글라스 세라믹 구형 돔의 충격파괴 모델링 기법 연구

이정희†· 이영신*· 김재훈**· 공정표**· 구송회***· 문순일***

A Study on the Impact Fracture Modeling Techniques of Glass-Ceramic Spherical Dome

Jung-Hee Lee, Young-Shin Lee, Jae-Hoon Kim, Jeong-Pyo Kong,
Song-hoe Koo and Soon-Il Moon

Key Words: Impact Fracture (충격파괴), Glass-Ceramic (유리세라믹), MACOR, Finite element method(유한요소법), Spherical dome(구형 돔)

Abstract

This paper studied on the impact fracture modeling techniques of spherical dome with MACOR glass-ceramic. The glass ceramic material has bigger compressive strength than the tensile strength and endure well at high temperature. The fracture simulation under shock perssure was performed by the finite element method with nonlinear code LS-Dyna. The simulation was carried out by 3 type dome models under step impact pulse shape. 4-node shell element and 8-node solid element were used for analysis.

1. 서 론

세라믹은 고강도, 고융점, 내마모성 그리고 내식성 등의 우수한 특성을 가지고 있다. 최근 세라믹의 제조 기술의 향상으로 우수한 특성의 세라믹 재료가 개발되고 있으며 산업용 구조재료로 적용시키기 위한 노력이 진행되고 있다.

본 논문에서는 요즘 신소재로써 각광 받고 있는 MACOR 글라스 세라믹(MACOR Glass-filled Ceramic)으로 만든 램제트 엔진의 돔 포트 커버에 대한 충격파괴 모델링 기법을 연구하였다. MACOR 글라스 세라믹은 가공성이 우수한 기계구조용 글라스 세라믹으로써 압축강도 대 인장강도의 비가 큰 특징이 있다. 또한 고온 환경에서 잘 견디며 연소시 가스 분출이 없어 항공우주 산업이나 핵융합 실험용 절연재료로서 사용되고 있다. 이러한 장점을 가지고 있는 글라스 세라믹은 램제트 엔진의 돔 포트 커버로 사용할 수 있다. 글라스 세라믹 재료특성을 이용한 돔 포트 커버는 램제트와 고체연료 로켓 부스터 사이에 존재하는 포트 커버의 일종이다. 구형 돔 형태로 제작하여 일반 평판 형태보다 로켓 부스터 작동시 높은 압력변화에 잘 견딜 수 있고 램제트 작동시에는 외부의 압력 변화에 의해 자동적으로 파괴되어 신속히 제거되어야 한다.[1)]

본 연구에서는 일반적으로 사용되는 3가지 형태의 구형 돔을 선정하여 쉘 요소와 솔리드 요소로 각각 모델링하였으며 계단형파로 충격 압력을 주었을 때 글라스 세라믹 구형 돔 포트 커버에 나

† 학생회원, 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단
E-mail : ljh26@cnu.ac.kr
TEL : (042)821-7621 FAX : (042)821-8906
* 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단장
** 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단
*** 국방과학연구소

타나는 압력과 응력 그리고 파괴 형상을 비교 분석하였다. 해석을 위해 유한요소법을 이용한 동적 수치 해석을 하였으며 비선형 동적 해석 분야에서 신뢰성 있는 상용 코드인 LS-DYNA로 연구를 수행하였다.

2. 해석모델 및 유한요소모델

2.1 해석모델

이 연구를 수행하기 위해 Table 1에서와 같이 3가지 형태의 구형 돔을 선정하였다. 이는 일반적인 구형 돔의 형상식을 통해 구한 값이다.[2] Fig. 1은 돔의 형상을 나타낸다. 여기에서 돔의 지름(D)을 100 mm 로 하였으며 두께는 모두 5 mm 를 적용하였다.

해석에 적용된 재료는 MACOR glass-filled ceramic (Corning Glass Works, Code 9658)으로 가공할 수 있는 글라스 세라믹 (machinable glass ceramic)이다. 이 재료는 냄새가 없고 흰색이며, 내열성이 우수하고 내부 결함이 없는 특징을 가지고 있다. Table 2에 나타나있는 값은 해석에 적용한 물성치값으로 정적 인장시험과 압축시험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 한 값이다. 구형 돔이 파괴 될 때의 항복응력은 글라스 세라믹의 인장강도를 적용하였으며 이는 구형 돔의 내부에 내압이 작용할 때 나타나는 대부분의 응력성분이 인장응력이 작용하기 때문이다.

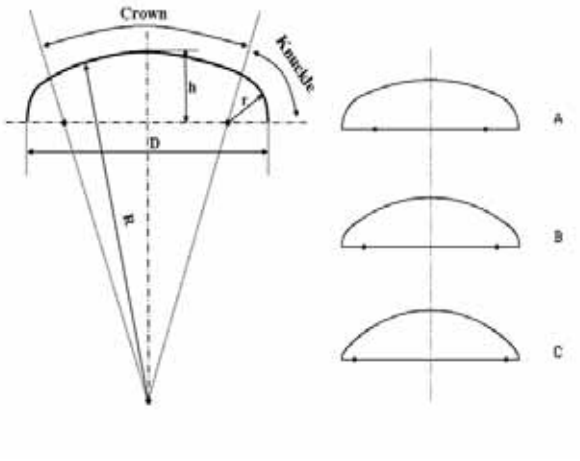


Fig. 1 Dimensions of analysis model[2]

Table 1 Nominal dimensions and shape parameters[2]

Type	R/D	r/D	h(mm)
A	1	0.188	25
B	0.75	0.125	25
C	0.68	0.073	25

Table 2 Material properties of MACOR Glass-filled ceramic[3]

Material property	MACOR Glass-filled ceramic
Density	2,520 kg/m^3
Young's modulus	63.9 GPa
Poisson's ratio	0.27
Yield strength	65 MPa
Tensile strength	65 MPa
Compression strength	341.7MPa

2.2 유한요소모델

Fig. 3은 해석에 사용된 8절점 솔리드 요소 모델로서 구형 돔형상의 1/4만을 모델링하였다. 이 모델은 돔의 대칭형상을 고려하여 x축과 y축 대칭경계조건을 적용하였으며 돔이 고정되는 가장자리 부분은 완전 경계조건을 주었다. 해석에 사용된 요소는 4절점 쉘 요소와 8절점 솔리드 요소를 사용하였으며 4절점 쉘 요소도 솔리드 요소의 경계조건과 동일하게 모델링하였다. 요소의 크기는 파편의 크기를 고려하여 최소 1.5mm에서 최대 2 mm 까지의 범위 안에서 모델링 하였으며 쉘 요소는 4380개, 솔리드 요소는 이보다 4배 많은 17520개 요소를 사용하였다. 모델링에 사용된 프로그램은 MSC. Patran 프로그램이다.

하중조건은 Fig. 4와 같이 돔의 면 전체에 내압을 받는 균일분포 압력으로 최대압력 10 MPa 을 주었으며 Fig. 5와 같이 계단형파 충격 펄스를 적용하여 해석을 수행하였다. .

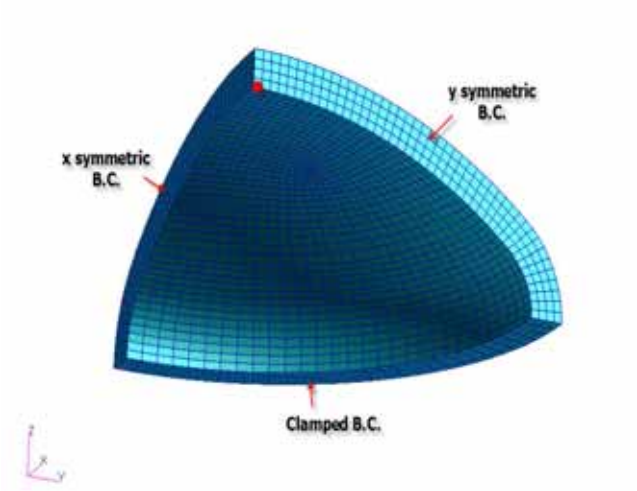


Fig. 3 Finite element model of fracture behavior analysis and boundary condition

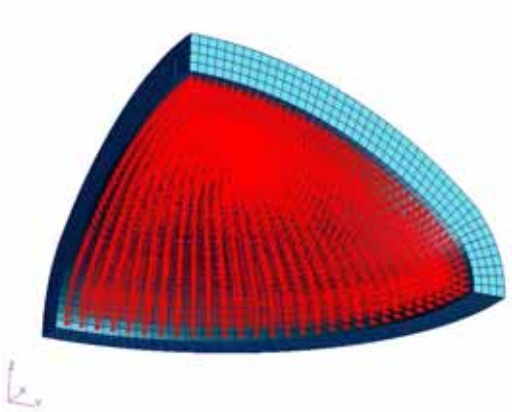


Fig. 4 Load condition for fracture behavior analysis

총 충격지속시간은 0.1 ms 로 제한하였으며 총 해석시간은 0.2 ms 로 하였다. 구형 돔의 충격 파괴 모델링 기법은 유한요소모델 생성에 있어 기존과는 다른 유한요소모델을 사용하였다. 기존의 방법은 동일한 위치에 있는 절점은 하나의 공통된 절점로 설정하여 인접해 있는 요소들간의 응력 및 변형량을 계산하였다면 이 논문에서 제시한 방법은 동일한 위치에 있다하더라도 요소들끼리 절점을 공유하지 않고 요소마다 각각 다른 절점(2개에서 8개까지)을 갖도록 절점번호를 부여하였고 이 절점들은 구속조건으로 묶어 주었다. Fig. 6은 이러한 구속조건을 보여준다. 쉘 요소는 위치에 따라 2개에서 4개의 절점을 구속시켜주었고 솔리드 요소는 2개에서 8개의 절점을 구속시켜주었다. 이는 파괴거동시 분산되는 파편을 표현하기 위해 필요한 것이다.[4] 구속을 시키는 조건은 변형량 0.001이상 초과되면 구속조건이 깨지면서 요소의 구속이 풀리게 되고 변형량이 0.001 미만에서는 요소의 구속을 유지하게 된다. 여기에서 변형량 0.001은 정적 인장시험을 통해 시편이 파단되기 전까지의 값을 고려하여 적용하였다.

세라믹 구형 돔의 파괴거동해석을 수행하기 위하여 상용 비선형 동적 유한요소코드인 LS-DYNA 를 사용하였다.

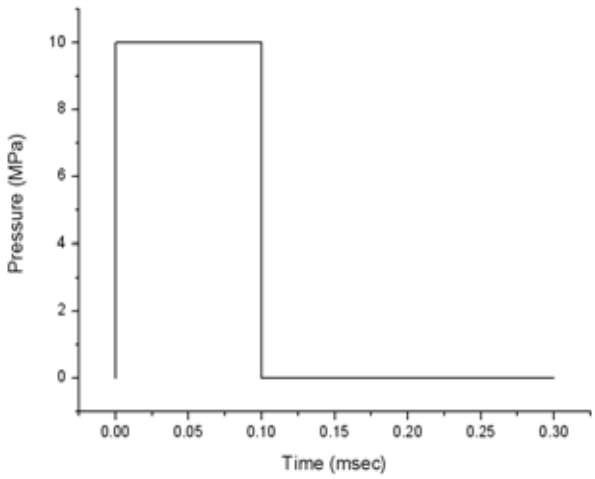


Fig. 5 Step-impact pulse shape

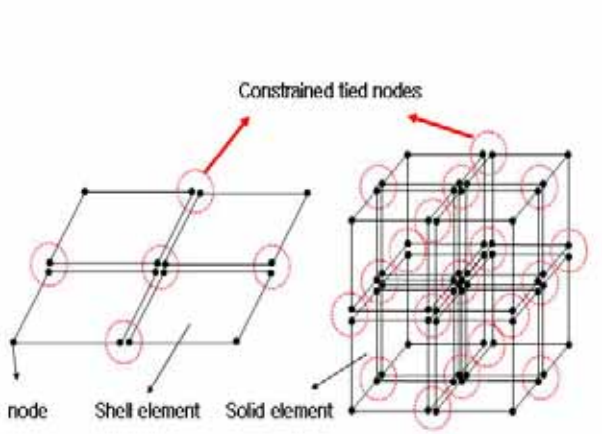


Fig. 6 Constrained tied nodes of element

3. 결과 및 고찰

글라스 세라믹 구형 돔의 충격파괴 모델링 기법을 연구 위해 일반적으로 사용되는 3가지 형태의 구형 돔을 선정하여 4절점 쉘요소와 8절점 솔리드 요소에 따른 파괴 형상을 확인하였다. 또한 파괴되기 직전, 돔의 중심에서 지름(D) 방향의 가장자리까지의 응력분포를 쉘 요소와 솔리드 요소로 비교 고찰하였다. 파괴 형상을 예측하기 위해 유한요소법을 이용한 동적 수치해석을 하였으며 비선형 동적 해석 분야에서 신뢰성이 있는 상용 코드인 LS-DYNA로 연구를 수행하였다.

3.1 요소에 따른 구형 돔의 중심부 응력 비교

충격압력에 의해 구형 돔이 받는 응력의 크기는 파편의 생성과 비산속도에 직접적인 영향을 미치는 물리량이다. Fig. 3에서 빨간점으로 표시된 돔 중심부요소를 비교 대상으로 선정하였다. Fig 7-9는 각각의 돔 형태에서 빨간점으로 표시된 곳의 응력을 쉘요소와 솔리드 요소에 따라 시간의 이력으로 비교하여 나타낸 그래프이다.

Fig. 7에서 보면 압력이 작용하고 약 0.01 밀리초가 지난 후 최대 응력이 나타남을 알 수 있다. 이 값은 글라스 세라믹의 인장강도 값이며 이 값에 도달했을 때 파괴가 시작되었음을 나타낸다. A형과 B형 그리고 C형 돔에서 최대 응력에 도달하는 시간은 거의 동일하였다. 최대 응력이 지속되는 시간은 A형 돔에서 가장 짧고 그 다음 B형과 C형 돔 순으로 길어지는 것을 알 수 있다. 이것은 돔의 곡률(R) 때문에 발생되는 것으로 곡률이 클수록 빠른 시간 안에 적은 양의 압력으로도 최대 응력이 발생하여 파괴현상이 나타나지만 곡률이 작아질수록 최대응력이 발생되는 시간과 지속되는 시간이 증가하는 경향이 나타났다. 또한 모든 구형 돔에서 쉘 요소보다는 솔리드 요소가 최대응력이 먼저 도달하였고 응력이 증가 폭도 더 컸지만 그 차이는 작으며 중앙부분에서의 쉘 요소와 솔리드 요소의 경향은 매우 유사하게 나타났다. 파괴 이후에도 응력이 진동을 하면서 남아 있는 이유는 하중이 작용하는 시간은 0.1 밀리초까지이기 때문이며 이후에는 하중값이 0으로 수렴하였다.

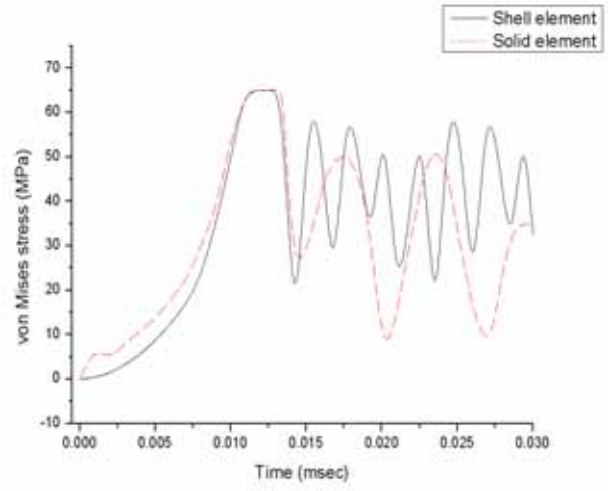


Fig. 7 Stress at center of type-A dome under impact pressure

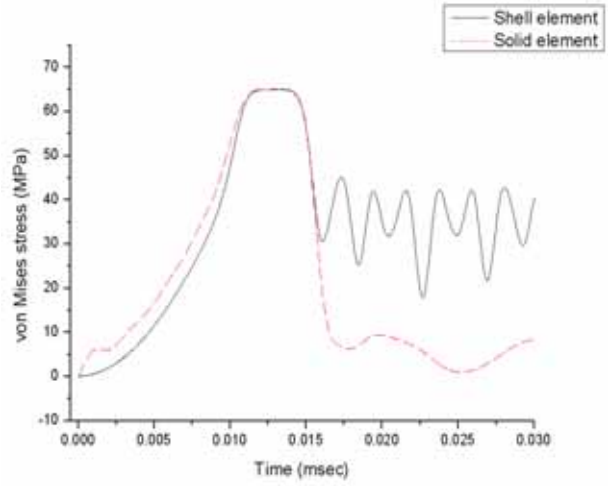


Fig. 8 Stress at center of type-B dome under impact pressure

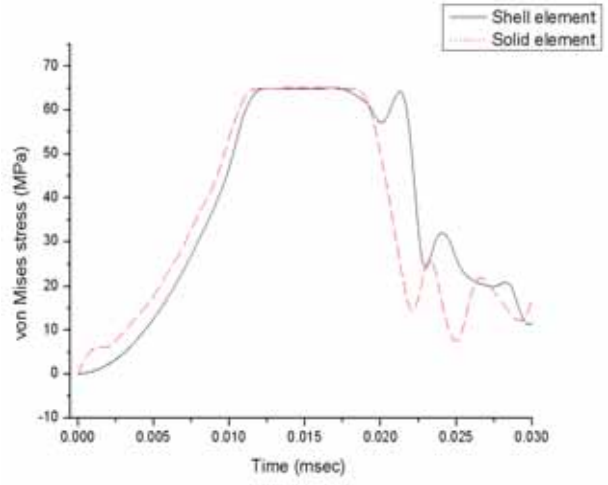
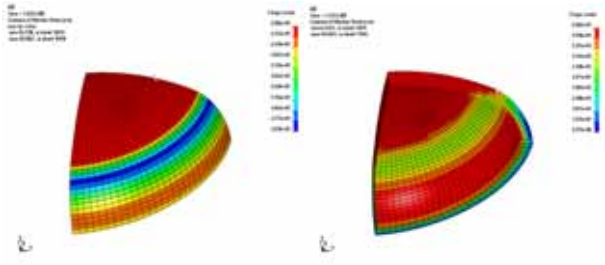


Fig. 9 Stress at center of type-C dome under impact pressure

3.2 구형 돔의 파괴 직전의 응력 분포 비교

Fig. 11-13 는 각 돔 형상에 따라 파괴되기 직전, 돔의 중심에서 지름(D) 방향의 가장자리까지의 응력분포를 쉘 요소와 솔리드 요소로 비교하여 나타낸 그래프이다. 이들 그래프에서 솔리드 요소에 해당하는 값은 두께의 중심면에 해당하는 요소를 선택하여 쉘 요소와 비교하였다. Fig. 11에서 A형 돔 모델은 솔리드 요소는 약 30mm 지점까지 쉘요소는 40 mm 지점까지 최대응력 65 MPa 나타났다. 쉘 요소와 솔리드요소의 응력의 값은 거리에 따라 차이를 보이지만 응력이 작용하는 경향은 유사하게 나타났다. Fig. 12에서 B형 돔 모델도 A형 모델과 유사하게 솔리드 요소는 약 30mm 지점까지 쉘요소는 40 mm 지점까지 최대응력 65 MPa 나타났다. B형 모델 역시 응력의 값의 차이를 보이지만 응력이 작용하는 경향은 유사하게 나타났다. C형 돔 모델은 Fig. 12에서 보는 것과 같이 쉘 요소와 솔리드 요소의 응력의 차이는 있지만 경향이 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 응력이 분포하는 경향은 유사하게 나타나지만 최대응력이 작용하는 위치와 분포가 쉘 요소와 솔리드 요소가 다름을 알 수 있다. 이러한 차이가 나타나는 이유는 돔 내부 표면에 압력이 작용할 때 솔리드 요소는 두께 방향으로 인접해 있는 요소들 상호간의 응력전달이 잘 표현되지만 쉘 요소는 두께에 따른 응력 전달 표현이 제안되기 때문이다. 이는 파괴 거동에도 영향을 미치는 것으로 분석된다.

Fig. 10은 A형 돔에서 파괴 직전의 쉘 요소 모델과 솔리드 요소 모델의 r방향의 응력분포를 나타낸 그림으로 이 현상을 설명할 수 있다. 솔리드 요소는 두께에 따라 응력의 분포 값이 다르게 나타나지만 쉘 요소는 두께에 따라 응력을 표현하지 못한다. 최대응력이 발생하는 위치가 달라지면 파괴가 일어나는 위치도 영향을 받으므로 파괴가 일어나는 모양이 달라질 수 있다.



(a) shell element model (b) solid element model

Fig. 10 Compare of stresses σ_r with the type-A dome before fracture

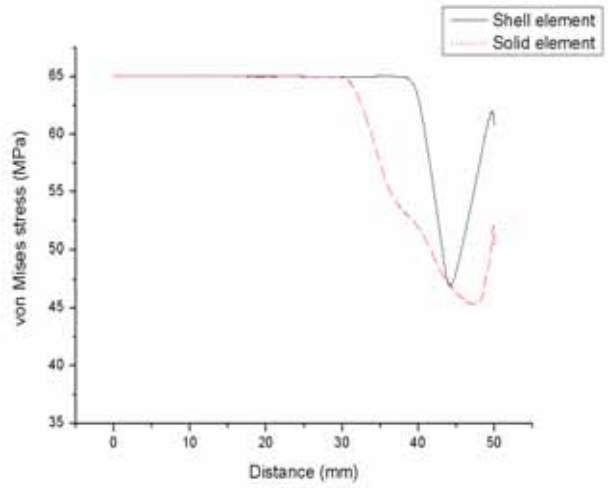


Fig. 11 Variation of stresses σ_r with the radius r in the half of type-A dome before fracture

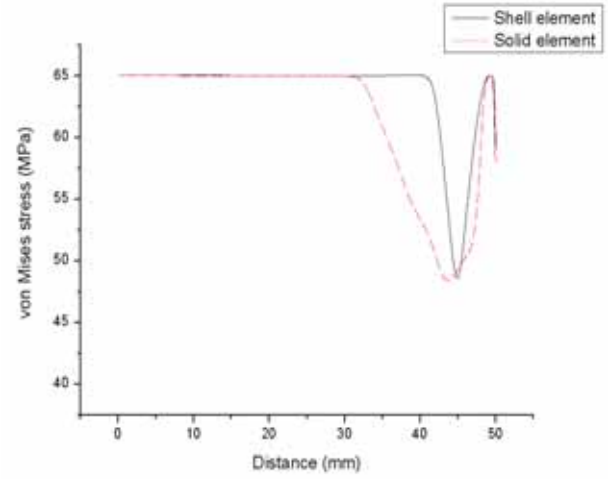


Fig. 12 Variation of stresses σ_r with the radius r in the half of type-B dome before fracture

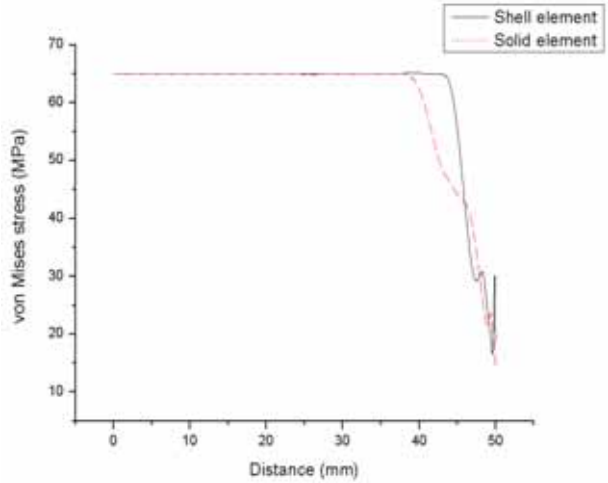
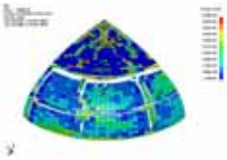
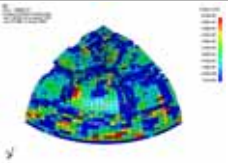
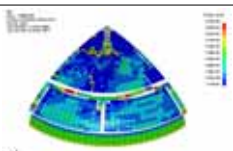
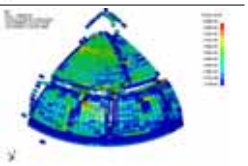
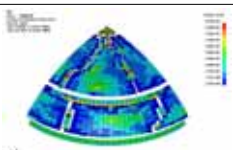
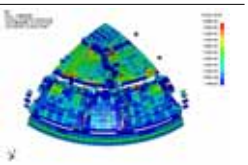


Fig. 13 Variation of stresses σ_r with the radius r in the half of type-C dome before fracture

3.3 요소에 따른 구형 돔의 파괴거동 비교

Table 3 은 3가지 형태의 구형 돔이 요소에 따라 충격 압력으로 인해 발생된 파괴 모습을 나타내고 있다. 대체로 쉘 요소와 솔리드 요소의 파괴 형상이 다르다는 것을 알 수 있다. 파괴가 일어나는 큰 형상은 유사하게 나타났지만 돔의 중심부분의 파괴 형태가 다름을 알 수 있다. A형 돔의 경우 돔의 중심부분의 1/3이상 5개 이하의 요소 파편으로 나누어졌지만 솔리드 요소는 그보다는 큰 형상으로 파괴되었음을 알 수 있다. B형의 돔의 경우 중심부분의 파괴가 크게 4부분으로 나누어졌지만 솔리드 요소는 2부분으로 나누어졌다. C형의 돔 경우 쉘 요소는 중심부분에서 가장자리 방향으로 3부분으로 나누어진 반면 솔리드 요소는 Y자 형태로 파괴됨을 알 수 있다. 이러한 차이는 쉘 요소는 파괴가 일어날 때 두께 방향으로 작용하는 힘을 표현하지 못함으로 나타나는 결과이다. 따라서 좀 더 현실감 있는 파괴 형상을 묘사하기 위해서는 쉘 요소보다 솔리드 요소를 사용하는 것이 좋다.

Table 3 Comparison of fracture behavior of ceramic dome under impact pressure

	Shell	Solid
Type-A		
Type-B		
Type-C		

4. 결 론

본 연구에서는 3가지 형태의 구형 돔을 선정하여 쉘 요소와 솔리드 요소에 따른 글라스 세라믹 구형 돔의 충격파괴 모델링 기법을 연구하였고 구형 돔에 중심에서의 응력을 요소에 따라 비교 고찰하였다. 세라믹 구형 돔의 충격파괴 모델링기법 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 돔의 중앙부분에서 응력을 시간이력에 따라 비교할 때 돔의 곡률이 클수록 빠른 시간 안에 적은 양의 압력으로도 최대 응력이 발생하여 파괴현상이 나타나지만 곡률이 작아질수록 최대응력이 발생되는 시간과 지속되는 시간이 증가하는 경향이 나타났다. 그리고 이 부분에서 쉘 요소와 솔리드 요소의 응력 경향은 매우 유사하게 나타났다.

2. 각 돔 형상에 따라 파괴되기 직전, 돔의 중심에서 지름(D) 방향의 가장자리까지의 응력분포를 쉘 요소와 솔리드 요소로 비교 응력분포 형태는 유사한 경향을 나타내었지만 값의 차이를 보이며 그 이유는 요소에 따라 두께방향으로 응력표현의 차이가 있기 때문이다.

3. 각 구형 돔이 요소에 따라 충격 압력으로 인해 발생된 파괴 모습을 비교하였을 때 파괴가 일어나는 큰 형상은 유사하게 나타났지만 돔의 중심부분의 파괴 형태가 다름을 알 수 있다. 이러한 차이는 쉘 요소는 파괴가 일어날 때 두께 방향으로 작용하는 힘을 표현하지 못함으로 나타나는 결과이다. 따라서 좀 더 현실감 있는 파괴 형상을 묘사하기 위해서는 쉘 요소보다 솔리드 요소를 사용하는 것이 좋다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 기초연구과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약번호 ADD-06-05-04)

참고문헌

(1) Scannell, P. R., Milich, N. R. and Kaili, E. O., 1980, "Advanced Integral Roket Ramjet Port Cover Development," *AIAA*, No. 80-1279.

(2) Novozhilov, V.V. , 1970, "Thin Shell Theory", Wolters-noordhoff publishing groningen, pp. 135~136

(3) Kim, D. H., Kim, J. H., Lee, Y. S., Rho, N. S., Park, C. K., Lee, K. S., and Moon, S. I., "Study on Dynamic Fracture Characteristic and Application to the Structure of Advanced Glass Ceramic," International Journal of Modern Physics B, Vol.20, No.25-27, pp.3908-3913, 2006

(4) 이제준, "세라믹 돔 포트 커버의 충격 특성 연구", 석사 학위 논문, 충남 대학교, 2006 pp.34-39