

충격을 받는 세라믹돔의 기하형상에 따른 파괴해석

권순국[†] · 이영신^{*} · 김재훈^{*} · 이정희^{*} · 윤수진^{**}

A Fracture Analysis on the Ceramic Dome with Different Geometry under Impact

Sun-Guk Kwon[†], Yung-Shin Lee^{*}, Jae-Hoon Kim^{*}, Jung-Hee Lee^{*},
and Su-Jin Yoon^{**}

Key Words : Fracture Analysis, Ceramic Dome, Impact, John

Abstract

The experiment of dome port cover under shock impact is performed with shock tube. The dome port cover blocked intake air duct up from the solid propellant during air breathing vehicle speed reach Mach 2.0. When the air breathing vehicle reach Mach 2.0, the inlet cover is removed and the dome port cover is broken to pieces by detonator or pressure of inlet air. Thus the dome port cover not only must stand the pressure of combustion chamber but also easy to break from the RAM pressure.

In this study, a fracture evaluation on the Al_2O_3 ceramic spherical dome and circular plate port under impact has been presented. Ceramic were supported by the rigid body and a couple of O-ring. The Mooney-Rivlin model have been used to describe behaviors of both O-ring. And spherical dome and circular plate fracture results of the LS-DYNA code using Johnson-Holmquist(JH-2) constitutive equation was compared.

1. 서론

세라믹은 인장강도보다 더 높은 압축강도를 갖고 높은 온도에서도 잘 견딘다. 또한 세라믹은 높은 강도, 내마모성 그리고 내삭성 등의 우수한 성질을 가지고 있다. 이러한 성질들은 세라믹이 다목적으로 사용될 수 있게 하는데, 특히 본 논문에서는 돔포트 커버에 대해서 연구하였다. 돔포트 커버는 반드시 부스터 압력을 견뎌야 하며,

공기 흡입구에서 들어오는 공기압에 빠르고 잘게 부서져야 한다. 그리고 부서진 파편들이 부스터 배부 벽에 손상을 주지 않아야 한다.[1]

Webster (1978)는 PTV 추진 시스템의 비행시험결과, 해석 기법과 flight-to-ground date correlation 에 대해 연구했다.[2] Scannell 등은 (1980) 액체, 고체연료 일체형 로켓에 적용가능한 진보된 포트커버에 대해 조사했다. 여기서 몇몇 디자인개념이 소개되고 실험 결과들이 각 디자인에 대해 소개되어 있다.[3] Soppa 등은 (2003) AL(6061)로 보강된 Al_2O_3 FE-micro 구조 모델의 기계적인 하중을 받는 동안의 붕괴과정을 예측하기 위해서 충격이론을 적용하였다.[4]

또한 Johnson 등은(1994) 세라믹 재료의 모델의 보다 비슷한 거동을 예측하기 위해 구성방정식을

[†] 권순국, 충남대학교 BK21
E-mail : sunkuki@naver.com
TEL : (042)821-8906 FAX : (042)821-8906

^{*} 충남대학교 BK21

^{**} 국방과학연구소

제안하였다.[5] Cronin 등은 Johnson-Holmquist 구성방정식을 LS-Dyna 에 적용하여 세라믹의 충격파괴거동을 연구하였다.[6]

본 논문에서는 3.0 mm, 4.5 mm, 6.0 mm 두께를 갖는 돛형과 원형판 Al₂O₃ 세라믹 에 Johnson-Holmquist 구성 방정식을 적용해 파괴해석을 하고 그 결과인 임계파괴 압력을 비교하였다.

2. 돛 해석 모델링

2.1 세라믹의 Johnson-Holmquist (JH-2) 모델

Johnson-Holmquist model[5]은 세라믹과 같은 취성 재료를 위한 구성 방정식이다. 잠시 JH-2 모델에 대해 알아보면, 주어진 Hugoniot elastic limit(HEL) 과 전단계수(G)를 이용하면 HEL 일때 μ 인 μ_{HEL} 을 얻을 수 있다.

$$HEL = k_1 \mu_{HEL} + k_2 \mu_{HEL}^2 + k_3 \mu_{HEL}^3 + \frac{4}{3} G \frac{\mu_{HEL}}{1 + \mu_{HEL}} \quad (4)$$

여기서 k_1, k_2, k_3 는 모델의 elastic constant 이다. HEL 일 때의 압력 P_{HEL} 은 식 (5)를 통해 구할 수 있다.

$$P_{HEL} = k_1 \mu_{HEL} + k_2 \mu_{HEL}^2 + k_3 \mu_{HEL}^3 \quad (5)$$

그리고 이 때의 응력 σ_{HEL} 은 식 (6)으로 부터 구할 수 있다.

$$\sigma_{HEL} = \frac{3}{2} (HEL - P_{HEL}) \quad (6)$$

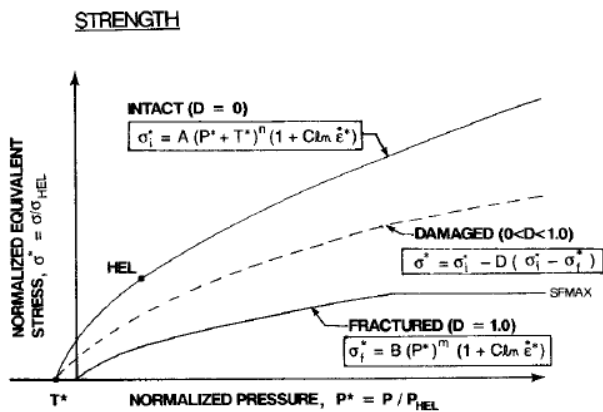


Fig. 1 Description of strength curve of the JH-2 ceramic model[5]

위 식을 바탕으로 아래 식 (7) 과 (8)을 얻을 수 있다.

$$P^* = \frac{P}{P_{HEL}} \quad (7)$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{\sigma_{HEL}} \quad (8)$$

이제 식 (4)~(8)을 이용해 아래 식 (9), (10), (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \quad (9)$$

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N (1 + C \cdot \ln \epsilon) \quad (10)$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M (1 + C \cdot \ln \epsilon) \quad (11)$$

여기서 A,B,C,D,M,N, SFMAX 는 재료에 따른 상수이다. 최대인장압력(T^*)과 무차원 변형률은(ϵ) 은 아래와 같이 정의된다.

$$T^* = \frac{T}{P_{HEL}} \quad (12)$$

$$\epsilon = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (13)$$

또한, 상수 D 는 아래와 같은 식으로 정의 된다.

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon^P}{\epsilon_f^P} \quad (14)$$

$$\epsilon_f^P = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \quad (15)$$

2.2 O-ring 의 Mooney-Rivlin 모델

변형에너지 밀도 함수는 다음과 같은 다항식의 형태로 얻어진다.

$$W = \sum_{k+l=1}^N a_{kl} (I_1 - 3)^k (I_2 - 3)^l + \frac{1}{2} \kappa (I_3 - 1)^2 \quad (1)$$

여기서 벌크 모듈러스는 아래와 같다.

$$\kappa = \frac{2(a_{10} + a_{01})}{(1 - 2\nu)} \quad (2)$$

여기서 I_1, I_2, I_3 는 strain invariant 이다.
 그리고 본 논문에서는 변형에너지 밀도함수는 2 parameter Mooney-Rivlin model 을 사용한다.

$$W = a_{10}(I_1 - 3) + a_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{2}\kappa(I_3 - 1)^2 \quad (3)$$

여기서 a_{10}, a_{01} 은 재료상수로 실험결과인 그래프 Fig. 1 을 바탕으로 구할 수 있다.

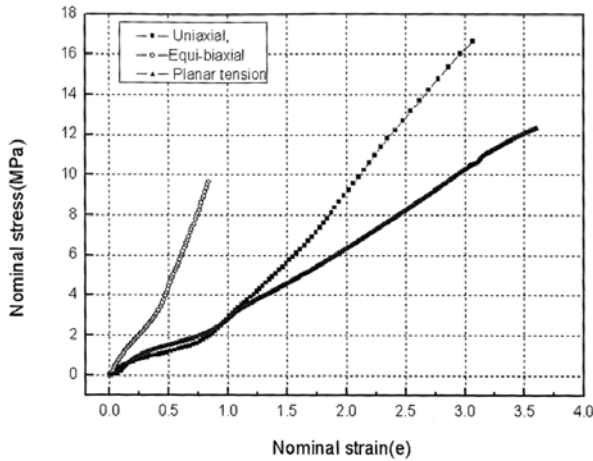


Fig. 2 Uniaxial, equi-biaxial and planar tension test results of chloroprene rubber [7]

3. 돔 유한요소해석

해석에 사용된 돔형 형상은 Fig. 3(a)와 같다. 외경(R_o)은 80.0 mm 로 고정되어 있고, 내경(R_i)가 83.0 mm, 84.5 mm, 86.0 mm 로 각각의 모델은 3.0 mm, 4.5 mm, 6.0 mm 의 두께를 가진다. 그리고 원판형 세라믹은 Fig. 3 (b) 과 같은 단면형상을 가지며 두께는 앞의 돔형 형상과 같이 3 mm, 4.5 mm, 6 mm 이다.

돔을 감싸는 강체는 변형이 없는 구조물이 세라믹과 세라믹 위아래로 있는 O-ring 을 고정시키는 역할을 한다. 축대칭 형상으로서 해석에는 1/4 모델만을 사용하여 해석하였다. 충격은 압력으로 1 msec 동안 계단파형으로 세라믹에 가해 주었다. O-ring 에는 Mooney-Rivlin 모델이 적용되었고, 세라믹에는 Johnson-Holmquist 모델이 적용되었다. O-ring 과 세라믹에 사용된 파라미터는 아래 Table 1 과 같다.

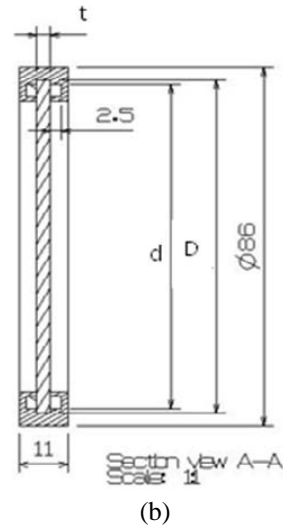
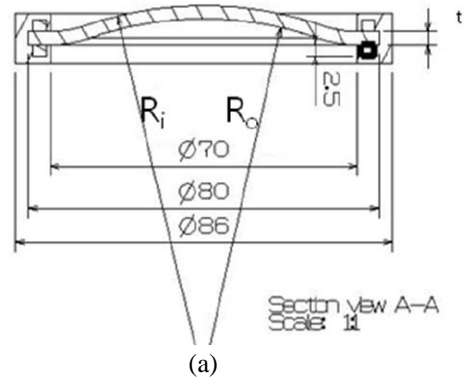


Fig. 3 Geometry of the dome port cover

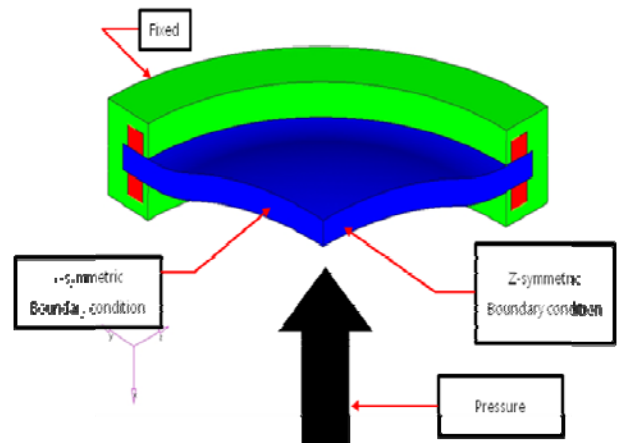


Fig. 4 Finite element model with boundary conditions

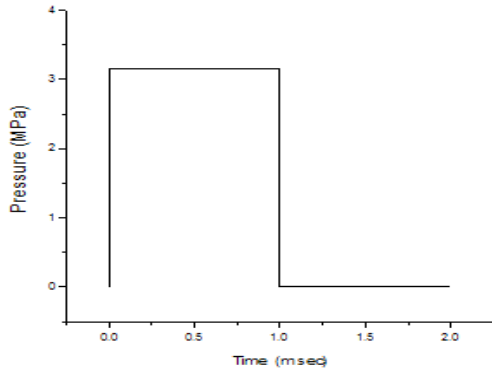


Fig. 5 Step function shape

Table 1 Constitutive constants for ceramic materials of JH-2 model[8]

Al ₂ O ₃	
Density (kg/m ³)	3700
Shear Modulus (GPa)	90.16
Strength Constants	
A	0.93
B	0.31
C	0.0
M	0.6
N	0.6
Ref. Strain Rate (EPSI)	1.0
Tensile Strength (GPa)	0.2
Normalized Fracture Strength	NA
HEL (GPa)	2.79
HEL Pressure (GPa)	1.46
HEL Vol. Strain	0.01117
HEL Strength (GPa)	2.0
Damage Constants	
D ₁	0.005
D ₂	1.0
Equation of State	
K1 (GPa) (Bulk Modulus)	130.95
K2 (GPa)	0
K3 (GPa)	0
Beta	1.0

Table 2 Material constants of the O-ring

	Material Constants
a ₁₀	0.418
a ₀₁	0.006

4. 충격파괴해석결과

해석결과 두께에 따른 돔형상 세라믹의 임계파괴 압력과 원형판 형상 세라믹의 임계파괴압력의 격차가 두께 증가에 따라 점진적으로 증가하는 것으로 나타났다. 3.0 mm 일 때의 차이는 5 bar 로 나타났고, 4.5 mm 일 때 25 bar, 6.0 mm 일 때 78 bar 로 파괴 압력차가 나타남을 해석 결과 Table 2 를 통해서 알 수 있었다.

압력을 적용직후에는 강체와 접촉한 세라믹의 외곽에서 응력이 집중되나 시간이 지남에 따라 응력집중이 세라믹의 중심으로 위치가 바뀌다가 다시 외곽까지 퍼져나가는 현상이 몇 차례 일어남을 발견할 수 있었다. 그 후 응력은 세라믹이 파괴될 동안 강체와 닿는 부분(압력을 받는 면)에서 발생한다. 형상에 따른 차이가 있었으나, 세라믹 원판의 경우 균열은 중심으로서부터 발생된 후 축을 중심으로 0.06~0.07 msec 내에 외곽까지 크랙이 퍼져나감을 알 수 있었으며 돔형 세라믹 도 비슷한 시간을 가졌다.

Table 3 Critical impact pressure with various shape and thickness

Thickness (mm)	Critical Impact Pressure (bar)	
	Circular Plate	Concave Dome
3.0 mm	38	43
4.5 mm	72	97
6.0 mm	120	198

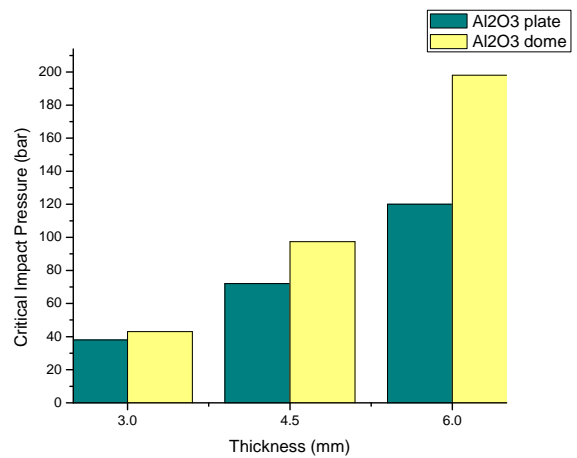


Fig. 6 The pressure of a fracture occurring point difference between Al₂O₃ circular plate and spherical dome.

5. 결 론

본 연구에서는 O-ring 과 세라믹모델에 Mooney-Rivlin 모델과 Johnson-Holmquist 모델이 적용되어 충격이 가해질 때 Al_2O_3 세라믹의 두께와 돔형상에 따른 거동을 유한요소 해석을 통해 확인하였다.

(1) 원판형상의 두께 3.0 mm, 4.5 mm, 6.0 mm 일 때 파괴압력은 38 bar, 72 bar, 120 bar 임을 알 수 있었다.

(2) 돔형형상의 두께 3.0 mm, 4.5 mm, 6.0 mm 일 때 파괴압력은 43 bar, 97 bar, 198 bar 로 나타났다.

(3) 응력집중은 계단파형압력 입력 직후에 세라믹 끝 단에서 시작해 중심으로 옮겨가며, 다시 외곽으로 퍼져나갔다 모이는 현상이 몇 차례 일어난을 확인 하였다. 이 부분이 파괴에 어떤 영향을 미치는 지에 대해서는 앞으로의 연구에서 알아보아야 할 부분이다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다. (계약번호 UD060012AD)

참고문헌

(1) J. J. Lee, Y.S. Lee, J.H. Kim, J.H. Lee, S.H. Koo and S.I. Moon, 2006, "A Study on the Impact Fracture Behavior of Glass-Ceramic Spherical Dome," *Proceeding of Fall KSME Conference*, pp. 19~24

(2) P. R., Scannel, N. R., Milich, and E. O., Kalil, 1980, "Advanced Integral Rocket Ramjet Port Cover Development," *American Institute of Aeronautics and Astronautics paper*, pp. 1980~1279

(3) E., Soppa, S., Schmauder, G., Fischer, J., Brollo, and U., Weber, 2003, "Deformation and Damage in Al/Al_2O_3 ," *Computational Materials Science*, Vol. 28, pp. 574~586

(4) F.F., Webster, 1978, "liquid Fueled Integral Rocket/Ramjet Technology Review," *American Institute of Aeronautics and Astronautics paper*, pp. 978~1108

(5) G. R. Johnson, T. J. Holmquist, 1994, "An improved computational constitutive model for brittle

materials", *America Institute of Physics*, Vol. 309, Issue 1, pp. 981-984

(6) D. S. Cronin, K. Bui, C. Kaufmann, G. McIntosh, T. Berstad, 2003, "Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-dyna", *4th European LS-DYNA Conference*, pp. 47~60

(7) S. H. Park, 2008, "Evaluation of the Large Deformation Behavior and the Effect of Design Parameters of O-ring", Ph.D. Thesis, Chung-Nam National University, pp. 58~65

(8) C.E. Anderson, G. R. Jhonson, T. J. Holmquist, 1995, "Ballistic Experiments and Computations of Confined 99.5% Al_2O_3 Ceramic Tiles" *Proceeding of Fifteenth International Symposium on Ballistics*,