

## 技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.6.079>

## 고속가압에 의한 고체추진제의 균열진전평가에 관한 연구

하재석\* · 김재훈\*\*† · 양호영\*

## A Study on Crack Propagation of Solid Propellant by Rapid Pressurization

Jaeseok Ha\* · Jaehoon Kim\*\*† · Hoyoung Yang\*

## ABSTRACT

An experiment of rapid pressurization-induced crack propagation of solid propellant was conducted by using a windowed test chamber. A pre-cracked specimen of solid propellant is installed in the chamber, and highly compressed nitrogen gas in an accumulator pressurizes the chamber until the chamber pressure reaches set-up pressure to make the chamber depressurization. Pressure-time trace was obtained from the experimental result, and pressurization rate was defined from the trace. In this study, three pressurization rates (64.34, 73.86 and 85.44 MPa/s) are considered, and propagation lengths are measured. Also, a progression of the crack propagation recorded by a high-speed digital camera is presented.

## 초 록

창이 있고 밀폐되어있는 시험챔버를 사용하여 고속가압에 의한 고체추진제의 균열진전시험을 수행하였다. 고체추진제 예균열 시험편은 시험챔버내에 설치되고, 축압기 내에 고압으로 축적된 질소가스는 고속가압을 위해 가압밸브를 통해 시험챔버를 가압한다. 시험챔버 내의 압력이 설정압력에 도달하게 되면 가압밸브는 닫히고 배기밸브를 통해 시험챔버는 감압이 된다. 본 논문에서는 시험결과로부터 시간에 따른 시험챔버압력을 나타내는 압력-시간 선도를 얻었으며, 선도로부터 가압비( $\Delta P/\Delta t$ )를 계산하였다. 3가지 가압비 64.34, 73.86, 85.44 MPa/s 에 대한 시험을 수행하였으며, 가압비에 따른 균열진전 길이를 측정하였다. 또한 고속 디지털카메라촬영을 통해 균열진전과정을 분석하였다.

Key Words: Rapid Pressurization(고속가압), Crack Propagation(균열진전), Solid Propellant(고체추진제), Test Chamber(시험챔버), High Speed Digital Camera(고속 디지털카메라)

접수일 2012. 5. 23, 수정완료일 2012. 11. 16, 게재확정일 2012. 11. 21

\* 학생회원, 충남대학교 기계설계공학과

\*\* 종신회원, 충남대학교 기계설계공학과

† 교신저자, E-mail: kimjhoon@cnu.ac.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2012년도 춘계학술대회(2012. 5. 17-18, 금오공과대학교) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

## 1. 서 론

고체로켓의 설계에 있어서 요구되는 추력 양상에 따라 고체추진제 그레인(grain)은 다양한

형상으로 결정되며, 저장기간 및 사용기간 동안에 여러 하중이 작용하게 된다. 고체추진제 그레인에 작용하는 하중으로는 추진제와 연소관 사이의 열팽창계수 차이에 의하여 발생하는 응력, 연소 시 연소관 내압에 의해 발생하는 응력 등이 있으며 이러한 응력에 의하여 그레인 내면의 응력 집중부에서 균열이 발생할 수 있다. 이러한 균열은 고체추진제의 과연소 및 로켓의 파손까지 발생할 수 있는 문제로 확장될 수 있다. 따라서 추진제 그레인 설계에 있어서 저장 및 사용기간 동안 예상되는 다양한 하중에 대한 추진제 그레인 균열의 안전성을 확인하는 과정이 필요하다[1].

고체추진제의 균열문제에 대한 실험적 연구는 정적 하중, 또는 동적 하중 하에서 이루어진다. Liu[2]는 다양한 온도 및 정적 하중 하에서 복합 고체추진제 균열성장 메커니즘을 실험적으로 규명하고 하중속도 및 온도에 따른 응력확대계수와 균열성장속도 사이의 관계에 대한 연구를 수행하였다. Ide 등[3]은 고체추진제의 균열성장 메커니즘에 대한 온도, 변형률속도, 노화의 영향에 대한 연구에서 Liu의 연구와 동일한 균열성장 메커니즘을 확인했으며, 온도가 증가함에 따라 균열성장속도도 증가함을 확인했다. Wu 등[4, 5]은 창이 있는 시험챔버를 사용하여 균열을 갖는 고연신율 추진제의 연소시험을 통해 연소가압비에 따른 균열전파모드의 변화를 확인하였으며,

추진제와 연소관의 접착분리 연소시험을 통해 연소가압비와 접착분리 속도의 상관관계를 확인하였다. 이와 같이 고체추진제의 정적 하중 또는 연소시험과 같은 동적 하중 하에서의 연구가 이루어져 왔지만, 고속가압 하에서 고체추진제의 균열진전거동에 대한 연구가 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 고속가압에 의한 고체추진제의 균열진전거동을 연구하기 위해 균열이 있는 고체추진제 시험편 및 창이 있는 시험챔버를 이용한 시험을 수행하였으며, 균열진전과정의 분석을 위해 고속 디지털카메라 촬영을 수행하였다.

## 2. 재료 및 시험 방법

### 2.1 시험 재료 및 시험편

시험에서 사용된 재료는 복합고체추진제로서 23.84 vol%의 바인더 내에 76.16 vol%의 산화제, 연료 등을 혼합한 고체추진제이다.

시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1에 나타나 있다. 시험편의 중앙에는 고속의 가압하중이 집중적으로 부가될 수 있도록 V형태의 홈이 있으며 홈 중앙에는 길이 6.3 mm의 예균열(pre-crack)이 예리한 칼날에 의해 삽입된다. 고체추진제의 비압축성을 고려하여 균열진전이 용이할 수 있도록 시험편의 양옆은 변형될 공간을 제공하기 위해 테이퍼(taper)형상을 갖는다.

### 2.2 시험장치 및 시험방법

Figure 2는 고속가압 시험장치의 개략도를 나타낸다. 시험장치는 시험챔버, 가압 및 배기장치, 데이터 획득장치로 구성되어 있다. 시험편은 Fig. 3에 나타낸 것처럼 시험챔버 내의 시험편 홀더에 고정되며 시험챔버 창에 의해 밀폐된다. 시험챔버의 상부 및 측부에는 각각 가압 및 배기포트가 설치되어 있으며, 내부에는 압력을 측정하기 위한 압력센서가 설치되어 있다. 시험이 시작되기 전에 시험설정 프로그램을 통해 목표표하는 시험압력(배기압력)을 설정한다. 고속가압을

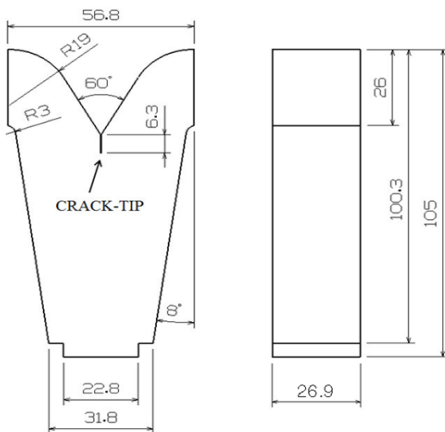


Fig. 1 Geometry and dimensions of specimen (unit : mm)

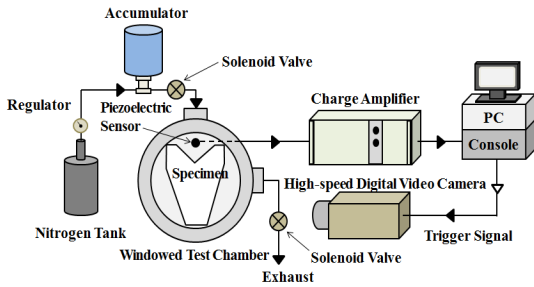


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

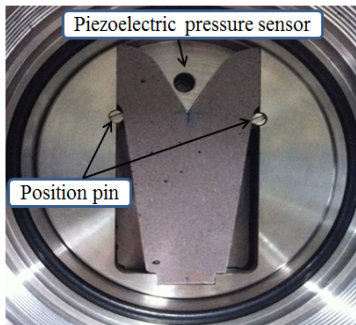


Fig. 3 Specimen fixed in a specimen holder

위해 고압의 질소가스는 축압기 내에 축적된다. 시험이 시작되면 축적된 고압의 질소가스는 솔레노이드 밸브가 연결된 가압포트를 통해 시험 챔버 내의 시험편을 고속으로 가압하며, 시험 챔버 내의 압력이 미리 설정된 배기압력에 도달하면 가압 측 솔레노이드 밸브가 닫힘과 동시에 배기포트와 연결된 솔레노이드 밸브가 개방되어 시험 챔버는 감압된다. 또한 균열진전과정을 촬영하기 위해 고속 디지털카메라가 시험 챔버 앞에 설치되며, 시험시작과 동시에 트리거신호가 전달되어 촬영이 진행된다.

시험은 설정된 배기압력에 따른 가압비를 변수로 수행되었으며, 64.34, 73.86, 85.44 MPa/s의 총 3가지 가압비에 대하여 시험을 수행하였다. 시험결과는 가압비에 따른 균열진전길이가 나타나었으며, 고속 디지털카메라 촬영기록을 통해 균열진전과정이 분석되었다.

3. 결과 및 고찰

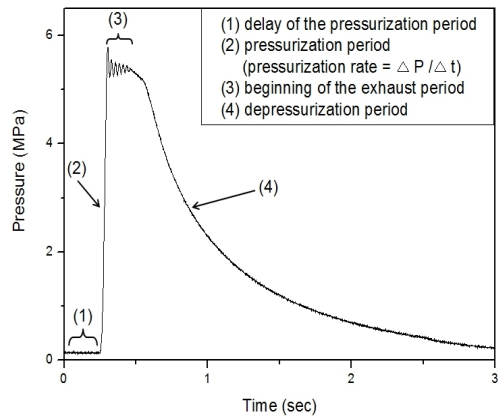


Fig. 4 Typical pressure-time trace of the experiment

3.1 압력-시간선도

전형적인 압력-시간 선도는 Fig. 4에 나타나 있다. 이 선도는 4개의 구간으로 정의할 수 있다: (1) 시험이 시작되고 고속가압이 되기 전의 지연구간, (2) 가압 측 솔레노이드 밸브가 개방되어 고속의 가압하중이 부가되는 가압구간, (3) 챔버의 압력이 설정된 배기압력에 도달함과 동시에 가압이 중단되고 배기포트와 연결된 솔레노이드 밸브가 개방되는 감압개시구간, (4) 시험 챔버의 압력이 대기압까지 감압되는 감압구간. 여기서 가압비는 압력-시간 선도의 두 번째 구간인 가압구간의 기울기 ( $\Delta P / \Delta t$ )로 정의된다. 모든 시험에 대한 압력-시간 선도는 Fig. 4와 동일 형태를 나타내며, 설정된 배기압력에 따른 가압비 및 최대압력만 다르게 나타난다.

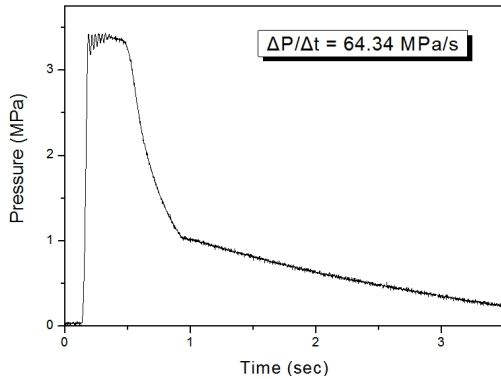
3.2 가압비에 따른 균열진전길이

본 연구에서는 64.34, 73.86, 85.44 MPa/s의 총 3가지 가압비에 대하여 시험을 수행하였으며, 각 가압비에 대한 압력-시간 선도는 Fig. 5에 주어 져 있다. 가압비에 따른 균열진전 길이는 실제현 미경을 통해 측정되었으며 Fig. 6에 나타나 있다. 균열진전길이는 가압비 64.34 MPa/s에서 0.45 mm, 가압비 73.86 MPa/s에서 0.99 mm, 가 압비 85.44 MPa/s에서 2.34 mm로 측정되었다.

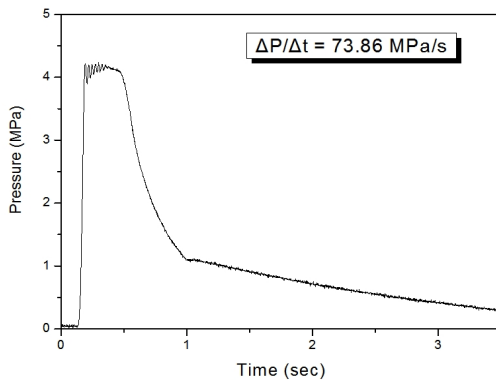
따라서 시험 결과로부터 가압비가 증가함에 따라 균열진전길이가 증가하고, 예균열 방향을 따라 균열이 진전되는 것을 확인하였다.

3.3 균열진전과정

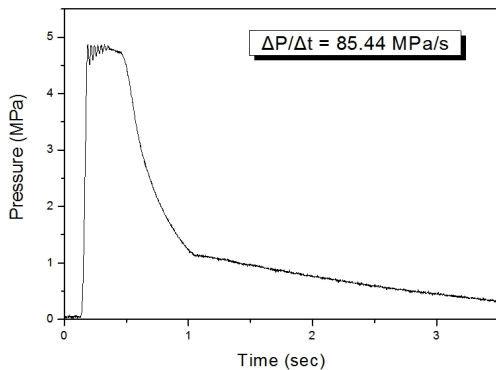
Figure 7은 가압비 85.44 MPa/s에서 특정 시간에 따라 고속 디지털 카메라를 통해 촬영된



(a) 64.34 MPa/s



(b) 73.86 MPa/s



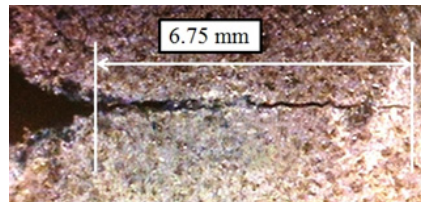
(c) 85.44 MPa/s

Fig. 5 Pressure-time traces at (a) 64.34 MPa/s, (b) 73.86 MPa/s, and (c) 85.44 MPa/s

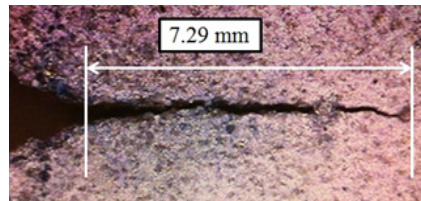
균열진전과정을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)은 고속 가압이 부가되기 전에 정지되어 있는 균열을 나타내며, Fig. 7(b)은 고속가압이 되어 균열이 벌어진 모습을 나타낸다. Fig. 7(c)은 압력이 증가함에 따라 벌어진 균열선단에서부터 균열이 진전되는 모습을 나타낸다.

압력-시간 선도와 촬영기록을 비교한 결과 압력-시간 선도의 두 번째 구간인 가압구간에서만 균열이 진전되며, 세 번째 구간인 감압개시 구간에서는 균열이 벌어진 상태에서 진전은 하지 않는 것으로 확인되었다. 즉 챔버의 최대압력 도달 후에는 균열이 더 이상 진전되지 않았다.

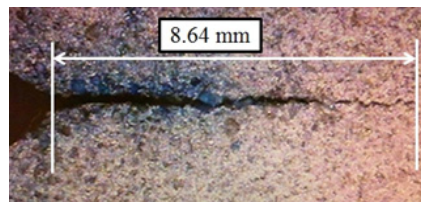
고속 디지털카메라 촬영을 통해 고속가압에 의한 고체추진제의 균열진전과정은 모든 가압비에 대하여 동일한 과정을 나타낸다는 것을 확인하였다.



(a) 64.34 MPa/s



(b) 73.86 MPa/s

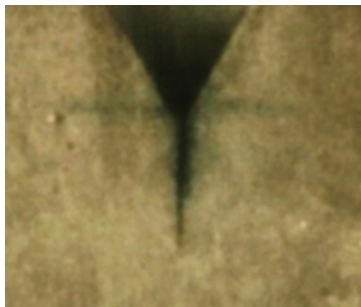


(c) 85.44 MPa/s

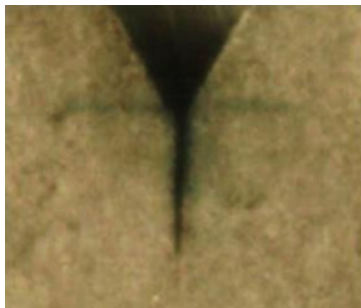
Fig. 6 Crack propagation lengths and contour at (a) 64.34 MPa/s, (b) 73.86 MPa/s, and (c) 85.44 MPa/s



(a) 255.073 ms



(b) 280.435 ms



(c) 292.754 ms

Fig. 7 Image sequences of the crack propagation at (a) 255.073 ms, (b) 280.435 ms, and (c) 292.754 ms under 85.44 MPa/s

현재 고속가압에 의한 고체추진제의 균열진전 시험은 거시적인 현상에 대해서만 분석이 이루어졌지만, 차후에는 가압비와 균열진전거동과의 상호연관성을 규명할 수 있는 역학적 파라미터를 연구할 계획이다. 또한 향후 혼합비를 달리 한 추진제 및 다른 종류의 추진제, 형상이 다른 시험편 등에서 나타나는 현상에 대한 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고속가압 시험장치를 이용한 고체추진제의 균열진전시험을 수행하였으며, 시험결과로부터 압력-시간선도, 균열진전길이, 균열진전과정을 분석하였다. 분석한 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 고체추진제의 고속가압시험으로부터 전형적인 압력-시간선도를 얻을 수 있었으며, 이 선도는 4개의 구간으로 정의할 수 있다: (1) 고속가압이 되기 전의 지연구간, (2) 고속가압이 시작되는 가압구간, (3) 가압이 중단되고 배기포트와 연결된 솔레노이드 밸브가 개방되는 감압개시구간, (4) 시험챔버의 압력이 대기압 까지 감압되는 감압구간.
- (2) 압력-시간 선도의 두 번째 구간인 가압구간의 기울기로부터 가압비( $\Delta P/\Delta t$ )를 정의할 수 있다.
- (3) 가압비에 따른 균열진전 길이는 실제현미경을 통해 측정되었으며 가압비 64.34, 73.86, 85.44 MPa/s에 대하여 각각 0.45, 0.99, 2.34 mm로 측정되었다. 따라서 가압비가 증가함에 따라 균열진전길이도 증가함을 알 수 있다.
- (4) 균열진전과정은 고속 디지털 카메라를 통해 촬영된 기록을 통해 분석되었으며, 압력-시간선도의 두 번째 구간인 가압구간에서만 균열이 진전되고 최대압력 도달 후에는 균열이 더 이상 진전되지 않는 것으로 확인되었다.
- (5) 가압비와 균열진전거동과의 상호연관성을 규명할 수 있는 역학적 파라미터에 대한 연구를 수행할 예정이며, 다양한 고체추진제 종류 및 형상이 다른 시험편에서 나타나는 현상에 대한 연구가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 진심으로 감사를 드립니다.  
(계약번호: TE 100335CD)

## 참 고 문 헌

1. 한국추진공학회, 항공우주 추진기관 개론, 한티미디어, 2008
2. Liu, C. T., "Crack Growth Behavior in a solid Propellant," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 56, No 1, 1997, pp.127-135
3. Ide, Kym M., Ho, Sook-Ying and Williams, David R. G., "Fracture Behaviour of Accelerated Aged Solid Rocket Propellants," Journal of Materials Science, Vol. 34, No. 17, 1999, pp.4209-4218
4. Wu, S. R., Lu, Y. C., Kuo, K. K. and Yang, V., "Combustion-Induced Crack/Debond Propagation in a Metalized Propellant," 28th AIAA/SAE/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 92-3506, July, 1992
5. Wu, S. R., Lu, Y. C., Kuo, K. K. and Yang, V., "Anomalous Combustion of Solid Propellant in a Propagating Debond Cavity," 30th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 92-0770, 1992