'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER 원자로내부구조물 고온 열응력 집중부위에 대한 응력해석 및 한계요건 검토

Thermal Stress Analysis and Service Limit Check for KALIMER Reactor Internal Structures

구경회, 이형연, 주영상, 김종범, 유봉

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구에서는 현재 국내에서 개발 중인 KALIMER 원자로내부구조물의 예비 정상상태 출력조건에 대한 고온 열응력해석을 수행하고 원자로내부구조물 고온 설계코드로 제시되고 있는 ASME Code Case N-201-4의 규정에 따라서 한계요건을 검토하였다. 열응력 해석결과 내부지지물과 연결되는 분리판과 격리판에서 열응력이 크게 발생하였으며 주로 두께를 따라서 발생하는 온도구배로 인하여 굽힘응력이 지배적으로 발생하였다. Level A/B 운전하중에 대한 한계요건 검토에는 정상상태 온도하중과 운전기준지진하중을 고려하였으며 탄성해석법을 적용하였다. 고온냉각재와 접하는 내부지지물 실린더 안쪽으로 열차폐를 설치할 경우에 하중제어 응력한계요건은 만족되었으나 주어진 해석요건에서 변형률 한계요건을 만족하지 못하는 것으로 나타났으며 해석조건들의 보완 및 비탄성해석을 통한 재검토가 요구된다.

Abstract

In this paper, thermal stress analyses and service limit checks using ASME Code Case N-201-4 for KALIMER reactor internal structures are carried out in case of pre-determined steady state condition. From the stress analysis, severe thermal stresses occurred at the connecting parts between the separation plate/the baffle plate and the support barrel/the RV liner. From the service limit checks for the Level A and B Service Loadings using the elastic analysis method, the reactor internal structures satisfy the load-controlled quantities when the thermal barrier is introduced, but do not satisfy the deformation-controlled quantities. Therefore, the modification of the analysis conditions and the detail inelastic analysis are required to check the service limits.

1. 서 론

현재 국내에서 개발중인 액체금속로인 KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor) 원자로는 150MWe 급으로 정상상태 출력조건에서 노심출구에서의 일차소듐냉각재 온도가

530°C 로 설계되는 매우 높은 고온조건을 가지고 있다[1]. 또한 일차열전달계통이 원자로내부에 설치됨으로 인하여 노심출구에서 나온 고온소듐냉각재(530°C)와 중간열교환기를 거쳐나온 저온소듐냉각재(386°C)의 경계가 되는 내부구조물이 존재하게 된다. 이러한 고온/저온냉각재의 경계부위 내부구조물에서는 매우 심각한 열응력 집중현상이 발생할 수 있으며 두께에 따른 온도구배로 야기되는 굽힘응력을 최소화할 수 있도록 박막구조로 설계된다. 그러나 이러한 박막구조는 지진하중에 취약하기 때문에[2] 상호 보완적인 구조설계가 이루어져야 한다. 실제로 KALIMER 원자로구조물은 지진충격을 크게 완화시킬 수 있는 면진설계(Seismic isolation design)[3]가 적용되어있기 때문에 구조물 설계에는 지진하중보다 고온운전 조건에서 발생되는 열적 하중들이 지배적인 설계하중이 된다.

본 논문에서는 정상상태 출력조건시 예비설계된 KALIMER 원자로내부구조물의 고온 열응력집중부위에 대하여 3 차원 유한요소해석을 통한 열전달해석 및 열응력해석을 수행하고 이들 구조물에서 발생하는 온도구배를 줄이기 위한 열차폐체 효과를 평가하였다.

ASME 코드를 이용한 원자로내부구조물의 한계요건 검토에는 운전온도가 427°C (800°F)이하인 기존의 경수로 설계에는 ASME Code Section III, Subsection NG 가 사용되지만 그 이상의 고온조건에 대해서는 원자로내부구조물 고온설계코드로 제시되고 있는 ASME Code Case N-201-4[4]의 규정에 따라서 한계요건을 검토할 수 있다. 본 논문에서는 KALIMER 원자로내부구조물의 정상상태 온도조건과 운전기준지진하중을 고려한 Level A/B 운전하중 한계요건 검토를 수행하였다.

2. KALIMER 원자로내부구조물 열응력 집중부위

Fig. 1 은 I-DEAS 를 사용하여 설계한 KALIMER 원자로내부구조물의 3 차원 개념도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 KALIMER 원자로내부구조물은 노심지지물(Core Support), 유입실(Inlet Plenum), 내부지지물(Support Barrel), 원자로용기 라이너(RV Liner), 격리판(Baffle Plate), 분리판(Separation Plate), 그리고 유동안내물(Flow Guide)로 구성되어 있다.

KALIMER 원자로내부구조물은 Fig. 2 의 개략도에 나타나 있는 바와 같이 일차 열전달

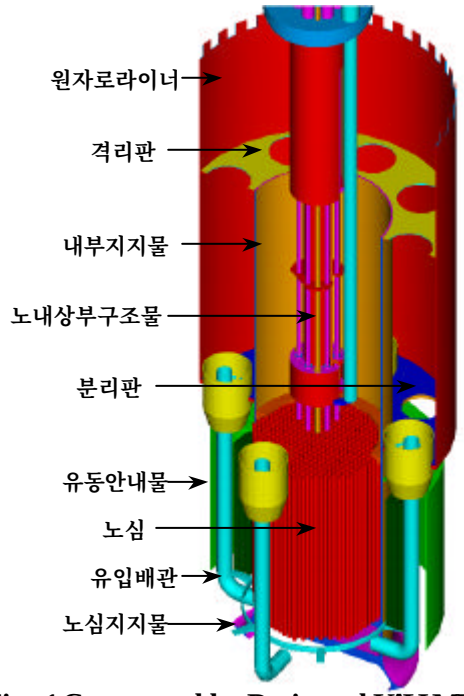

Fig. 1 Conceptually Designed KALIMER RI

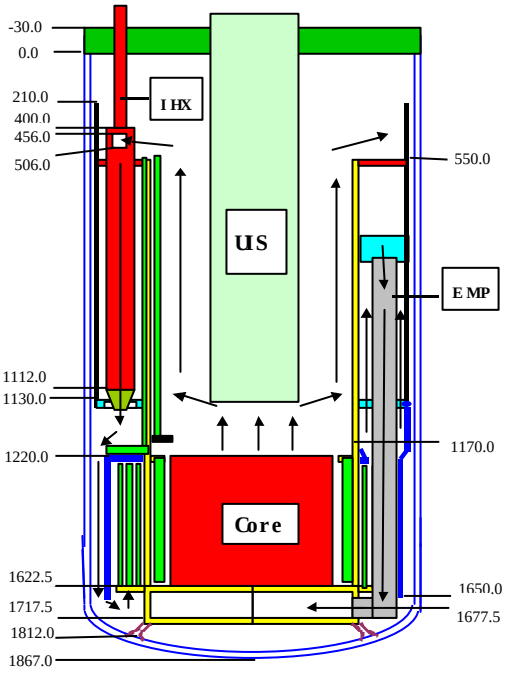

Fig. 2 Primary Sodium FlowPath

계통이 원자로용기 내부에서 존재하며 이는 2 개의 일차 중간열교환기(Primary Intermediate Heat Exchanger)와 2 개의 전자펌프(Electro Magnetic Pump)로 구성되어 있다. 원자로내부구조물은 노심에서 나온 고온냉각재(530°C)를 중간열교환기로 안내하고 중간열교환기를 거쳐 나온 저온냉각재(386°C)를 다시 유동안내물을 통하여 전자펌프로 안내함으로써 효율적인 일차 열전달계통을 형성하게 해준다. 이때 원자로내부구조물은 필수적으로 고온냉각재와 저온냉각재의 경계를 형성하게 된다. 이러한 열적 경계부위는 노심출구에서 나온 고온냉각재와 중간열교환기를 거쳐 나온 저온냉각재의 경계부위가 되는 노심상부 부위의 내부구조물에서 형성되며 이 부위에서의 온도차를 최소화하기 위하여 KALIMER 원자로 내부구조물에서는 내부지지물/격리판/분리판/원자로라이너로 구성된 캔형태의 격리구조가 설계되어 있다. 이러한 구조형상은 구조물내부에 포함된 소듐냉각재의 열성층화를 유도하여 노심출구에서 나온 고온냉각재와 중간열교환기를 나온 저온냉각재의 과도한 온도차가 원자로내부구조물에 발생되는 것을 억제하도록 개념설계되어 있다.

노심출구에서 나온 고온소듐냉각재를 중간열교환기로 안내하는 내부지지물은 유입실의 상부판에 용접되어 격리판, 분리판, 그리고 원자로라이너 등을 지지하는 일체형 실린더 구조물로 설계되며 따라서 이들과의 연결부위에서의 발생되는 열응력 최소화 설계는 매우 중요하다. 특히 내부지지물/격리판/분리판/원자로라이너로 구성된 캔형태의 격리구조 내부에는 중간열교환기와 전자펌프가 관통하며 이들 기기들이 장착되는 격리판과 분리판에서 생기는 8 개의 관통구멍은 구조물의 응력집중을 야기할 수 있다.

실제로 KALIMER 원자로노심을 구성하고 있는 덕트집합체 중에서 노심 열출력을 발생시키는 구동핵연료(Drive fuel) 덕트집합체들의 위치는 노심의 중심부위에 위치한다. 따라서 노심출구로부터 나온 고온소듐냉각재는 유로특성으로 인해 어느정도 상승한 후 내부지지물에 접근한다. 이를 고려하여 내부지지물에 연결되는 분리판의 위치결정은 연결부위에서의 열응력 발생을 최소화할 수 있도록 가능하면 고온소듐냉각재보다 아래부분에 설치되도록 한다. 이러한 분리판은 고온냉각재와 중간열교환기를 거쳐 나온 저온냉각재의 경계를 이루는 구조물로서 내부지지물과 분리판이 연결되는 부위는 구조물에 작용하는 온도차가 크게 발생되는 곳이다. 또한 격리판과 원자로라이너의 연결부위는 고온냉각재와 저온냉각재의 경계를 이루는 구조물이며 열응력 집중이 예상된다.

열응력을 완화시키기 위하여 내부지지물 내측에 설치된 열차폐체는 316 SS 재질로서 두께 1.5cm 의 실린더 형상이며 내부지지물과는 10cm 의 간격을 유지하는 것으로 가정하였다.

3. 열응력해석 및 평가

3.1 해석모델

Fig. 3 은 유동안내물을 포함한 내부지지물/격리판/분리판/원자로라이너의 열응력 집중부위에 대한 열전달해석과 열응력해석을 위한 1/4 유한요소 모델을 나타낸 것으로 온도분포해석에 필요한 열차폐체와 원자로용기의 해석모델이 포함되어 있다. 해석에는 ANSYS 5.5 범용 유한요소해석코드[5]를 사용하였으며 열전달 해석을 위한 유한요소로는 SOILD70 를 사용하였고 열응력해석에는 SOLID45 요소를 사용하였다.

내부지지물/격리판/분리판/원자로라이너 내부에 존재하는 소듐냉각재 및 원자로라이너

와 원자로용기 사이의 냉각재는 유동이 거의 발생되지 않는 정지유체로 가정하고 구조물과 함께 열전도를 통한 열전달 해석모델을 수립하였다.

1/4 유한요소 해석모델에 나타나 있는 격리판과 분리판에는 각각 1 개의 외경 1.2m 중간열교환기와 전자펌프 장착구멍이 있으며 유동안내물 상부판에는 전자펌프노즐과 연결되는 구멍이 존재한다.

3.2 열적 경계조건

열응력이 집중되는 내부지지물/격리판/분리판/원자로라이너에서의 온도분포를 결정하기 위해서는 원자로내부에서부터 잔열제거계통(PSDRS)으로의 열전달 특성을 고려해야 한다. 열적 경계조건이 되는 PSDRS 는 외부공기의 자연순환을 이용한 잔열제거계통이다. 이러한 잔열제거는 원자로내부의 고온 냉각재에서부터 PSDRS 로 유도되며 대류(Convection), 전도(Conduction), 그리고 복사(Radiation)와 같은 매우 복잡한 열전달 기구를 통해 이루어진다.

Fig. 4는 열유동 전용해석코드인 COMMIX 코드를 사용하여 KALIMER 원자로의 정상상태 출력조건에 대한 원자로내부 일차 소듐냉각재의 예비 온도분포해석 결과에 근거하여 원자로내부구조물의 열응력해석을 위한 구조물내부의 온도분포계산에 사용된 열적 경계조건을 나타낸다.

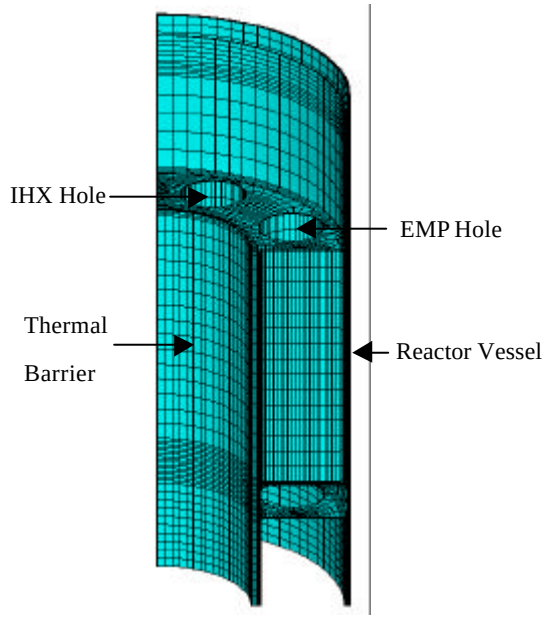

Fig. 3 Finite Element Model

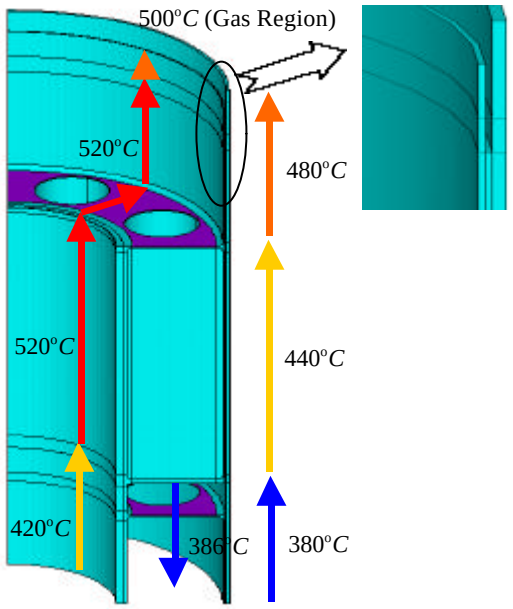

Fig. 4 Thermal Boundary Conditions

그림에서와 같이 정상상태 출력조건에 대한 보수적인 열응력 해석을 위하여 앞의 3.1 절에서 기술한 바에 근거하여 내부지지물에 작용하는 고온소듐냉각재온도는 520°C 로 설정하고 분리판과 접하는 내부지지물의 상단필렛끝단 위치부터 고온냉각재 자유액면위치의 원자로라이너까지 작용하는 것으로 가정하였다. 그리고 분리판과 접하는 내부지지물 상단필렛이하에서는 420°C 의 혼합평균온도(Bulk temperature)를 가정하였다. 중간열교환기를 거쳐 나온 386°C 의 저온소듐냉각재는 분리판의 하부면, 분리판과 유동안내물 상부판 사이의 내부지지물 바깥실린더, 유동안내물 내부 및 외부실린더, 그리고 분리판 위치 이하의 원자로용기 내부실린더 표면에 모두 적용되는 것으로 열적 경계조건을 설정하였다.

Fig. 4 에서와 같이 고온 및 저온 자유액면위의 불활성가스에 접하는 내부구조물에 대한 혼합평균온도는 500°C 로 가정하였다.

원자로용기 외부에 대한 열적 경계조건은 PSDRS 의 조건에 따라서 크게 달라지며 위치에 따라서 매우 복잡한 혼합평균온도가 적용되어야 하지만 해석을 단순화하고 보수적인 온도분포조건을 주기 위하여 본 논문에서는 Fig. 4 에서와 같이 3 개 영역의 혼합평균온도분포를 가정하였다.

열전달 해석시에 내부지지물/격리판/분리판/원자로라이너 내부의 정지유체 속에 장착되는 중간열교환기와 전자펌프의 영향은 무시하였다.

3.3 온도분포 해석결과

Fig. 5는 열차폐체를 사용하지 않은 경우의 원자로 정상상태 출력조건에 대한 원자로 내부구조물 열응력 집중부위의 온도분포 해석결과를 윤곽선으로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 분리판과 내부지지물의 연결부위 및 격리판과 원자로라이너 연결부위에서 구조물 내부의 온도차가 크게 발생함을 알 수 있다.

Fig. 6은 분리판에서의 온도분포 해석결과를 윤곽선으로 나타낸 것으로 중간열교환기 및 전자펌프 장착구멍 주변에 온도구배가 크게 발생한다.

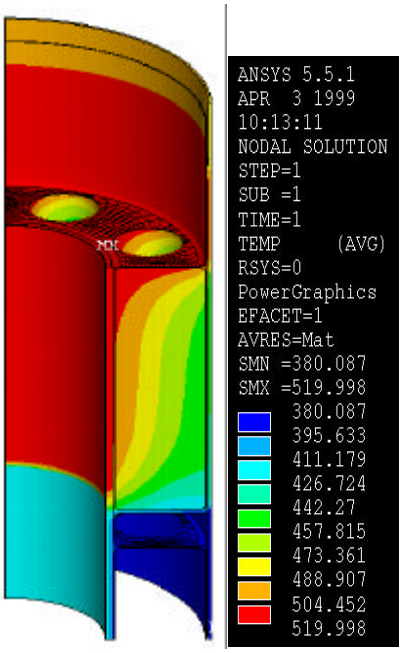

Fig. 5 Calculated Temp. Distributions

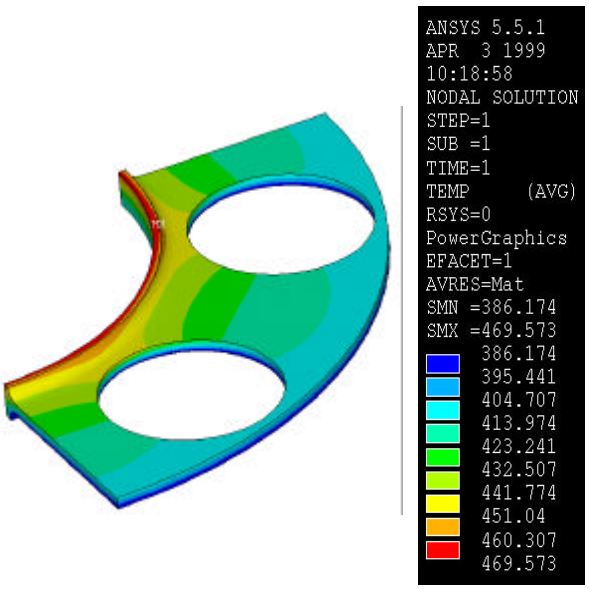

Fig. 6 Calculated Temp. Distribution at SP

3.4 열응력 해석결과

Fig. 7은 온도분포 계산결과로부터 결정된 한계요건 검토부위를 나타낸 것이이며 Fig. 8 ~ Fig. 12 는 이들 각 검토부위에 대한 열응력 분포도를 나타낸 것이다. 내부지지물과 유동안내물의 열결부위(검토부위 1)에 대한 열응력분포 해석결과를 나타내는 Fig. 8에서 내부지지물의 두께에 따른 굽힘응력이 지배적으로 발생함을 알 수 있다. 내부지지물과 분리판의 연결부위(검토부위 2)에서는 Fig. 9 와 같이 내부지지물에 접한 분리판의 기기 장착구멍 주변에서 분리판의 두께에 따른 굽힘응력이 크게 발생한다. Fig. 10 은 내부지지물

과 격리판 연결부위(검토부위 3)에서의 열응력분포를 나타낸 것으로 내부지지물과 격리판이 연결되는 필렛부위에서 격리판의 두께에 따른 굽힘응력이 지배적으로 나타난다. Fig. 11 은 원자로라이너와 분리판연결부위(검토부위 4)에서의 해석결과를 나타낸 것으로 검토부위 2 와 마찬가지로 원자로라이너와 가까운 기기 장착구멍 주변에서 응력이 크게 발생한다. Fig. 12 는 원자로라이너와 격리판 연결부위(검토부위 5)에서의 열응력분포를 나타낸 것으로 검토부위 3 과 같이 원자로라이너와 격리판이 연결되는 필렛부위에서 격리판의 두께에 따른 굽힘응력이 크게 나타남을 알 수 잇다.

Table 1 은 각 검토부위에 대하여 ASME 설계코드에서 제시하는 응력성분 분류에 따라서 최대 응력강도 계산결과와 최대 탄성변형률 계산결과를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 각 검토부위에서는 구조물 두께를 따라서 발생되는 온도구배로 인해 굽힘응력이 지배적으로 발생함을 알 수 있다.

Table 1. Calculated Thermal Stress Intensity and Strain for Steady State Condition

	With Thermal Barrier, (*MPa*)					W/O Thermal Barrier, (*MPa*)				
	No. 1	**No. 2**	**No. 3**	**No. 4**	**No. 5**	**No. 1**	**No. 2**	**No. 3**	**No. 4**	**No. 5**
Membrane	21.3	49.3	51.4	91.4	26.3	48.6	54.2	58.0	118.6	26.6
Bending	55.7	144.5	109.8	127.9	125.5	106.4	165.4	125.2	151.6	135.1
Total	66.4	152.7	113.3	130.6	127.4	105.0	173.2	129.2	151.6	137.1
e_p (%)	0.059	0.147	0.143	0.146	0.167	0.092	0.166	0.162	0.166	0.178

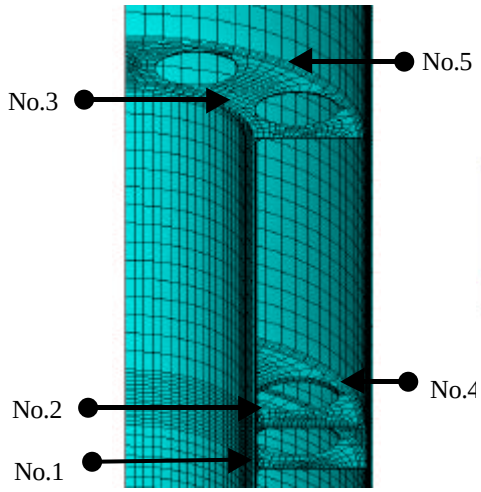

Fig. 7 Check Part of Service Limits

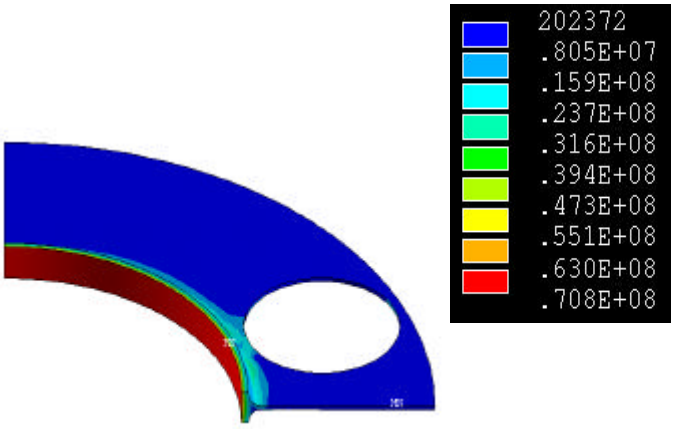

Fig. 8 Stress Intensity Contour Around No.1

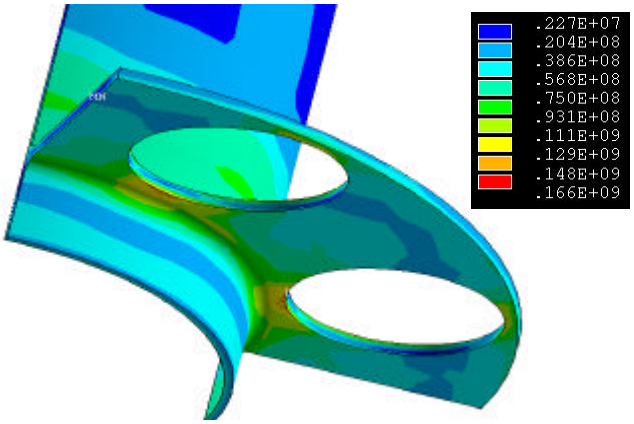

Fig. 9 Stress Intensity Contour around No.2

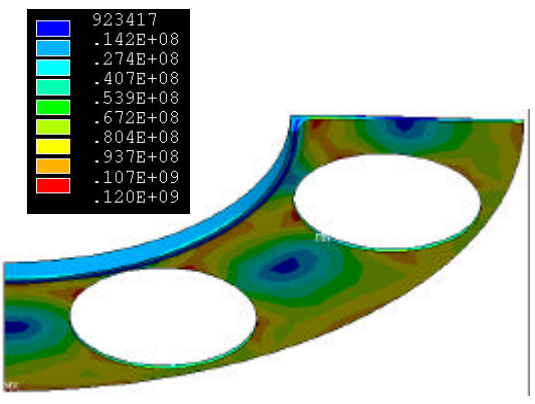

Fig. 10 Stress Intensity Contour Around No.3

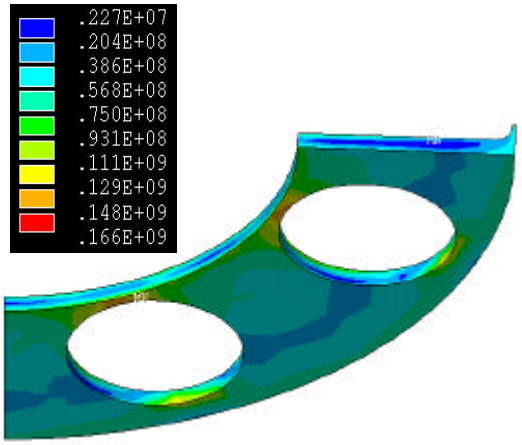

Fig. 11 Stress Intensity Contour Around No.4

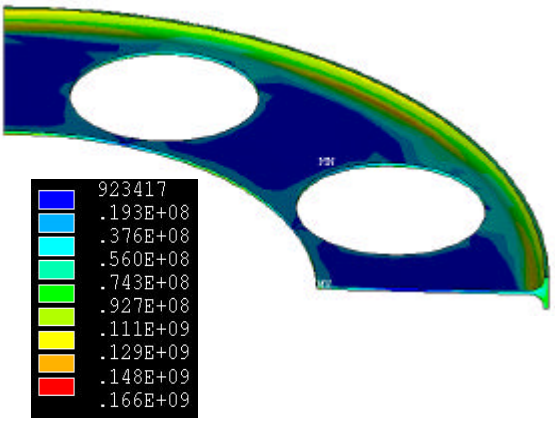

Fig. 12 Stress Intensity Contour Around No.5

4. ASME 고온설계코드에 따른 한계요건 검토

기존의 원자력발전소에 적용해 온 원자로내부구조물에 대한 설계해석은 ASME Code Section III, Division 1 – NG 를 사용하고 있다. 이는 금속온도가 약 427°C (800 °F) 이하인 구조설계에만 적용 가능한 설계코드로써 이를 현재 개발중인 액체금속로 KALIMER 의 설계코드로 적용하기 위해서는 약 800°F 이상의 고온운전이 예상되는 초과고온 금속온도를 고려한 새로운 설계규정이 요구된다.

ASME Code Section II, Part D 에서 제공하는 금속온도를 초과한 초과고온 설계해석에 대한 Section III 의 노심지지물(CSS)을 다루는 규정(Rules)이 현재 ASME 위원회에서 준비 중에 있다. 따라서 Section II, Part D 의 허용응력에 대해 주어진 금속온도를 초과하는 범위를 갖는 노심지지물에 대해서는 Subsection NG 에 대하여 ASME Code Case N-201-4 의 Part A 또는 Part B 로 수정/보완된 규정들을 적용할 수 있도록 하고 있다.

ASME Code Case N-201-4 는 Part A 와 Part B 로 구성되어 있으며 Subsection NG 의 상한선 이상의 금속온도에 적용할 목적으로 Subsection NG 를 수정하거나 필요한 규정들이 보완되어 있다.

Part A 는 크립과 Stress-rupture 효과가 발생 가능한 범위의 온도까지 Subsection NG 를 확장한 것이지만 Appendix XIX 의 Time-at-temperature limits 에 대한 규정이 초과고온 운전을 제한하기 때문에 크립과 Stress-rupture 을 명확히 고려할 것을 요구하지 않는다. 반면에 Part B는 크립과 Stress-rupture 효과를 적절히 고려할 수 있도록 Subsection NG 에 대한 규정들을 수정 보완한 것이다. Part A 의 Appendix XIX 의 Time-at-temperature limits 에 대한 요건들이 만족되더라도 Part A 대신에 Part B 를 사용할 수 있다.

본 논문에서는 크립과 Stress-rupture 효과를 고려한 Part B 의 한계요건을 적용하고자 한다. 해석에 기초한 설계수용(Design Acceptability) 요건들은 Code NG(이하 NG)와 Code Case N-201-4(이하 N-201)가 서로 유사하나 NG 에서는 계산된 응력값이 ASME Section II, Part D, Subpart 1 의 Table 2A, 2B 그리고 4 에 주어진 설계허용응력(S_m) 만을 초과하지 못하도록 규정하고 있는 반면에 N-201 은 응력, 변형률, 그리고 변형에 대한 한계요건을 두고 있다. 따라서 NG 와 N-201 은 운전조건에 대한 응력한계 규정이 근본적으로 다른 개념으

로 구성되어 있다.

탄성해석의 경우에는 최대전단변형설(Tresca 조건)을 사용하여 응력강도를 결정하고 비탄성해석의 경우에는 적절한 다축 응력-변형률 관계와 Flow rule 을 사용하여 응력강도와 변형률 결정하도록 요구하고 있다.

ASME Code Case N-201 의 설계평가를 위한 응력 및 변형률 한계요건은 하중에 따른 구조물의 거동형태와 관련하여 2 가지 제어량, 즉 하중제어량과 변형제어량에 따라서 결정된다. 하중제어량은 운전중에 발생되는 힘과 모멘트하중으로 야기되는 응력강도이며 응력분류상 일차 막응력, 일차 굽힘응력 그리고 많은 탄성추종량을 갖는 이차응력이 이에 해당한다. 변형제어량은 처짐 또는 변형률 적합성으로 발생되는 변형률, 반복변형률 범위 또는 변형이 이에 속한다. 따라서 N-201 의 설계평가는 크게 운전조건에 따른 하중제어응력 한계요건(NG-3220)과 변형량, 변형 그리고 피로 한계요건(Appendix Y)으로 구분하여 적용한다.

탄성해석은 NG-3000 에 따라서 수행하며 비탄성해석은 열하중이나 기계하중들이 항복을 야기할 만큼 심각할 경우 그리고(또는) 열적 크립현상이 발생할 경우에 요구되며 이때는 Appendix Y 의 규정과 한계가 적용된다.

설계수용을 위해서는 하중제어 응력한계에 대한 규정(NG-3220)과 변형율, 변형 그리고 피로한계에 대한 규정(Appendix Y)을 모두 만족해야 한다.

4.1 하중제어 응력한계요건

하중제어 응력한계에 대한 요건으로서 계산된 응력강도(막응력 P_m, 굽힘응력 P_b, 첨두응력 F, 총응력 P_t)가 명시된 허용한계를 초과하지 않음을 보여야 한다. 이러한 허용한계는 응력등급(일차, 이차응력 등)에 따라 달리 규정된 절차(Fig. NG-3220.1)에 의거해서 평가되어야 한다. 어느 정도 전형적인 경우에 대한 응력등급은 Table NG-3217-1 이 명시되어 있으며 고온이 아닌 금속온도를 갖는 구조물의 응력등급은 NG 에 명시되어 있는 Table 에 따라서 결정될 수 있다.

Level A/B 운전하중에 대한 응력한계요건 검토에서 고려된 일차응력은 본 논문에서 계산된 정상상태 온도조건에서 계산된 막응력과 운전기준지진(Operating Basis Earthquake)에 대한 굽힘응력[6]이며 다음과 같은 절차에 따라서 검토를 수행하였다.

Check 1 ;

$$P_m \leq S_{mt} \tag{1}$$

여기서 S_{mt}는 시간(t)와 온도(T)에 대해 결정된다. 여기서 t는 전체 운전수명동안 특정하중이 발생되는 총 지속시간이며 T는 특정하중사건 동안에 발생되는 최대 벽평균온도이다.

KALIMER의 운전수명인 30년과 분리판 주변의 최대 벽면평균온도를 T=455°C와 격리판 주변의 최대 벽면평균온도 T=500°C를 가정하면 S_{mt}는 각각 108MPa과 106MPa이다. Table 2는 한계요건 검토결과를 나타낸 것으로 열차폐체를 설치할 경우에 각 해석부위에서 식 (1)의 한계조건들을 모두 만족하지만 열차폐체를 설치하지 않은 경우에는 분리판과 원자로라이너의 연결부위(해석부위 4)의 일차막응력이 118.6MPa로

나타나 식 (1)의 한계요건을 만족하지 못한다.

Table 2. Service Limit Check for Load-Controlled Quantities

	Check Part	Check 1 ($P_m \le S_{mt}$)		Check 2 ($P_m+P_b \le KS_m$)		Check 3 ($P_m+P_b/K_t \le S_t$)	
		P_m	S_{mt}	P_m+P_b	KS_m	P_m+P_b/K_t	S_t
With Thermal Barrier	No. 1	21.3	108	30.1	159	28.4	140
	No. 2	49.3	108	80.2	159	74.0	140
	No. 3	51.4	106	63.5	159	61.1	124
	No. 4	91.4	108	122.1	159	116.1	140
	No. 5	26.3	106	38.4	159	36.0	124
W/O Thermal Barrier	No. 1	48.6	108	57.4	159	55.7	140
	No. 2	54.2	108	85.1	159	78.9	140
	No. 3	58.0	106	70.1	159	67.7	124
	No. 4	118.6	108	149.5	159	143.3	140
	No. 5	26.6	106	38.7	159	36.3	124

* P_m : Primary membrane stress due to thermal load of steady state condition

* P_b : Primary bending stress due to OBE load

Check 2 :

$$P_m + P_b \le K S_m \tag{2}$$

여기서 S_m은 주어진 온도에 대한 시간독립 허용응력강도이며 K는 단면계수로서 다음과 같이 결정된다.

$$K = \frac{F_{(fully\ plastic)}}{F_{(initial\ plastic)}} = \frac{\text{완전소성단면을 야기하는 하중집합}}{\text{초기소성단면을 야기하는 하중집합}} \tag{3}$$

위의 식 (3)에서 사각단면을 갖는 쉘 구조물의 굽힘을 평가할 경우 K=1.5 가 사용된다.

Table 3 의 검토결과에서와 같이 열차폐체를 사용하지 않을 경우 해석부위 No.4 에서 한계요건에 대한 여유도가 거의 없으나 열차폐를 사용할 경우에 약 20%정도의 응력감소 효과를 나타낸다.

Check 3 :

$$P_m + P_b / K_t \le S_t \tag{4}$$

여기서 S_t는 온도와 시간종속 응력강도한계를 나타내며 이때 온도(T)는 구조물 총 운전수명 동안의 최대 벽평균온도, 시간(t)는 응력강도의 총 지속시간이다.

위의 식 (4)에서 K_t는 크립효과로 인한 굽힘응력의 감소를 고려하기 위한 계수이며 다음과 같이 결정된다.

$$K_t = (K+1)/2 \tag{5}$$

앞의 Check 2 에서 사용한 K=1.5 를 고려하면 K_t=1.25 로 결정된다.

Check 1 에서와 마찬가지로 KALIMER 원자로 운전수명과 해석구조물의 최대 벽면평균온도 T=455°C 와 T=500°C 에 대한 응력강도한계 S_t는 ASME Code Case N-201-4 의 Table 5.3B 으로부터 각각 S_t=140MPa, S_t=124MPa 로 결정된다.

Table 3 에 나타나 있는 검토결과에서와 같이 열차폐체가 있는 경우 식 (4)에 대한 한계요건을 만족하지만 열차폐체가 없는 경우에는 분리판과 원자로라이너 연결부위(No.4)에서 응력이 크게 발생하여 Check 3 의 한계요건을 만족하지 못한다.

4.2 변형율 한계요건

앞에서 기술한 바와 같이 고온구조물(427°C)에 대한 설계수용을 위해서는 4.1 절에서 검토한 하중제어 응력한계와 함께 변형율, 변형 그리고 피로한계에 대한 규정을 모두 만족해야 한다. 변형률, 변형 그리고 피로한계에 대한 검토는 1) 기능적요건에 대한 변형한계요건, 2)구조적 건전성에 대한 변형 및 변형률 한계요건, 3) 크립-피로평가, 4) 좌굴 및 불안정성에 대한 한계요건, 5) 특수요건, 6) Isochronous 응력-변형률 관계 등을 포함한다.

본 논문에서는 원자로 정상상태 온도조건에 대한 열응력해석결과로 부터 구조물의 기능적 요건과 구조적건전성 요건을 우선 검토하였다.

Check 1 : 기능적요건에 대한 변형 한계요건

본 요건에 대한 검토는 탄성해석을 수행하여 다음과 같이 벽두께를 가로지른 최대 평균변형률이 1%이하임을 보여야 한다

$$e \le 1.0\% \tag{6}$$

Table 1 의 변형률에 대한 해석결과에서와 같이 해석구조물의 최대 평균변형률은 모두 1.0%이하로 나타났으며 열차폐체가 없는 경우에도 충분히 기능적요건을 만족한다.

만일 식 (6)의 요건이 만족되지 않을 경우에는 변형에 대한 비탄성해석을 수행하여 설계사양서에 명시된 비탄성 변형률에 대한 한계요건들을 검토해야 한다.

Check 2 : 구조적 건전성에 대한 변형 및 변형률 한계요건

본 요건은 구조물에 발생되는 비탄성 변형률에 대한 한계요건으로 심각한 천이하중조건이 발생되지 않는 정상상태 운전하에서 기기의 운전수명동안 계산된 누적변형률 한계요건으로서 변형률의 계산은 응력강도 계산방법과 마찬가지로 다음과 같이 벽두께를 따른 평균, 굽힘변형률로 구분한다.

$$Membrane\ e_m \le 1.0\%,\ \ Bending\ e_b \le 2.0\%,\ \ Local\ e_L \le 5.0\% \tag{7,8,9}$$

위의 한계요건을 검토하는 또 다른 방법으로 하중제어 응력한계요건에 사용된 탄성해석결과를 이용하는 방법이 제시되어 있다. 이러한 방법은 탄성해석결과로부터 주어진 세가지 한계요건(Test No. A-1, A-2, A-3) 가운데 한가지만을 만족하면 구조적건전성에 대한 변형 및 변형률 한계요건이 성립하는 것으로 인정하고 있다.

Test No. A-1

$$X + Y \le S_a / S_y \tag{10}$$

위의 식에서

$$X \equiv \left(P_m + P_b / K_t\right)_{\max} \div S_y,\ \ Y \equiv (Q_R)_{\max} \div S_y \tag{11,12}$$

이다. 식 (10)에서 S_y는 주기하중 동안에 발생되는 최대 및 최소 벽면평균온도에서 결정된 2 개의 S_y에 대한 평균값을 사용하며 분리판의 경우에 S_y=120MPa(455°C), 격리판의 경우 S_y=118MPa(500°C)이다. 그리고 S_a는 10^4 시간과 최대 벽면평균온도를 사용하여 결정한

$1.25S_t$와 앞서 설명한 S_y 중에서 작은 값을 사용한다. 분리판의 경우에 S_a = Min[$1.25S_t$, S_y] = Min[1.25x142MPa, 120MPa] = 120MPa 이며 격리판의 경우에는 S_a = Min[$1.25S_t$, S_y] = Min[1.25x135MPa, 118MPa] = 118MPa 이다. 따라서 식 (10)의 한계요건 검토에서는 S_a/S_y=1.0 이 사용된다.

식 (12)에 나타나 있는 $(Q_R)_{max}$는 주기하중 동안에 발생되는 최대 이차응력강도범위 (Maximum range of secondary stress intensity)를 나타낸다. 본 논문에서는 정상상태 온도조건에 대하여 계산된 굽힘응력(Table 1)을 이차응력이 없는 상태에서 원자로가 Startup 하여 Hotstandby 상태에 도달후의 이차응력상태라로 가정하고 이를 최대 이차응력강도범위로 결정하였다.

Table 3 은 식 (10)에 대한 한계요건 검토결과를 나타낸 것으로 분리판과 격리판에서 모두 한계요건을 만족하지 못한다. 열차폐가 있는 경우에 분리판(검토부위 No.4)에서 $X+Y$ 값이 열차폐체가 없는 경우에 비하여 약 14% 감소하며 격리판(검토부위 No.3)는 약 12% 감소하는 효과가 있다.

Table 3. Service Limit Check for Deformation-Controlled Quantities

	Check Part	Check 1 ($X+Y \le S_a / S_y$)	
		$X+Y$	S_a/S_y
With Thermal Barrier	No. 1	0.23 + 0.29 = 0.52	1
	No. 2	0.62 + 0.79 = 1.41	1
	No. 3	0.51 + 0.50 = 1.01	1
	No. 4	0.97 + 0.30 = 1.27	1
	No. 5	0.30 + 0.84 = 1.14	1
WO Thermal Barrier	No. 1	0.47 + 0.48 = 0.95	1
	No. 2	0.65 + 0.93 = 1.58	1
	No. 3	0.57 + 0.57 = 1.14	1
	No. 4	1.19 + 0.28 = 1.47	1
	No. 5	0.31 + 0.92 = 1.23	1

Test No. A-2

$$X+Y \le 1 \tag{13}$$

최대 이차응력강도범위$(Q_R)_{max}$를 정의하는 응력최대값들 가운데 하나에서의 평균벽면 온도가 ASME Code Case N-201-4 의 Table Y-1323 에 주어진 적용온도 이하인 운전조건 경우에 대하여 식 (13)의 요건을 제시하고 있다. 표에서 주어진 재료 Type 316 SS 의 경우 적용온도가 544°C(1011°F)로 나타나 있으며 이는 본 논문에서 격리판에서의 평균벽면온도로 산정된 500°C 를 만족한다. 그러나 식 (13)의 한계요건은 앞의 Test No. A-1 에서 결정된 S_a/S_y=1.0 과 같은 조건으로서 검토결과는 Table 3 과 동일하다.

Test No. A-3

본 한계요건을 위해서는 먼저 NG-3222 에서 규정한 응력한계 요건들을 만족해야 하며 이에 추가하며 다음의 요건들을 만족해야 한다.

$$\sum_i t_i / t_{id} \le 0.1 \tag{14}$$

위의 식에서 t_i는 운전수명동안 구조물의 금속온도 T_i가 발생되는 총시간으로서 정상상태

출력조건이 원자로수명 30 년 동안 발생된다고 가정하면 t_i=2.628x10^{5}hr 이 된다. 그리고 t_{id} 는 금속온도 T_i와 $1.5S_y|_{Ti}$ 에 대해 ASME Code Case N-201-4 의 Fig.5.5 로 부터 결정되는 최대 허용시간을 나타낸다. 본 논문의 정상상태 출력조건에 대하여 설정된 원자로내부구조물의 평균금속온도 T=500°C 를 고려하면 $1.5S_y|_{Ti}$ =180MPa(26.1ksi)이다. 이로부터 N-201-4 Fig.5.5 의 Stress-to-rupture 자료에 대한 선형외삽법을 도입하여 최대 허용시간을 결정하면 t_{id}=4.61x10^{5}hr 로 나타나며 식 (14)를 적용하면 $\sum_i t_i / t_{id} = 0.57 > 0.1$이며 한계요건을 만족하지 못한다.

4. 결 론

본 논문에서는 예비 설계된 KALIMER 원자로내부구조물의 열응력 집중부위에 대하여 정상상태 출력시의 열응력해석을 수행하고 고온구조물 설계코드로 제시된 ASME Code Case N-201-4 에 따라서 한계요건을 검토하였다. 열응력해석결과로부터 응력집중은 내부지지물과 분리판 및 격리판의 연결부위, 원자로라이너와 분리판 및 격리판의 연결부위에서 발생하였으며 주로 두께방향 온도구배로 야기된 굽힘응력이 지배적으로 나타났다. ASME 고온구조물 설계코드에서 규정하는 탄성해석법에 의한 Level A/B Service Loadings 의 한계요건 검토결과 내부지지물 내측에 열차폐체를 설치할 경우에 하중제어조건은 만족하지만 주어진 해석조건에 대해 변형률 한계요건을 만족하지 못하였다. 앞으로 설정된 해석조건들의 보완과 비탄성 해석을 통한 한계요건 재검토, 그리고 하중조합을 고려한 열천이 운전하중들에 대한 크립-피로평가 및 좌굴 특성평가 등이 계속 수행되어야 한다

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. C. K. Park, et.al, "KALIMER Design Concept Report," KAERI/TR-888/97, *Korea Atomic Energy Research Institute*, 1997.
2. G. H. Koo, el.al, " Study on Application of 3-D Seismic Isolation Design to KALIMER Reactor Structure," KAWERI/TR-1065/98, *Korea Atomic Energy Research Institute*, 1998.
3. G. H. Koo, J. H. Lee, and B. Yoo, "Seismic Response Analyses of Seismically Isolated Structures Using the Laminated Rubber Bearings," *Journal of the Korean Nuclear Society*, Vol.30, No.5, pp.387-395, 1998.
4. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1 – Subsection NG, Core Support Structures, 1992 Edition, *ASME*, 1992.
5. ANSYS User's manual for Version 5.5, Volume I,II,III, *Swanson Analysis Systems, Inc*.
6. 구경회,이형연,유봉," 면진된 KALIMER 원자로구조물의 내진설계 및 지진해석," 한국지진공학회 논문집, 인쇄중, 1999.