

## 통계적 파괴확률에 의한 Sin/Hip 질화규소의 신뢰도 분석(III)

송진수 · 이재석\* · 김해일\* · 이준근

한국과학기술연구원 구조세라믹스연구실  
\*한국과학기술연구원 부설 시스템공학연구소  
(1991년 1월 24일 접수)

### Reliability Analysis of Statistical Failure Probability in Sin/Hip $\text{Si}_3\text{N}_4$ (III)

Jin-Soo Song, Jae-Seok Lee\*, Hae-Il Kim\* and Junn-Gunn Lee

Structural Ceramics Lab., KIST  
\*System Engineering Research InsL, KIST  
(Received January 24, 1991)

#### 요 약

피스톤 핀 및 poppet valve에 대한 파괴확률을 계산하기 위해 구조 세라믹스의 신뢰도 분석 프로그램인 KIST/CARES를 사용하였다. 계산에 필요한 재료상수  $m$ ,  $\sigma_0$ ,  $k_B$ 를 구하기 위해 Sin/Hip 질화규소에 대한 4점 꺾임 강도시험을 하였으며, 또한 응력분포를 구하기 위해 MSC/NASTRAN에 따라 유한요소해석을 하였다. 계산된 피스톤 핀의 파괴확률은  $10^{-6}$  이하였으며, poppet valve의 파괴확률은 0.95 이상이었다.

#### ABSTRACT

KIST/CARES reliability analysis program was used to calculate failure probabilities of piston pin and poppet valve. The 4-point bending test was performed on Sin/Hip  $\text{Si}_3\text{N}_4$  for obtaining material parameters such as  $m$ ,  $\sigma_0$ , and  $k_B$ , and the finite element analysis was performed using MSC/NASTRAN for obtaining stress distribution. The calculated failure probability of piston pin was lower than  $10^{-6}$  and the failure probability of poppet valve was greater than 0.95.

#### 1. 서 론

##### 1.1. 개 요

구조 세라믹스를 세라믹 디젤 엔진 부품, 터보 차저 로터(turbo charger roter) 등 동적 구조물의 소재로 사용하기 위해서는 부품 설계시 파괴에 대한 신뢰도 분석 과정이 필연적으로 수반된다. 구조 세라믹스 부품의 신뢰도 분석은 어떤 구조 세라믹스를 부품 재료로 사용했을 때 주어진 열적 기계적 응력하에서 어떤 양상으로 파괴가 일어날 것인가를 예측하여 부품화할 최적 재료의 선택 및 그 부품의 최적 형상을 설계하기 위한 것이다.

따라서 구조 세라믹스로 부품을 설계하고자 할 때, 구조 세라믹스의 특성상 우선적으로 고려되어야 하는

점들은 다음과 같다. 첫째, 구조 세라믹스의 파괴는 50-200  $\mu\text{m}$  정도의 작은 결함으로부터 시작되며, 이러한 작은 결함 범위에서는 비파괴 측정법에 따른 결함의 검출이 용이하지 않다. 따라서 파괴 결함의 형태 및 크기에 따른 파괴확률의 변화는 결함의 형태, 크기에 대한 실제 관찰보다는 여러 시편에 대한 통계적인 해석을 통해서 구하는 것이 현실적으로 더 유용하다.

두번째로 구조 세라믹스는 작용응력에 따라 가장 심각한 결함부터 불안정 확대를 일으키고, 작용응력이 임계응력에 도달할 때 결함의 급격한 확대가 일어나면서 파괴된다. 따라서, 시험부품의 크기가 클수록, 임계 결함으로 될 수 있는 결함의 수가 더 많으므로, 더 낮은 응력하에서 파괴를 일으키는 크기효과(size effect)를

나타낸다.

세번째로 구조 세라믹스는 사용환경에서의 온도분포 및 부하응력에 따른 영향과 침식, 부식 및 산화에 의해 기존 결함의 확대가 시간의 경과에 따라 계속적으로 진행되므로, 빠른 파괴(fast fracture)하에서의 파괴를 일으키는 하중보다 더 낮은 하중하에서 파괴를 유발하는 느린 파괴(slow fracture) 거동을 나타낸다.

따라서, 구조 세라믹스의 실제 응용을 위한 설계시 위와 같은 특성을 종합적으로 고려하기 위해서 다음과 같은 내용이 고려되어야 한다.

- (1) 파괴 형태의 파악-빠른 파괴 및 느린 파괴
- (2) 파괴 모델의 설정-파괴 기준의 설정 및 파괴 자료의 통계적 처리를 위한 방정식의 유도
- (3) 위 사항을 신속 처리할 수 있는 전산프로그램의 작성-복잡한 형상의 실제 부품에 대한 FEA(Finite Element Analysis)와 각 파괴 모델에 따른 파괴확률의 예측을 연계
- (4) 실험실 시편의 신뢰도 분석-단순한 형태의 실험실 시편을 단순한 시험조건하에서 신뢰도 분석을 하여 최적 파괴 모델의 결정
- (5) 실제 제품의 신뢰도 분석-실험실 시편의 신뢰도 분석을 바탕으로 복잡한 형태의 실제 제품을 응용조건하에서 이론적인 신뢰도 분석을 하여, 그 제품의 파괴 양상 예측
- (6) 최적 디자인의 결정-실제 제품의 이론적 신뢰도 분석을 바탕으로 하여 신뢰도를 최대화시킬 수 있는 형태로 제품의 디자인을 수정
- (7) 비교 분석에 의한 보완-최적 디자인으로 제조된 실제 부품의 실험적 신뢰도 분석과 그 이론적 신뢰도 분석을 서로 비교 분석하여 소결 모델, 전산프로그램 등을 보완

### 1.2. 파괴확률 예측을 위한 각 모델

빠른 파괴 모델 고려시 중요한 것은, 결함의 형태, 분포, 배향성의 파악 및 그에 따른 파괴 기준의 설정에 따라, 파괴확률을 통계적으로 처리할 수 있는 방정식의 유도이다. 여기에는 응력의 상태, 균열진행의 모드(mode), 전단 응력의 작용여부 등이 고려된다. 통계적으로 파괴확률을 예측하기 위해 처음으로 제시된 모델은 Weibull의 최악 결함설에 따른 모델이다<sup>1,2)</sup>. Weibull 모델은, 일축 응력하에서 재료가 모드 I의 양상으로 균열이 진행되어 빠른 파괴를 일으키는 경우에 적용되며 다음과 같은 반 실험식으로 된다.

$$P_N = 1 - \exp\left\{-\left[\int_V (\sigma - \sigma_0)/\sigma_0\right]^m dV\right\} \quad (1)$$

여기서 m은 Weibull 계수,  $\sigma_0$ 는 파괴확률이 0인 경우의 threshold stress이고,  $\sigma_0$ 는 (stress)(volume)<sup>1/m</sup>의 단위를 가지게 되는 scale parameter이다.

Freudenthal<sup>3)</sup>은 Weibull 모델을 다차원 응력상태로 확장하기 위해서, 가해지는 주응력이 서로 독립적이라고 가정한 PIA(Principle of Independent Action) 모델을 제시하였다. PIA 모델에서 파괴확률과 강도와의 관계식은 내부 결함, 표면 결함에 대해서 각각 다음과 같다.

$$P_N = 1 - \exp\left\{-\int_V [(\sigma_1/\sigma_0)^m + (\sigma_2/\sigma_0)^m + (\sigma_3/\sigma_0)^m] dV\right\} \quad (2)$$

$$P_S = 1 - \exp\left\{-\int_A [(\sigma_1/\sigma_0)^m + (\sigma_2/\sigma_0)^m] dA\right\} \quad (3)$$

여기서  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 3차원 각 방향에서의 주응력을 의미한다.

다축 응력상태에서는 주응력이 아닌 부응력에 수직으로 배향된 결함이라 할지라도 그 크기가 충분히 크면 파괴를 일으킬 수가 있다. 이 사실을 고려한 파괴 기준이 Batdorf의 파괴 기준이다. Batdorf 등<sup>4,5)</sup>은 임계응력  $\sigma_{cr}$ 보다 큰 응력이 작용하는 균열이 존재하며, 이 균열의 유효응력(effective stress)  $\sigma_e$ 가  $\sigma_{cr}$ 보다 큰 값이 되는 배향을 가질 때 파괴가 일어나는 것으로 가정하고 다음 식을 유도하였다.

$$P_I = P_1 \cdot P_2 \quad (4)$$

여기서  $P_1$ 은 임계응력  $\sigma_{cr}$ 을 가지는 균열이 각 요소에 존재할 확률이고,  $P_2$ 는 유효응력  $\sigma_e$ 가 임계응력  $\sigma_{cr}$ 보다 큰 방향으로 균열이 배향할 확률이다. 결함의 형태에 따른 파괴확률과 강도와의 관계식은 다음과 같다.

$$P_N = 1 - \exp\left[-\int_V dV \int_0^{\sigma_{cr}} (\Omega/4\pi) \frac{dN_V}{d\sigma_{cr}} d\sigma_{cr}\right] \quad (5)$$

(volume flaw)

$$P_S = 1 - \exp\left[-\int_A dA \int_0^{\sigma_{cr}} (\Omega/\pi) \frac{dN_S}{d\sigma_{cr}} d\sigma_{cr}\right] \quad (6)$$

(surface flaw)

여기서  $\Omega$ 는  $\sigma_e \geq \sigma_{cr}$ 인 균열들 각각의 배향을 포함하는 주응력 공간에서의 solid angle이며,  $N_V, N_S$ 는 내부 결함 및 표면 결함에 대한 Batdorf 균열 밀도 함수(crack density function)를 의미한다. Batdorf 모델에서, 각각의 파괴 기준 및 균열의 형태에 따른 유효응력은 다음과 같이 결정된다.

$$\sigma_e = 0.5[\sigma_n + (\sigma_n^2 + \tau^2)^{1/2}] \quad (\text{MTSC GC, volume}) \quad (7)$$

$$\sigma_e = 0.5\{\sigma_n + \sigma_n^2 - \tau^2/(1 - 0.5v)^2\}^{1/2} \quad (\text{MTSC PSC, volume}) \quad (8)$$

$$\sigma_c = [\sigma_n^2 + \tau^2]^{1/2} \text{ (SERRC GC, volume, surface)} \quad (9)$$

$$\sigma_c = [\sigma_n^2 + 1/(1-\nu) (S_s/L.1215)^2]^{1/2} \text{ (SERRC GN, surface)} \quad (10)$$

$$\sigma_c = [\sigma_n^2 + \tau^2/(1-0.5\nu)^2]^{1/2} \text{ (SERRC PSC, volume)} \quad (11)$$

여기서  $\sigma_n$ 은 수직응력,  $\tau$ 는 전단응력,  $S_s$ 는 out-of plane shear stress이며,  $\nu$ 는 Poisson ratio이다.

Shetty<sup>6)</sup>는 균열의 전파가 인가된 far field 다축 응력 상태함수로부터 결정된다는 가정하에 mixed-mode 파괴 기준을 제시하였다. 이 때 파괴 모드의 상호작용에 따른 전단응력의 영향을 고려하기 위해서 다음 식을 제시하였다.

$$K_I/K_{IC} + (K_{II}/C \cdot K_{III})^2 = 1 \quad (12)$$

여기서  $K_{II}$ 는  $K_{II}$ 와  $K_{III}$  중 주로 작용하는 파괴 모드이다. Shetty는 C가 0.8에서 2 사이에서 결정되는 것을 확인하였다. 여기서 C값이 증가함은 shear-insensitive 경향이 더 커지는 것을 의미한다. Shetty의 mixed-mode 파괴 기준에서 주로 작용하는 파괴 모드가  $K_I$  및  $K_{II}$ 라고 할 때, 각 파괴 기준 및 결합의 형태에 따라 결정되는 유효응력은 다음과 같다.

$$\sigma_c = 0.5[\sigma_n + \sqrt{(\sigma_n^2 + (2\tau/c)^2)}] \text{ (GC, volume)} \quad (13)$$

$$\sigma_c = 0.5[\sigma_n + \sqrt{(\sigma_n^2 + 4(\tau/c)^2)}] \text{ (GC, surface)} \quad (14)$$

$$\sigma_c = 0.5[\sigma_n + \sqrt{(\sigma_n^2 + 3.1803(\tau/c)^2)}] \text{ (GN, surface)} \quad (15)$$

$$\sigma_c = 0.5[\sigma_n + \sqrt{(\sigma_n^2 + (4\tau/c(2-\nu))^2)}] \text{ (PSC, volume)} \quad (16)$$

$$\sigma_c = 0.5[\sigma_n + \sqrt{(\sigma_n^2 + 3.301(\tau/c)_s^2)}] \text{ (SSC, surface)} \quad (17)$$

## 2. 실험

### 2.1. 시편의 제조 및 특성

본 실험에서는 제 1보, 제 2보에서와 같이 쌍용 중앙 연구소에서 6 wt%  $Y_2O_3$  + 2 wt%  $Al_2O_3$ 를 소결조제로 사용하여 Sin/Hip 공정으로 제조한  $Si_3N_4$ <sup>7M)</sup>를 사용하였다. 4점 꺾임 강도 측정용 시편은 50×4×3 mm의 크기로 가공하였으며, 표면 거칠기( $R_{ms}$ )는 모두 0.5-0.6  $\mu m$  이하가 되도록 표면 처리를 하였고, 표면 처리 후 잔유응력을 제거하기 위해서 1200°C에서 열처리하였다. 여기서 4점 꺾임 강도 시험은 재료상수를 구하기 위해 행하였으며, 사용한 지그(jig)는, JIS 규격의 30/10 mm였다. 이 때 크로스 헤드속도(cross head speed)는 모두

**Table 1.** The Test Results of 4-point MOR Test (30 mm/10 mm jig).

(R.T.)			
Specimen number	Fracture strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Specimen number	Fracture strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )
1	7932.5	2	8058.2
3	8290.8	4	8294.9
5	8624.9	6	8799.9
7	8808.3	8	8833.3
9	8941.7	10	9124.9
11	9550.0	12	9749.9
13	10183.3	14	10441.7
15	10675.0		
average: 9093.9 Kgf/cm <sup>2</sup>			
(1000°C)			
Specimen number	Fracture strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )	Specimen number	Fracture strength (Kgf/cm <sup>2</sup> )
1	2353.3	2	2485.8
3	2555.0	4	2870.0
5	2876.7	6	2888.3
7	3022.5	8	3095.8
9	3131.7	10	3216.7
11	3237.5	12	3264.2
13	3268.3	14	3310.8
15	3494.2	16	3519.2
17	3564.1	18	4078.3
19	4400.8	20	4454.2
21	4494.2	22	4507.5
23	4731.7	24	4738.3
25	4970.8	26	5308.3
27	5317.5		
average: 3672.4 Kgf/cm <sup>2</sup>			

0.5 mm/min으로 유지하였다. 4점 꺾임 강도 측정결과는 Table 1에 나타내었다.

본 연구과정에서 사용한 KIST/CARES는 미국 NASA에서 개발한 NASA/CARES를 수정 보완한 것으로써, 프로그램의 처리과정은 다음과 같다<sup>9,10)</sup>.

(1) 대상 부품의 신뢰도 분석을 위한 전처리 과정 - MSC/NASTRAN 또는 ANSYS를 이용하여 대상 부품을 각 요소로 분할하여 유한요소해석을 행하면, 각 요소의 응력, 온도, 면적, 부피에 대한 값들이 출력화일 형태로 얻어진다. 출력화일에서의 각 값들은 KIST/CARES 프로그램내의 각 변수에 자동으로 입력 처리된다.

(2) 일축 강도 시험 자료로부터 통계적 재료 상수의 추정 - 4점 꺾임 강도 시험에 따라 얻어진 각 강도값은

로부터 재료 상수인 Weibull 계수  $m$ 과 shape parameter  $\sigma_0$  및 Batdorf 계수  $k_B$ 를 자체적으로 계산한다. 이 때 각 온도에 대한 재료 상수 데이터 베이스를 얻기 위해서 여러 온도에서의 시험 강도값을 입력하여, 각 온도에 대한 재료 상수를 구한다. 또한 파단면 관찰에 따라 파괴 결함의 형태는 내부 결함, 표면 결함으로 나누어지고, 각 결함의 형태별로 시험 강도값을 입력하면, 내부 결함 및 표면 결함에 대해서 각각의 재료 상수가 얻어진다.

(3) 각 파괴 모델에 따른 계산-현재 고려할 수 있는 모델은 PIA 모델, Batdorf의 shear-sensitive 모델이며, 이 중에는 Shetty의 mixed-mode 기준에 따른 shear-sensitive 모델도 포함된다. 이 때 파괴확률은 결함형태에 따라 각각 계산된다. 또한 느린 파괴에 대한 파괴확률의 변화는 느린 파괴 변수의 고려에 의해 변형 PIA 모델로부터 계산될 수 있다. 이 때 각 파괴 모델에 따른 파괴확률의 변화는 임의 하중하에서의 연속적인 계산을 통해서 얻어지며, 또한 한 그래프상에서 처리할 수 있도록 그래픽 데이터를 AutoCAD 호환 파일로 처리한다.

(4) 온도, 응력 및 파괴확률 분포의 MOVIEBYU 처리-각 요소별 응력분포, 온도분포 및 파괴확률의 분포는 MOVIEBYU로 후 처리, 3차원 그래픽으로 출력한다.

### 2.2. MSC/NASTRAN에 의한 유한요소해석

실제 부품 설계를 위한 초기 단계로써 피스톤 핀 및 세라믹 밸브에 대한 유한요소해석을 행하였다. 피스톤 핀 형상의 최적화를 위해서는 우선적으로 피스톤 핀의 동작 환경에 대한 분석과 그에 따른 열 해석 및 응력 해석이 필수적이다. 본 연구에서도 피스톤 핀의 형상 설계에 관한 기본적 과정을 수행하는 것을 목적으로 3가지 형상의 피스톤 핀에 대해서 열 해석 및 응력 해석을 수행하였다. 3가지 형상의 선정에 있어서 변수는 피스톤 핀의 두께로써 기본 형상인 두께  $t$ 가 5.5 mm인 피스톤 핀을 중심으로 각각  $t$ 가 4, 7.5 mm인 경우를 포함시켰다. 이렇게 두께를 조정한 이유는 실제 초기의 두께인 5.5 mm에서부터 두께를 증가 또는 감소시킬 것인가를 결정하기 위한 것이다.

피스톤 핀의 유한요소해석에는 미국 GM에서 해석한 신타를 참고하였으며, 열 해석시 boundary 조건 및 형상치수는 Fig. 1.에서와 같이 일부 변경하였다<sup>11)</sup>. 계산시 사용한 압력은 loading region에 inertia force가 22000 N 작용하며, constrained region에서는 양쪽에 각각 11000 N이 작용하는 것으로 처리하였다. 위의 조건하에서 MSC/NASTRAN에 의한 유한요소해석을 위해서 피스톤 핀은 solid 요소인 HEXA element가 384개, shell 요소인

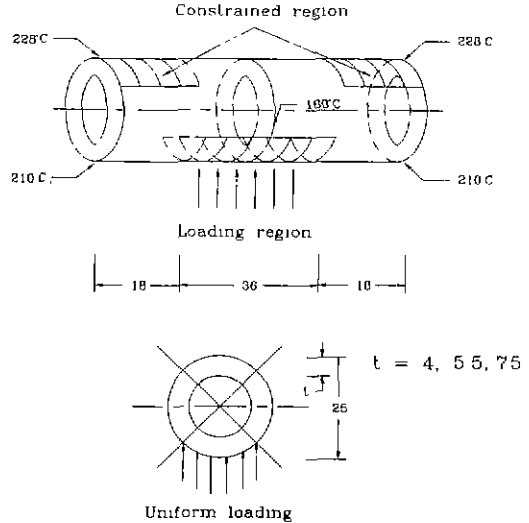


Fig. 1. The mechanical loading condition and thermal boundary condition of piston pin<sup>11)</sup>.

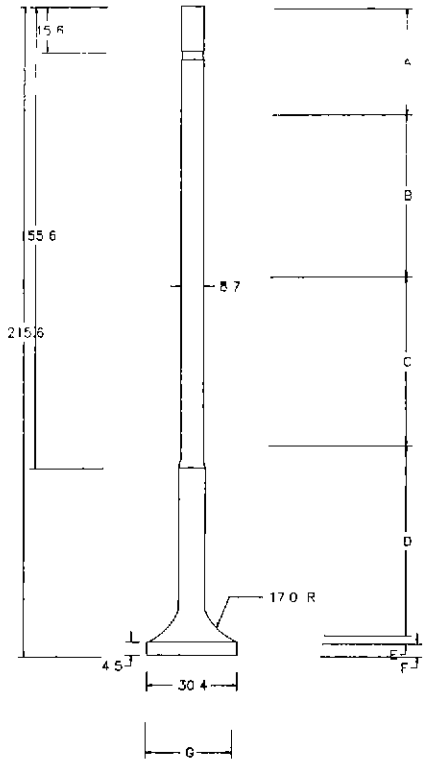
QUAD8 요소는 352개, 합쳐서 736개의 요소로 분할되었으며, KIST/CARES 프로그램에 따라 solid 요소는 27개, shell 요소는 9개의 조요소로 각각 재분할되었다.

세라믹 밸브의 해석시, valve의 형상치수 및 열해석을 위한 각 부위에서의 온도조건은 Weber가 최적 설계한 결과를 이용하였다<sup>12)</sup>. 이것은 Fig. 2에 valve 각 부위에서의 온도에 대한 boundary 조건과 함께 나타내었다. 가해지는 하중은 두 가지 상황으로 구별하여 고려하였다. 첫번째 경우에는, 온도분포에서 연유하는 열 하중과 실린더내의 연소 압력에 따른 16.2 MPa의 기계적 하중을 함께 고려하였으며, 두번째 가정에서는 valve가 실린더에 seating될 때 작용하는 1741 N의 기계적 하중과 열 응력을 함께 고려한 경우에 대해서 해석하였다. 이 최적화된 밸브에 대한 MSC/NASTRAN에 의한 유한요소해석을 위한 요소 분할은 solid 요소인 HEXA 요소를 288개, PENTA 요소를 299개 사용하였으며, KIST/CARES를 이용하여 각각 27개의 조요소로 재분할하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 피스톤 핀의 해석

실제 동작 환경에서의 복잡한 하중조건(loading condition) 중 해석에 직접 고려한 것은 피스톤 핀 중심부에서의 관성력에 따른 기계적 부하와 실린더와 접해있는 양쪽 끝단의 속박 지역(constrained area)에서 생기는 기계적 부하이다. 이 때 실린더와 접한 부분에 생기는



Lcation	Surface temperature (°C)	Heat transfer coefficient (W/mm <sup>2</sup> ·°C)
A	100	100
B	200	200
C	400	500
D	760	560
E	590	1700
F	850	400
G	940	450

Fig. 2. The dimension and thermal boundary condition of ceramic poppet vale<sup>12)</sup>.

부하는 피스톤 핀의 둘레에 걸쳐 균일하게 적용하는 것으로 간주하였다. 또한 온도 분포에 따라 생기는 열적 부하도 응력 해석에 함께 고려하였다.

유한요소해석에 의해 구한 온도 분포는 Fig. 3에 나타내었다. 피스톤 핀에 가해지는 압력하에서 피스톤 핀의 변형을 쉽게 일 수 있도록 변형이 일어난 부분을 강조하면 Fig. 4와 같이 된다. 이 기계적 응력과 열응력의 동시작용으로 피스톤 핀의 각 부에 작용하는 응력은 Fig. 5에 나타내었다. 응력 분포를 살펴보면, 피스톤 핀의 중심부 바깥부분에 작용한 입력으로 인해 가장 큰 인장

응력이 피스톤 핀의 하단 중심부 안쪽 표면에 생기며, 피스톤 핀의 상단 중심부 바깥부분에도 인장 응력이 발생한다. 이러한 응력 분포로부터 피스톤 핀의 파괴가 주로 피스톤 핀의 하단 중심부 안쪽 표면에서 주로 유발될 것으로 생각된다.

Fig. 6은 피스톤 핀의 두께가 7.5 mm인 경우의 파괴 확률을 Weibull PIA 모델로부터 구한 것이다. 파괴확률은 KIST/CARES로 구하였으며, 시편에 대해서 30/10 mm 4점 굽힘 강도시험을 행한 결과를 사용하였으며, 결함의 형태에 따른 구별없이 입력하였다. KIST/CARES를 사용하여, 최소자승법에 의해 구한 재료상수는 다음과 같다. 상온 강도값의 경우, Weibull 계수  $m$ 은 11.59였고, scale parameter  $\sigma_0$ 는  $0.1E+4 \text{ MPa}(m)^{3/11.59}$ 였다. 1000 °C의 경우, Weibull 계수  $m$ 은 4.74였고, scale parameter  $\sigma_0$ 는  $0.4E+3 \text{ MPa}(m)^{3/11.74}$ 였다.

파괴확률을 구한 결과 모든 경우에서 실용 가능한 낮은 파괴확률을 나타내었으며, 피스톤 핀의 두께가 증가할수록 파괴확률이 감소하였다. 그 값은 내부 결함에 대한 Weibull PIA 모델로부터 계산시, 두께가 4 mm인 경우에  $0.8096E-4$ 였으며, 5.5 mm인 경우에는  $0.8035E-4$ 였으나, 두께가 7.5 mm인 경우에는  $0.1480E-6$ 으로 크게 감소하였다. 또한 표면 결함에 대해서는 두께가 증가함에 따라 파괴확률이 역시  $0.3215E-7$ ,  $0.3210E-7$ ,  $0.22813E-8$ 으로 감소하였으며, 내부 결함에 대해 고려한 경우보다 더 낮은 파괴확률을 나타내었다. 파괴확률과 응력 해석에서 얻어진 최대 인장 응력과의 관계를 살펴보면, 피스톤 핀의 두께가 가장 얇은 경우에서 가장 큰 파괴확률과 최대 인장 응력을 나타내었다. 따라서 파괴확률을 낮추는 것을 목적으로 피스톤 핀의 두께를 결정하고자 하면, 기계적 하중에 대해 더 낮은 최대 인장 응력의 발생을 나타내는 더 두꺼운 피스톤 핀쪽으로 접근하여야 할 것이다.

### 3.2. 세라믹 밸브의 해석

세라믹 밸브는 미국 DDC(Detroit Diesel Corporation)에서 최적 설계한 최종 형상에 대해서 본 연구에서 개발한 KIST/CARES를 적용하는 것을 목적으로 수행되었다. 따라서 형상 치수 및 온도의 경계조건은 DDC의 것과 동일하다. 미국 DDC의 연구보고에 의하면 초기 설계시 고려한 밸브의 경우 144g이었으나, 최적 설계 후 73.7g으로 무게가 감소되도록 형상이 변경된 것이다.

세라믹 밸브의 각 요소에서의 응력 분포는 두 가지 가정에 대해서 각각 구하였다. 그 중 세라믹 밸브가 실린더내로 진입한 경우로 가정한 첫번째 조건에 대해서는,

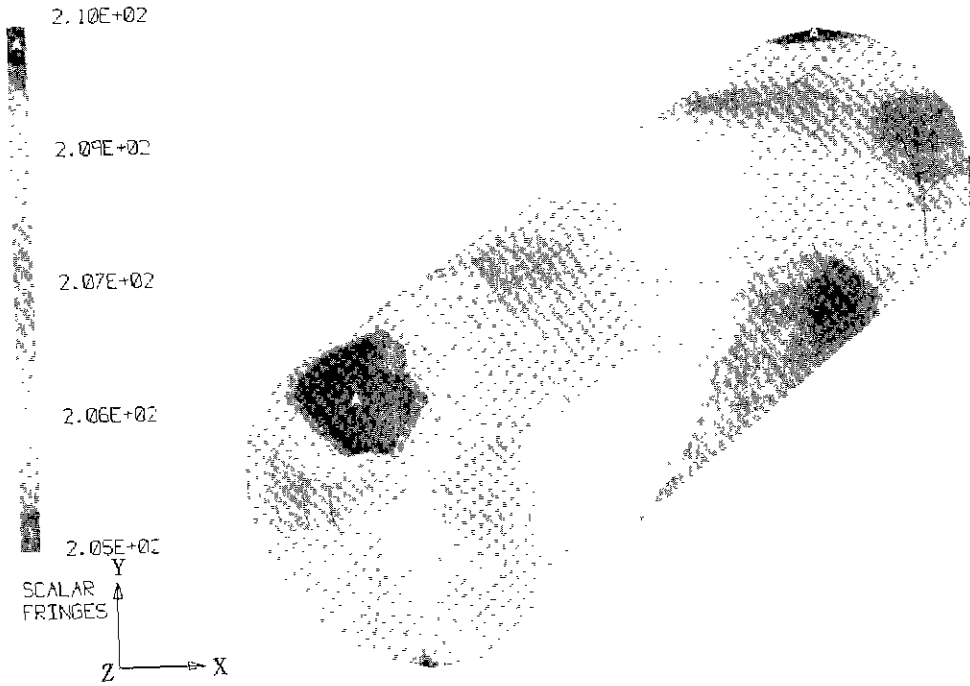


Fig. 3. MOBIEBYU pattern of temperature distribution for piston pin (thickness=7.5 mm).

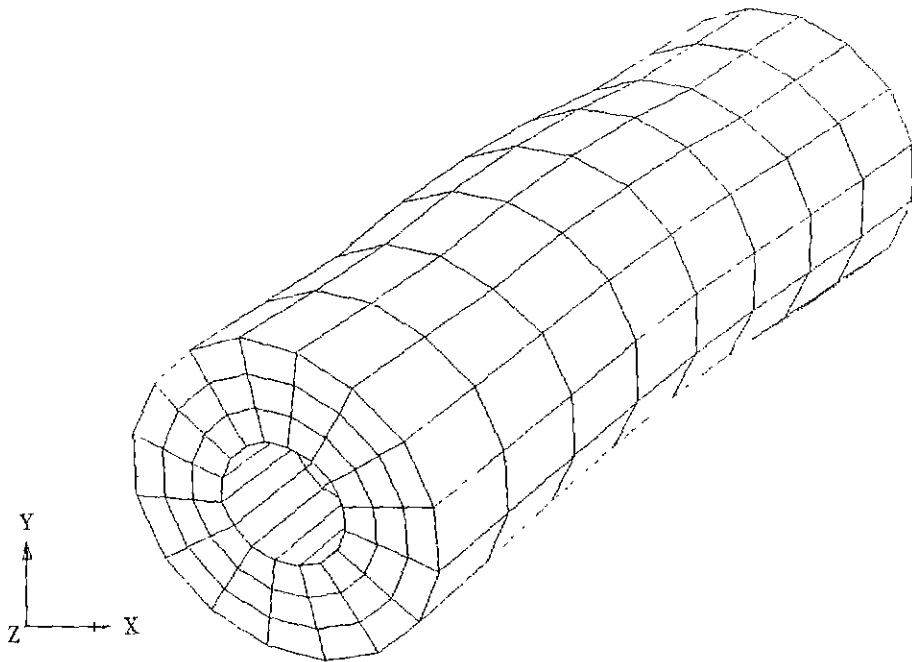


Fig. 4. MOBIEBYU pattern of displacement for piston pin.

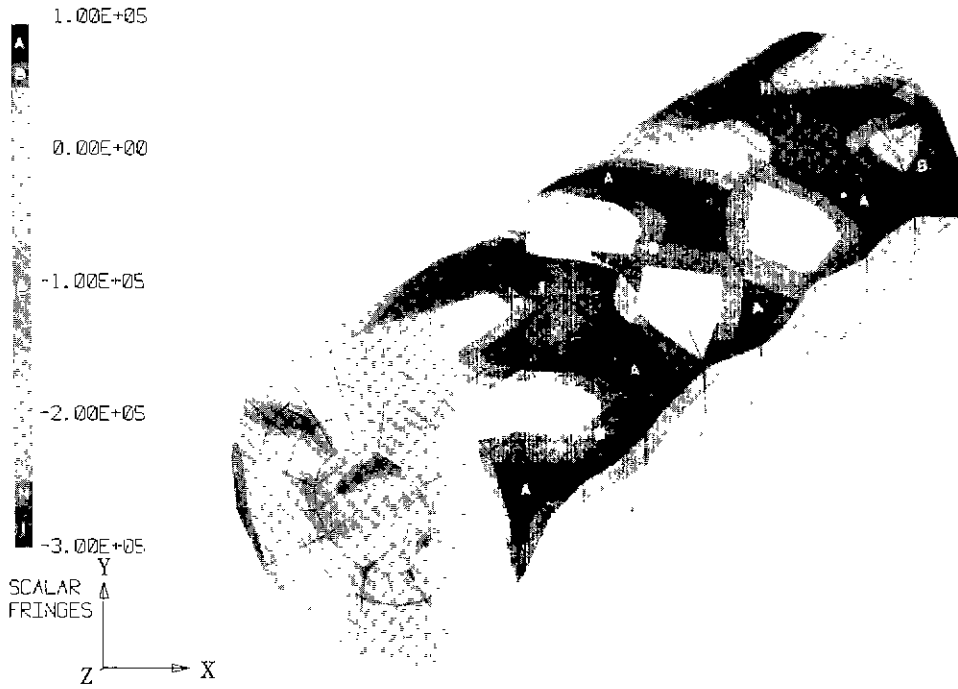


Fig. 5. MOBIEBYU pattern of stress distribution for piston pin (thickness=7.5 mm).

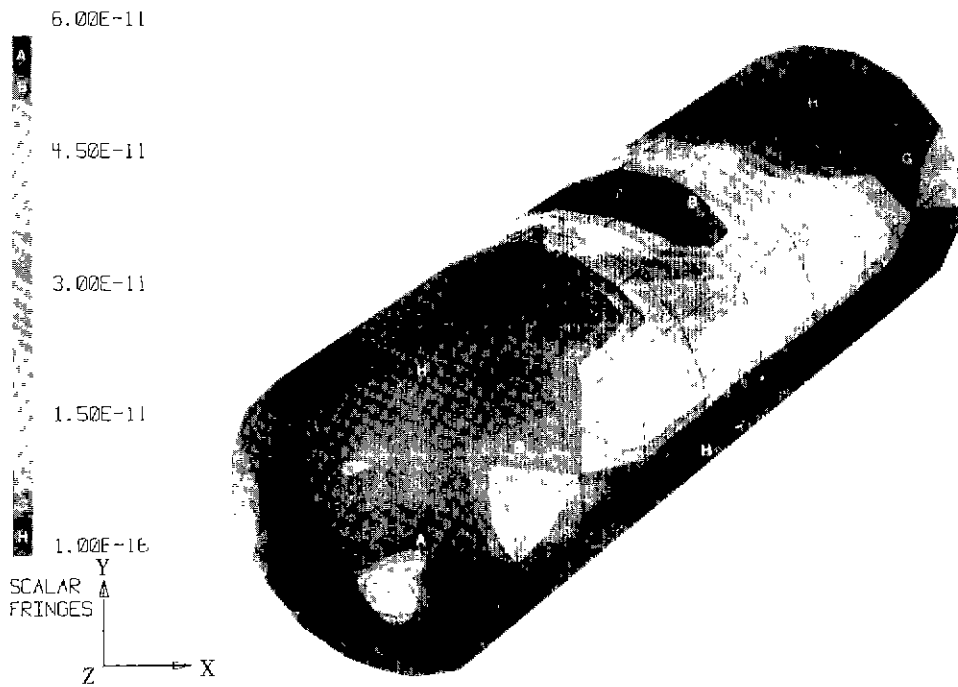


Fig. 6. MOBIEBYU pattern of failure probability distribution for piston pin (thickness=7.5 mm, Weibull PIA model).

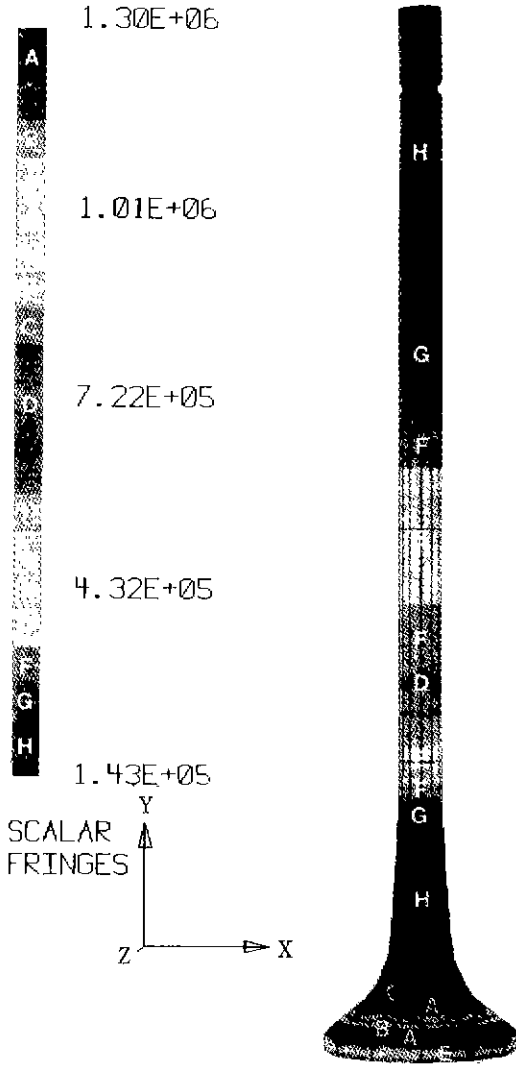


Fig. 7. MOBIEBYU pattern of stress distribution of ceramic poppet valve case 1.

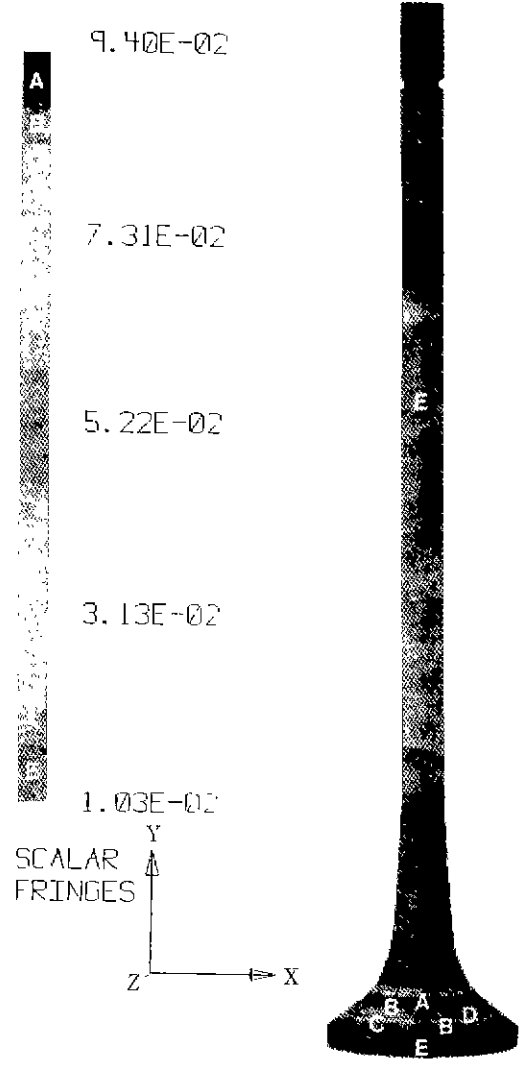


Fig. 8. MOVIEBYU pattern of failure probability distribution of ceramic poppet valve case 1 (Weibull PIA model)

Fig. 7에 나타난 것처럼 실린더내의 연소 압력으로 가정한 16.2 MPa의 작용으로 밸브의 locking groove 부분에 가장 큰 응력이 걸리는 것을 알 수 있다. 또한 세라믹 밸브가 실린더 헤드에 sitting될 때에 가정한 두번째 조건에 대해서는, fillet 부분에 집중되어 최대 인장 응력 부가 형성되었다. 그러나 두번째 가정의 경우에서, 최대 응력은  $7.36E+4$ 으로서 첫번째 경우의  $9.49E+4$ 보다 작게 나타났다. 이러한 결과는 밸브의 파괴를 야기하는 주원인이 온도분포에 의해 발생하는 열응력과 함께 locking groove 부분에 인가되는 연소 압력이므로 이를

고려하는 첫번째 경우로써, 설계의 기준을 설정할 필요가 있는 것을 의미한다.

응력해석 결과만으로 해석할 때, 밸브의 파괴는 주로 실린더내로 밸브가 진입한 상태에서 발생하리라 예측할 수 있다. 세라믹 밸브에 대한 파괴확률 중 첫번째 가정의 경우에 대한 Weibull PIA 모델에 따른 파괴확률의 분포는 Fig. 8에 나타내었다. 재료 상수를 구하기 위하여 입력된 일축 강도값은 SHSN의 상온, 1000°C 시험 자료로써, 피스톤 핀의 경우와 Weibull 계수 및 scale parameter값은 동일하다.



계산된 파괴확률값을 살펴보면 두번째 가정의 경우에는, Batdorf의 shear-insensitive 모델에 따라서 구한 값이  $0.3244E-6$ 으로써 거의 파괴가 일어나지 않는 것으로 나타났다. 그러나 첫번째 가정의 경우에는 파괴확률이 0.95 이상을 나타내어 거의 전부 파괴가 일어나는 것으로 예측되었다. 따라서 파괴확률 예측 결과에 따르면 미국 DDC의 설계 형상에 의한 세라믹 밸브는 실제 사용이 곤란할 것으로 나타났다. 이를 해결하기 위해서는 열응력의 발생을 감소시킬 수 있도록 새로운 형상의 설계가 필요하며, 또한 고온 강도 특성이 우수한 새로운 물성의 재료가 선택되어야 할 것이다.

### 3.3. 앞으로의 연구 전망

본 연구에서와 같이 구조세라믹스 부품의 파괴는 대부분의 경우, 최대 인장 응력이 걸리는 부분에서 발생하나, 파괴확률은 최대 인장 응력의 값만으로 결정되지는 않는다. 그 이유로 세라믹스에는 최대 인장 응력보다 작은 인장 응력하에서 파괴가 일어날 수 있을 정도로 큰 결함이 존재하고 이 결함이 그 부 인장 응력이 걸리는 부분에 있으면 최대 인장 응력보다 작은 인장 응력하에서 파괴가 일어날 수 있기 때문이다. 그리고, 파괴 결함의 형태는 재료의 소결조건, 가공조건에 따라 결정되지만, 처음에는 주로 내부 결함이 작용한 경우라도 시간, 사용 환경에 따라서 결함의 형태가 변화될 수 있으므로 이를 고려할 수 있는 파괴확률 예측 시스템이 필요하며, 이 시스템에 의해 파괴확률도 함께 고려하는 것이 설계를 위한 필수 과정으로 정착되어야 한다. 이와 아울러 느린 파괴에 대한 원인 규명 및 전산화 처리기술에 관한 종합적인 연구가 장기적으로 수행되어 파괴수명의 예측을 할 수 있도록 시스템이 확장되어야 할 것이며, 이러한 결과들이 단일 재료가 아닌 복합재료에 대해서도 적용될 수 있도록, 복합재료에 대한 파괴 모델의 전산처리에 관한 연구도 아울러 진행되어야 할 것이다.

## 4. 결 론

1. 구조 세라믹스의 빠른 파괴 및 느린 파괴에 관한 각 모델로부터 세라믹 부품의 파괴확률을 예측할 수 있는 전산시스템 KIST/CARES를 구성하기 위해 미국의 NASA/CARES를 수정 보완하였다. KIST/CARES는 세라믹 밸브 및 피스톤 핀에 대한 최적 형상의 설계에 사용되었다. 연구결과 KIST/CARES는 다른 부품의 설계시에도 적절히 이용될 수 있으리라 생각된다.
2. 피스톤 핀에 대한 설계를 목적으로 길이가 72 mm

이고, 내경, 외경 사이의 두께가 4, 5.5, 7.5 mm인 세 경우에 대해 열 해석, 응력 해석을 한 후 SHSN 일축 강도 자료를 사용하여 파괴확률을 측정하였다. 내부 결함에 대한 Weibull PIA 모델에 따른 파괴확률의 계산 결과는 두께가 7.5 mm인 경우에  $0.1480E-6$ 으로 4, 5.5 mm의  $0.8096E-4$ ,  $0.8035E-4$ 보다 더 낮은 파괴확률을 나타내었으며, 표면 결함에 대해서도 동일한 양상을 나타내었다.

3. 미국 DDC(Detroit Diesel Corporation)에서 최적 설계된 세라믹 밸브형상에 대해 열 해석, 응력 해석을 하고, SHSN 일축 강도 자료를 사용하여 파괴확률을 계산한 결과, Weibull PIA, Batdorf 모델에서 모두 0.95 이상의 파괴확률을 나타내었다. 응력 해석 결과를 살펴볼 때, 이런 높은 파괴확률의 원인은 주로 밸브에 생기는 열응력에 따른 것임을 알 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 1990년 과학기술처의 연구비 지원을 받아, 수행된 한국-독일간 국제공동연구개발 결과임.

## 참고문헌

1. W. Weibull, "A Statistical Theory of the Strength of Materials," Ingeniors Vetenskaps Akademien Handlingar, No. 151 (1939).
2. W. Weibull, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *J. App. Mech.*, **18** (1951).
3. A.M. Freudenthal, "Statistical Approach to brittle Fracture," Fracture, (ed. by H. Liebowitz), Academic Press (1968)
4. S.B. Batdorf and J.G. Crose, "A Statistical Theory for the Fracture of Brittle Structures Subjected to Nonuniform Polyaxial Stresses," *J. App. Mech.*, TRANS. ASME, 459-464, June (1974).
5. S.B. Batdorf and H.L. Heimsch, Jr, "Fracture Statistics of Brittle Materials with Surface Cracks," EFM, Vol. 10, 831-841 (1978).
6. D.K. Shetty, A.R. Rosenfield and W.H. Duckworth, "Statistical Analysis of Size and Stress State Effects on the Strength of an Alumina Ceramic," Methods for Assessing the Structural Reliability of Brittle Materials, ASTM-STP-844, (ed. by S.W. Freiman and C.M Hudson), American Society for

- Testing and Materials, Philadelphia, PA, 57-80 (1984).
7. 유영혁, 이준근, 이재석, "통계적 파괴확률에 의한 Sin/Hip 질화규소의 신뢰도 분석," *요업학회지*, **26** (1), 116-122 (1989).
  8. 송진수, 김영욱, 이재석, 이준근. "통계적 파괴확률에 의한 Sin/Hip 질화규소의 신뢰도 분석(II)," *요업학회지*, **27**(3), 321-328 (1990).
  9. J.P. Gyekenyesi, "SCARE: A Postprocessor Program to MSC/NASTRAN for Reliability Analysis of Structural Ceramic Components," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **108** (3), 540-546 (1986).
  10. N.N. Nemeth *et al.*, "Designing Ceramic Components with the CARES Computer Program," *Am Cer. Soc. Bull.*, **68**, 2064-2072 (1989).
  11. C.M. Suh, "Reliability Analysis of Structural Ceramic Components," Unpublished Report (1985).
  12. K.E. Weber and C.J. Micu, "Ceramic Valve Development for Heavy-Duty Low Heat Rejection Diesel Engines," *Ceram. Eng Proc.* **10**, 12544-1268 (1989).