2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

계장캡슐 하단부 구조물의 설계개선 및 응력해석

Design Modification and Stress Analysis of Bottom Structure for the Instrumented Capsule

최명환, 강영환, 주기남, 오종명, 조만순, 류정수, 조영갑
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

연구용 원자로인 하나로 내에서 조사시험에 이용되는 계장캡슐의 하단부 구조물은 조사시험 동안 원자로 내의 육각형 조사공 내부에 캡슐 본체를 고정하는 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 하단부 구조물의 설계 개선과 구조건전성 확보를 위한 응력계산 결과에 대하여 기술하였다. 기존 3개의 안내 핀을 갖던 하단부 구조는 냉각수의 흐름을 좋게 하고, 구조적으로 안정된 형상을 갖도록 일체형으로 변경, 개선되었다. 또한 장전 툴에 가해진 하중으로 인한 하단부 구조물의 용접부, 볼트, Rod Tip의 Neck부 등 부품에 대한 응력계산을 통하여, 이들 각 부품의 구조적 건전성을 평가하였다. 인장 및 전단응력 계산은 전통적인 역학공식을 이용하였으며, 좀더 복잡한 캡슐 하단부 구조물의 집합체에 대한 유한요소해석 모델개발 및 해석을 수행 중에 있다.

Abstract

The bottom structure of the instrumented capsule, which is used for the irradiation test in the HANARO in-core, plays an important role to support the capsule main structure within the hexagonal flow tube. This paper is described the design modification and stress analysis results to obtain the structural integrity of bottom structure for the instrumented capsule. The capsule's bottom guide structure consisted of three guide pins before, but it is modified as one block structure to obtain an efficient flow of coolant water and a stabilized shape structurally. The structural integrity of the bottom structure is estimated by the stress calculation of components such as welding parts, bolts and neck parts of the rod tip due to the force applied by handling tool. The tensile and shear stresses are calculated by using a mechanical formulas, and a finite element model development is planned to be performed for more complex assembly of the capsule bottom structure.

1. 서 론

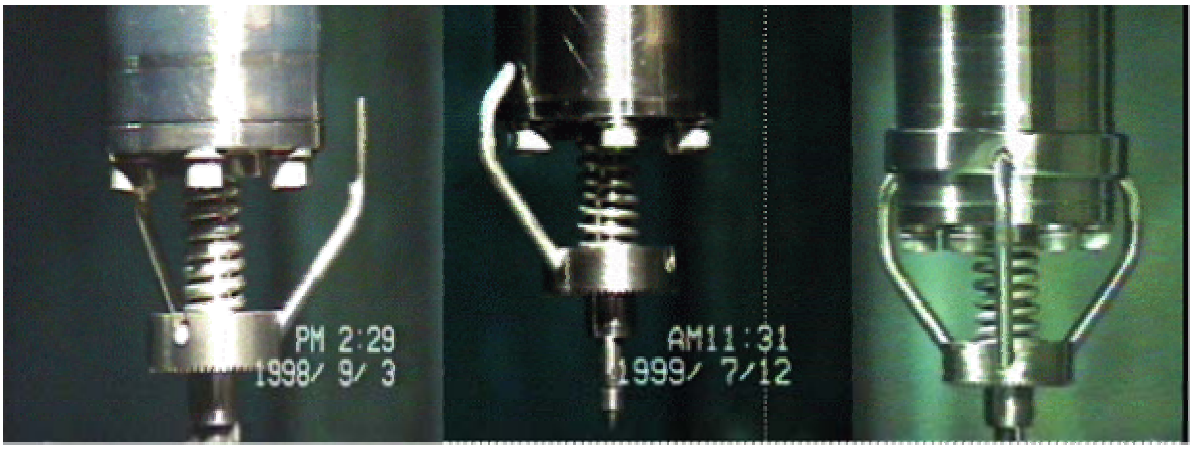
계장캡슐(instrumented capsule)은 연구용 원자로인 하나로(HANARO) 내에서 재료 및 핵연료 등의 조사시험을 위해서 활발히 이용되고 있으며, 이와 관련한 제작, 계장, 제어, 측정 기술들이 확립되었고, 지속적인 연구가 수행되고 있다[1,2]. 캡슐의 구조 중에서 하단부 안내 구조물(bottom guide structure)은 캡슐 본체(mainbody) 및 보호관(protection tube)을 원자로 내의 육각형 조사공(test hole) 하단부 리셉터클(receptable)에 고정하는 역할을 한다. 캡슐을 조사공에 고정하는 방법은 캡슐을 수직으로 삽입하고, 최상부에서의 장전툴(handling tool)을 이용한 회전으로 수행한다. 이로 인하여 캡슐 하단부 구조물은 수직 및 비틀림 응력을 받게 되고, 전체 구조 중에 있어서 취약한 부위 중의 하나이다. 기존의 캡슐 하단부 구조물은 직경 4.8mm의 3개 안내핀(guide pin)이 120^{o} 간격으로 설치된 형상을 갖고 있었으며, 핀을 고정하는 용접부가 취약하였다. 실제 조사시험 후 안내핀 하나가 절단된 사례가 있었으며, 이를 방지하기 위하여 안내핀 상부에 링을 보강하여 설계를 변경하였었고, 만능시험기를 이용한 인장 및 굽힘시험을 통하여 캡슐 하단부의 건전성을 확보하였다[3-5]. 그러나 최근에 이러한 링 구조 역시 조사 시험중 노내에서 절단되는 사고가 있었으며, 이에 대한 원인분석 및 해결을 위한 설계개선 작업이 진행 중에 있다.

최근에 하단부 구조물에 대한 설계가 변경되어, 3개의 핀을 갖던 기존의 구조를 일체형으로 개선하여 노외 시험을 위한 시제품(mock-up)을 제작하였다. 본 논문에서는 기존의 하단부와 설계변경, 제작된 하단부 구조물의 변경된 내용에 대하여 기술하였으며, 하단부 구조물의 구성 부품에 대한 구조건전성 평가를 위한 응력계산 결과에 대하여 언급하였다. 고려한 부품 및 항목으로는 1) Rod Tip의 Neck부에 작용하는 전단응력을 이용한 장전 툴에 가해줄 수 있는 하중, 2) 인장하중 및 전단하중을 결정하기 위한 용접부의 응력계산, 3) 캡슐 하단부와 본체를 연결하는 직경 6mm의 볼트에 작용하는 전단응력 계산을 통하여 하단부 구조물이 구조적으로 건전성이 확보되는가를 평가하였다. 또한 현재 수행 중에 있는 개선된 하단부 전체 구조물의 응력 분포를 고찰하기 위한 유한요소해석 모델링 및 추후 연구 과제인 노외 시험에 대하여 간략히 언급하였다. 응력계산 및 해석을 위해서 전통적인 고체역학 및 기계설계의 공식들을 사용하였고[6,7], 구조물에 대한 건전성의 평가는 구조물 재료의 항복응력을 통하여 평가하였다. 또한 응력분포를 해석하기 위한 캡슐 하단부의 3차원 모델링은 I-DEAS[8]를 이용하고 있다.

2. 해석모델 및 설계개선 사항

서론에서 언급된 바와 같이 캡슐 하단부 구조물은 조사시험이 처음 시작된 이래 몇 차례의 설계개선이 이루어졌는데, 그 이유는 하단부가 다른 부분에 비해 구조상 다소 취약하게 되어 있으며, 이로 인하여 하단부 가이드의 핀이 절단되는 사고가 발생하였기 때문이다. 캡슐 하단부의 설계변경에 따른 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 초기 계장캡슐(97M-01K)은 육각형의 조사공에 삽입

하기 위하여 4.8mm의 3개 핀이 120° 간격으로 안내역할을 하도록 제작되었으며, 핀의 하단부는 용접되고, 상단부는 유동관(flow tube)과 평행하게 자유상태에 있는 형상이었다(Fig. 1(a)). 그 후 핀의 하단 용접부의 절단으로 인하여 평행부를 Fig. 1(b)와 같이 곡선이 되도록 변경하였으며, Fig. 1(c)와 같이 핀의 상단부를 링에 용접하여 제작한 형상을 갖도록 설계 변경, 제작되어 한 동안 조사시험이 수행되었다. 하지만 이들 또한 링과 핀의 용접부가 파손되는 사고가 있었는데, 이는 아직 명확하게 규명되지는 않았지만 캡슐의 취급 혹은 시험 중에 하단부 핀에 다소 무리한 외부하중이 작용한 것이 아닌가 추정하고 있다.



(a) 97M-01K (b) 98M-02K (c) 00M-03K (02M-05U)

Fig. 1 Shape of the bottom structure

이상과 같은 사고로 인하여 현재 설계 개선 중에 있는 신형 하단부 구조물은 Fig. 1과 같은 핀의 형상을 갖는 것이 아니고, 하단부 구조물을 일체형으로 하여 캡슐본체와 볼트로 체결할 수 있도록 변경되었으며, 그 시제품 형상의 사진과 단면을 각각 Fig. 2와 3에 나타내었다. 기본적인 역할은 기존의 하단부 구조물과 동일하며, 세 개의 핀으로 가이드 역할을 하던 구조를 일체형으로 설계, 제작하였다. 본 구조물에 대하여 기본적으로 검토되어야 하는 사항으로는 열수력적인 측면에서의 압력강하(200 KPa 이상)를 검토해야 하는데, 이는 노외 시험시설을 이용한 압력강하 시험이 예정되어 있다. 또한 외부하중으로 인한 구조물 각 부분의 구조적 강도를 생각할 수 있는데, 특히 용접부, 볼트, 연구로 노심의 리셉터클에 고정되는 Rod Tip Neck부의 구조적 건전성을 확보하는 것은 중요하다.

캡슐 하단부는 Fig. 1과 같은 형상에서 Fig. 2와 같은 일체형의 형상으로 설계 변경되었으며, 주요 변경사항은 Rod Tip Neck의 직경(6.6mm → 6.8mm), 스프링 강성(1.2 kgf/mm → 1.0 kgf/mm), End Cap과 Rod Tip 연결부의 용접 bead 및 방법(EB welding → TIG welding), Rod Tip 재질(Zircaloy-4 → STS 304) 등의 설계 개선이 반영되었다.

Fig. 2 Shape of the modified bottom structure

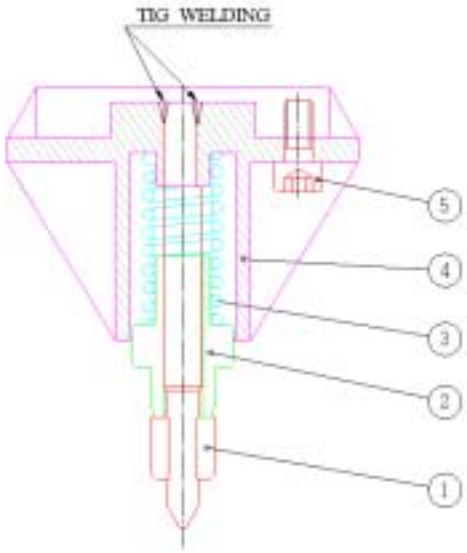


Fig. 3 Section view of the modified bottom structure

3. 하중 및 응력계산

하단부 구조물의 설계 관점에서의 구조건전성 평가를 위한 응력계산은 전통적인 역학공식을 이용하였고, 재료의 허용응력을 이용하여 작용 가능한 인장 및 전단응력을 계산하였다. Fig. 4는 장전 툴에 의해 작용하는 하단부의 비틀림모멘트(T)에 대한 개념을 나타내었다. 작용하중(Q)은 캡슐 장전시 작업자의 하중이 될 것이며, 우력으로 작용할 것이다. 또한 b는 하중 사이의 거리로서 비틀림모멘트 계산시 이용되고, 여기서는 100mm로 가정하여 계산에 적용하였다. 계산결과는 재료의 항복응력에 안전율을 고려한 허용응력(allowable stress)을 근거로 하여 평가하였다. 설계 개선된

캡슐 하단부 구조물은 모두 Type 304 스테인레스 강(stainless steel)으로 제작되었으며, Table 1은 122 °F에서의 기계적 물성값을 나타내었다.

Table 1. Material properties [9] of type 304 stainless steel (122 °F)

Young's Modulus (GPa)	Density (kg/m^3)	Poisson's Ratio	Yield Strength (MPa)	UTS (MPa)	Allowable Stress* (MPa)	Elongation (%)
193	7900	0.3	205	515	123	60

* Allowable stress = 0.6×Yield Strength

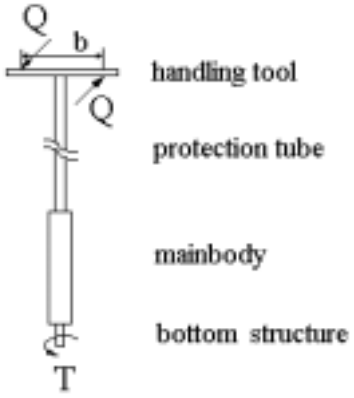


Fig. 4 Schematic view of the force and the moment applied by handling tool

3-1. Rod Tip Neck부

캡슐 전체 구조물의 형상에서 본체의 직경은 60mm이고, Rod Tip 직경은 8.0mm와 Neck부가 6.8mm로 되어 있다. 일반적으로 캡슐을 하나로 조사공에 장전할 때 무리한 힘은 가해지지 않기 때문에 정확한 힘은 알 수가 없다. 그러나 캡슐 장전시 하단부가 원자로의 리셉터클에 완전히 삽입되지 않고, 이웃한 구조물에 조금이라도 걸린 상태에서 무리한 힘을 가한다면 툴의 장전하중으로 인한 비틀림모멘트의 대부분은 하단부 구조물에 작용할 것이다. 특히 구조상 직경이 작은 Rod Tip의 Neck부에 걸릴 것으로 생각된다. 따라서 보수적인 계산이기는 하지만 Rod Tip의 Neck부가 고정되어 있고, 비틀림모멘트가 직경 6.8mm의 Neck부에 작용한다는 가정하에 재료의 허용전단응력을 이용하여 툴에 가해줄 수 있는 장전하중을 계산하였다.

Fig. 4에서와 같이 미지의 우력이 작용하는 상태에서 비틀림모멘트는

$$T = Qb \tag{1}$$

이고, 직경 6.8mm의 Neck부에 작용하는 최대전단응력(τ_{max})은 $r = d/2$에서 발생하므로

$$\tau_{\max} = \frac{Td/2}{J} \tag{2}$$

여기서 J는 단면의 극 2차모멘트(polar moment of inertia)로서 원형 단면인 경우에 다음과 같다.

$$J = \frac{\pi d^4}{32} \tag{3}$$

따라서 식(1)과 (3)을 식(2)에 대입하고, 최대전단응력을 재료의 허용전단응력(τ_a)과 같게 하여 작용하중 Q의 항으로 정리하면,

$$Q = \frac{\pi d^3 \tau_a}{16b} \tag{4}$$

이다. 여기서 재료의 허용전단응력은 허용인장응력의 60%로 적용하였으며, 약 74MPa이다. 식 (4)에 주어진 값들을 대입하여 계산한 우력 Q=45.7N으로서, 툴에 가해질 수 있는 장전하중은 약 91.4N이다. 이 값은 안전율을 충분히 크게 적용한 값이며, 캡슐과 툴 전체에서 약간의 비틀림각이 발생할 것을 고려한다면 장전하중은 계산값 보다 훨씬 커질 것으로 판단된다. 그러나 이미 예상한 바와 같이 Rod Tip 하단 Neck부는 캡슐 구조물 중에서 가장 취약한 부분으로 생각되며, 연구로의 조사공 조건에 맞추어야 하는 구조로서 설계변경이 불가능하기 때문에 캡슐을 장전할 때 취급자의 각별한 주의가 요망된다.

3-2. 용접부

캡슐 하단부 구조물은 핵연료 집합체의 하단부와 유사하게 장전 후 체결상태를 유지하기 위하여 약 1.0 kgf/mm 강성의 스프링이 사용된다. 이 스프링은 Rod Tip과 Bottom End Cap 중간에 삽입되고, Rod Tip과 End Cap의 한쪽 끝단은 양쪽 45° 홈 티스용접(groove TIG weld)하게 된다. Rod Tip 부분의 용접부에 대한 상세한 형상과 하중의 작용상태를 Fig. 5에 나타내었고, 그림에서 사용된 각 기호에 대한 설명과 계산에 사용된 값을 Table 2에 나타내었다. 용접부의 응력계산에서는 재료의 허용응력을 기준으로 하여 용접부에 가해질 수 있는 수직하중(P)과 비틀림모멘트 작용시 용접부에 가해질 수 있는 전단하중(F)을 계산하였다.

Table 2. Description and value of the welding part used in the stress calculation

Notation	Description	Value
P	Tension	Unknown
T	Twisting moment	T = F×r
r	Radius of the rod tip	4 mm
h1, h2	Welding size	2 mm, 2 mm
α1, α2	Groove angle	45°, 45°
a1, a2	Throat thickness	a1=h1×cos α1, a2=h2×cos α2

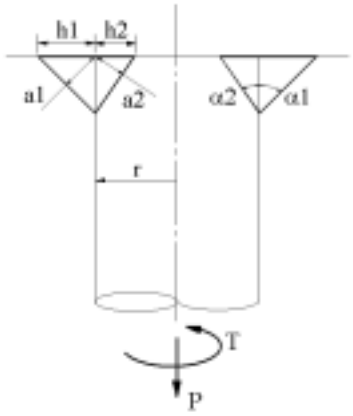


Fig. 5 Schematic view of the welding part and the applied force

(1) 인장하중

Fig. 5와 Table 2의 조건에서 Rod Tip에 작용할 수 있는 인장하중(P)을 결정하였다. 용접부의 용접크기(welding size)를 h라 하고, 목 두께(throat thickness)를 a라 할 때, 하중 P에 저항하는 면의 단면적(A)은 다음과 같다.

$$A = 2\pi r(a1 + a2) = 2\pi r \times 0.707 \times (h1 + h2) \tag{5}$$

인장하중을 결정하기 위하여 수직 인장응력(σ_t)을 용접 허용응력(σ_a)과 같게 하고 계산하면,

$$\sigma_t = \sigma_a = \frac{P}{A} \tag{6}$$

이다. 일반적으로 용접부는 모재의 강도에 대한 용접부 근처에서의 강도저하가 발생하며, 이 비율을 용접이음 효율(η)로 나타내는데, 이것은 다시 경험으로부터 얻어진 형상계수(v_1)와 용접계수(v_2)로 나타낼 수 있다[7].

$$\sigma_a = \eta\sigma'_a = v_1 v_2 \sigma'_a \tag{7}$$

여기서, σ'_a은 모재의 허용응력으로서 End Cap과 Rod Tip의 재료가 Type 304 스테인레스 강이기 문에 123 MPa을 적용하였다. 또한 정하중에 대한 형상계수는 맞대기 용접 인장의 경우, 0.75를 적용하였고, 양호한 용접시 용접계수는 1.0을 적용할 수 있다[7].

식(7)을 식(6)에 대입하여 하중의 식으로 표현하면 식(8)과 같다.

$$P = A\sigma_a = A\eta\sigma'_a = Av_1 v_2 \sigma'_a \tag{8}$$

식 (8)에 단면적, 형상계수, 용접계수, 모재의 허용인장응력을 대입하여 계산하면 Rod Tip에 가할 수 있는 인장하중 P=6.56 kN이다.

(2) 전단하중

장전 툴의 하중에 의한 비틀림모멘트(T)가 Rod Tip에 작용하면, 용접부의 목단면을 따라 F =

T/r의 전단하중이 작용한다고 볼 수 있다. 따라서 전단력에 의한 전단응력(τ_t)을 허용전단응력(τ_a)과 같게 하면,

$$\tau_t = \tau_a = \frac{F}{A} \tag{9}$$

이다. 전단력 작용시 식(7)에서 형상계수 $v_1 = 0.65$ 이고[7], 용접 허용인장응력 σ_a = 80 MPa이다. 따라서 식(9)의 허용전단응력은 허용인장응력의 60%인 $\tau_a = 0.6\sigma_a$ =48 MPa 를 적용할 수 있다.

홈각(groove angle)이 45^o 이기 때문에 전단력의 작용 단면적은 수직하중 작용시와 마찬가지이며, 허용전단응력과 단면적 식(5)의 값을 식(9)에 대입하여 전단력을 구한다.

$$F = \tau_a A = 48 \times 10^6 \times \{2\pi r \times 0.707 \times (h1 + h2)\} = 3.41 \text{ kN} \tag{10}$$

따라서 용접부가 항복이 일어나지 않고 건전성을 유지할 수 있는 최대 전단력 F=3.41kN이다. 용접부의 실제 구조에 있어서는 Rod Tip의 길이 20.5mm가 D 형상으로 가공되어 End Cap에 끼워진 후 용접되기 때문에 이 부분의 마찰력과 비틀림 저항력 등을 고려한다면 용접부의 작용응력은 훨씬 낮아져 구조적 건전성이 확보될 것으로 평가된다.

3-3. 직경 6mm볼트

캡슐 하단 볼트 체결부에 대한 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 캡슐의 본체와 하단부 구조물은 6개의 M6 볼트로 체결되며, 볼트는 노내에서 냉각수에 의한 축 방향 하중을 받게 되지만, 그로 인한 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. 그러나 용접부가 완벽하게 용접되어 Rod Tip과 End Cap이 일체형으로 결합되면, 장전시 Rod Tip이 리셉터클에 걸린 상태에서 툴에 가하는 힘은 비틀림모멘트를 유발시켜 볼트에는 전단력이 작용하게 된다. 이 경우 볼트 체결부는 토오크를 전달하는 플랜지 커플링과 유사하게 고려할 수 있으며[7], 축의 전달 토오크 식과 재료의 허용 전단응력을 이용하여 사용할 수 있는 체결 볼트의 최소 직경을 계산하였다.

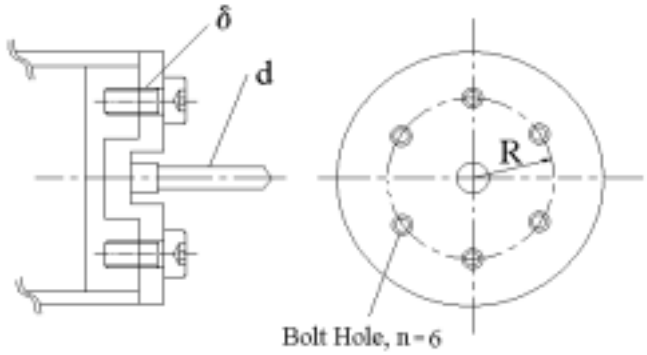


Fig. 6 Schematic view of the bolting part

Rod Tip의 전달 토오크 T는

$$T = \frac{\pi}{16} d^3 \tau_s \tag{11}$$

여기서 d는 축의 직경(8mm)이고, τ_s는 허용전단응력이다. n개 볼트의 전단저항에 의한 커플링의 전달토오크 T'은

$$T' = \frac{\pi}{4} \delta^2 \tau_b nR \tag{12}$$

이고, 여기서 τ_b는 볼트의 허용전단응력, R은 Rod Tip의 중심으로부터 볼트의 피치원 반지름으로서 R=24mm이다. 볼트가 토오크를 전달하기 위해서는 $T' \geq T$ 이어야 하므로,

$$\frac{\pi}{16} d^3 \tau_s = \frac{\pi}{4} \delta^2 \tau_b nR \tag{13}$$

식(13)에서 Rod Tip과 볼트는 동일한 재료이므로 허용전단응력(0.6×123=74MPa)은 같고, 식 (13)을 사용 볼트의 직경으로 나타내면 식(14)와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 주어진 값들을 대입하여 계산하면 체결 볼트의 최소 직경을 구할 수 있다.

$$\delta = 0.5\sqrt{\frac{d^3}{nR}} = 0.94 \text{ mm} \tag{14}$$

계산상 하단부 체결볼트는 정하중시 강재의 안전계수 3을 고려한다면 약 2.8mm이상이면 충분한 것으로 평가되며, 6mm 볼트를 사용하는 현재의 설계는 구조적으로 건전함을 확인할 수 있다.

3-4. 3D 모델링 및 추후 연구과제

하단부 구조물의 부품들이 조립된 상태에서의 구조물에 대한 응력값 및 응력분포를 얻기 위한 3차원 유한요소해석 모델을 개발 중에 있다. 모델링은 I-DEAS[8]를 이용하고 있으며, 해석은 ANSYS를 이용하여 수행할 예정이다. Fig 7은 하단부 Rod Tip과 End Cap이 결합된 상태의 기하학적 형상 모델을 나타내었다.

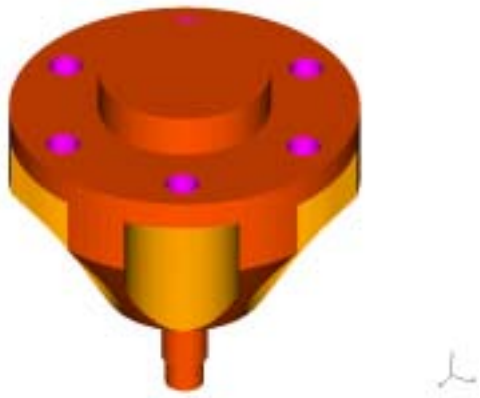


Fig. 7 Geometrical shape model of the bottom structure using an I-DEAS

모델링은 최대한 실제 형상을 모사하였으며, 현재 모델 검토 및 부분 수정을 수행하고 있다. 해석은 I-DEAS에서 요소망을 생성한 후, ANSYS의 입력파일로 변환, 수정하여 수행할 것이다. 또한 해석에서의 하중조건은 하단부 스프링력 및 장전 하중 등을 작용외력으로 고려하고 있다.

설계 개선된 하단부 구조물의 시제품이 완성되어 노외에서의 시험이 계획되어 있으며, 노외시험은 본 과제에서 보유하고 있는 단일채널시험루프에서 하나로와의 양립성 확인을 위한 압력강하시험, 캡슐 특성 및 장·탈착 시험, 내구성시험, 진동변위 측정을 통한 기존 캡슐 구조물과의 상대적인 진동특성 비교 등이 수행될 예정이다.

4. 결 론

조사시험을 위한 계장캡슐의 하단부 구조물에 대한 설계 개선된 사항들에 대하여 기술하였고, 몇몇 취약 부위에 대한 응력계산 결과들을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 캡슐 하단부 구조물은 기존 3개의 안내핀을 갖는 구조에서 일체형으로 설계변경 개선되어, 구조적으로 안정한 형상을 갖고 유체의 흐름을 좀더 원활하게 할 것으로 판단된다.
(2) 직경 6.8mm의 Rod Tip 하단 Neck부는 캡슐 구조 중에서 취약한 부분으로 생각되며, 안전율을 충분히 고려한 재료의 허용응력 이내에서 장전 툴에 가해질 수 있는 장전하중은 약 91.4N로 계산되었고, 캡슐을 장전할 때 취급자의 각별한 주의가 요망된다.
(3) Rod Tip과 End Cap의 연결부인 용접부에 가할 수 있는 인장 및 전단하중은 각각 P=6.56 kN과 F=3.41kN이다. 용접부의 실제 구조는 Rod Tip의 길이 20.5mm가 D 형상으로 가공되어 End Cap에 끼워진 후 용접되기 때문에 용접부의 작용응력은 많이 낮아질 것이다.
(4) 캡슐 본체와 하단부 구조물을 연결하는 볼트는 정하중 시 강재의 안전계수 3을 고려하면 2.8mm이상이면 충분한 것으로 평가되었으며, 6mm 볼트를 사용하는 현재의 설계는 구조적으로 건전함을 확인하였다.
(5) 하단부 구조 전체에 대한 응력분포를 얻기 위한 3차원 유한요소해석 모델을 개발 중에 있으며, 하나로와의 양립성 및 건전성 확보를 위하여 단일채널 시험루프를 이용한 시제품 장착 캡슐의 노외 시험을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력 중장기개발사업인 조사시험용 캡슐개발 및 활용 과제의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 강영환 외 다수, 1996, "원자력신소재개발-계장캡슐활용기술개발," KAERI/RR-1760/96, 한국원자력연구소.
2. 강영환 외 다수, 2003, "연구로 이용기술개발-조사시험용 캡슐개발 및 활용," KAERI/RR-2360/03, 한국원자력연구소.
3. 강영환, 류정수, 김도식, 오종명, 이영신, 고재화, 2000, "하나로 캡슐의 설계개선," 한국원자력학회 '2000 춘계학술발표회 논문집.
4. 내부통신문, 1999, "계장캡슐 하단부 Guide Pin 응력해석," HAN-IC-CR-99-013, 한국원자력연구소.
5. 내부통신문, 2000, "계장캡슐 하단부 Guide Pin 시험," HAN-IC-CR-00-003, 한국원자력연구소.
6. S.H. Crandall, N.C. Dahl and T.J. Lardner, 1978, "An Introduction to the Mechanics of Solids," 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc..
7. 박영조, 1990, "기계설계," 보성문화사.
8. SDRC, 2003, "I-DEAS 10 NX Series m1," Structural Dynamics Research Corporation, OH, USA.
9. CE-FMD Materials Manual.