'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER 원자로용기 설계특성 및 사례해석

Design Characteristics and Case Study of KALIMER Reactor Vessel

김종범, 이형연, 유봉
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 두께 5cm 로 예비 개념 설계된 KALIMER 원자로용기의 두께를 실린더부 중간에서 2.5cm 로 줄여 재료를 절감하고 구조건전성을 향상시킬 수 있는지 타당성을 사례분석하고 또한 하부헤드의 형상을 5 가지 사례를 제시하여 구조적 타당성을 분석하였다. 그 결과 원자로용기는 5cm 균일두께로 설계하는 것이 유리한 것으로 평가되었고 하부헤드의 형상은 부분원이나 반타원 모델이 가장 적합할 것으로 분석되었다. 앞으로 제작성과 과도하중을 고려한 상세해석을 수행하여 최종적인 개념설계를 확립할 예정이다.

Abstract

In this paper, a comparative analyses of the reactor vessel having variable thickness between 5cm and 2.5cm were performed to investigate the possibility of saving materials and improving the structural integrity compared to the case of 5cm uniform thickness. And 5 design alternatives for reactor vessel bottom head shape were presented and a case study has been carried out to select the optimum shape. It is concluded that the uniform thickness of reactor vessel is preferable to the variable thickness case and the partial spherical shape and the semi-elliptical shape for the reactor vessel bottom head are the most appropriate conceptual design shapes considering both design characteristics and structural integrity.

1. 서론

출력 150MWe 의 풀형 액체금속로 KALIMER[1]의 원자로용기는 그림 1 에 보인 것과 같이 노심과 내부구조물들을 지지하고 원자로 계통으로서의 기능을 수행한다. 원자로용기는 원자로헤드[2]에 매달린 형태로 지지되며 안전성 향상을 위하여 정상운전시 고온소듐에 직접 접촉하지 않도록 하였다. 노심지지물은 원자로용기 하부 헤드에 용접되며 이를 제외하고는 원자로용기에는 어떠한 접촉부도 없으며 또한 관통부도 없게 설계함으로써 구조건전성을 높이도록 했다.

액체금속로의 운전압력은 대기압에 가깝기 때문에 150 기압의 고압설계조건을 갖는 경수로와는 달리 고온운전 환경과 지진하중 및 수송하중 등을 고려해서 원자로용기의 두께를 결정해야 한다. 프랑스의 SuperPhenix[3]와 같은 대형 풀형 액체금속로는 원자로용기 두께가 2.5cm 이고, 미국의 PRISM[4]과 일본의 MONJU[5]와 같은 소형이고 직경에 비해 길이가 긴 액체금속로 원자로용기의 두께는 5cm 정도로 대부분의 액체금속로는 2.5cm~5cm 의 두께를 갖는다. 원자로용기 하부헤드의 형상으로는 미국에서 1970 년대에 설계건조 중에 중단되었던 원형로 CRBR[6]이 부분원 형상

(Partial Spherical), 카자흐스탄에서 운전중인 실증로 BN-350[7]은 원뿔 형상, 미국에서 30 년간 성공적인 운전경험이 있는 실험로 EBR-II[8]는 평판 형상, 러시아에서 진행중인 상업로 BN-800[7]은 반구형 형상, 그리고 미국의 PRISM[4]은 반타원 형상인데 이러한 다양한 형상을 갖는 이유는 액체금속로 원자로용기가 기본적으로 압력용기가 아니고 소듐을 담고 있는 용기로서 각 액체금속로의 특성에 맞고 구조건전성을 확보할 수 있는 형상이면 되기 때문이다.

KALIMER 원자로용기 개념설계는 그림 1 에 보인 것과 같이 내경이 6.92m, 두께는 5cm, 실린더 부분의 길이는 17m 이다. 현재 개념설계 단계에서 부분원 형상으로 설계된 원자로용기 하부헤드를 포함한 원자로용기의 총 높이는 18.55m 이다.

KALIMER 초기 개념설계에서 정상운전 조건시[9] 원자로용기의 두께 평가분석 결과 5cm 의 균일두께를 설정하였는데[10] 본 연구에서는 원자로용기에 비교적 큰 인장응력이 발생하는 상단부를 제외한 아래부분의 두께를 2.5cm 로 줄여 재료절감을 도모하고 또한 구조건전성을 높일 수 있는지 여부를 비교한 사례분석을 수행하였다. 또한 원자로용기 하부헤드의 최적형상을 결정하기 위해 기존의 액체금속로들을 참조하여 부분원, 원뿔, 평판, 반구, 및 반타원 형상의 5 가지 모델을 설정한 사례분석을 수행하였다.

2. 원자로용기 사례분석

2.1 원자로용기 두께변화 영향분석

원자로용기의 실린더부에서 두께가 변하는 경우에 대한 구조적 타당성을 분석하기 위해 정상운전시 열전달해석을 수행한 결과를 적용하여 열응력해석을 수행하였고 또한 압력하중을 적용한 구조건전성을 평가하였다.

2.1.1 정상운전시 가변두께 원자로용기 열전달 및 열응력해석

그림 2 에 보인것과 같이 원자로용기, 격납용기, RV 라이너, 분리판, 격리판, 내부지지물 및 소듐을 포함한 축대칭 해석모델을 구성하여 정상상태 열전달해석을 수행한 뒤 열응력해석을 수행하였다. 원자로용기의 두께가 5cm 에서 2.5cm 로 변하는 가변두께인 경우(이하 가변두께 모델로 부름)와 5cm 의 균일한 두께인 경우를 해석하여 그 결과를 비교분석하였다.

<u>해석모델 및 경계조건</u>

KALIMER 원자로용기의 고온 소듐 부근의 구조물에 대한 정상상태 열전달해석 및 열응력해석을 상용 유한요소해석코드인 ANSYS[11]를 이용하여 수행하였다. 30cm 의 두께를 갖는 원자로헤드[2] 상단으로부터 고온 소듐 자유표면까지의 거리는 250cm 이고 라이너와 원자로용기 사이 환형부의 저온소듐 자유 표면까지의 거리는 750cm 이다. 원자로용기, 격납용기, 라이너, 및 내부지지물의 외경은 각각 702cm, 737cm, 682cm, 374cm 이고 원자로헤드 상단에서 라이너, 격리판, 및 분리판 상단까지의 거리는 각각 210cm, 550cm, 1130cm 이며 내부지지물 하단은 1190cm 까지 모델링하여 해석을 수행하였다.

열전달 해석에는 1664 개의 4 절점 축대칭 열전달요소(PLANE75)와 270 개의 일차원 복사 열전

달 요소(LINK31)가 사용되었고 전체 절점의 수는 1967 개이며 유한요소 모델은 그림 3 에 나타나 있다. 격납용기는 2.25Cr-1Mo 강으로 만들어졌고 이를 제외한 나머지 구조물은 모두 316 스테인레스강으로 만들어졌으며 구조물은 모두 PLANE75 요소로 모델링하였다. 박스 구조 안에 채워진 소듐과 환형부의 저온 소듐은 마찬가지로 PLANE75 요소로 모델링 하였으며 보수적인 해석을 위하여 정지상태로 가정하였다. 원자로용기와 라이너 사이, 원자로용기와 격납용기 사이, 및 격납용기와 PSDRS 공기 사이는 LINK31 요소를 사용하여 복사 열전달을 해석하였다.

정상상태 열전달 해석에 대한 경계조건과 열하중은 다음과 같다. 내부지지물의 안쪽면, 격리판의 윗면과 라이너의 안쪽면중 고온소듐에 접하고 있는 부분에는 530°C 의 온도를 적용하였다. 저온소듐과 접하고 있는 분리판의 아래면에는 386°C 의 온도를 적용하고 환형부의 저온소듐과 접하고 있는 원자로용기와 격납용기 사이에는 전도 열전달을 적용하였다. 원자로용기와 라이너 사이, 원자로용기와 격납용기 사이의 복사 열전달에는 방사율을 각각 0.2 와 0.7 을 적용하고 PSDRS[12] 공기와 접하는 격납용기 외면의 방사율은 0.8 을 적용하였다. PSDRS 공기의 온도는 정상상태시 높이에 따라 온도가 다르지만 해석의 편의를 위해 평균값으로 90°C 를 가정하였으며 막계수값은 11.358J/sec-m^2-°C 을 사용하였다[13].

원자로용기의 두께변화는 원자로 헤드와 라이너 상단높이(원자로 헤드 아래 1.8m) 사이는 5cm, 라이너 상단높이와 고온 소듐 자유표면 높이(원자로 헤드 아래 2.2m) 사이에서는 5cm 에서 2.5cm 로 작아지며 고온 소듐 자유표면 높이 아래 부분은 2.5cm 로 하였다. 5cm 의 두께에서 2.5cm 로 변화하는 두께를 갖는 원자로용기의 경우는 110 톤 정도의 무게를 갖게되어 5cm 로 균일한 원자로용기에 비해 80 톤 정도의 재료를 줄일 수 있어 경제적으로 도움이 될 것으로 예상되지만 보다 상세한 경제성을 논하기 위해서는 두께변화 영향 분석을 포함하여 제작성 문제 및 가동중 검사 영향도 살펴보아야 한다.

해석 결과

정상상태에 대한 열전달 해석 결과 가변두께 원자로용기의 온도분포를 그림 4 에 보였는데 5cm 균일두께 원자로용기의 온도분포와 비슷한 분포를 나타내었고 고온소듐 자유표면 높이와 저온소듐 자유표면 높이에서 큰 온도구배를 보여서 이를 살펴보기 위해 그림 5 에 원자로용기 안쪽면과 바깥면을 따라 온도분포를 나타내었다. 그림 5 에서 x-축은 모델의 원자로용기 상단으로부터의 거리를 나타내며 y-축은 온도를 나타낸다. 가변두께 원자로용기와 5cm 균일두께 원자로용기는 환형부의 저온소듐 자유표면(원자로헤드 하단으로부터 7.3m) 바로 아래에서 각각 최고온도가 403.4°C 와 401.8°C 이며 이 곳을 경계로 윗 방향으로는 급격한 축방향 온도구배가 발생하고 아래 방향으로는 두께 방향으로의 온도구배가 커져서 이 부근에서 큰 열응력을 예상할 수 있다. 그리고 라이너 안에 위치한 고온소듐 자유표면(원자로헤드 하단으로부터 2.2m)의 영향으로 이 부근에서도 큰 온도변화를 보이고 있지만 온도변화의 정도는 저온소듐 자유표면 부근보다는 완만함을 알 수 있다.

열응력 해석은 앞에서의 열전달 해석 결과인 온도분포를 적용하여 ANSYS 코드의 4 절점 고체요소인 PLANE42 요소에 축대칭 조건을 부여하여 수행하였다. 가변두께 원자로용기의 경우와 5cm 균일두께 원자로용기의 경우에 대한 해석결과 응력강도 분포는 서로 유사하며 최대 응력강도는

예측한 것과 같이 저온소듐 자유표면과 인접한 부분에서 발생하였고 고온소듐 자유표면 근처에서도 큰 응력강도가 발생하였다.

가변두께 원자로용기의 원주방향 응력은 저온소듐 자유표면 바로 윗 부분에서 최대 인장응력 54.2MPa, 자유표면 높이에서 최대 압축응력 115MPa 을 갖는다. 5cm 균일두께인 경우 최대 인장응력은 51.6MPa 이고 최대 압축응력은 135MPa 로 가변두께 경우보다 조금 컸다. 축방향 응력은 가변두께 원자로용기의 경우는 저온소듐 자유표면 바로 아래에서 용기의 내면에 최대 압축응력 90.5MPa 이 발생하고 외면에 최대 인장응력 91.8MPa 이 발생하였는데 원자로용기의 두께 방향으로 축방향응력이 대칭을 이루어 이 부분이 두께방향 온도구배에 의한 순수 굽힘 거동을 보임을 알 수 있다. 5cm 균일 두께 원자로용기의 경우는 최대 압축응력과 인장 응력이 각각 105MPa 과 104MPa 이 발생하여 가변두께 경우보다 축방향 응력이 약 15% 증가하였다.

그림 6 은 가변두께 모델과 5cm 균일두께 모델의 원자로용기 상단으로부터의 거리에 따른 원자로용기 내면과 외면에서의 응력강도 분포를 나타내는데 앞에서 열전달해석 결과로부터 예측한 것과 같이 저온소듐 자유표면 부근(7.3m)에서 가장 큰 응력 분포를 갖고 고온소듐 자유표면 부근(2.2m)에서도 비교적 큰 응력강도가 발생하고 전체적으로 가변두께 모델의 경우가 5cm 균일두께 경우보다 10~15% 정도 작은 값을 가짐을 볼 수 있다. 최대 응력강도는 가변두께 모델과 5.0cm 균일 두께의 경우 각각 125MPa 과 135MPa 이고 온도는 404°C 정도이다. 이는 고온설계코드인 ASME B&PV Code, Section III, Subsection NH[14]의 적용온도인 427°C 보다 낮아 Subsection NB 의 요건을 적용하여 구조 건전성을 판단할 수 있는데 400°C 에서의 316 스테인레스강에 대한 이차응력 허용값인 $3S_m$ 은 333MPa 로써 앞에서 구한 응력강도는 가변두께의 경우와 5.0cm 균일두께의 경우 모두 허용치를 충분히 만족시킴을 알 수 있다.

고온소듐 자유표면 부근을 살펴보면 그림 6 에서 보듯이 최대 응력강도는 자유표면보다 조금 아래에서 발생하는데 5cm 균일두께 경우 최대값이 103MPa 로 용기 내면에 발생하였고 가변두께의 경우에는 최대값이 14% 정도 작은 90MPa 로 용기 외면에서 발생하였다. 고온소듐 자유표면 근처에서의 원주방향 응력 분포와 축방향 응력 분포는 가변두께의 경우가 5cm 균일두께의 경우와 분포양상은 유사하지만 크기가 10~15% 정도 작았다.

2.1.2 구조하중에 대한 가변두께 원자로용기 해석

KALIMER 원자로용기 및 주요 내부구조물들의 개략적인 중량을 표 1 에 나타내었는데 여기서 원자로용기는 5cm 균일두께인 경우이다. 정상운전시에 원자로용기는 내부구조물들과 소듐의 무게를 지지하고 있는데 이들의 중량은 합해서 739 톤 정도이고 여기에 원자로용기 자체의 중량 173 톤을 고려하면 원자로용기 상단에서는 축방향으로 인장하중을 약 8.2Mpa 받으며 이는 정상상태시 약 400°C 의 최대 온도를 갖는 원자로용기의 설계제한값(Sm)인 111MPa 에 비하면 무척 작은 값으로써 자중의 영향은 거의 받지 않는 것으로 분석되었다. 가변두께 원자로용기의 경우에는 고온소듐 자유표면 부근에서 용기의 두께가 2.5cm 로 작아져서 이 부위에서 지탱하는 원자로용기 중량은 78 톤이고 내부구조물과 소듐 중량 739 톤을 더하면 총 817 톤의 무게를 지탱해야 하며 이때 축방향 응력은 14.7MPa 로써 5cm 균일두께 경우보다 약 79% 증가하였지만 설계제한값(Sm) 111MPa 을 충분히 만족시키는 값이다. 본 절에서는 원자로용기에 작용하는 주요 구조하중으로 압력하중을 설

정하여 비교 구조해석을 수행하였다.

표 1. KALIMER 원자로 주요 구조물의 무게 (150MWe, 예비 개념설계 자료)

	Weight (tons)	Remarks
Containment Vessel	90	Partially spherical bottom head
Reactor Vessel	173	Partially spherical bottom head
RV Liner	39	
Support Barrel	49	Extended to upper inlet plenum
Inlet Plenum	48	Neglecting perforated holes
Separation Plate	13	With holes of 4 IHX and 4 EMP
Baffle Plate	3	With holes of 4 IHX and 4 EMP
Reactor Head	125	Assumed as simple disk type (including RP, CRD)
Core Supports	2	Skirt type
Core	150	
EM Pump	80	Weights for 4
IHX	100	Weights for 4
UIS	20	
Sodium	435	Inside RV

해석모델 및 경계조건

가변두께 원자로용기의 압력하중과 수송하중에 대한 구조해석을 수행하기 위하여 쉘 요소를 사용하여 1/2 대칭 유한요소 해석모델을 만들어 그림 7 에 나타내었다. 유한요소해석코드 ANSYS 를 사용하였으며 모델은 4 절점 쉘요소인 SHELL63 요소 756 개와 802 개의 절점으로 구성되었다. 원자로용기의 실린더 부분은 길이가 17m 이고 하부헤드의 형상은 반구로 가정하였는데 이는 압력하중의 적용이 원자로용기 가변두께에 미치는 영향을 파악하는 것이 본 해석의 목적이기 때문에 실린더부와 하부헤드 연결부에서의 응력집중 영향을 최소화시키기 위해 가능한 한 부드럽게 연결하기 위함이다.

경계조건은 1/2 대칭 모델의 단면에서는 대칭조건을 적용하였고 원자로용기 상단은 강성이 큰 원자로헤드에 연결되어 있는 점을 고려해서 보수적인 결과를 얻기 위해 변위고정 조건을 적용하였다. 액체금속로의 경우 원자로용기 내부의 가스 압력은 거의 대기압에 가깝고 원자로용기 내부에 소듐이 가득 차 있을 경우 원자로용기 하부에서는 소듐에 의한 최대압력이 160KPa 정도가 작용하여 이를 더하면 약 260KPa 이 된다. 여기서는 보수적으로 최대 압력의 2 배 정도인 500Kpa(약 5 기압)을 적용하였다.

해석결과

가변두께와 5cm 균일두께 및 2.5cm 균일두께인 원자로용기에 500KPa 의 내압이 작용할 때 발생하는 최대 응력강도를 정리하면 다음과 같다.

	가변두께(5~2.5cm)	5cm 균일두께	2.5cm 균일두께
최대변위 (cm)	0.24	0.11	0.25
최대 응력강도 (MPa)	74.9	44.2	83.7
최대 원주응력 (MPa)	74.1	38.1	83.3
최대 축응력 (MPa)	43.7	43.5	68.2

가변두께 원자로용기의 경우 2.5cm 균일두께 경우보다는 작은 값들을 얻었지만 5cm 균일두께 경우와 비교하면 상당히 큰 응력이 발생하였다. 최대변위는 118% 정도 크고 최대응력강도는 5cm 균일두께 경우가 용기 상단에서 발생한 것에 비해 가변두께의 경우는 용기의 두께가 변하는 부분에서 74.9MPa 이 발생하였고 이는 5cm 균일두께 경우보다 69% 증가한 값이다. 최대 축응력은 가변두께 경우가 5cm 균일두께 경우와 비슷한 크기를 가졌지만 최대 원주응력은 94% 증가하였다. 가변두께 원자로용기에서 발생한 최대응력강도 74.9MPa 은 정상상태시 약 400°C 의 최대 온도를 갖는 원자로용기의 설계제한값(Sm)인 111MPa 을 만족시키는 값이지만 제한값의 67%에 이른다. 본 해석에서 적용한 5 기압의 내압이 비교해석을 위해 가정한 값이기는 하지만 5cm 의 원자로용기의 두께를 상부에서 절반의 두께인 2.5cm 로 줄일 경우 최대응력강도가 69% 정도나 증가하여 설계제한값에 가까이 갈 수 있다는 사실은 가변두께가 압력과 같은 구조하중에 취약할 수 있다는 것을 의미하므로 바람직하지 않다고 평가되었다. 가상노심붕괴사고(Hypothetical Core Disruptive Accident)와 같은 과도하중으로 발생하는 원자로용기 압력하중은 본 해석에서 사용한 5 기압보다 훨씬 클 것으로 예상되며 앞으로 과도하중이 설정되면 보다 면밀한 분석이 요구된다.

2.2 원자로용기 하부헤드 최적형상

원자로용기 하부헤드의 5 가지 형상을 설정하여 해석모델을 만들고, 압력하중에 대한 구조거동과 열하중에 대한 열거동을 분석하여 비교평가를 수행하였다.

2.2.1 해석모델

해석에는 범용 유한요소해석 코드인 ANSYS[11]를 사용하였고 압력하중에 대한 구조해석을 위해 제시된 5 가지 하부헤드 형상을 8 절점 평면요소인 PLANE82 요소에 축대칭조건을 적용하여 축대칭모델을 만들었고 원자로용기 실린더부와 하부헤드의 재질은 모두 316 스테인레스강으로 영률은 158.6GPa, 포와송비는 0.29 를 적용하였다.

부분원 모델

KALIMER 원자로용기는 대용량 풀형이 아니고 직경에 비해 원자로용기의 길이가 긴 구조인데 부분원 형상의 하부헤드는 내부에 있는 원자로 내부구조물들을 배치하기 쉽게 공간확보를 위해 도움이 될 것으로 판단되어 초기 개념설계로 선정하였다. 이는 미국 WH 사가 1970 년대에 설계하였던 출력 380MWe 의 루프형 원형로인 CRBR 원자로용기에 사용된 바 있다.

그림 8 은 부분원 형상의 하부헤드를 모사한 축대칭 유한요소 해석모델을 보여주고 있는데 축대칭 조건을 부여한 PLANE82 요소 133 개와 668 개의 절점으로 구성되었다. 부분원 형상의 하부헤드 반경은 반경 5.3m 이고 하부헤드와 원자로용기 실린더부의 연결부분은 곡률반경을 20cm 적용하였다. 하부헤드의 중심 단면에는 축대칭조건을 적용하고 원자로헤드에 용접되는 원자로용기 실린더부의 상단은 x-축 방향으로의 변형만을 허용하였는데 이는 여기서 해석의 관심부분이 하부헤드에 있기 때문이다. 이 경계조건들은 이하 다른 모델에도 똑같이 적용하였다.

원뿔 모델

원뿔 형상의 하부헤드는 카자흐스탄에서 운전중인 출력 130MWe 이고 루프형 실증로인 BN-350 에 적용되었는데 이는 루프형이기 때문에 원자로용기 내부에 여러가지 기기를 담고 있을 필요가 없어서 원자로용기가 소형화되고 저온 소듐이 유입되는 하부헤드 형상으로 원뿔 모양이 유리했을 것으로 추정된다. 또한 고온소듐의 정상운전시 온도가 430°C 에 불과한 저온이기 때문에 열응력의 영향도 상대적으로 작을 것으로 예측된다.

그림 9 는 원뿔 형상의 하부헤드를 모사한 축대칭 유한요소 해석모델을 보여주고 있는데 축대칭 조건을 부여한 PLANE82 요소 140 개와 703 개의 절점으로 구성되었다. 원뿔 형상의 하부헤드와 원자로용기 실린더부의 연결부분은 곡률반경을 20cm 적용하였고 하부헤드 하단에도 곡률반경 20cm 를 적용하였다.

평판 모델

미국 ANL 은 1963 년에 출력 20MWe 의 풀형 실험로인 EBR-II 를 만들어 임계에 도달한 후 30 년간 성공적인 운전경험을 쌓았는데 원자로용기 하부헤드는 평판으로 구성되어 있다. EBR-II 는 전기를 생산한 액체금속로 실험로의 효시인데 이에 대한 설계자료는 확보되어 있지 않지만 설계 당시 액체금속로는 압력이 대기압에 가까와 경수로와 같은 압력용기가 필요치 않고 단지 소듐을 담고 있는 용기로 간주하여 형상이 가장 단순한 평판으로 만들었던 것으로 예측된다. 그리고 정상운전시 원자로용기 내의 고온소듐과 저온소듐의 온도가 각각 473°C 와 371°C 정도로 비교적 고온의 영향이 작았을 것으로 판단된다.

그림 10 은 평판 형상의 하부헤드를 모사한 축대칭 유한요소 해석모델을 보여주고 있는데 축대칭 조건을 부여한 PLANE82 요소 123 개와 622 개의 절점으로 구성되었다. 평판 형상의 하부헤드와 원자로용기 실린더부의 연결부분은 곡률반경을 20cm 로 적용하였다.

반구 모델

러시아는 BN-350 과 BN-600 을 거쳐 출력 800MWe 규모의 상용로 BN-800 을 개발 중에 있는 원자로용기의 크기는 내경이 12.9m, 길이가 14m 에 달하는 큰 풀형 액체금속로이다. 큰 풀형의 원자로용기는 내부에 충분한 공간을 확보하여 여러가지 기기들을 배치하기 쉽고 또한 구조적으로 우수하다고 알려져 있는 반구형 하부헤드를 채택하고 있다. 이는 유럽에서 공동개발하고 있는 출력이 1580MWe 인 대용량 풀형(RV 내경 17.2m) 상용로인 EFR 에도 적용되고 있다.

그림 11 은 반구 형상의 하부헤드를 모사한 축대칭 유한요소 해석모델을 보여주고 있는데 축대칭 조건을 부여한 PLANE82 요소 100 개와 503 개의 절점으로 구성되었다. 반구의 반경은 원자로용기와 같은 3.46m 이고 하부헤드는 원자로용기 실린더부에 완만하게 연결된다.

반타원 모델

미국의 GE 사는 300MWe 출력의 풀형 상용로인 PRISM 을 개발하고 있는데 원자로용기의 크기는 내경이 9.1m, 두께 5cm, 길이가 19.4m 인데 반타원 형상의 하부헤드로 설계되었다. 미국에서 개발되었던 실험로 FFTF 와 영국의 실험로 PFR 의 원자로용기 하부헤드의 형상도 이데 가까운 것으로 나타나 있다.

그림 12 는 반타원 형상의 하부헤드를 모사한 축대칭 유한요소 해석모델을 보여주고 있는데 축대칭 조건을 부여한 PLANE82 요소 130 개와 653 개의 절점으로 구성되었다. 이 모델은 반구형 모델과 유사하게 연결부위가 부드럽다는 장점과 부분원 모델이 갖는 충분한 내부공간 확보의 장점을 동시에 지니고 있다.

2.2.2 압력하중에 대한 구조해석

액체금속로는 고온의 소듐을 냉각재로 사용하며 정상운전시 원자로용기 내부 헬륨가스의 압력은 대기압에 가까운 저압이고 소듐 압력은 최고 1.6 기압 정도이다. 원자로용기의 건전성평가시 고려해야 하는 가상노심붕괴사고(HCDA) 경우에는 큰 압력이 발생하는 것으로 알려져 있는데, 노심이 붕괴되어 순간적으로 발생한 200 기압 정도의 노심 압력이 주변의 내부구조물들에 영향을 미친 뒤 원자로용기에 27 기압 정도의 충격 압력하중을 주고 초기과도기간이 지나면 이보다 작아진 압력하중이 원자로용기에 작용하지만 정확한 크기는 밝혀지지 않았다[15]. 본 연구에서는 원자로용기 하부헤드의 사례분석을 수행하기 위한 목적으로 5 가지 하부헤드의 모델에 대해서 10 기압(1.013MPa)의 내압을 적용하였으며 해석결과는 다음과 같다.

10 기압의 내압이 작용했을때 5 가지 원자로용기 하부헤드 모델의 구조해석 결과를 표 2 에 나타내었는데 하부헤드의 최대변위는 평판 모델의 경우 136.1cm 나 되는 대변형을 하는 것으로 나타나 압력하중에 대해 구조적으로 취약함을 나타내고 부분원 모델과 반타원 모델이 각각 0.74cm 와 1.11cm 로 변형이 작음을 알 수 있다. 응력강도분포 결과를 그림 8~그림 12 에 나타내었는데 반구 모델을 제외하고는 모두 원자로용기 실린더부와 하부헤드가 연결되는 부위에 응력이 집중하였다. 평판모델의 경우는 3130MPa 의 큰 응력강도가 발생하여 구조적으로 바람직하지 않은 형태임을 알 수 있고 반구 모델이 73MPa 로 가장 작은 값을 얻었고 그 다음으로는 반타원 모델이 210MPa 로 작은 값으로 두 모델이 구조적으로 적합함을 알 수 있다.

표 2. 압력하중에 대한 구조해석 결과

모델명	최대변위 (cm)	응력강도 (MPa)	Sz –원주 (MPa)	Sx (MPa)	Sy (MPa)
부분원	0.74	331	-187	-121	-185
			846	149	245
원뿔	1.9	527	-287	-321	-268
			171	387	320
평판	136.1	3130	-2350	-2860	-1760
			2550	3060	1800
반구	1.9	72.5	32	-1	-1
			72	35	45
반타원	1.11	210	-128	-15	-49
			98	91	115

원자로용기가 정상운전시 최대 온도가 약 400°C 정도임을 감안하면 ASME B&PV Code, Section III, Subsection NB 의 적용온도에 해당하고 이에 따른 허용설계응력강도(Sm)는 111MPa 이다. Subsection NB 에 따른 평가를 수행하기 위해 원자로용기 실린더부가 하부헤드와 연결되는 부위를 선정하여 축방향 응력을 선형화한 결과, 피크응력은 거의 없으며 막응력은 작은 값이고 5 가지 모

델 모두 대부분의 응력이 굽힘응력 양상을 가짐을 알 수 있다. Subsection NB 에 따른 막응력의 제한값은 Sm(111MPa)이고 막응력과 굽힘응력 합의 제한값은 1.5Sm(166MPa)이다. 반구 모델과 반타원 모델은 설계 제한치를 잘 만족시키고 나머지 3 가지 모델은 설계 제한치를 만족시키지 못하였다. 따라서 압력하중에 대한 구조해석 결과 원뿔 모델과 평판 모델은 구조적인 문제가 있고 반구 모델과 반타원 모델이 가장 적합함을 알 수 있었다. 부분원 모델은 여기서 설정된 형상으로는 만족스럽지 않은 결과를 얻었지만 연결부위 곡률을 조절하면 반타원 모델에 가까운 형상을 가져 이와 유사한 결과가 예상된다.

2.2.3 온도하중에 대한 열해석

KALIMER 의 정상운전시 원자로용기 내의 고온소듐과 저온소듐의 온도는 각각 530°C 와 386°C 이고 원자로 내부 소듐의 온도분포[16]와 원자로용기의 온도분포를 살펴보면 원자로용기 내면의 온도는 최대 400°C 정도이고 격납용기 내면의 온도는 최대 300°C 정도이다. 본 연구에서는 원자로용기 하부헤드와 실린더부 연결부분의 열하중에 대한 거동을 비교분석하기 위해 5 가지 하부헤드 모델에 대해 내면에는 400°C, 외면에는 300°C 의 온도를 적용하여 열전달 및 열응력해석을 수행하고 결과를 비교하였다.

열해석은 구조해석 경우와 같은 모델들을 사용하여 열전달해석이 먼저 수행되고 그 결과를 적용한 열응력해석 순서로 수행되었다. 열전달해석은 ANSYS 의 8 절점 축대칭 연전달요소인 PLANE78 요소를 사용하고 열응력해석은 축대칭 조건을 부여한 PLANE82 요소를 사용하였다.

열해석 결과를 정리하여 표 3 에 나타내었는데 온도하중에 대해서는 하부헤드의 형상과 무관하게 피크응력과 막응력이 거의 발생하지 않고 두께 방향으로 굽힘응력의 양상을 갖는다. 최대변위는 5 가지 모델 모두 하부헤드 중심이 아래로 10.6cm 정도 변형하여 거의 비슷하였는데 이는 길이가 긴 원자로용기 실린더부가 축방향으로 변형한 것이 주로 영향을 미친 것이기 때문에 하부헤드 자체에 큰 수직방향 변형률이 발생한 것은 아님을 짐작할 수 있다. 5 가지 하부헤드 모델에서 발생한 최대응력강도는 모두 하부헤드가 실린더부와 연결되는 모서리 부근에서 발생하여 연결부위에 열변형률이 집중됨을 알 수 있다. 열응력에 대한 ASME B&PV Code, Section III, Subsection NB 의 설계 제한값은 3Sm 으로 333MPa 인데 5 가지 경우 모두 설계 제한값을 만족시켜서 단순 온도하중에 대해서는 하부헤드 형상이 별로 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

표 3. 온도하중에 대한 열해석 결과

모델명	최대변위 (cm)	응력강도 (MPa)	Sz –원주 (MPa)	Sx (MPa)	Sy (MPa)
부분원	10.6	201	-201	-196	-199
			196	195	199
원뿔	10.6	207	-204	-179	-204
			197	177	203
평판	10.7	216	-197	-201	-197
			198	199	196
반구	10.6	196	-196	-196	-196
			195	195	195
반타원	10.6	201	-199	-196	-198
			198	194	197

3. 결론

개념설계 초기 단계에서 5cm 의 균일한 두께로 설정한 KALIMER 원자로용기의 두께를 고온소듐 자유표면 높이에서 2.5cm 로 줄여 가변두께로 제작할 경우의 구조적인 타당성을 분석하기 위해 가변두께 모델과 균일두께 모델을 만들어서 정상운전하중에 대한 열응력 영향을 분석하고 또한 내압과 같은 구조하중에 대한 비교해석을 수행하였다.

열응력 해석결과 저온소듐 자유표면 부근에서 최대응력강도가 발생하였는데 가변두께인 경우 최대 응력강도가 125MPa 로 5cm 균일두께인 경우의 135MPa 보다 약 8% 정도 줄어드는 것으로 나타났다. 원자로 운전중 원자로용기가 지지하는 내부의 구조물들과 소듐 및 원자로용기의 자중을 고려한 해석 결과 자중의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 원자로용기 내부에 5 기압의 압력하중을 적용한 해석 결과는 5cm 균일두께 경우에 최대응력강도가 용기 상단에서 44.2MPa 인 것에 비해 가변두께의 경우는 용기의 두께가 변하는 부분에서 74.9MPa 로 5cm 균일두께 경우보다 69% 증가하였다.

가변두께를 채택하여 원자로용기 상단부를 5cm 두께로 하고 그 아래 부위들을 2.5cm 로 얇게 만들면 열응력은 8% 정도 작아지지만 압력하중이나 같은 구조하중에 대해서는 최대응력강도가 오히려 70% 가까이 증가함을 알 수 있었다. 즉, 열하중에 대한 영향은 조금 개선되는데 비하여 구조하중에 대한 영향은 많이 나빠지기 때문에 가변두께의 채택이 바람직하지 않다고 판단되어서 원자로용기는 5cm 의 균일 두께로 설계함이 타당한 것으로 평가되었다. 앞으로 열과도하중, 가상 노심붕괴사고에 따른 압력하중 및 동적하중에 대한 추가적인 해석노력이 필요하다.

KALIMER 원자로용기 하부헤드의 적절한 형상을 결정하기 위해 부분원 모델, 원뿔 모델, 평판 모델, 반구 모델, 및 반타원 모델의 5 가지 하부헤드 모델을 제시하고 내부 압력하중을 가한 구조해석과 원자로용기 내외면에 작용하는 온도하중에 대한 열해석을 수행하여 비교분석을 수행하였다. 압력하중에 대한 구조해석 결과 원뿔 형상과 평판 형상의 하부헤드는 구조적으로 건전하지 않아 적절하지 않은 것으로 나타났고, 반구 형상과 반타원 형상은 발생 변위도 작고 구조응력이 ASME B&PV Code Subsection III 의 설계 제한값을 잘 만족시켰다. 부분원 형상은 본 연구에서 설정한 형상으로는 설계 제한치를 만족하지 않은 결과를 얻었지만 하부헤드와 실린더부의 연결부위에 좀 더 큰 곡률반경을 사용하면 반타원 형상에 가까운 결과를 얻을 것으로 예상된다. 온도하중에 대한 열해석으로부터 5 가지 경우 모두 비슷한 결과를 얻었고 ASME B&PV Code Subsection III 의 설계 제한치를 만족함으로써 하부헤드 형상이 정상상태 온도분포 하중에 별 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

본 연구에서 압력하중과 온도하중에 대한 해석결과를 종합해서 평가한 결과는 하부헤드의 형상으로 반구 형상, 부분원 형상 및 반타원 형상이 적절할 것으로 판단된다. 하지만 원자로용기 전체 길이를 증가시키지 않고 대용량 풀형 액체금속로에 적합한 반구 형상의 하부헤드를 채택할 경우는 원자로용기 실린더부의 길이가 작아지고 하부헤드 내의 공간이 줄어들게 되어 EM Pump 배관, 유로 안내물, 노심지지물 등의 구조물을 설치하는데 문제가 있을 수 있다. 따라서 대용량 풀형 액체금속로보다 직경이 작은 KALIMER 원자로용기의 경우에는 부분원 형상과 반타원 형상의 하부헤드가 가장 적절할 것으로 평가되었다. 부분원 형상의 하부헤드는 부분원의 내경과 하부헤드와 실린더부가 연결되는 부위의 곡률반경을 조절함으로써 반타원 형상에 가까운 모습을 가질 수 있

어서 기본적으로 유사한 설계로 예측되었고 앞으로 제작성과 상세해석을 수행하여 최종적인 개념 설계안을 확립할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

[1] KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97

[2] 이형연,김종범,유봉, "KALIMER 원자로헤드 설계특성 및 사례해석," '99 춘계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 1999

[3] NERSA, The Creys-Malville power plant (Superphenix), EDF, 1986

[4] PRISM - Preliminary Safety Information Document, GE, USA, 1987

[5] Y.Yokota, el.al, "Design and Construction of the Reactor Structure of the Prototype Fast Breeder Reactor MONJU", Proceedings of FR '91, 8-2, Japan, 1991

[6] CRBRP – Preliminary Safety Analysis Report, WH, USA, 1975

[7] IAEA-TECDOC-866, Fast reactor database, IAEA, 1996

[8] J.I.Sackett, "Operating and Test Experience of EBR-II", Proceedings of FR '91, 2-4, Japan, 1991

[9] IOC-FS-004-1998, 정상조건시 원자로 Pool 의 온도분포, 1998

[10] KALIMER/TR-1064/98, KALIMER 원자로용기 두께평가 사례연구(I), 1998

[11] ANSYS, Version 5.5, Swanson Analysis Systems Inc., USA, 1999

[12] 심윤섭, 위명환, 김성오, "PSDRS 의 잔열제거 특성 분석", '98 춘계학술발표회논문집, 한국원자력학회, 1998

[13] Personal Communication with Mahadeo Patel, GE, USA, 1996

[14] ASME B&PV Code, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Div. 1, Subsection NH, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, 1995

[15] PRISM Preliminary Safety Information Document, GE, 1987

[16] IOC-FS-004-1998, 정상조건시 원자로 Pool 의 온도분포, 1998

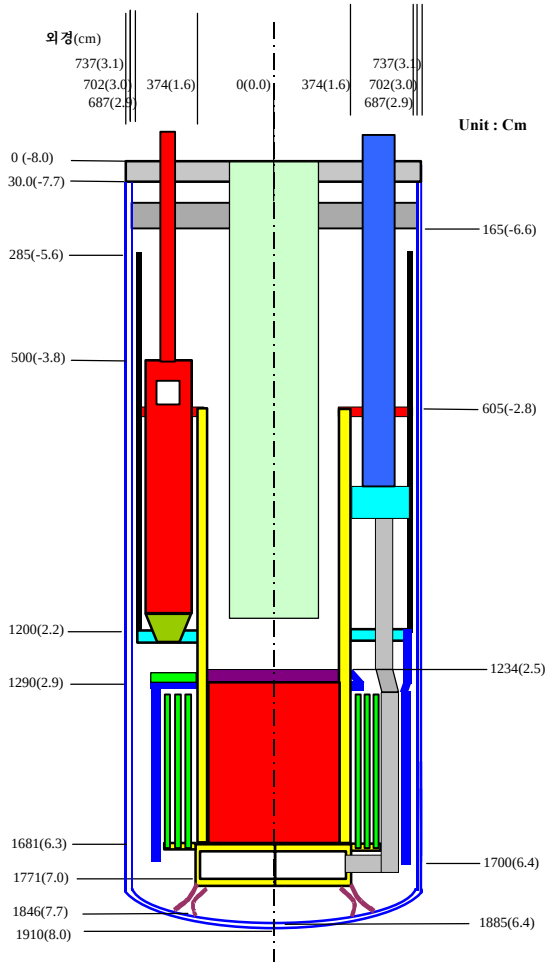

그림 1. KALIMER 원자로 개략도

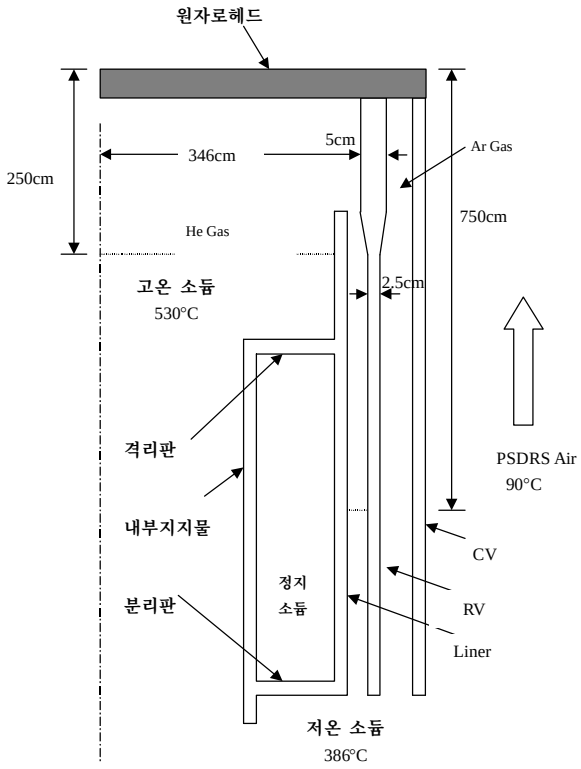

그림 2. 가변두께 원자로용기 해석모델 개략도

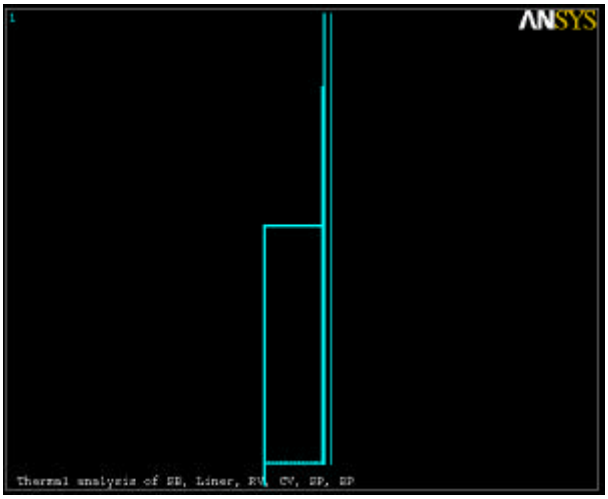

그림 3. 원자로용기 유한요소 해석모델

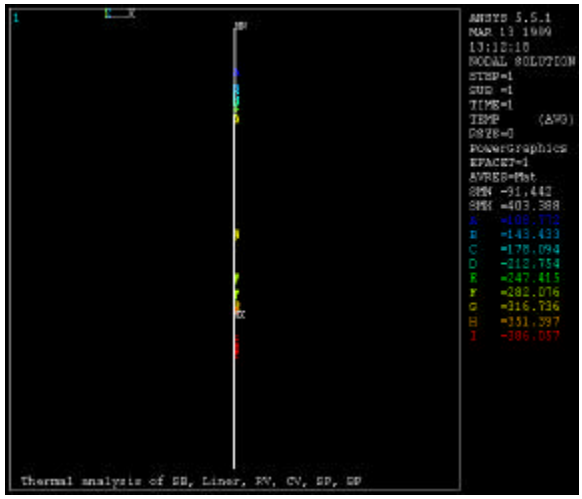

그림 4. 가변두께 원자로용기 온도분포 (정상운전시)

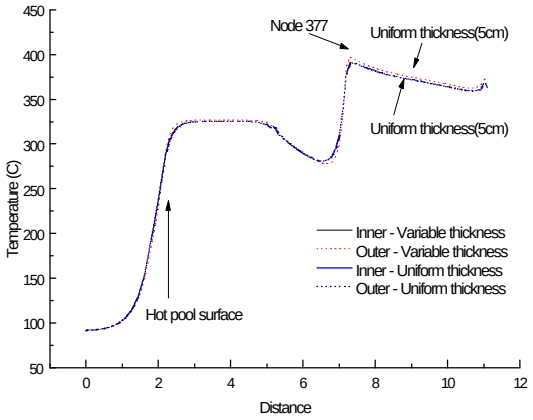

그림 5. 원자로용기 내외면의 온도분포 (정상운전시)

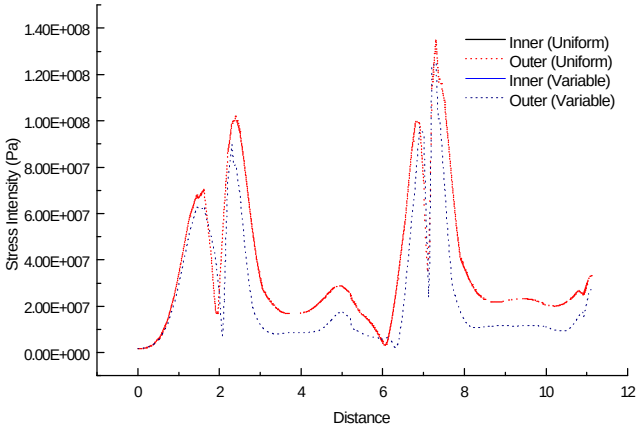

그림 6. 원자로용기 내외면의 응력강도분포 (정상운전시)

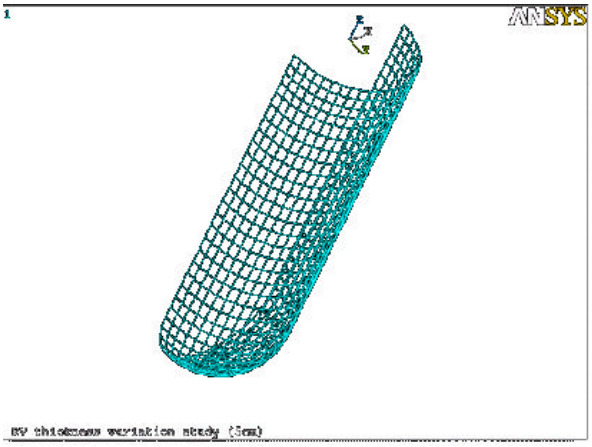

그림 7. 원자로용기 구조하중 해석모델

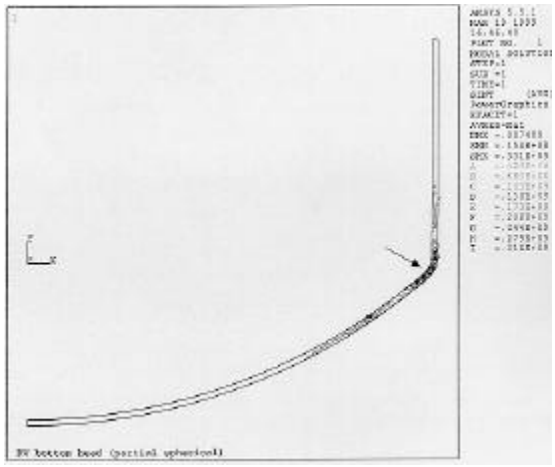

그림 8. 부분원모델의 응력강도 분포(압력하중)

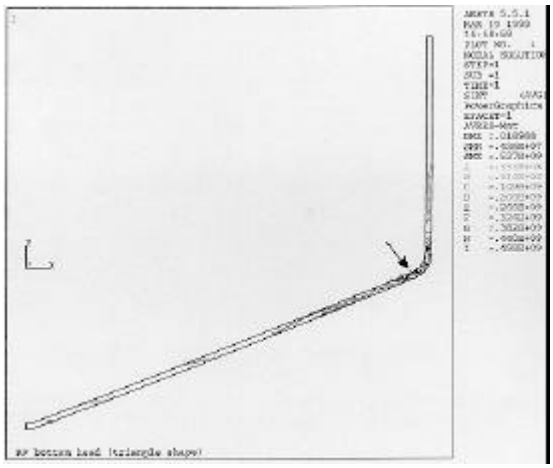

그림 9. 원뿔모델의 응력강도분포(압력하중)

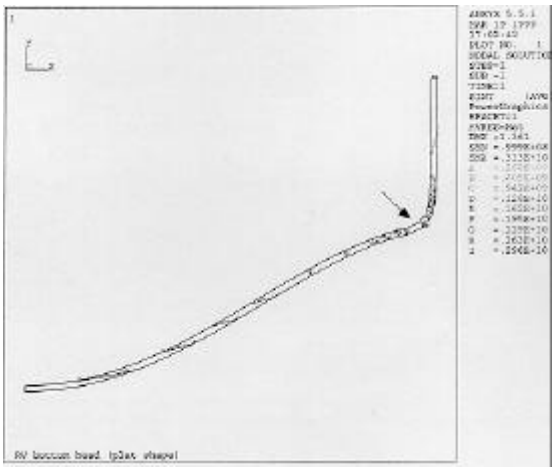

그림 10. 평판모델의 응력강도분포(압력하중)

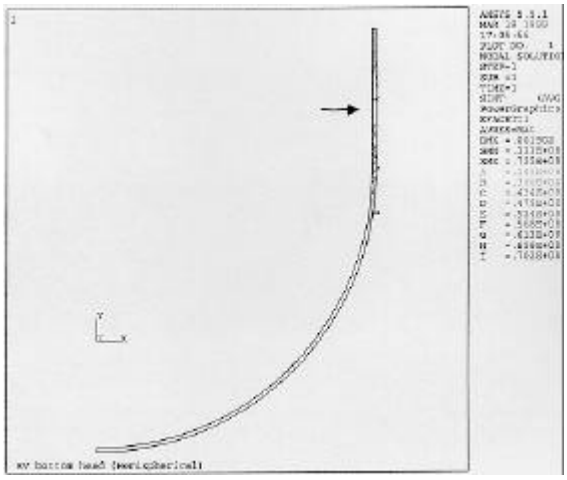

그림 11. 반구모델의 응력강도분포(압력하중)

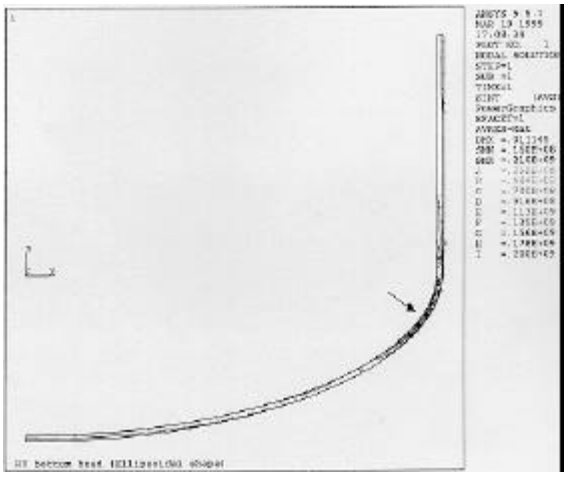

그림 12. 반타원모델의 응력강도분포(압력하중)