

## 다공 캡슐 열매체의 구조응력해석

강영환, 주기남

한국원자력연구소

이영신, 최명환, 신도섭

충남대학교

### 요 약

재료 조사시험용 계장캡슐은 하나로(Hi-Flux Advanced Neutron Application Reactor : HANARO)를 이용하는 조사시설중의 하나이다. 캡슐 내부에 있는 열매체는 다공 원통구조물로 고려되며, 다양한 형태와 크기를 갖는 조사시험용 시편이 각 단에 삽입된다. 조사시험에 대한 사용자의 요구조건을 효율적으로 충족시키기 위해서는 캡슐 열매체에 대한 여러 역학적인 특성을 파악하여 설계 및 제작할 필요가 있다. 따라서 계장 캡슐 설계의 초기단계로서 다양한 기하학적인 설계변수를 갖는 다공 캡슐 열매체의 구조적 특성을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 조사 분위기인 하중상태에서의 다공 구조물에 대한 구조응력해석을 수행하여 다공 매개변수에 따른 응력 및 변위 등을 고찰하였고, 구조물의 건전성을 평가하였다.

### 1. 서 론

구조물에 외력이 작용하게 되면, 구조물 내부에는 외력에 대응하는 응력(stress)과 동시에 구조물의 성질에 따른 변형(deformation)이 발생하므로 작용된 하중상태하에서의 응력과 변형은 구조물 설계에 있어 매우 중요하다[1]. 본 연구에서는 하나로용 캡슐 내부 조사시편을 지지하는 열매체의 형상과 유사한 다공 원통구조물의 구조적 응력해석을 수행하였다. 조사시편에는 인장시편, 충격시편, 파괴인성시편 등으로 나뉜다[2]. 이들 시편의 직경은 파괴인성시편인 경우, 34mm 이상이어야 하고, 인장시편과 충격시편은 11mm정도가 된다. 다공 원통구조물은 기하학적인 형상변화(중앙공의 크기, 시편공의 크기, 중앙공과 시편공과의 거리, 시편공의 개수)에 의해 다양한 다공 원통구조물을 설계할 수 있으므로 이러한 기하학적인 형상변화를 설계변수로 하였다.

본 연구에서의 구조응력해석은 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS[3]를 이용하였고, 캡슐 열매체가 하나의 시편구멍을 갖는 경우와 여러 개의 시편구멍을 갖는 경우로 구분하여 역학적 특성을 분석하였다.

## 2. 캡슐 열매체 개요

캡슐 본체 내부에는 반경 27.9mm, 길이 120mm인 열매체가 5단으로 배열되도록 설계되었으며, 각 단은 조사온도를 확보하기 위하여 재질이 알루미나( $Al_2O_3$ )이고, 길이가 15mm인 단열재(Insulator)에 의하여 단열되어 있고, 이들 캡슐 열매체의 움직임을 제한하기 위하여 본체 상부에 스프링이 설치되어 있다. 조사시험중 다공 캡슐 열매체는 내부 스프링에 의해 축방향으로 압축하중을 받으며, 캡슐외통과 캡슐 열매체 사이의 갭에서 캡슐 내부 온도를 제어하기 위한 헬륨가스에 의해서 압력을 받게 된다[4]. 따라서 이들 압축하중과 내압하에서의 다공 캡슐 열매체에 작용하는 응력상태에 대한 정보는 여러 개의 시편구멍을 갖는 캡슐열매체의 설계에 대한 기초 데이터가 된다. 조사시험편을 삽입하기 위한 다공 캡슐 열매체는 순수 알루미늄인 A1050 재질로 이루어졌으며, 기계적 물성은 다음과 같다. Young's modulus  $E=70GPa$ , Density  $\rho=2710kg/m^3$ , Poisson's ratio  $\nu=0.33$ 이다. Table 1은 다공 원통구조물의 기하학적인 형상변화에 따른 설계변수의 정의를 나타내고 있다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 해석모델 및 방법

본 연구에서는 기하학적인 형상변화에 따른 다공 원통구조물의 응력 및 변위 특성을 알아보기 위하여 3차원 모델링을 하였다. 특히, 시편공이 비대칭적으로 분포한 열매체를 고려하여 1/2대칭형상으로 모델링을 하였고, 대칭적으로 분포한 열매체를 고려하여 1/4대칭형상으로 모델링하였다. 해석에 사용된 요소는 8절점, 3자유도( $U_x, U_y, U_z$ )를 갖는 3차원 요소인 solid 45를 사용하였고, 중앙공 및 시편공 주변의 응력집중이 예상되는 부위에서는 상대적으로 조밀하게 요소를 나누어 모델링하였다. 대표적 해석모델로는 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2는 원통구조물의 중앙에서 일정한 거리만큼 편심된 시편공이 1개 있을 경우의 모델이고, Fig. 3은 원통구조물의 중앙에 1개의 중앙공이 있고, 중앙공과 일정한 거리만큼 떨어진 시편공이 22.5°간격으로 시편공의 개수가 12개인 경우의 모델을 나타내고 있다. 각각의 해석모델에 사용된 절점수와 요소수는 Table 2와 같다.

본 연구에서는 해석방법으로 단일공 원통구조물과 다공 원통구조물의 몇몇 경우를 제시하였고, 각각의 경우에 대한 정의는 다음과 같다.

Case 1 : 중앙에 1개의 중앙공이 있을 경우

Case 2 : 중앙에서 일정한 거리로 편심된 1개의 시편공이 있을 경우

Case 3 : 1개의 중앙공과 90°간격으로 4개의 시편공이 있을 경우

Case 4 : 1개의 중앙공과 22.5°간격으로 12개의 시편공이 있을 경우

해석모델에서 다공의 기하학적인 형상변화는 설계변수로 하였고, 해석의 단순화를 위해 중앙공으로부터 일정한 거리로 떨어져 있는 시편공 사이의 간격은 일정한 것으로 보았다. Table 1에서 주어진 것과 같이 열매체의 반경은 27.9mm이므로 이 반경을 기본값으로 하여 다른 매개변수의 크기를 결정하여 해석하였다. Table 3은 각각의 경우에 대하여 해석 가능한 범위와 최대 경우의 수를 나타내고 있다. 시편공의 수가 증가할수록 설계할 수 있는 모델 형상에는 많은 제약을 받는다는 사실을 알 수 있다.

### 3.2 하중 및 경계조건

일반적으로 계장캡슐 설계시, 이용자의 요구조건을 충족시키기 위하여 스프링력, 헬륨가스압력이 최종설계에 반영되어 제작된다. 본 연구에서는 표준형 계장캡슐의 하중조건을 이용해서 해석 결과를 얻었다. 캡슐 내부의 시편삽입을 위한 다공 열매체는 계장후 캡슐 상부의 스프링에 의하여 압축하중을 받으며, 이 스프링의 스프링력은  $f=2.19\text{kgf}$ 이다. 또한 캡슐 본체 외통과 열매체 사이의 겹에는 단열특성이 좋은 헬륨가스  $1\text{atm}$ 을 유지시켜 주고 있다. 따라서 조사시험중 캡슐 열매체는 이들 압축하중과 내압을 동시에 받게 된다. 스프링에 의한 압축하중은 해석모델의 상단 표면에 균일하게 작용하는 것으로 보았다. 이들 하중조건에 대해 보수적인 해석결과를 얻기 위해 스프링력으로 작용하는 축방향 하중을 최대  $100\text{N}$ , 헬륨가스압을  $10\text{atm}$ 으로 해석결과를 얻도록 하였다. 또한 각각의 캡슐열매체는 단열재(Insulator)에 의해 상·하로 구속되어 있고, 캡슐외통과의 겹이 존재하므로 캡슐 열매체 상부에서는 3자유도( $U_x, U_y, U_z$ )가 주어진 하중조건에서 전이(Translation) 될 수 있고, 하부에서는  $U_x, U_y$ 방향으로는 전이될 수 있으며,  $U_z$ 방향으로는 전이될 수 없는데 보수적인 해를 얻기 위해 하단에서 3자유도( $U_x, U_y, U_z$ )를 완전고정으로 해석하였다.

## 4. 해석결과 및 고찰

### 4.1. 단일공 원통구조물의 응력해석

#### (1) Case 1

이 경우의 설계변수는 중앙공의 반경( $R_i/R_o$ )이고, Fig. 4는 조합하중하의 중앙공 크기 변화에 따른 응력 및 변위를 나타내었고, 응력 및 변위는  $R_i/R_o$ 가 증가할수록 증가하며,  $R_i/R_o=0.8$ 이상이 되면 급격히 증가하고,  $0.2 \leq R_i/R_o \leq 0.7$ 에서는 약  $4\text{MPa}$ 로 거의 일정하다. 또한 주어진 하중(축하중  $100\text{N}$ , 외압  $10\text{atm}$ ) 및 경계조건(외팔형 지지)에서 중앙공 주변에서 최대응력이 발생하며, 그 값은  $11.9\text{MPa}$  이내에 있고, 최대변위는  $6\mu\text{m}$  이내에 있다.

#### (2) Case 2

이 경우의 설계변수는 편심공의 반경( $R_a/R_o$ ), 중앙점과 시편공과의 거리( $a/R_o$ )이다.  $R_a/R_o=0.2$ 로 일정하고  $a/R_o$ 가 변할 경우의 조합하중하에서 응력을 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 응력은  $a/R_o$ 가 증가할수록 증가하고, 변위는  $a/R_o$ 가 증가할수록 감소하여  $a/R_o=0.5$ 에서 최소의 변위를 갖고,  $a/R_o$ 가 증가함에 따라 다시 증가하였다. 이때 응력은  $a/R_o=0.7$ 일 때  $23.9\text{MPa}$ 로 최대를 나타내고, 변위는  $a/R_o=0.7$ 에서  $2.80\mu\text{m}$ 로 최대를 나타낸다. 응력은  $R_a/R_o=0.1$ 일 때  $16.2\text{MPa}$ 로 최대를 나타내고,  $R_a/R_o=0.3$ 일 때  $12.3\text{MPa}$ 로 감소한다. 이것으로부터 시편공이 편심되었을 경우에는 시편공의 크기가 증가할수록 최대응력은 감소하고, 중앙점과 시편공과의 거리가 증가할수록 최대응력은 감소한다.

### 4.2. 다공 원통구조물의 응력해석

#### (1) Case 3

이 경우의 설계변수는 중앙공 반경( $R_i/R_o$ ), 시편공 반경( $R_a/R_o$ ), 중앙공과 시편공과의 거리( $a/R_o$ )이다. Fig. 6은  $a/R_o=0.5$ 로 일정하고  $R_i/R_o, R_a/R_o$ 가 변할 경우로  $R_i/R_o=0.2, R_a/R_o=0.2$ 일 때 최대응

력은 9.3MPa이고,  $Ri/Ro=0.2$ ,  $Ra/Ro=0.1$ 일 때 5.6MPa로 최소값을 갖는다. 이것으로부터 시편공의 크기가 증가할수록 응력변화는 크게 나타나며, 중앙공의 크기 변화에 관계없이 일정하다.

(2) Case 4

이 경우의 설계변수는 중앙공 반경( $Ri/Ro$ ), 시편공 반경( $Ra/Ro$ ), 중앙공과 시편공과의 거리( $a/Ro$ )이다. Fig. 7은  $a/Ro=0.6$ 로 일정하고  $Ri/Ro$ ,  $Ra/Ro$ 가 변할 경우로  $Ri/Ro=0.1$ ,  $Ra/Ro=0.1$ 일 때 최대응력은 6.9MPa로 최대값을 가지며,  $Ri/Ro=0.2$ ,  $Ra/Ro=0.1$ 일 때 최대응력은 5.7MPa로 최소값을 갖는다. 이것으로부터 시편공의 크기가 증가할수록 응력변화는 크게 나타나며, 중앙공의 크기 변화에 관계없이 일정하다.

5. 결 론

이들 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 다공 원통구조물에서 최대응력은 중앙공과 시편공사이, 시편공과 시편공 사이에서 발생하며, 중앙공의 크기( $Ri/Ro$ )보다는 시편공의 크기( $Ra/Ro$ ) 및 중앙공과 시편공과의 거리( $a/Ro$ )에 의해서 응력변화가 뚜렷하게 변한다. 주어진 하중조건하에서 최대응력 23.9MPa 이내이고, 최대변위는 큰 차이가 없이 약  $6\mu m$  이내로 일정한 결과를 얻을 수 있다.
- (2) 파괴인성시편은 시편공이  $Ri/Ro \geq 0.7$ 가 되어야 하고, 인장시편과 충격시편은 시편공이  $Ri/Ro \geq 0.2$ ,  $Ra/Ro \geq 0.2$ 가 되어야 한다. 따라서 파괴인성시편 조사시에는 중앙에 1개의 시편공을 가진 단 일공 원통구조물이 적합하며, 인장시편과 충격시편 조사시에는 다공 원통구조물이 적합하다.

6. 참고문헌

- [1] 전문헌 외 3인, "핵기계공학", 한국원자력학회, 1990
- [2] KAERI/RR-1398/93, "KMRR을 이용한 노내검증실험 평가기술 개발", 한국원자력연구소, 1994
- [3] ANSYS Engineering Analysis System User's Manual for Revision 5.2, Swanson Analysis System, Inc., 1992
- [4] KAERI/RR-1760/96, "계장캡슐활용기술개발", 한국원자력연구소, 1997

Table 1. The geometric dimensions of the structure with multi-holes

Descriptions	Symbols	Dimensions
Outer radius of the structure	$Ro$	27.9 mm
Inner radius of the structure	$Ri$	variables
Specimen hole radius	$Ra$	variables
Distance between center of the central hole and center of the specimen hole	$a$	variables
Number of specimen holes	$m$	variables

Table 2. Node and element numbers in the analytical model

(unit : each)

Case	Node numbers	Element numbers
Case 1	1664	1225
Case 2	4712	3780
Case 3	8707	6700
Case 4	12426	9600

Table 3. The geometric design parameters in the analytical model

(unit : each)

Case number	Analysis model	The analysis extent of the design parameter	Number of case
1	The structure with a central hole	$0.1 \leq Ri/Ro \leq 0.9$	9
2	The structure with an eccentric hole	if $Ra/Ro=0.1$ , $0.2 \leq a/Ro \leq 0.8$ if $Ra/Ro=0.2$ , $0.3 \leq a/Ro \leq 0.7$ if $Ra/Ro=0.3$ , $0.4 \leq a/Ro \leq 0.6$	15
3	The structure with a central hole and four specimen holes at 90 ° intervals	if $Ri/Ro=0.1$ , $Ra/Ro=0.1$ , $0.3 \leq a/Ro \leq 0.7$ if $Ri/Ro=0.1$ , $Ra/Ro=0.2$ , $0.5 \leq a/Ro \leq 0.6$ if $Ri/Ro=0.2$ , $Ra/Ro=0.1$ , $0.4 \leq a/Ro \leq 0.6$ if $Ri/Ro=0.2$ , $Ra/Ro=0.2$ , $a/Ro=0.5$ if $Ri/Ro=0.3$ , $Ra/Ro=0.1$ , $a/Ro=0.5$	12
4	The structure with a central hole and twelve specimen holes at 22.5 ° intervals	if $Ri/Ro=0.1$ , $Ra/Ro=0.1$ , $0.5 \leq a/Ro \leq 0.7$ if $Ri/Ro=0.1$ , $Ra/Ro=0.15$ , $a/Ro=0.7$ if $Ri/Ro=0.2$ , $Ra/Ro=0.1$ , $0.5 \leq a/Ro \leq 0.7$ if $Ri/Ro=0.3$ , $Ra/Ro=0.1$ , $a/Ro=0.6$	8

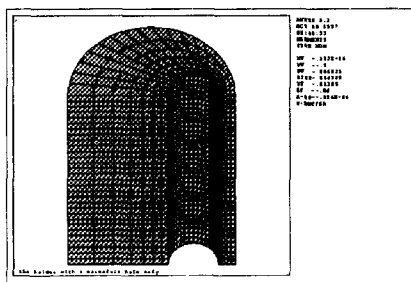


Fig. 2 Finite element model of the structure with an eccentric hole

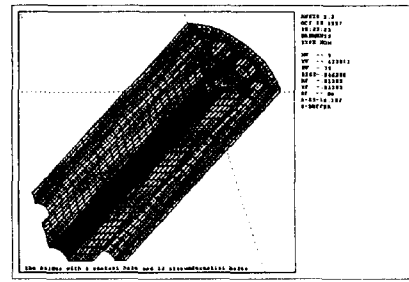


Fig. 3. Finite element model of the structure with a central hole and twelve specimen holes at 22.5 ° intervals

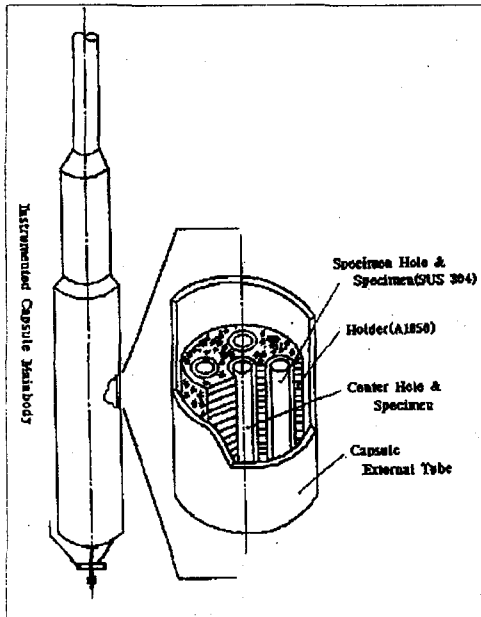


Fig. 1 Scheme of the capsule specimen holder

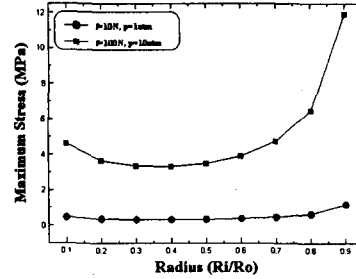


Fig. 4 The maximum stresses on the structure with a central hole under combined load

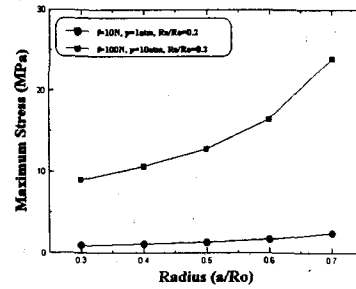


Fig. 5 The maximum stresses on the structure with an eccentric hole under combined load

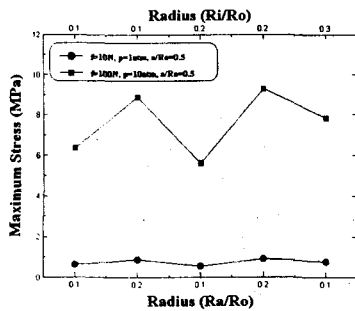


Fig. 6 The maximum stresses on the structure with a central hole and four specimen holes at 90 degree intervals

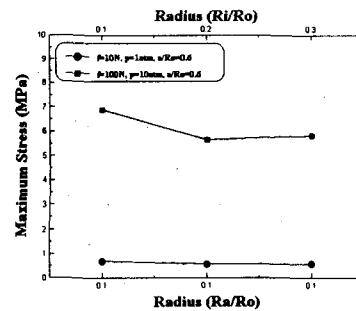


Fig. 7 The maximum stresses on the structure with a central hole and twelve specimen holes at 22.5 degree intervals