig. 4는 CTOA 및 CTOD를 정의한 것을 나타낸 것이다. CTOA와 CTOD는 균열진전과 함께 재료의 파괴를 적용하는데 사용되는 파괴기준들이다. 재료의 안정한 균열성장의 현상은 모드 1 하중하에 탄소성 유한요소법을 이용하여 널리 연구가 진행되었다. 이 때 CTOA는 변위측정으로부터 균열선단의 파괴저항을 분석하는데 사용된다. 이러한 CTOA는 균열진전을 모사하는데 효과적으로 사용되며, 전체 파괴에 대한 기준으로 제시될 수 있다. 균열 선단으로부터 특정한 거리에 위치한 CTOA_c는 파괴과정동안 안정한 균열성장과 불안정한 균열성장을 제시하는데 사용된다. 현재 일정한 CTOA는 항공기 동체, 복잡한 구조물 및 파이프라인과 같은 수치적인 구조물 적용에 성공적으로 적용이 되었다. 본 연구에서는 이러한 CTOA를 이용하여 점탄성 재료인 입자강화 복합재료의 파괴기준을 모사하기 위하여 적용하였다. 식 (7)은 CTOA를 나타낸 것으로 CTOD와 균열길이, *d*를 통해 도출할 수 있다.

$$CTOA = 2 \tan^{-1} \frac{CTOD}{2d} \quad (7)$$

CTOA는 균열성장에 대한 거동을 나타내며, 재료의 특성에 따라 일정한 재료상수로 존재하며 K나 J와 같이 변화하는 값이 아니다.

Fig. 5는 일반적인 금속 재료의 CTOA 선도를 나타낸 것으로 불안정 영역과 안정 영역으로 구분될 수 있다.

CTOA는 초기 균열이 진전함에 따라 급격하게 증가하다가 감소하면서 일정한 CTOA값에서 수렴하게 된다. 이 때, 일정하게 수렴하는 CTOA값은 CTOA_c로 결정될 수 있다.

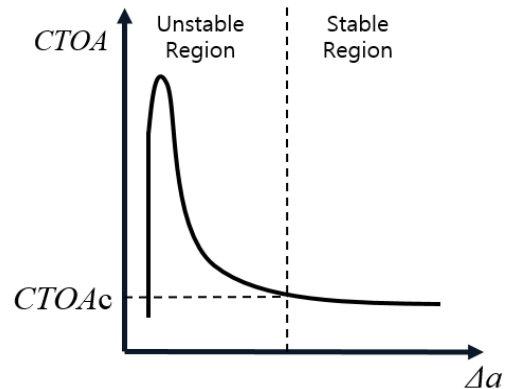


Fig. 5 General CTOA-Δa curve

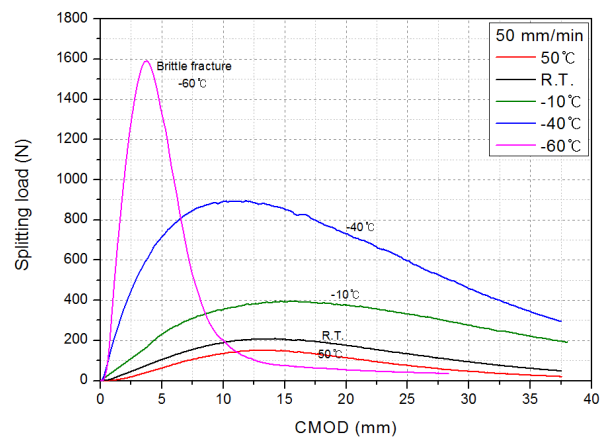


Fig. 6 Splitting load - CMOD curves at various temperatures

3. 결과 및 고찰

3.1 썩기분열시험 결과

Fig. 6은 다양한 시험 온도 조건에서 썩기분열 시험을 통해 도출한 분열하중-CMOD 곡선을 나타낸 것이다. 이 때, 분열하중은 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 분열하중은 CMOD가 증가할수록 증가하다가 감소하는 경향을 나타낸다. 최대 분열하중은 50°C에서 약 150N, 상온에서 약 205N, -10°C에서 약 390N, -40°C에서 약 900N, -60°C에서 약 1600N으로 온도가 감소함에 따라 증가폭이 커지는 것을 알 수 있다.

또한 온도가 감소할수록 재료의 연화구간의 경사가 급하게 나타나며 -60°C의 경우 두드러지게 나타난다. -60°C에서 재료는 취성거동을 나타났기 때문에 분열하중-CMOD 곡선은 급격하게 증가다가 감소한 후에 완만한 현상을 나타낸다. 이와 같은 현상은 서보휘 등^(9,10)이 동일한 재료의 파단

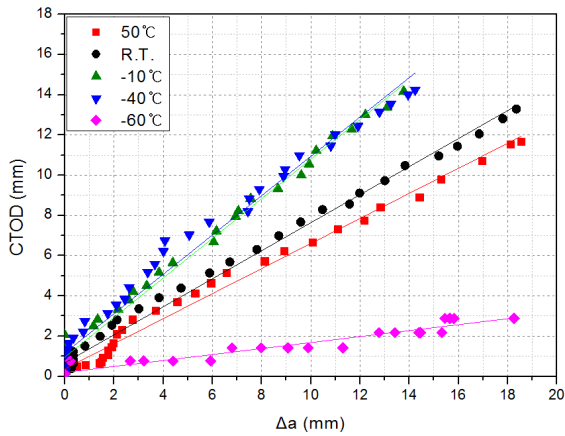


Fig. 7 CTOD- Δa curves at various temperatures

후에 SEM 분석한 결과와 유사하며, -60°C 에서 입자 파괴가 발생하여 취성 현상을 보이고, 그 외의 온도에서 입자들이 드웨팅(dewetting) 되어 떨어져 나가는 현상을 볼 수 있다. 그리고 50°C 에서 분열하중-CMOD 곡선의 경사는 매우 완만하게 나타나는데, 이는 재료가 점성의 영향이 많이 나타났기 때문으로 사료된다.

3.2 디지털 화상관련법을 이용한 CTOD

Fig. 7은 다양한 시험 온도 조건에서 Δa 따른 CTOD를 나타낸 것이다. Δa 는 초기 균열길이, a_0 에서 변화된 균열길이, a 의 차를 이용하여 도출하였다. 이 때 CTOD는 식 (6)을 이용하여 도출하였다. 시편 표면에 대한 이미지(image)는 CCD 카메라를 통해 0.5초 간격으로 캡처하였다. CTOD는 캡처된 이미지에서 균열선단의 5 mm 떨어진 양쪽에 표시한 두 점에 대하여 ARAMIS 소프트웨어를 이용하여 분석하였다. Fig. 7의 결과로부터, 점탄성 거동을 나타내는 재료는 온도가 감소함에 따라 응력완화현상이 감소하였기 때문에 CTOD는 크게 증가하는 것을 파악할 수 있으며, -60°C 의 경우 작은 CTOD와 함께 균열이 진전하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 균열선단열림각도(CTOA) 결정

Fig. 8은 입자강화 복합재료의 다양한 온도에서 CTOD 및 균열진전길이를 통해 식 (7)을 이용하여 균열진전에 따른 CTOA를 나타낸 것이다. CTOA는 전체적으로 균열진전에 따라 불안정영역에서 증가하다가 일정한 값으로 수렴한다. 특히 50°C 와 -60°C 의 CTOA 선도는 불안정영역을 측정하기 어렵다. 이는 입자강화 복합재료의 특성이

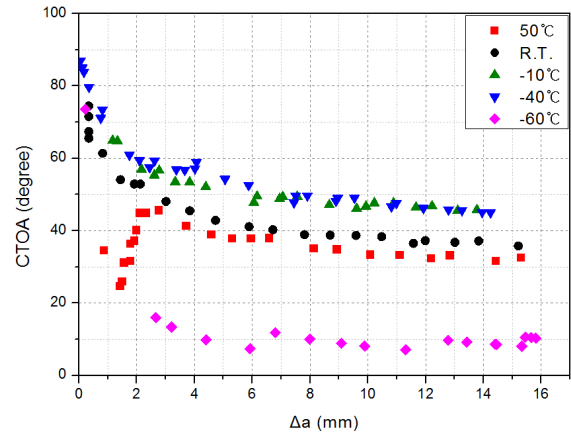


Fig. 8 CTOA- Δa curves at various temperatures

상온에 비해 온도가 증가함에 따라 점탄성 거동의 성질이 뚜렷해지며, 온도가 -60°C 에 가까워질수록 취성거동을 나타내기 때문이다. 안정영역에서 수렴된 $CTOA_c$ 를 측정된 결과, 50°C 에서 34° , 상온에서 40° , -10°C 에서 50° , -40°C 에서 51° , -60°C 에서 10° 를 나타낸다. 측정된 $CTOA_c$ 는 온도가 50°C 에서 -40°C 로 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타내지만, -60°C 의 경우 취성거동을 나타내기 때문에 작은 CTOA 값에서 균열이 진전하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 입자강화 복합재료의 $CTOA_c$ 는 균열 진전에 따른 파괴 파라미터로 이용하는 것이 가능하다고 판단된다.

4. 결론

입자강화 복합재료에 대한 균열저항을 평가하기 위해 WST 시험편을 사용하여 시험을 수행하였다. 균열저항 분석은 디지털 화상관련법을 이용하여 CTOD 및 균열진전길이를 측정하고 이로부터 CTOA 선도를 도출하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 썪기분열시험을 통해 분열하중-CMOD 곡선은 온도가 감소함에 따라 증가폭이 커지고, 온도가 증가함에 따라 완만한 경사를 보인다. 취성거동을 나타내는 -60°C 에서 급격한 증가와 감소를 확인할 수 있다.

(2) 비접촉 광학측정 기술인 디지털 화상관련법을 이용하여 분석한 CTOD는 50°C 에서 -40°C 로 온도의 감소에 따라 같은 균열진전길이에서 증가하고, -60°C 에서 CTOD는 취성거동을 보이기 때문에 다른 온도에 비해 작다.

(3) 점탄성 거동을 나타내는 입자강화 복합재료의 균열진전에 따른 $CTOA$ 선도는 균열초기 불안정영역에서 증가하다가 감소하며 안정영역에서 일정한 값으로 수렴한다. 일정한 값으로 수렴되는 $CTOA$ 값은 $CTOA_c$ 로 도출할 수 있다.

(4) 다양한 온도에 따른 $CTOA_c$ 는 온도의 감소에 따라 증가한다. -60°C 에서 $CTOA_c$ 는 취성거동을 나타내기 때문에 다른 온도에 비해 다소 작은 값을 나타낸다. 이러한 $CTOA_c$ 는 입자강화 복합재료의 췌기분열시험에 대한 균열저항의 파괴역학 파라미터로 이용할 수 있다.

참고문헌 (References)

- (1) Tussiwand, G. S., Saoirna, V. E., Terzenbach, R. and De Luca, L. T., 2009, "Fracture Mechanics of Composite Solid Rocket Propellant Grains: Material Testing," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 25, No. 1, pp. 60~73.
- (2) Newman Jr, J. C., James, M. A. and Zerbst, U., 2003, "A Review of the $CTOA/CTOD$ Fracture Criterion," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, No. 3-4, pp. 371~385.
- (3) Lacroix, R., Lens, A., Kermouche, G., Bergheau, J. M. and Klöcker, 2012, "Determination of $CTOA$ in the Molten Material of Spot Welds Using the Digital Image Correlation Technique," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 86, No. 1, pp. 48~55.
- (4) Zenkun, L., Ruixiang, B., Libo, D. and Wei, Q., 2012 "Noncontact Optical Measurement of $CTOA$ and $CTOD$ for Interface Crack in DCB Test," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 50, No. 7, pp. 963~970.
- (5) Zhang, H., Huang, G., Song, H. and Kang, Y., 2012, "Experimental Investigation of Deformation and Failure Mechanisms in Rock Under Indentation by Digital Image Correlation," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 96, No. 1, pp. 667~675.
- (6) Gao, G., Huang, S., Xia, K. and Li, Z., 2015, "Application of Digital Image Correlation (DIC) in Dynamic Notched Semi-Circular Bend (NSCB) tests", *Experimental Mechanics*, Vol. 55, No. 1, pp. 99~104.
- (7) Bohn, M. A. and Elsner, P., 1999, "Aging of the Binders GAP-N100 and HTPB-IPDI Investigated by Torsion DMA," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 24, pp. 199~205.
- (8) Liu, C. T., 1997, "Crack Growth Behavior in a Solid Propellant," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 56, No. 1, pp. 127~135.
- (9) Seo, B. H. and Kim, J. H., 2013, "Effect of Temperature and Thickness on Fracture Toughness of Solid Propellant," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 11, pp. 1355~1360.
- (10) Seo, B. H. and Kim, J. H., 2015, "Estimation of Mechanical Behavior for Particulate Reinforced Composites at Different Temperatures," *Advanced Materials Research*, Vol. 1110, pp. 32~35.