

DIC에 의한 입자강화 복합재 추진제의 균열저항 특성평가

나성현^a · 최훈석^a · 오광근^a · 김재훈^{a,*}Evaluation of Crack Resistance Properties on
Particulate Reinforced Composite Propellant using
Digital Image CorrelationSeonghyeon Na^a · Hoonseok Choi^a · Kwangkeun Oh^a · Jaehoon Kim^{a,*}^aSchool of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Korea^{*}Corresponding author. E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

ABSTRACT

In this study, it is evaluated for fracture toughness to analyze crack resistance properties of particulate reinforced composite propellant. Fracture toughness test using WST specimen is conducted by temperature conditions from 50°C to -60°C. Evaluation method for fracture toughness calculated using an equation suggested by ASTM E399 with linear elastic fracture mechanics. From these result, splitting loads and stress intensity factors of propellant increase according to decrease of test temperature. Also, the strain fields of specimen surface using digital image correlation increase as temperature decreased from 50°C to -40°C, but it sharply decreases at -60°C because of brittle behavior.

초 록

본 연구에서는 파괴인성에 대하여 입자강화 복합재 추진제의 균열저항 특성을 분석하기 위하여 평가되었다. 50°C 에서 -60°C까지 온도 범위에서 WST 시험편을 이용하여 파괴인성시험이 수행되었다. 파괴인성에 대한 평가방법은 선형탄성파괴역학에 기초한 ASTM E399를 이용하여 산출하였다. 추진제의 분열하중과 응력확대계수는 온도가 내려감에 따라 증가하고 있다. 또한 디지털 이미지 상관법을 이용하여 가시화된 변형률장은 온도가 50°C에서 -40°C로 내려갈수록 증가하나, -60°C에서 변형률장은 취성거동으로 인해 크게 감소한다.

Key Words: Particulate Reinforced Composite Propellant(입자강화 복합재 추진제), Viscoelasticity (점탄성), Digital Image Correlation(디지털 이미지 상관법), Strain Field(변형률장)

Received 2 June 2015 / Revised 14 October 2015 / Accepted 20 October 2015

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2015년도 춘계학술대회(2015. 5. 28-29,

부산 해운대 그랜드호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

Nomenclature

WST : wedge splitting test

1. 서 론

입자강화 복합재료 형태로 제조된 추진제(이하 '추진제')는 금속연료, 산화제 및 고분자 물질인 바인더가 결합되어 점탄성 특성을 나타내는 재료이다. 추진제는 최근 산업 여러 분야에서 다양하게 사용되기 때문에 기계적 특성을 분석하여 제작 과정, 제작 환경을 개선하는데 중점을 두고 있다. 추진제는 사용 용도에 따라서 다양한 그레인(grain)의 형상으로 제작된다. 그레인은 운송, 경화반응 중의 열적 변화, 점화 시 급격한 내부 압력 상승 등의 내부 및 외부 요인에 의해 그레인의 취약부위에 응력이 집중하여 균열이 발생할 수 있다. 또한 균열의 발생에 의해 연소 표면적이 넓어져서 로켓 모터의 성능 저하가 발생할 수 있다. 결과적으로 추진제의 파괴 역학적 특성을 파악하는 것이 필수적인 요소이다[1]. 추진제는 균열 현상에 의해 파괴가 일어난다 하더라도 균열선단에 파괴진행영역이라는 비선형 영역이 존재하기 때문에 선형파괴역학의 직접적인 적용에 의한 해석은 많은 오차가 발생한다. 최근에는 추진제에 존재하는 결함을 파악하기 위하여 다양한 기법이 제안되었으며, 비접촉식 광학 방법을 이용한 변형 측정 등이 개발되고 있다. 디지털 이미지 상관법(digital image correlation)은 많은 비접촉식 광학 방법 중 하나로, 다양한 활용 방법에 대하여 연구가 진행 중이다. 디지털 이미지 상관법은 구조물의 무질서한 패턴을 카메라로 촬영하고, 변형 전과 후의 이미지를 비교하여, 구조물의 변위, 변형, 변형률을 측정하는 기법이다[2]. 관심 영역의 상대적인 변위 차이를 계산하는 것을 이용하여 비선형 거동을 나타내는 추진제의 균열저항에 대해 평가할 수 있다.

추진제 파괴역학 연구동향을 살펴보면, Liu[3]는 입자강화 복합재 추진제에 대해서 선형 탄성과 선형 점탄성 파괴역학을 기초로 다양한 온도 및 시험 속도에서 균열 성장 거동을 평가하였다.

Tussiwand[4]는 AP-HTPB 추진제에 대한 선형 탄성 파괴역학 및 비선형 파괴역학 시험인 WST 를 통해 파괴에너지를 연구하였다.

본 논문에서는 입자강화 복합재 추진제의 파

괴 역학적 거동을 확인하기 위하여 WST 시험편을 이용하였다. 시험은 추진제의 점탄성 특성상 온도에 영향을 미치기 때문에 다양한 온도에서 수행하였다. 이를 통해 추진제의 파괴인성치(fracture toughness)를 결정하고 균열저항 거동을 예측하였다. 또한 균열 선단 근처에서 변형률장(strain fields)예측은 디지털 이미지 상관법을 이용하여 가시화하였다.

2. 이론적 배경

2.1 디지털 이미지 상관법

디지털 이미지 상관법은 측정하고자 하는 물체의 표면에서 얻어낸 이미지를 전 영역에서 평가할 수 있는 광학적 처리기법 중 하나이다. 변형률장은 물체의 변형 전과 후의 얼룩무늬(speckle pattern)의 이미지 정보로부터 움직임을 추적하여 도출한다. Fig. 1은 측정 영역의 변형 전과 변형 후의 이미지를 보여주고 있다. Eq. 1은 디지털 이미지 상관법을 수행하여, 변형 전과 후 이미지에서 점의 회색도 값 경로를 계산한 과정을 상관 계수 $C(X)$ 로 나타내었다. 임의의 두 점에서 Eq. 2,3과 같은 상관관계로 위치가 표현될 수 있다. $f(x_i, y_j)$ 는 기존 이미지 좌표 P에서 회색도 값이고, $f'(x_i^*, y_j^*)$ 는 변형된 이미지 좌표 P'의 회색도 값이다.

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

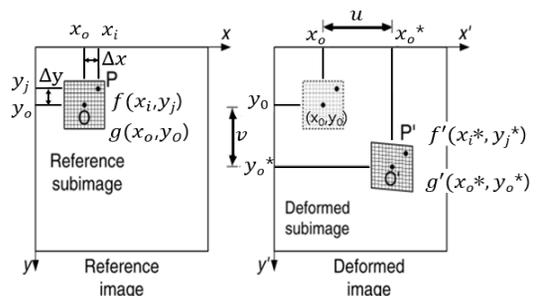


Fig. 1 Schematics of reference and deformed subsets.

$$x_i^* = x_0 + \Delta x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \quad (2)$$

$$y_j^* = y_0 + \Delta y + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \quad (3)$$

$$X = \left(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (4)$$

Eq. 1에서 \bar{f} 와 \bar{F} 는 $f(x_i, y_j)$, $f'(x_i^*, y_j^*)$ 의 평균 회색도 값이다. Eq. 4는 6개의 변형 변수를 나타낸다. 만약 벡터 X 의 6개 성분이 정확하게 측정되면 상관계수 $C(X)$ 의 값은 하나일 것이다. 이러한 디지털 이미지 상관법은 측정 위치의 이동에 따른 이미지의 선명화를 극대화한다[5,6].

2.2 ASTM E399 규격에 의한 파괴인성 평가

본 연구에서 진행된 파괴인성에 대한 평가 방법은 선형탄성 파괴역학을 바탕으로 하였다. WST시험편의 파괴인성 평가방법은 명확한 규격이 없기 때문에 ASTM E399[7]에서 제안한 예측식(Eq. 5,6)을 이용하여 계산하였다. ASTM E399에서는 본 시험편과 유사한 컴팩트 인장 시험편에 대한 규격이 규정되어 있다.

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} F(\alpha) \quad (5)$$

$$F(\alpha) = \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (6)$$

여기서, W 는 시험편의 폭, B 는 시험편의 두께, α 는 a/W 로서 a 는 균열길이, P 는 균열개시 하중, $F(\alpha)$ 는 형상에 대한 보정계수이다. 추진제의 항복강도는 인장시험 데이터로부터 정의하는 것은 불가능하다. 따라서 파괴인성 계산에서는 하중 모드 I(열림)에 대한 응력확대 계수인 K_I 계산만을 수행하였다.

2.3 WSI(Wedge Splitting Test)

WST는 노치(notch)와 홈(groove) 및 썰기와 롤러(roller)를 이용하여 시험을 진행한다. 시험편을 지지대위에 올린 다음, 측면에 롤러가 부착된 하중 장치를 시험편에 고정시키고, 썰기가 롤러 사이를 통과하도록 움직인다. 이 때 썰기와 롤러는 수평으로 쪼개는 힘이 작용한다. 쪼개는 힘은 베어링에 작용하는 힘의 수평 분력으로 썰기 각을 이용하여 구할 수 있다[3].

3. 재료 및 시험 방법

본 연구에 사용된 재료는 23.84 vol%의 HTPB 고분자 바인더에 76.16 vol%의 AP산화제와 Al 연료 입자들로 구성된 추진제로 제작되었다. 입자들의 크기는 AP 산화제 6~200 μm , Al 연료 5 μm 이다. Fig. 2는 WST 시험편의 형상으로 높이 85 mm, 폭 120 mm, 두께 50 mm이다. 노치는 길이 18 mm, 폭 40 mm로 제작하였다. 예비균열은 25 mm로 예리한 나이프를 사용하였다. 추진제는 일반 금속에 비해서 강도가 매우 약하기 때문에 시험 치구에 직접적으로 물리면 깃눌려 버린다. 이를 보완하기 위해 WST 시험편을 이용하였다. 시험 장비는 INSTRON 5567과 온도 조건을 맞춰주는 환경 용기(chamber)를 사용하였고, 결합 소자 카메라(charge-coupled device camera)는 시험편의 표면 균열 부위를 측정하기 위해 사용하였다.

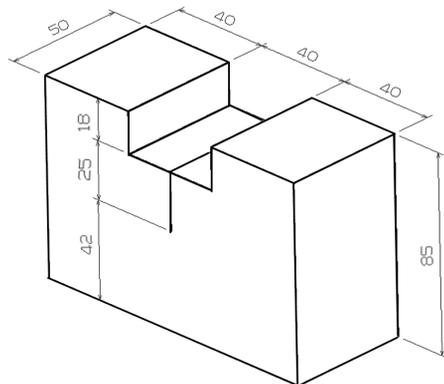


Fig. 2 Specimen of wedge splitting test.

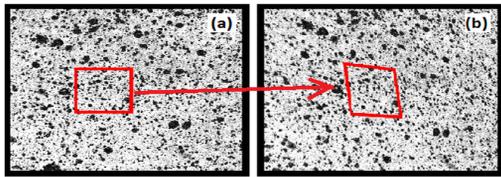


Fig. 3 Speckle patterns of reference and deformed subsets.

GOM사의 ARAMIS software를 이용하여 변형률장을 가시화하였다. 시험 온도는 50℃, 20℃, -40℃ 및 -60℃, 인장 속도는 동일하게 50 mm/min으로 시험하였다. 모든 시험은 3시간 동안 환경 용기에서 열평형을 유지한 후 진행되었다. 디지털 이미지 상관법을 적용하기 위한 얼룩 무늬는 흑색과 백색의 래커(lacquer)를 이용하여 Fig. 3과 같은 불규칙한 흑점 무늬를 만들었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 균열진전길이에 따른 분열하중의 영향

Fig. 4는 다양한 온도 변화에 따른 추진제의 균열진전길이에 따른 분열하중을 나타낸 것이다. 가로축은 균열 길이(a)에서 초기 길이(a₀)를 뺀 균열진전길이(Δa)이고, 세로축은 분열하중을 나타내었다. 균열진전길이는 대략 3 mm까지 DIC를 이용하여 측정되었다. 이들 결과로부터 균열이 발생하기 전까지 추진제에 가해지는 분열하중은 50℃에서 -60℃까지 온도가 내려갈수록 급격하게 증가하고 있다. 이러한 현상은 추진제의 온도가 내려갈수록 강도가 증가하였기 때문이다. 특히 -60℃에서 균열선단의 하중은 초기에 급격히 증가하고 최대하중에 도달한 후 균열이 개시되면서 빠르게 진전하였기 때문에 미세한 균열진전 길이를 측정하는데 어려움이 있었다.

4.2 균열저항에 대한 온도의 영향

Fig. 5는 다양한 온도에서 추진제의 균열저항 특성을 분석하기 위해 ASTM E399에서 제시한 파괴인성평가 방법을 이용하여 구한 균열진전길

이에 따른 K_I 선도를 나타낸 것이다. Fig. 5는 약 3 mm 정도의 동일한 균열진전 길이에서 20℃를 기준으로 각 온도 조건에서 응력확대계수를 비교하였다. 시험 온도 20℃를 기준으로 50℃에서 응력확대계수는 약 0.8배로 약간 감소하였고, -40℃에서는 약 3.5배 증가하였으며, -60℃에서는 약 6.5배 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 추진제의 온도가 내려갈수록 강도가 커지고, 균열진전에 대한 저항성이 점차 커진다는 것을 의미한다. 한편, 점탄성 특성이 있는 추진제는 저온인 경우 취성거동을 보이기 때문에 선형파괴역학에 기반을 둔 파괴인성을 사용하는 것이 가능하지만 유리 천이 온도 이상인

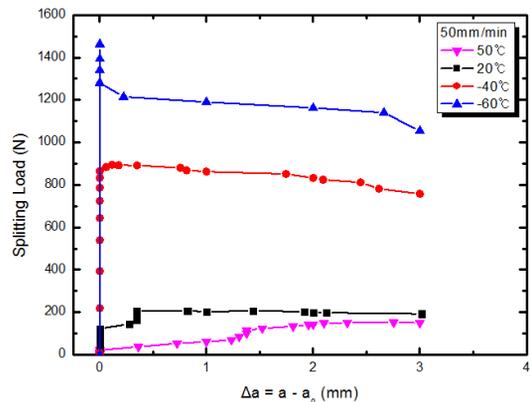


Fig. 4 Load and crack length curves for various temperatures.

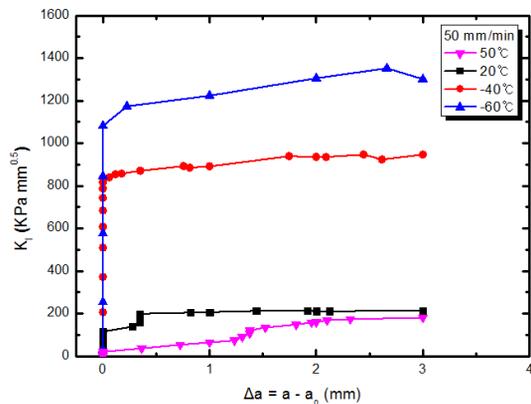


Fig. 5 Crack propagation resistance curves for various temperatures.

경우 상대적인 특성에 대한 비교는 가능하나 절대적인 수치의 비교는 사실상 어렵다고 할 수 있다.

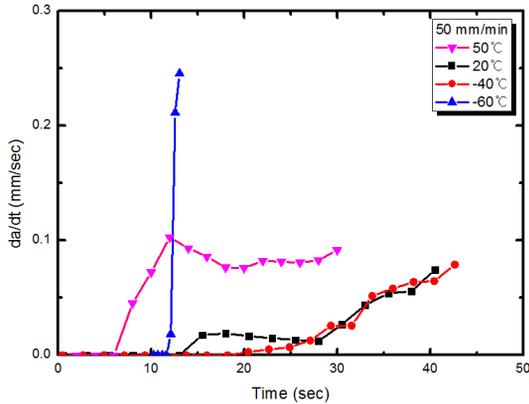


Fig. 6 Crack propagation rates for loading time history.

4.3 시간 경과에 따른 균열진전속도의 영향

Fig. 6은 다양한 온도에서 추진제의 시간 경과에 따른 균열진전속도를 나타낸 것이다. 추진제의 균열진전속도는 균열길이와 시간에 대하여 시컨트법(secant method)을 이용하여 계산하였다. 50°C에서 균열진전의 개시 시간은 20°C에서 보다 더 빠른 것을 알 수 있다. 이는 추진제가 20°C에서 50°C로 온도가 올라갈수록 추진제의 균열에 대한 저항성이 감소하는 것을 의미하고 있다. 50°C에서 균열진전속도는 급격하게 증가하였다가 감소한 후 안정화상태를 보이고 약간 증가하고 있다. 20°C와 -40°C에서 균열진전속도의 변화는 초기에 거의 없으나, 20°C에서 먼저 균열이 개시되고 일정한 시간이 지나면서 미소한 증가와 감소하는 현상을 보이며 점차 증가하고 있다. 이러한 현상은 추진제가 점탄성 거동을 나타내는 재료로서 블런팅(blunting)과 샤프닝

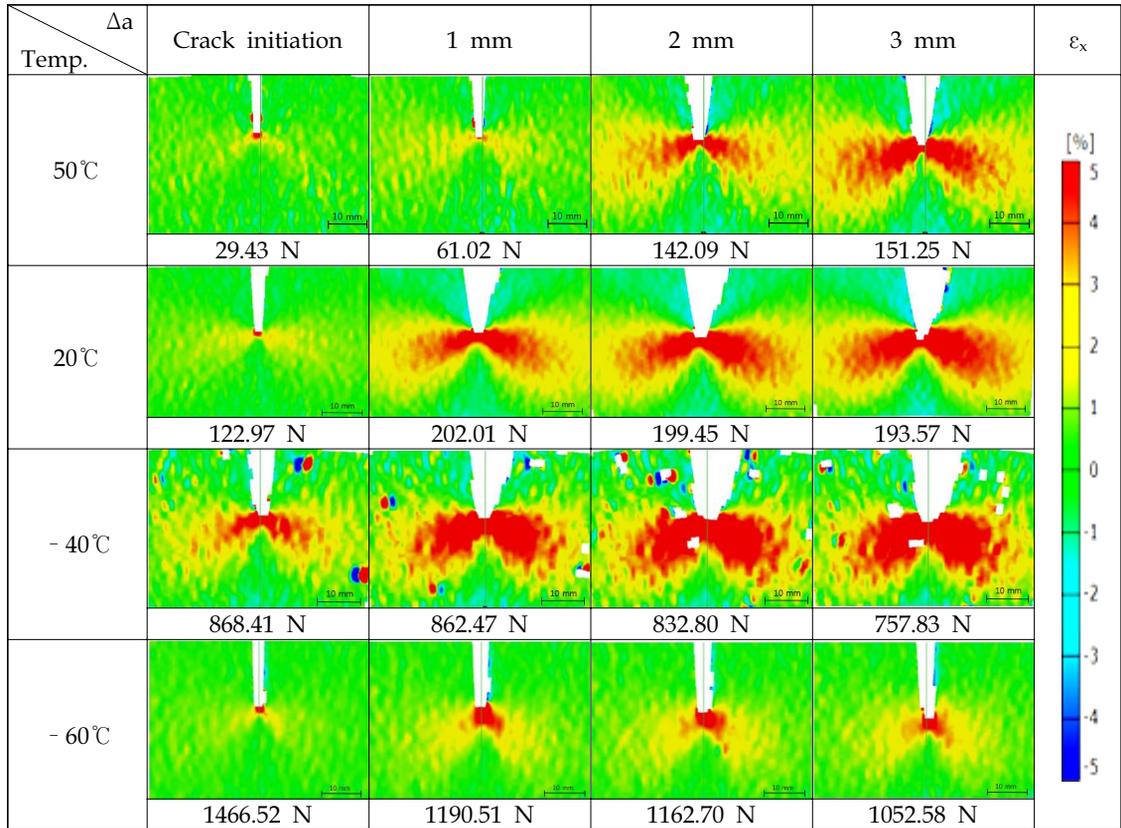


Fig. 7 Normal strain fields of digital image correlation for particulate reinforced composites.

(sharpening)을 반복하는 현상을 보이기 때문이다[8]. 반면, -60°C 에서 균열진전속도는 취성거동을 보이기 때문에 빠르게 증가하여 큰 분열하중으로 균열이 개시되었고, 변형률 영역은 작게 나타나고 있다[9].

4.4 DIC에 의한 변형률장의 가시화

Fig. 7은 다양한 온도에서 디지털 이미지 상관법을 이용하여 구한 추진제의 균열진전길이에 따른 x축 방향의 변형률을 균열이 발생하기 직전인 균열 개시점과 균열진전길이 1 mm, 2 mm 및 3 mm 지점에서 가시화한 것이다. 균열 개시점은 추진제가 분열하중을 받고 있으나 균열이 진전되기 전 변형률장을 디지털 이미지 상관법을 이용하여 나타내고 있다. 동일한 온도 범위에서 균열이 진전함에 따라 변형률장은 넓게 분포된다. 또한 동일한 균열진전 길이에서 비교해 보면, 추진제에 가해지는 하중과 변형률장은 온도가 50°C 에서 -40°C 로 내려감에 따라 증가하였다. 반면 -60°C 온도에서는 추진제의 강도가 증가하고 취성거동을 보이기 때문에 상대적으로 다른 온도에 비해 큰 하중이 가해지지만 좁은 변형률장을 나타내고 있다. 이러한 결과는 균열 선단에서 저항력만 있다는 것을 의미한다. 따라서 DIC에 의한 균열선단에서 발생하는 변형률장은 균열이 진전될 때 균열 선단의 양쪽에 임계 변형률 이상이 가해지고, 추진제의 내부 손상으로 발생하여 균열이 진전되는 것을 확인할 수 있는 유용한 가시화 방법이다.

5. 결 론

본 논문에서는 입자강화 복합재 추진제의 균열저항 거동을 평가하기 위해 다양한 온도조건에서 WST 시험편을 이용하여 파괴인성시험을 수행하였다. ASTM E399 규격을 이용하여 파괴인성을 평가하였고, 디지털 이미지 상관법을 통해 균열저항 특성을 분석하였다. 본 연구 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 균열길이에 따른 분열하중 선도를 통해 추

진제에 가해지는 하중은 균열의 개시 전까지 증가하다가 균열이 진전 후에 감소한다.

(2) 추진제의 응력확대계수는 50°C 에서 -60°C 로 온도의 감소에 따라 증가한다.

(3) 50°C 에서 균열진전속도는 급격하게 증가하였다가 감소한 후 안정화상태를 보인다. 20°C 와 -40°C 에서 균열진전속도의 변화는 초기에 거의 없으나, 20°C 에서 먼저 균열이 개시되고 일정한 시간이 지나면서 점차 증가하고 있다.

(4) 디지털 이미지 상관법을 이용하여 균열 선단 부근에서 x축 방향에 대한 변형률장을 가시화하였다. 변형률장은 50°C 에서 -40°C 온도로 내려감에 따라 넓은 범위로 증가한다. 반면 -60°C 온도에서는 다른 시험 온도에 비해 좁은 변형률장을 나타내고 있다.

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, pp. 40-45, 2005.
2. Gao, G., Huang, S., Xia, K. and Li, Z., "Application of Digital Image Correlation (DIC) in Dynamic Notched Semi-Circular Bend (NSCB) tests," *Experimental Mechanics*, Vol. 55, No. 1, pp. 99-104, 2015.
3. Liu, C.T., "Crack Growth Behavior in a Solid Propellant," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 56, No. 1, pp. 127-135, 1997.
4. 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, pp. 60-73, 2009.
5. Kim, J.I., Huh, Y.K. and Lee, G.C., "Detectability of Pore Defect in Wind

- Turbine Blade Composites using Image Correlation Technique," *Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 37, No. 10, pp. 1201-1206, 2013.
6. 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, pp. 667-675, 2012.
 7. ASTM, *Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials*, ASTM E399-09, Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, Philadelphia, P.A., USA, pp. 1-33, 2009.
 8. Liu, C.T., "The Effect of Micro Damage on Time-Dependent Crack Growth in a Composite Solid Propellant," *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 1, No. 1, pp. 123-136, 1997.
 9. 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, pp. 199-205, 1999.