

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.3.253>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

입자강화 복합재료의 썬기분열시험 및 파괴에너지 평가[§]

나성현* · 김재훈*[†] · 최훈석* · 박재범** · 김신회** · 정규동**

* 충남대학교 기계공학부, ** 국방과학연구소

Wedge Splitting Test and Fracture Energy on Particulate Reinforced Composites

Seong Hyeon Na*, Jae Hoon Kim*[†], Hoon Seok Choi*, Jae Beom Park**,
Shin Hoe Kim** and Gyoong Dong Jung**

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

** Agency for Defense Development

(Received March 31, 2015 ; Revised January 18, 2016 ; Accepted January 27, 2016)

Key Words: Wedge Splitting Test(썬기분열시험), Fracture Energy(파괴 에너지), Digital Image Correlation(디지털 이미지 상관법), Crack Tip Opening Distance (CTOD, 균열선단 개구변위)

초록: 입자강화복합재료를 이용하여 썬기분열시험으로부터 얻은 파괴에너지, 균열진전 및 CTOD 에 대한 온도의 영향이 조사되었다. 이용된 재료는 고분자바인더, 산화제 및 알루미늄입자로 이루어져 있으며, 썬기분열시험의 시험 속도는 50 mm/min 이고, 온도 조건은 50℃, 상온, -40℃, -60℃이었다. 분열하중-CMOD 로부터 구한 파괴에너지는 50℃에서 -40℃까지 온도의 감소와 함께 증가한다. 또한 -60℃에서 입자강화복합재료의 강도는 유리전이온도에 의해 급격히 증가하며 취성거동을 보였다. 그리고 디지털 이미지 상관법을 이용하여 균열 선단부근에 대한 변형률장이 분석되었다.

Abstract: The effect of temperature on the fracture energy, crack propagation, and crack tip opening displacement (CTOD) was determined for particulate reinforced composites using the wedge splitting test. The materials that were used consisted of a polymer binder, an oxidizing agent, and aluminum particles. The test rate of the wedge splitting specimen was 50 mm/min, the temperature conditions were 50℃, room temperature, -40℃, and -60℃. The fracture energy, calculated from splitting load-crack mouth opening displacement(CMOD) curves, increased with decreasing temperature from 50℃ to -40℃. In addition, the strength of the particulate reinforced composites increased sharply at -60℃, and the composites evidenced brittle fracture due to the glass transition temperature. The strain fields near the crack tip were analyzed using digital image correlation.

- 기호설명 -

1. 서론

F_v : 수직 하중(N)
 F_s : 분열 하중(N)
 G_f : 파괴에너지(mJ/mm²)

입자강화 복합재료는 금속연료, 산화제 및 고분자 물질인 바인더를 결합하여 점탄성 특성을 나타내는 재료이며, 점화 시에는 고온 고압의 작동 환경이 조성되므로 구조재로 작용한다. 최근 이 재료는 각종 산업 분야에서 다양하게 사용되기 때문에 기계적 특성을 분석하고 평가하여 제작 과정 및 제작 환경을 개선하는데 중점을 두고 있다. 입자강화 복합재료는 사용 용도에 따라 다양한 그레인(grain)의 형상으로 제작되는데, 이러한 그레인은

[§] 이 논문은 2015년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2015. 4. 2-3., 서귀포 KAL 호텔) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, kimjhoon@cnu.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

운송, 경화 반응 중의 열적 변화, 점화 시 급격한 내부 압력 상승 등의 내·외부 요인들에 의해 응력이 집중하는 취약부위에 균열이 발생할 수 있다. 이 때 취약부의 균열은 계속적으로 진전하게 되고, 연소 표면적이 넓어져서 과연소로 인하여 점화 시에 성능이 감소될 수 있다. 따라서 이러한 입자강화 복합재료의 파괴역학적 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

국내외에서 입자강화 복합재료의 균열 문제에 대한 다양한 파괴역학적 파라미터 연구가 진행되고 있다. Liu⁽¹⁾는 다양한 온도 및 시험 속도 조건에서 모서리 균열 시편을 사용하여 입자강화 복합재료의 균열전과거동을 연구하였다. Schapery⁽²⁾는 선형 점탄성 재료의 크립트 컴플라이언스, K_I 과 파괴에너지와의 상관관계를 확인하기 위해 시간 의존적 파괴거동 이론을 보고하였다. Tussiwand⁽³⁾는 AP-HTPB (ammonium perchlorate hydroxyl terminated polybutadiene) 기반의 혼합형 입자강화 복합재료에 대한 선형 탄성 및 비선형 파괴역학에 대한 연구를 수행하였다. 또한 다양한 온도 조건에서 일반적인 콘크리트의 에너지 해방율을 구하는 방법인 췌기분열시험을 입자강화 복합재료에 적용하였다. Kwon 등⁽⁴⁾은 높은 변형속도에서 노치를 지니고 있는 점탄성 성질의 입자강화 복합재료에 대한 균열 성장과 손상을 연구하였다. Kakavas⁽⁵⁾는 입자강화 복합재료의 응력완화 및 크립트 시험을 수행하였으며, 이들 연구 결과에서 재료의 대변형은 연속체의 대변형으로 설명될 수 있다고 보고하였다. 이러한 연구동향에서 볼 수 있듯이 입자강화 복합재료의 파괴역학적 파라미터에 대한 평가는 선형 점탄성 이론을 이용하고 있다.

본 연구에서는 HTPB의 입자강화복합재료를 이용하여 온도 변화에 대한 췌기분열시험을 수행하고 균열길이, 균열선단 개구변위 및 파괴에너지를 도출하며 디지털 이미지 상관법을 이용하여 표면 변형률장을 가시화하였다.

2. 시험 방법

2.1 재료 및 시편

사용된 재료는 유리전이 온도보다 낮은 온도에서 유리화 같이 거동하고, 유리전이 온도 이상에서 고무의 성질을 가진 고체로 점탄성 거동을 나타내는 입자강화 복합재료이다. 재료는 HTPB 바인더 소재로 구성되어 있다. Fig. 1은 췌기분열시험 시편의 형상 및 치수를 나타낸 것이다. 시편은 높이 85 mm, 폭 120 mm, 두께 50 mm 이고, 노치는

18 mm 크기로 제작되었다. 그리고 길이 25 mm의 예비균열은 예리한 칼날을 사용하여 시편 중심에 생성시켰다.

2.2 시험 조건

시험온도는 운반이나 저장 운용 시 재료가 공기 중에 노출 될 수 있는 온도인 50°C, 상온, -40°C와 점탄성 소재의 재료 물성이 크게 변화되고 취성 파괴를 발생시키는 유리전이 온도인 -60°C에서 수행하였다. 시험 속도는 50 mm/min로 췌기가 롤러를 통과하면서 시편에 열림 하중이 작용되도록 하였다. 이 때 췌기가 최대로 내려가는 변위 설정을 70 mm로 각 온도에서 동일하게 시험을 하였다. 시험에 사용된 장비는 INSTRON 5567시험기와 INSTRON 3119 환경 단열용기를 이용하여 용기 내의 온도를 일정하게 유지하였다. CCD 카메라(charge-coupled device camera)는 시편의 표면, 균열 길이 및 CTOD를 측정하기 위해 사용되었다. 모든 시험은 열 평형을 유지하기 위해 3시간 동안 환경 단열용기에서 일정 온도를 유지한 후에 진행되었다. 표면 변형률장은 디지털 이미지 상관법을 이용한 GOM사의 ARAMIS소프트웨어를 사용하여 도출하였다.

2.3 시험 방법

Fig. 2는 췌기분열 시편에 치구를 장착한 모습을 나타낸 것이다. 췌기분열시험은 파괴인성시험에서 많이 다루어지고 있는 콤팩트 인장시편의 장점을 가지고 있다. 입자강화 복합재료의 특성상 시험 치구에 직접 맞물리게 되면 압축 변형되는 현상을 보완하게 된다.

췌기분열 시편을 이용한 시험 방법은 분열하중-CMOD 곡선을 도출할 수 있다.이 곡선 아래 면적은 파괴에너지로서 균열이 발생한 단면을 생성하

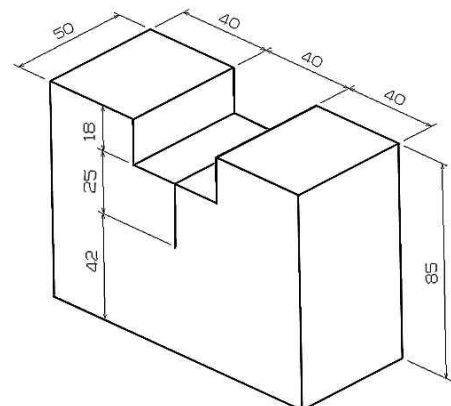


Fig. 1 Specimen for wedge splitting test (unit: mm)

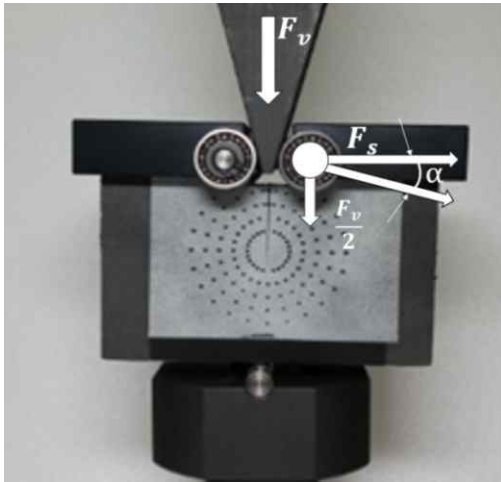


Fig. 2 Static system of wedge splitting test

는데 필요한 에너지이다. 파괴에너지는 재료의 강도가 증가함에 따라 증가한다. 여기서, 생성되는 균열 면은 응력 전달이 없는 완전히 분리된 파단 면적을 의미한다. 따라서 파괴에너지는 시험의 처음부터 시편이 파괴될 때까지 안정적으로 시험을 수행한다면, 시편에 가해진 외부에너지와 시편의 완전한 파괴에 사용되는 에너지가 같다는 개념을 이용하였다. CMOD 는 식 (1)을 사용하여 구한다. 여기서, d 는 종 방향 이동 거리, d' 는 횡 방향 이동 거리를 나타내고 있다. 본 연구에서 사용되는 썬기 치구의 각도는 30° 이다. 각도 α 는 썬기 각의 1/2 인 15° 이다. 횡 방향의 분열 하중(splitting load)은 식 (2)로부터 구할 수 있다. 여기서 F_s 는 분열 하중, F_v 는 수직 하중이다.

$$\tan\alpha = \frac{d'}{d}, d' = d \tan\alpha \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{CMOD} &= d' \times 2 \\ \tan\alpha &= \frac{F_v}{F_s}, F_s = \frac{F_v}{2 \tan\alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

W_f 는 분열 하중-CMOD 의 그래프 곡선 아래 면적을 이용하여 계산한 파괴일이다. 이는 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$W_f = \int F_s d (\text{CMOD}) \quad (3)$$

G_f 는 파괴에너지이며, 균열이 발생하는데 필요로 하는 에너지의 양으로 정의된다. 파괴에너지는 식 (4)와 같이 계산할 수 있다. A_f 는 초기 균열이 진전하여 형성된 전체 파단 면적이다.

$$G_f = W_f/A_f \quad (4)$$

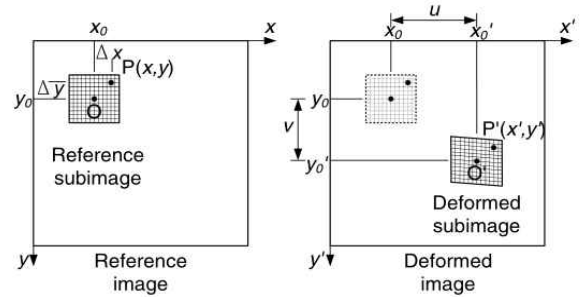


Fig. 3 Diagram for correlating the images between a reference and deformed sub images

입자강화 복합재료의 파괴변수는 CTOD 로 결정하여 평가하였다. CTOD 는 CCD 카메라를 이용하여 균열 선단에 위치한 균열 이탈의 대략적인 추정치를 파악하는 것이 가능하다.(6)

2.4 디지털 이미지 상관법

디지털 이미지 상관법은 측정하고자 하는 물체의 표면에서 얻어낸 이미지를 전 영역에서 평가할 수 있는 광학적 처리 기법 중에 하나이다. 디지털 이미지 상관법의 가장 큰 장점은 관심대상 영역에 대한 전체적인 변형률을 측정하는데 탁월한 특징을 나타낸다. 따라서 이러한 방법을 이용하여 시편 표면에 스페클 패턴(speckle pattern)을 만들어 패턴의 움직임을 추적해서 변형률장을 도출할 수 있다.

Fig. 3 은 측정 영역의 초기 지점 P, O 가 변형이 된 지점 P', O' 로 이동하는 것을 나타낸다. 식 (5), (6)은 두 점 사이의 관계를 나타내는데, x, y 는 변형 전 P 점, x_0, y_0 는 변형 전 O 점의 좌표를 나타내고, x', y' 는 변형 후 P' 점, x_0', y_0' 는 변형 후 O' 점 좌표를 나타낸다.

$$x' = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (5)$$

$$y' = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (6)$$

여기서 $\Delta x = x - x_0, \Delta y = y - y_0$ 이고, u, v 는 x, y 방향으로 이미지의 중심 이동을 의미한다. 적절한 초기 추측치의 설정으로부터 반복 계산하여 기준 서브 픽셀과 변형 후 픽셀의 최적화를 통해 변위 u, v 를 계산할 수 있다.

디지털 이미지 상관법은 이미지의 차이를 구별할 수 있도록 시편 표면에 흰색과 검은색 래커(lacquer)를 분사하여 스페클 패턴을 만들었다. 또한 균열이 진행된 후의 표면 변화를 확인하기 위해서 균열 개시 점에서 적당한 거리에 각 각도 별

로 점을 찍어 육안으로 관찰할 수 있게 하였다. 균열 진전 시에 시편의 표면은 CCD 카메라를 이용하여 1초당 하나의 프레임 간격으로 촬영하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CMOD 에 따른 분열 하중

Fig. 4 는 다양한 온도에서 썬기분열시험을 수행하여 분열 하중-CMOD 곡선으로 나타낸 것이다. 최대 분열 하중은 온도가 감소할수록 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 저온영역에서 입자강화 복합재료의 강도가 증가하기 때문이다. Table 1 은 다양한 온도 변화에 따른 파괴일, 균열면적 및 파괴에너지를 정리한 것이고, Fig. 5 는 파괴에너지와 균열 면적의 관계를 온도 변화에 따라 나타낸 그래프이다. 이들 결과로부터 파괴에너지는 온도가 50℃에서 -40℃로 내려갈수록 증가하고, 썬기가 설정에 따라 최대로 내려갔을 때 균열이 발생한 면적은 감소한다. 특히 -60℃에서는 취성거동을 보이기 때문에, -40℃에 비해 파괴에너지는 작아지고 균열 면적이 크게 증가하고 있다. 이러한 현상

Table 1 Fracture energy in the fracture zone for various temperatures

Temp. (°C)	W_f (N•mm)	A_f (mm ²)	G_f (mJ/mm ²)
50	3062.41	2717	1.13
R.T.	4860.24	2096	2.32
-40	23371.29	1424	16.41
-60	9509.90	2907	3.27

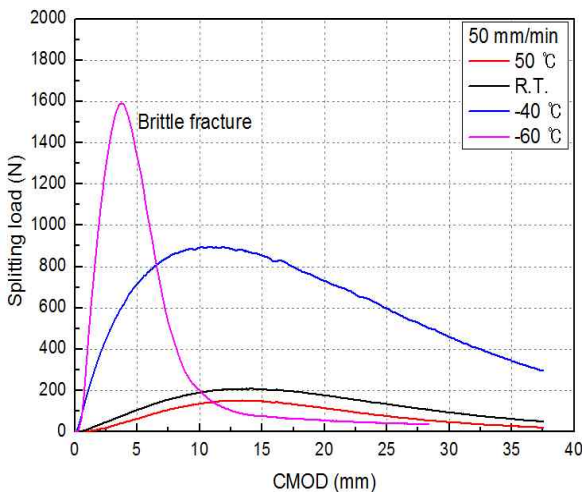


Fig. 4 Splitting load - CMOD curves for various temperatures

은 Fig. 4 의 -60℃ 곡선 경사가 유리전이 거동에 의해 균열 열림 구간까지 급격하게 증가하다가 균열진전 시작과 함께 감소하였기 때문이다. 입자강화 복합재료의 파괴에너지 평가는 분열하중-CMOD 곡선을 통해 가능하다고 판단된다.

3.2 시간 경과에 따른 균열 진전 길이

Fig. 6은 다양한 온도에서 시간에 따른 균열 진전 길이를 그래프로 나타낸 것이다.

균열진전 길이는 초기 시험 시간에서 변화하지 않고, 시간이 지나감에 따라 점진적으로 증가하고 있다. 온도가 50℃에서 -40℃로 감소할 때 균열진전 길이는 감소하는 것을 알 수 있다. -60℃에서 균열진전 길이는 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 -60℃에서 유리전이 거동에 의한 취성거동을 보이기 때문에 균열진전에 걸리는 시간이 매우 짧아지고 균열은 급격히 증가

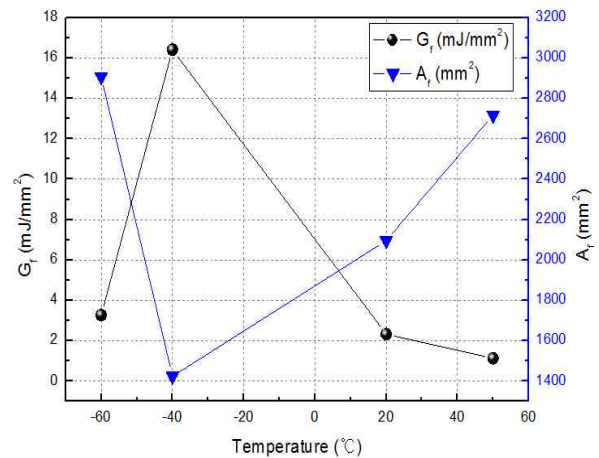


Fig. 5 Plots of fracture energy and area for various temperatures

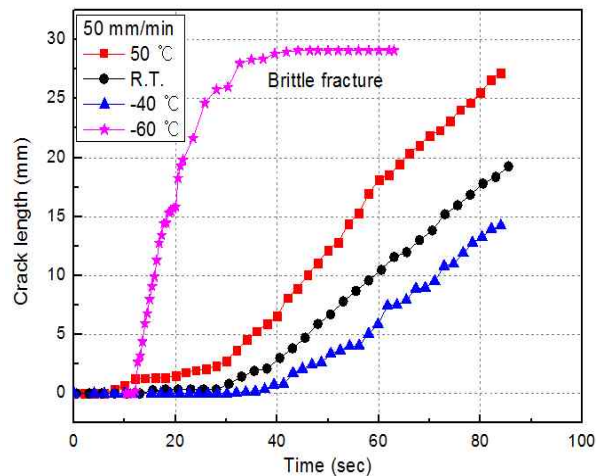


Fig. 6 Crack length-time curves for various temperatures

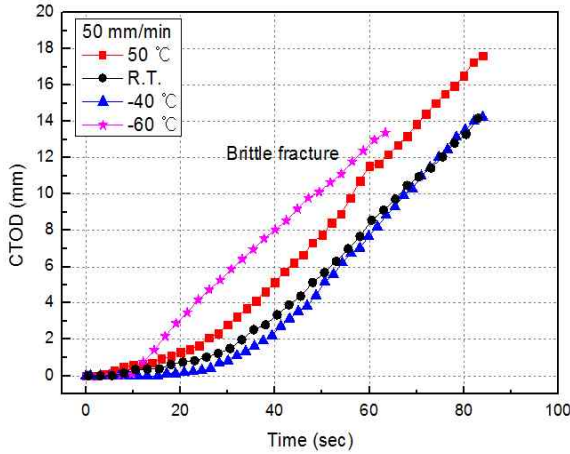


Fig. 7 CTOD - time curves for various temperatures

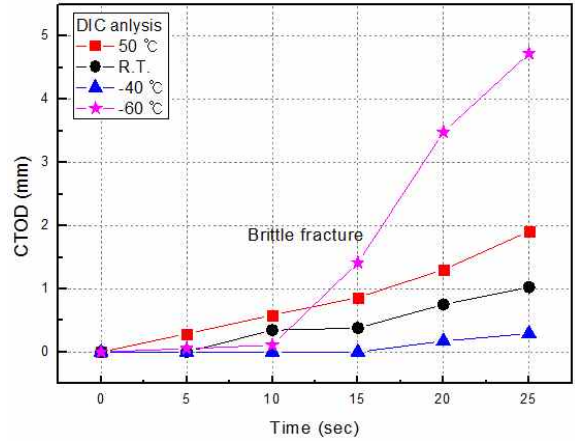


Fig. 9 CTOD-time curves by digital image correlation

Temp.	CCD Image	ϵ_x	ϵ_y	
50 °C				[%] 5 4 3 2 1 0 -1 -2 -3 -4 -5
R.T.				
-40 °C				
-60 °C				

Fig. 8 Strain fields for various temperatures of the surface at 25 sec

하는 것으로 판단된다. 따라서 입자강화 복합재료의 점탄성 성질로 인해 재료 내부의 응력완화 현상에 대한 시간이 온도가 감소함에 따라 줄어드는 것으로 판단된다.

3.3 시간 경과에 따른 CTOD

Fig. 7은 다양한 온도 조건에서 시간에 따른 CTOD를 측정된 그래프이다. 이들 결과로부터 CTOD는 50 °C에서 -40 °C로 온도가 변화에 따라 감소하는 경향을 보인다. 특히, -60 °C에서 CTOD는 시험 시작 후 10초가 지난 시점부터 60초까지 짧은 시간에 급격하게 증가하고 있다. 이러한 현상은 균열 길이의 변화와 동일하게 온도 감소에 따른 재료의 강도가 증가하였기 때문이다.

3.4 디지털 이미지 상관법을 이용한 변형률장

Fig. 8은 시험 시간이 25초일 때 다양한 온도 변화에 따른 x, y 변형률장의 윤곽(contour)을 가시화한 것이다. 변형률장은 축 방향 변형률, ϵ_x 과 횡 방향 변형률, ϵ_y 로 나타내었다. 이 때, 25초 이상에서는 하강하는 썩기의 그림자 때문에 더 이상 표면 변형률장을 측정할 수 없는 시점이다. 이들 결과로부터 표면 변형률장은 50 °C와 상온 조건에서 균열 선단과 균열 선단부근에 넓은 변형률장을 형성하면서 약 2~5% 정도 변형률이 발생하고, -40 °C에서 변형률은 아주 미미하게 나타나고 있다. 따라서 균열을 가진 입자강화 복합재료는 인장 하중을 받을 경우 균열 선단에서 가장 큰 응력이 발생하여 균열이 진전되지만, 균열 선단 부근에서도 미세한 균열이나 결함이 발생하게 되는 것을 의미한다. 특히 유리전이 온도 부근 -60 °C에서는 취성 파괴가 일어났기 때문에 짧은 시간에 미미한 변형과 함께 급격하게 균열이 진전된다. Fig. 9는 디지털 이미지 상관법을 이용하여 시간에 따른 초기 균열 선단의 변위를 측정된 그래프이다. 결론적으로 디지털 이미지 상관법은 변형된 이미지를 통해 변위 및 변형률장을 측정할 수 있기 때문에 시험의 파괴 영역에 대한 분석이 가능하다.

4. 결론

본 연구에서는 HTPB 바인더 소재의 입자강화 복합재료에 대하여 썩기분열 시험을 이용해서 균열 진전 시험을 수행하였다. 시험 온도는 50 °C, 상온, -40 °C, -60 °C에서 실시하였고, 시험을 통해 분열 하중-CMOD 곡선을 도출하고, 파괴에너지를 구하였다. 또한 디지털 이미지 상관법을 이용하여 표면의 변형률장을 도출하였다. 본 연구로부터 얻은

결론은 다음과 같다.

(1) 시험 온도가 50°C에서 -40°C로 내려갈수록 파괴에너지는 증가한다. 또한 썬기가 시험 설정에 따라 최대로 내려갔을 때 균열이 일어난 면적은 감소한다. 반면, 취성거동이 발생한 -60°C에서 파괴에너지는 유리전이 거동으로 인해 분열하중-CMOD 곡선의 기울기가 급격하게 증가하다가 감소하였기 때문에 -40°C에 비해 감소한다.

(2) 입자강화 복합재료는 온도가 감소에 따라 강도가 증가하기 때문에 시간에 따른 균열 길이와 CTOD 는 온도가 50°C에서 -40°C로 내려갈수록 응력완화 현상에 대한 시간이 줄어들기 때문에 감소한다. 특히 -60°C에서 균열길이와 CTOD 는 유리전이 거동으로 인해 짧은 시간 동안 증가한다.

(3) CCD 카메라를 통해 측정된 시편의 표면은 디지털 이미지 상관법을 이용하여 변형률장을 가시화하였다. 이 때 표면 변형률장은 균열이 진전할 때 균열 선단과 균열 선단 부근에서 미세한 균열이나 결함이 발생하기 때문에 약 2~5%의 변형률이 발생한다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (계약번호: UE135125GD)

참고문헌

(References)

- (1) Liu, C. T., 1997, "Crack Growth Behavior in a Solid Propellant," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 56, No. 1, pp. 127~135.
- (2) Schapery, R. A., 1975, "A Theory of Crack Initiation and Growth in Viscoelastic Media: II, Approximate Methods of Analysis," *International Journal of Fracture*, Vol. 11, No. 3, pp. 369~388.
- (3) Tussiwand, G. S., Saouma, 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.
- (4) Kwon, Y. W. and Liu, C. T., 1998, "Damage Growth in a Particulate Composite under a High Strain Rate Loading," *Mechanics Research Communications*, Vol. 25, No. 3, pp. 329~336.
- (5) Kakavas, P. A., 2013, "Mechanical Properties of Propellant Composite Materials Reinforced with Ammonium Perchlorate Particles," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, No. 10, pp. 2019~2026.
- (6) Brühwiler, E. and Wittmann, F. H., 1990, "The Wedge Splitting Test, A New Method of Performing Stable Fracture Mechanics Tests," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 35, No. 1, pp. 117~125.
- (7) Crammond, G. S., Boyd, W. and Dulieu-Barton, J.M., 2013, "Speckle Pattern Quality Assessment for Digital Image Correlation," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 51, pp. 1368~1378.
- (8) Lecompte, D., Smits, A. and Sven B., 2006, "Quality Assessment of Speckle Patterns for Digital Image Correlation," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, pp. 1132~1145.
- (9) Seo, B. H. and Kim, J. H., 2014, "Estimation of Master Curves of Relaxation Modulus and Tensile Properties for Solid Propellant," *Advanced Materials Research*, Vol. 871, pp. 247~252.
- (10) Jung, G. D., 1998, "A Nonlinear Viscoelastic Constitutive Model of Solid Propellant," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 22, No. 7, pp. 1237~1249.
- (11) 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.