

KALIMER-600 원자로헤드 개념 설계 및 지지구조물 형상 개선

Conceptual Design of Reactor Head and Shape Improvement of Reactor Support Structure for KALIMER-600

박창규, 김종범, 이재한

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

KALIMER-600 원자로헤드를 개념 설계하고 원자로 지지구조물에 대한 구조건전성을 평가하였다. 원자로헤드는 내부 기기들과 원자로 구조물들을 지지하도록 설계되고 중간열 전달계통 형식에 적합하도록 내부 기기들을 배치하였다. 원자로헤드의 하부에는 절연차폐체를 설치하였다. 원자로 지지구조물의 설계 개념으로는 일체형 링구조와 이를 변형한 가변 링구조를 제안하고 각 구조에 대하여 ANSYS를 활용한 구조 해석을 수행하였는데 두 경우 모두 응력 및 변형에 대한 구조건전성 요건을 만족하는 것으로 평가되었다.

Abstract

KALIMER-600 reactor head was designed conceptually and the structural integrity of reactor support structure was evaluated. Reactor head is designed to support the reactor structures and the internal components which are arranged to be compatible with IHTS loop type. The insulation and shield plates are installed under the reactor head. As the design concepts of reactor support structure, the ring type support attached to reactor head and the variable ring type support which is similar to the ring type support are proposed and structural analyses using ANSYS have been performed with respect to each case. The structural integrity limits of stresses and deformation for both cases are satisfied

1. 서 론

KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor)는 소듐을 냉각제로 사용하고 저압, 고온(500℃ 이상)에서 운전되는 풀형 액체금속로이다[1]. KALIMER-600의 원자로헤드에는 소듐을 담고 있는 원자로용기를 비롯하여 중간열교환기와 같은 원자로 주요 기기들이 지지된다. KALIMER-150의 원자로 지지구조물은 원자로를 건물 내부의 지지벽에서 지지되도록 하는 것으로 여러 가지 방식이 제안된 바 있다[2]. 본 연구에서는 용량이 격상된 KALIMER-600의 원자로헤드 및 원자로 지지구조물에 대한 개념 설계를 수행하고 응력해석을 통한 구조건전성을 평가하였다.

원자로헤드에는 여러 가지 내부 기기들이 설치되어 지지되므로 이들 관통부의 간격을 고려하여 내부 기기들을 최적 배치해야 한다. 원자로헤드의 하부에는 절연차폐체를 설치하여 차폐 및 단열의 기능을 하도록 하였다.

KALIMER-600의 원자로 지지구조물은 원자로헤드를 헤드접근구역까지 연장한 일체형 링구조가 단순한 구조이면서 격납경계 설정이 쉬운 장점이 있다. 원자로 지지구조물은 수직방향으로 원자로와 주요 기기들의 하중을 견뎌야 하고 수평방향으로의 열변형은 수용할 수 있도록 설계해야 한다[3]. KALIMER-600 원자로 지지구조물은 원자로헤드의 두께를 고려하여 일체형 링구조 뿐만 아니라 가변 링구조를 제안하였다. 원자로 지지구조물과 원자로헤드에는 내부 기기 및 구조물들에 의한 기계적 하중과 고온 운전 특성에 의한 상하면의 온도차로 인하여 열하중이 발생한다. 이러한 하중 조건을 고려하여 각 구조 형상에 대한 구조해석을 수행하고 그 결과를 통하여 설계의 타당성을 평가하였다.

2. KALIMER-600 원자로 지지구조물 설계

2.1 원자로헤드 설계 및 기기 배치

KALIMER-600의 원자로헤드는 두께가 50cm, 직경이 11.76m인 원판 형상으로 재질은 316 SS이다. 원자로헤드의 하부에는 차폐절연체가 설치되는데 재질은 316 SS이고 두께가 3cm인 절연판 5개를 2.5cm 간격으로 설치하여 절연과 차폐의 기능을 하도록 하였다. 그림 1은 원자로헤드 하부에 설치되는 차폐절연체를 개략적으로 나타낸 것이다.

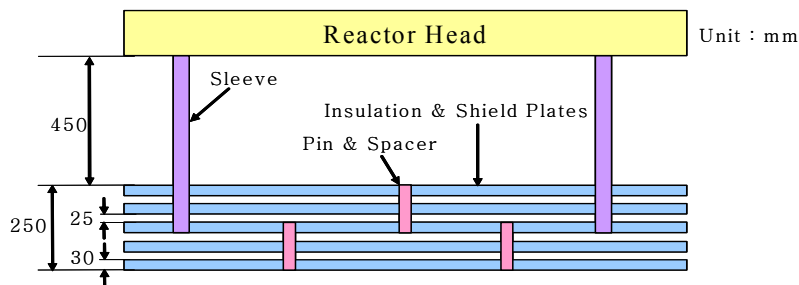


그림 1 KALIMER-600 차폐절연체 개략도

또한 차폐절연체는 원자로용기의 온도구배를 완화시키고 헤드접근성을 개선시키기 위해서 원자로헤드 하부면과의 거리를 45cm로 유지하도록 하였다.

원자로헤드의 설계에서 고려해야 할 중요한 요건들은 아래와 같다[4].

- 회전플러그 밀봉 기능을 유지하기 위하여 원자로헤드의 최대 수직 변위를 6.35mm 이하가 되도록 한다.
- 원자로헤드 하부 커버가스의 누설량은 하루 0.1% 이하가 되도록 밀봉 설계가 이루어져야 한다.
- 설계지진 및 열과도 하중에 대하여 구조건전성이 유지되어야 한다.
- 가동중검사(ISI) 및 보수 접근성이 좋아야 한다.
- 제작 및 수송이 용이해야 한다.

원자로헤드에는 4개의 중간열교환기(IHX), 2개의 일차펌프(primary pump), 2개의 잔열 제거용 열교환기(DHX), 회전플러그 및 상부내부구조물 그리고 기타 계장기기 등이 지지된다. 원자로헤드에서 IHX가 지지되는 부분의 형상은 원자로기기가 통과하는 여유 공간과 방사선 차폐를 위해 단층구조 및 기기밀봉구조로 설계된다. 또한 IHX를 수직방향으로 지지하기 위하여 IHX riser에 플랜지를 부착하고 이를 원자로헤드에 볼트 체결 한다. IHX는 설계시 원자로 수명동안 교체하지 않도록 설계하지만 고장이나 수리 등에 의해 교체되어야 할 경우에는 밀봉을 제거하고 볼트를 해체한 뒤 IHX를 교체할 수 있다. 볼트 체결부는 방사선 및 커버가스의 누설을 방지하기 위하여 밀봉 설계가 이루어져야 한다.

KALIMER-600은 풀형 원자로로서 계통은 2-루프로 구성되어 있다. 내부 기기들은 루프당 2개의 IHX, 1개의 기계식펌프, 1개의 DHX 등이 배치되는데 원자로헤드의 중심축을 기준으로 대칭적으로 배치하였다. 원자로헤드에 배치되는 주요기기들의 직경이 다르기 때문에 기기 사이의 간격이 같아지도록 기기를 배치하면 기기 간격이 1.2m가 된다. 기기들 간의 간섭을 없애고 원자로기기 및 지지구조물에 대한 가동중검사에 필요한 최소 기기간격을 40cm로 설정하면 현재의 기기간격은 충분하다고 할 수 있다. 그림 2는 원자로헤드의 단면도를 개략적으로 나타낸 것이다.

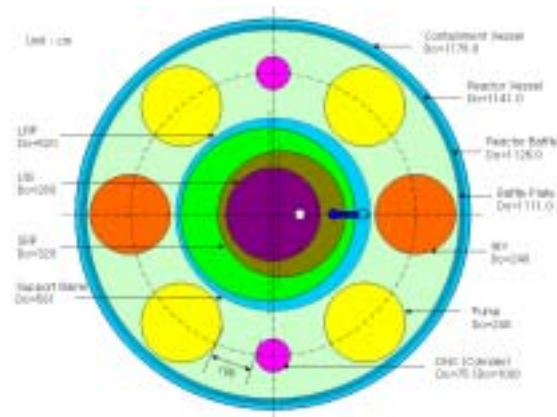


그림 2 KALIMER-600 원자로헤드 평면도

2.2 원자로 지지구조물 설계

원자로 지지구조물은 면진설계의 채택유무, 원자로헤드 설계와의 상관관계, 격납 경계와의 연계사항, 헤드접근구역에서의 작업성 및 가동중검사 요건 등을 고려하여 설계되어야 하고 또한 설계 하중에 대해서는 구조건전성이 확보되어야 한다[5]. 원자로 지지구조물 설계시 고려되어야 할 중요한 설계 요건으로는 다음과 같다.

- 원자로 지지구조물은 원자로 운전수명을 토대로 설계되어야 하고 운전수명 동안 그 기능을 유지해야 한다.
- 지지구조물 형상은 공장 제작 및 수송이 용이해야 하고 현장에서의 조립, 설치가 편리해야 한다.
- 운전시 발생하는 반경방향으로의 열변형을 수용할 수 있어야 한다.
- 지진하중에 견딜 수 있도록 충분한 강성을 가진 구조가 되어야 한다
- 유지보수가 쉬워야 하고 지지영역에서는 가동중검사를 위한 접근이 용이해야 한다.

KALIMER-600 원자로 지지구조물의 초기 개념으로는 원자로헤드를 원자로 지지벽의 헤드접근구역(HAA)까지 연장한 일체형 링구조를 선정하였다. 일체형 링구조는 지지구조물이 온도가 낮은 원자로헤드에 연결되어 열응력 영향이 작고 구조가 단순하며 또한 격납 경계의 설정이 용이한 장점이 있다. 다만 원자로헤드에 원자로용기와 격납용기를 용접하는 제작과정에서 접근성이 문제가 될 수 있지만 현재 용접기술로는 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

링구조 지지구조물은 헤드접근구역 바닥에 볼트 체결하여 지진에 의해 발생할 수 있는 원주방향 및 수직방향으로의 움직임을 구속하였다. 하지만 온도에 의해서 반경방향으로의 열팽창이 발생하므로 이를 수용할 수 있는 구조가 되어야 하므로 지지구조물의 볼트 체결부 구멍을 반경방향으로의 길이를 길게 하여 열변형이 발생하여도 구속이 발생하지 않도록 하였다.

정상운전시의 원자로헤드 온도는 130℃에 이르는데 이때 원자로헤드는 반경방향으로 1.02cm의 열팽창이 발생한다. 이러한 열팽창을 강제로 구속하면 원자로헤드에 큰 응력이 발생하게 되므로 이를 방지하기 위해서 지지구조물과 헤드접근구역 사이에는 판형 무급유베어링을 설치하여 운전 중 발생하는 반경방향 열변형을 수용할 수 있도록 하였다. 무급유베어링은 수력발전소의 수문, 교량 등에 적용되고 있으며 국내 경수로에도 사용되고 있다[6]. 지지구조물에 의해 지지되는 하중이 약 2880톤인데 이는 접촉면적이 0.95m²가 되도록 무급유베어링을 지지구조물과 헤드접근구역 사이에 분산 배치하였다.

대용량 원자로인 KALIMER-600의 원자로헤드 두께는 50cm로 설정하였다[3]. 원자로의 수직방향 움직임을 고정시키기 위하여 볼트 체결을 하는데 원자로헤드의 두께가 두껍기 때문에 볼트의 제작과 강성 확보가 쉽지 않다. 따라서 지지구조물 형상을 원자로헤드와 연결되는 부분의 두께는 50cm로 하고 헤드접근구역에서 볼트가 체결되는 부분의 두께는 30cm가 되도록 두께가 점차 감소하는 가변 링구조 지지구조물을 대안으로 제시하

였고 열변형 수용 방법은 링구조와 동일하다. 그림 3은 일체형 링구조 및 가변 링구조로 설계된 원자로 지지구조물의 형상을 개략적으로 나타낸 것이다.

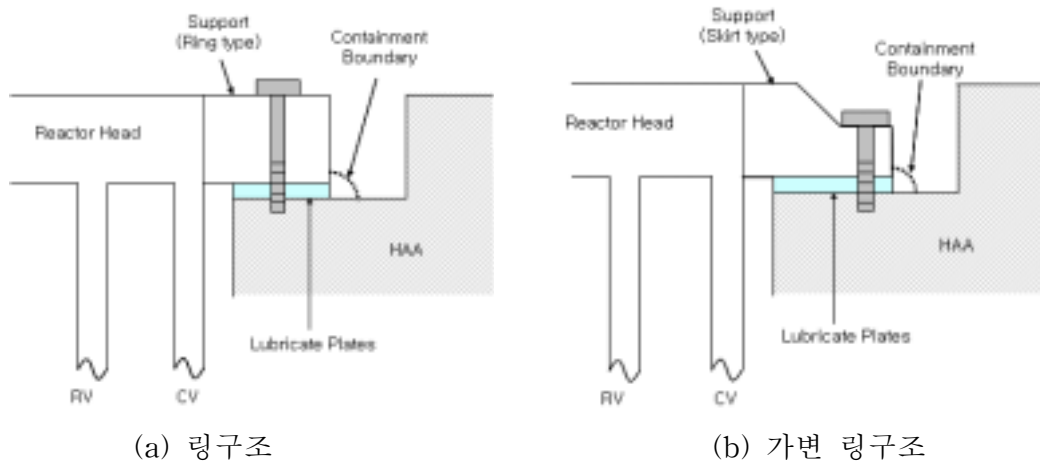


그림 3 일체형 원자로 지지구조물

3. KALIMER-600 원자로 지지구조물 구조 해석

3.1 작용 하중 및 경계 조건

KALIMER는 원자로헤드에서 원자로용기 및 내부기기들을 지지하기 때문에 원자로헤드와 일체형으로 제작되는 원자로 지지구조물의 구조건전성 확보가 반드시 필요하다.

원자로헤드에는 기기의 지지 및 계측을 위한 관통부위가 많이 존재하지만 구조 해석의 단순화를 위해서 그림 2와 같이 IHX, primary pump, DHX, 회전플러그 등 9개의 주요 관통부위만 고려하였다. 원자로 내부 기기들이 90° 간격으로 대칭적으로 배치되므로 1/4 대칭으로 모델링하였고 해석에는 ANSYS 6.1 구조해석 프로그램을 사용하였다.

원자로헤드에 작용하는 하중으로는 기기 및 내부구조물들에 의한 자중과 온도에 의한 열하중을 고려하였다. 표 1에 원자로헤드에서 지지되는 주요 구조물들의 하중을 나타내었는데 소듐과 내부구조물들은 원자로용기의 하중에 포함 적용된다. 내부기기들은 원자로헤드 관통부위에서 지지되므로 관통 원주상의 절점에 자중을 분포시켰다. 원자로헤드에서의 온도분포는 상단면이 145℃, 하단면이 130℃로 선형적으로 감소하는 형상으로 적용하였다[7]. 원자로헤드의 반경방향 변형은 열팽창에 의해서만 발생하는데 관형 무급유베어링을 사용하여 이를 수용하도록 했으며 원주방향 및 수직방향 변형은 볼트 체결에 의해서 구속된다.

원자로 지지구조물은 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Subsection NF에 따라 설계 및 평가를 수행하고 열응력은 Subsection NB에 따라 평가하였다. 원자로 지지구조물의 재료인 316 SS의 S_m 이 150℃ 이하에서는 137.9MPa이고 응력 성분에

따른 설계 제한치를 만족시켜야 한다. 원자로 지지구조물의 설계에 있어서의 변위 제한치 요건으로는 수직방향으로의 변위 요건인 6.35mm를 만족해야 한다[4].

표 1 원자로헤드에 작용하는 기계적 하중

구조물	하중(톤)	비고
원자로용기	395.96	외경 1141.0cm, 두께 5.0cm
소듐	1196.65	$V_{\text{sodium}}=1300.69\text{m}^3$
내부구조물	774.73	원자로용기에서 지지되는 모든 구조물
절연차폐체	66.64	두께 2.5cm인 강판× 5개
격납용기	158.22	외경 1176.0cm, 두께 2.5cm
IHX	29.53	외경 240.0cm
DHX	4.98	실린더 외경 : 100.0cm DHX 외경 75.0cm
Primary Pump	108.25	외경 240.0cm
회전플러그	145.13	RP+UIS

3.2 링구조 지지구조물 구조 해석

원자로 지지구조물의 구조건전성을 평가하기 위하여 ANSYS 구조해석 프로그램[8]을 이용하여 모델링 및 해석을 수행하였다. 해석에는 32,257개의 절점과 6,580개의 20절점 육면체요소(solid 95)가 사용되었다.

그림 4는 링구조 지지구조물에 대하여 정상운전 상태에서의 응력 해석을 수행한 결과를 나타낸 것으로 최대 응력강도(stress intensity)는 지지구조물과 HAA가 접하는 부분에서 나타났다. 지지구조물에 대한 응력제한치는 ASME Subsection NF에서 규정하는데, 전역 막응력(global membrane stress, P_m)은 S_m 이하가 되어야 하고, 주 막응력(primary membrane stress, P_ℓ)과 굽힘응력(P_b)의 합은 $1.5S_m$ 이하가 될 것을 요구한다. 또한 이차응력(Q)인 열응력에 대한 제한조건은 Subsection NB를 적용하여 주 막응력, 굽힘응력, 이차응력의 합이 $3S_m$ 이하가 될 것을 요구한다. 최대 응력강도가 발생하는 부분에서의 (P_m)은 30.50MPa이고 ($P_\ell+P_b$)는 40.13MPa로 나타나 각각 S_m 과 $1.5S_m$ 조건을 만족시켰다. 또한 ($P_\ell+P_b+Q$)는 146.0MPa로 나타나 $3S_m$ 인 413.7MPa 보다 작아 충분한 설계 여유도를 갖는 것으로 평가되었다.

그림 5는 해석 결과로 나타난 수직방향 변위를 나타낸 것으로 최대값이 1.29mm로 허용치인 6.35mm를 만족시켰다.

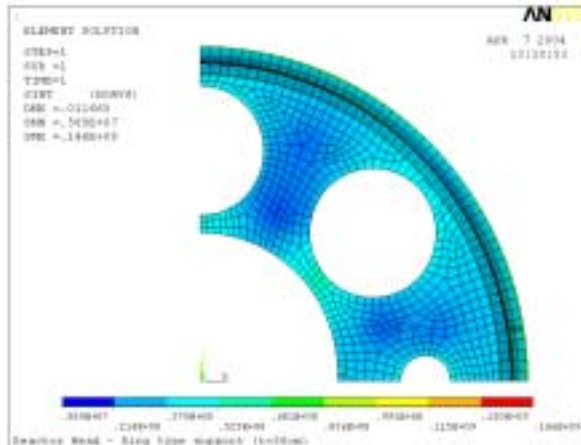


그림 4 최대 응력강도(링구조)

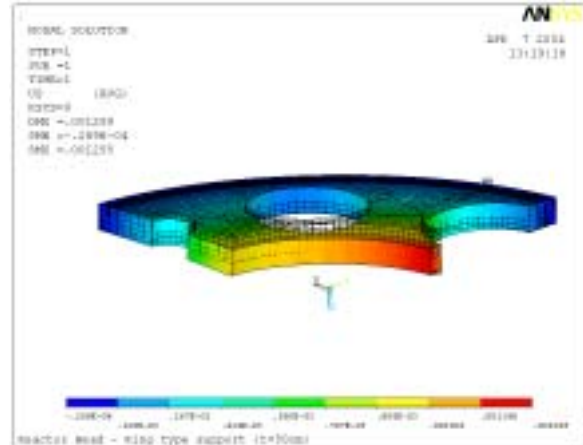


그림 5 수직방향 변위(링구조)

3.3 가변 링구조 지지구조물 구조 해석

가변 링구조 지지구조물 해석에서는 원자로 지지구조물의 형상만 다르고 다른 조건들은 일체형 링구조 지지구조물 해석에서 사용된 것들과 동일하다. 지지구조물의 반경방향 폭은 30cm이고 헤드접근구역과 접하는 부분은 일체형 링구조에서와 동일하게 25cm로 설정하였다.

그림 6은 가변 링구조 지지구조물의 응력 해석을 수행한 결과를 나타낸 것으로 최대 응력강도는 HAA와 접하는 부분에서 발생하였다. 가변 링구조에서의 (P_m)은 31.25MPa이고 ($P_\ell + P_b$)는 40.16MPa로 나타나 응력제한치를 만족시켰고, 또한 ($P_\ell + P_b + Q$)는 144MPa로 나타나 $3S_m$ 조건을 만족시킴을 알 수 있다. 그림 7은 수직방향 변위를 나타낸 것으로 최대값이 1.38mm로 나타나 역시 허용치를 충분히 만족시켰다.

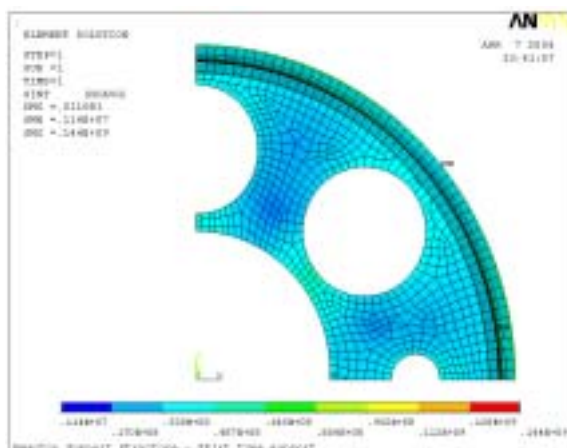


그림 6 최대 응력강도(가변 링구조)

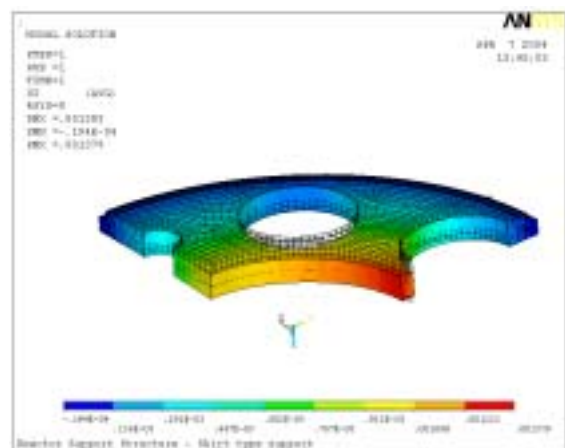


그림 7 수직방향 변위(가변 링구조)

4. 결론

본 연구에서는 KALIMER-600 원자로에 대하여 원자로헤드의 구조를 분석하고 원자로 지지구조물로 일체형 링구조 및 가변 링구조 설계 개념에 대한 구조해석을 수행하여 구조조건전성을 평가하였다.

원자로헤드는 원자로 구조물들을 지지하는 중요한 역할을 하는데 내부 기기들의 관통부는 단층 구조로 설계하고 IHX riser에는 플랜지를 부착하여 원자로헤드와 볼트 체결을 하도록 하였다. 원자로헤드의 하부에는 단열과 차폐의 기능을 하는 절연차폐체를 설치하였다. 또한 2-루프 계통에 적합하도록 내부기기들을 최적 배치하였다.

원자로 지지구조물로 제시된 일체형 링구조와 가변 링구조에 대한 구조 개념을 분석하고 유한요소 구조 해석을 수행하여 표 2의 결과를 얻을 수 있었다.

표 2 지지구조물 구조 형식에 따른 해석 결과 비교

구조 형식	제한조건	제한값	해석 결과
링구조	P_m (MPa)	137.90	30.50
	$P_\ell + P_b$ (MPa)	206.85	40.13
	$P_\ell + P_b + Q$ (MPa)	413.70	146.0
	수직 변위 (mm)	6.35	1.29
가변 링구조	P_m (MPa)	137.90	31.25
	$P_\ell + P_b$ (MPa)	206.85	40.16
	$P_\ell + P_b + Q$ (MPa)	413.70	144.0
	수직 변위 (mm)	6.35	1.39

표에서 보는 바와 같이 각 구조 형식은 모든 제한 조건들을 여유있게 만족시킴을 알 수 있다. 원자로 지지구조물은 수직방향과 회전반향 움직임을 고정시키기 위하여 헤드접근구역 바닥에 볼트 체결을 하는데 볼트의 제작 및 강성 확보를 고려할 때 두께를 줄이는 것이 유리하다. 따라서 KALIMER-600 원자로 지지구조물로는 원자로헤드와 일체형이고 두께가 변하는 가변 링구조가 보다 타당한 설계 개념으로 판단된다.

향후 연구과제로는 내부기기들에 대한 상세 설계가 확정되면 이들과 연계한 설계 해석을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

- [1] 한도희 외, KALIMER 개념설계보고서, KAERI/TR-2204/2002, 한국원자력연구소, 2002.
- [2] 김종범, 이형연, 유봉, “KALIMER 원자로 지지구조물 설계 특성 및 사례해석”, '99 추계학술대회 논문집, 한국원자력학회, 1999.
- [3] 이재한 외, 액체금속로 기계설계 기술개발('03), KAERI/TR-2704/2004, 한국원자력연구소, 2004.
- [4] 이형연, 김종범, 유봉, “KALIMER 원자로헤드 설계특성 및 사례해석”, '99 춘계학술대회발표회 논문집, 한국원자력학회, 1999.
- [5] 김종범, 이형연, 유봉, “KALIMER 원자로지지구조물 설계특성 및 사례해석”, '99 추계학술발표회 논문집, 한국원자력연구소, 1999.
- [6] 이재한 외, 액체금속로 설계기술개발 중 기계설계기술개발 최종보고서, KAERI/RR-2215/2001, 한국원자력연구소, 2002.
- [7] 김성오 외, 액체금속로 유체 및 계측제어계통 설계기술개발, KAERI/TR-2726/2004, 한국원자력연구소, 2004.
- [8] ANSYS Release 6.1, 2002.