2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER UIS 하단부의 열과도하중 영향 분석

Thermal Transient Loading Effects on KALIMER UIS Bottom Plate

김종범, 이형연, 유봉
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로 내부의 냉각재 펌프 유량상실 사고나 IHX 열제거 능력상실과 같은 열과도하중이 발생하면 노심을 통과하는 냉각재의 급격한 온도변화가 발생하고 이는 노심출구 바로 위에 위치한 UIS 하단부에 영향을 주게 된다. 본 연구에서는 열과도하중의 영향으로부터 UIS 하부판을 보호하기 위해 개념설계 단계에서 설정한 열충격방지 라이너의 설계타당성을 분석하기 위해 예상되는 열과도하중을 분석하고 또한 열충격방지 라이너 설치의 타당성과 적정 두께에 대해 살펴보았다. 사례분석 결과 인코넬 718 라이너와 열충격방지 라이너가 열과도하중으로부터 UIS 하부판을 보호하는 기능을 확인하였으며 개념설계에서 설정한 열충격방지 라이너의 1.2cm 두께가 적절한 것으로 분석되었다.

Abstract

The KALIMER Upper Internal Structure(UIS) bottom region is subjected to a thermal transient load due to the loss of flow, loss of heat sink, and reactor scram, etc. In this paper, a parametric study of thermal transient analysis of UIS bottom region based upon conservatively assumed thermal transient loading to investigate the design adequacy of UIS bottom region. It was investigated that the Inconel 718 liner plate and the thermal shock liner protect the UIS bottom plate from severe thermal transient load. The analysis results of this study indicated that the 1.2cm thickness of conceptually designed thermal shock liner under the UIS bottom plate is adequate.

1. 서론

풀형 액체금속로인 KALIMER[1]의 UIS(Upper Inter Structure)는 원자로헤드에 매달려 있는 구조로 개념설계되어 있는데 그림 1에 보인 것과 같이 전체 길이가 약 865cm이고 외경이 240cm이며 하부판은 노심 출구로부터 약 90cm 위에 위치하고 있다. UIS 하단부를 좀 더 자세히 개략적으로 나타낸 것이 그림 2에 보이고 있는데 UIS의 실린더부 두께와 하부판의 두께는 2.5cm이며 제어봉안내관 쉬라우드(Shroud) 튜브는 하부판 아래로 연장

설치되어 노심 상단으로부터 약 5.0cm 떨어져 있다. UIS 하부판은 316 계열 스테인레스강으로 만들고 그 아래에는 하부판과 같은 재질로 만든 1.2cm 두께의 열충격방지 라이너를 개념 설치하였고 가장 하단부에는 노심으로부터 전달되는 열스트라이핑 하중으로부터 보호하기 위해 0.6cm 두께의 인코넬 718 강을 부착하였다[2].

본 연구에서는 노심으로부터 전달되는 열과도하중의 영향으로부터 UIS 하부판을 보호하기 위해 개념설계 단계에서 설정한 열충격방지 라이너의 설계타당성을 분석하기 위해 예상되는 열과도하중을 분석하고 또한 열충격방지 라이너 설치의 타당성과 적정 두께에 대해 살펴보았다.

2. UIS 하단부에 영향을 주는 열과도하중 분석

우선 KALIMER UIS 하단부에 작용되는 열과도하중은 아직까지 생산되지 않은 상태이기 때문에 Bounding Event 로 분류된 몇가지 과도조건을 살펴보았다. UTOP(Unprotected Transient Overpower) 과도조건은 정격출력운전중 제어봉 인출사고가 발생하고 보호계통에 의한 원자로정지가 발생하지 않는 사고조건이다. 그림 3 에 나타난 것과 같이 18 초후 최고출력 116%에 도달한 후 칼리머 고유안전성인 반응도 궤환효과에 의해 106% 출력에서 안정되고 핵연료 냉각재의 온도는 1.67C/sec 속도로 증가해서 580°C 에서 안정된다[3]. ULOF (Unprotected Loss of Flow) 과도조건은 100% 정격출력시 원자로 내의 4 대의 펌프가 동시에 coast down 하고 원자로보호계통에 의한 원자로정지가 발생하지 않는 사고이다. 하지만 칼리머의 설계특징인 GEM 의 효과로 제어봉 삽입과 같은 효과가 발생하여 유량이 급격히 감소함과 동시에 출력도 감소한다[3]. 노심출구 소듐의 온도는 증가하여 그림 4 에 보인 것과 같이 약 3.5 초에서 590°C 의 절정에 도달했다가 유량보다 출력이 작아지기 시작하여 17 초후 500°C 정도까지 낮아진다. ULOF 과 IHX 의 열제거능력상실 사고가 동시에 발생할 경우에는 유량이 갑자기 없어지지 않고 급격히 감소하여 약 3 분후 10% 정도로 줄어든다. 유량상실사고의 경우 펌프 coastdown 은 발전소 안전성에 중요한 역할을 한다. 유량 상실후 GEM 이 빨리 반응하기 시작하고 또한 반응도 궤환 효과로 출력이 급격히 감소하게 된다. 그림 5 와 같이 노심출구 소듐의 온도는 4 초후 630°C 에 도달하였다가 감소하기 시작하여 16 초후에는 500°C 로 낮아진다[4]. 그리고 다시 증가하기 시작하여 120 초에는 647°C 에 이르렀다가 이후 서서히 낮아지기 시작한다. ULOSH(Unprotected Loss of Heat Sink) 과도조건은 IHX 가 기능을 상실하는 사고이다. 이때 펌프는 정상 작동하여 96% 이상의 유량을 유지하고 IHX 가 열제거 기능을 수행하지 못하기 때문에 IHX 출구 온도가 급격히 증가하여 저온풀의 온도를 급격히 높아져 고온풀의 온도와 비슷하게 된다[3]. 그림 6 과 같이 고온풀의 온도는 736 초 동안 664°C 까지 증가하는데 이 경우 유일한 잔열제거 계통인 PSDRS 의 작동 여부는 초기 과도 상태에서는 영향을 주지 않다가 그 후 영향을 주어 PSDRS 가 작동하지 않을 시에는 고온풀의 온도증가 기울기가 PSDRS 작동시보다 2 배 증가함을 알 수 있다.

미국에서 개발중인 PRISM 의 경우에는 UIS 하단부에 작용되는 심각한 열과도하중으로 펌프 유량상실(primary pump coastdown)과 IHX 기능상실(loss of heat sink) 사고로 원자로정

지되는 경우를 레벨 C 로 분류하여 고려하였는데 이 경우 유일한 잔열제거는 PSDRS 계통이다. 그림 7 에 나타난 것과 같이 driver fuel 의 출구 소듐온도는 5 초후 480°C 에서 510°C 로 증가하였다가 30 초후 약 360°C 로 6°C/sec 의 속도로 낮아진다. 이러한 급격한 노심출구 온도변화는 UIS 하단부와 같은 노심출구 부근에 있는 구조물에만 큰 영향을 미치고 노심출구에서 멀리 떨어진 구조물들은 고온풀의 큰 열용량 대문에 훨씬 완화된 영향을 받는다.

앞에서 원자로보호 계통이 작동하지 않는 몇가지 과도조건을 살펴보았는데 그중에서 그림 5 에 나타났듯이 ULOF 과 LOHS 가 발생할 경우 소듐온도가 약 130°C 만큼 급격히 냉각되는 하중이 KALIMER UIS 하단부에 작용하는 큰 열과도하중일 것으로 예상된다. 운전레벨 B 에서는 이러한 과도조건으로 제어봉이 삽입되어 원자로가 정지되는 과도조건을 고려할 수 있는데 아는 아직까지 구체적 자료가 생산되지 않았지만 앞에서 고려한 과도조건에서 GEM 의 특성으로 원자로정지 효과가 있는 것을 고려하면 과도조건은 비슷한 양상을 가질 것으로 예상된다.

본 연구에서는 KALIMER UIS 하단부가 받을 열과도하중이 구체적으로 생산되기 전 단계에서 보수적인 하중조건을 설정하여 사례분석을 수행하였다. KALIMER 의 운전온도가 노심입구 소듐은 386°C 이고 노심출구 소듐은 530°C 이므로 노심출구 소듐의 온도가 과도발생으로 약간 증가하였다가 거의 저온 소듐 온도까지 낮아지는 것을 고려하였는데 냉각속도와 열전달 계수는 여러가지 경우를 고려해 사례분석을 수행하였다.

3. UIS 하단부 열과도 사례해석

열과도하중은 그림 8 에 보인 것과 같이 560°C 에서 390°C 로 낮아지는데 냉각속도는 2.5°C/sec, 5°C/sec, 8.5°C/sec, 10°C/sec 의 4 경우를 고려하였다. 그리고 소듐과 구조물 표면에서의 열전달계수는 28400, 113600, 284000, 454400J/sec-m^2-°C 의 4 가지 값으로 설정하여 열전달계수의 영향을 살펴보았다. 상용유한요소 해석코드인 ANSYS[5]의 4 절점 열전달요소인 PLANE55 를 사용한 일차원 열전달해석을 수행하였고 UIS 하단부를 이루고 있는 0.6cm 두께의 인코넬 718 라이너와 316SS 로 만들어지는 두께 1.2cm 의 열충격방지 라이너 및 하부판 두께 2.5cm 를 고려하였고 UIS 슬롯을 통과한 열과도하중이 슬롯을 통한 유량이 작기 때문에 UIS 하부판의 윗면에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단되므로 여기서는 무시하였다. 열전달해석에서 시간적분을 위한 시간증분 요건은 다음과 같다.

$$\Delta t \le h^2 / (2k / r c), \qquad (1)$$

여기서 h 는 요소의 길이, k 는 열전도 계수, r 는 밀도, c 는 비열을 나타낸다.

UIS 하단부에 대한 열전달 해석결과는 시간에 대한 온도의 변화로 나타나는데 구조물 두께 방향으로의 온도분포를 살펴보았다. 그림 9 ~ 그림 12 는 소듐 냉각속도가 5°C/sec 인 경우 열전달계수를 28400, 113600, 284000, 454400J/sec-m^2-°C 를 사용했을 경우의 온도분포 결과를 각각 나타내고 있다. 본 연구에서 사용한 열전달계수가 비교적 높기 때문에 낮은 열전달계수의 경우에도 1% 이내의 차이를 보여 열전달계수의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 그림 13 ~ 그림 15 는 열전달계수가 284000J/sec-m^2-°C 인 경우 소듐 냉각 속도

가 2.5°C/sec, 8.5°C/sec, 10°C/sec 인 경우의 결과를 각각 나타내고 있다. 그림 13, 그림 14, 그림 11, 그림 15 에서 보듯이 소듐의 냉각속도가 빠를수록 열과도하중은 두께방향으로 깊이 전달되지 않는 것을 알 수 있다. 인코넬 718 라이너와 열충격방지 라이너 및 UIS 하부판의 두께 방향으로의 최대 온도차는 2.5°C/sec 인 경우 각각 56°C, 66°C, 50°C 이고 5°C/sec 인 경우 76°C, 72°C, 30°C 이고 8.5°C/sec 인 경우 90°C, 73°C, 18°C 이고 10°C/sec 인 경우 98°C, 70°C, 12°C 이다. 0.6cm 두께의 인코넬 718 라이너에 걸리는 두께방향 온도구배가 냉각속도가 4 배까지 빨라지면 75% 정도 증가하고 대신에 UIS 하부판의 두께방향 온도구배의 크기는 76% 정도 감소하였다. 중간 구조물인 열충격방지 라이너는 냉각속도에 따라 66°C~73°C 의 온도구배를 가져 완충역할을 수행하는 것을 알 수 있다. 만일 열충격방지 라이너가 없다면 UIS 하부판에서 감당해야 하는 두께방향 온도구배가 크게 증가할 것을 예측할 수 있다.

4. 구조건전성 평가 및 열충격방지 라이너 두께분석

UIS 하단부의 열응력은 구조물 내부로 열과도하중이 전달되어 발생하는 두께방향 온도구배에 의존하는데 평판의 두께방향으로 ΔT 의 온도구배가 발생했을 때 열응력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_{thermal} = \pm E \alpha \Delta T / 2(1-v) \qquad (2)$$

열과도하중에 대한 UIS 하단부의 구조건전성 평가에는 ASME B&PV Code, SecIII 의 Subsection NB 와 Subsection NH[6]가 사용되는데 316SS 의 경우 사용온도가 427°C 를 넘으면 Subsection NH 를 적용하도록 되어 있다. Subsection NH 에서는 기존의 응력요건 외에 변형률요건을 요구하고 있는데 이는 고온구조물에서는 비탄성변형이 발생하게 되어 응력보다는 변형률요건을 강조하게 되는 것이다. 구조물의 수명동안 비탄성 막변형률은 1%, 굽힘변형률은 2%, 첨두변형률은 5%를 제한값으로 제시하고 있다. 사용온도가 427°C 이하인 경우에는 Subsection NB 를 적용하게 되는데 일차응력과 이차응력의 합은 일반적으로 3Sm 보다 작을 것을 요구하고 있다. 고온인 경우 Subsection NH 에서는 응력요건으로 3Sm 을 요구하지 않는 대신에 고온에서 응력완화를 고려해서 변형된 $3\bar{S}m$ 를 만족시키면 변형률요건을 만족시킬 수 있는 것으로 나타나 있다. 물론 이밖에도 다른 요건들이 있지만 본연구에서는 $3\bar{S}m$ 을 기준으로 UIS 하단부의 구조건전성을 살펴 개념설계 단계의 설계타당성을 분석하였다. 참고로 530°C 에서 316SS 강에 대한 3Sm 은 333MPa 인데 비하여 $3\bar{S}m$ 은 238MPa 이다. 인코넬 718 강의 설계응력강도는 자료가 없지만 항복응력이 530°C 일때 890MPa 인 점을 고려하면 설계허용응력도 316SS 강보다 2 배 이상일 것으로 예측된다.

UIS 하단부를 이루는 구조물 중에서 열스트라이핑을 방지하기 위해 도입된 인코넬 718 라이너는 본래의 기능 외에도 열과도하중이 작용할 경우 두께방향 온도구배를 전체 과도온도의 33% ~ 58%까지 담당하여 최대응력이 186MPa 발생하나 이는 항복응력 890MPa 을 고려하면 충분히 구조건전성을 가질 수 있는 범위이다. 열충격방지 라이너는 과도온도의 38% ~ 43% 정도의 온도구배를 가지며 최대응력이 170MPa 로 계산되었는데 이는 $3\bar{S}m$ 보

다 작은 값이고 또한 라이너는 하중을 지지하는 구조물이 아니기 때문에 구조건전성 문제가 없을 것으로 평가되었다. UIS 하부판은 1.2cm 두께의 열충격방지 라이너를 설치한 경우 냉각속도가 2.5°C/sec 로 작을 경우 최대응력이 116MPa 인데 이는 허용값인 $3\bar{S}m$ 의 절반 정도의 값으로 충분한 구조건전성을 확보하고 있음을 알 수 있다.

개념설계 단계에서 설정한 1.2cm 두께의 열충격방지 라이너를 사용하지 않을 경우 본 연구에서 고려한 열과도하중에 대해서 UIS 하부판은 구조건전성을 확보하지 못할 가능성이 있는 것으로 평가되었다. 본 연구에서 사례해석을 위한 과도조건을 보수적으로 설정하기는 하였지만 아직 구체적인 KALIMER 열과도하중이 생산되지 않은 것을 고려한 불확실성을 감안하면 개념설정된 열충격방지 라이너의 두께는 적절할 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구에서는 노심으로부터 전달되는 열과도하중의 영향으로부터 UIS 하부판을 보호하기 위해 개념설계 단계에서 설정한 열충격방지 라이너의 설계타당성을 분석하기 위해 예상되는 열과도하중을 분석하고 또한 열충격방지 라이너 설치의 타당성과 적정 두께에 대해 살펴보았다.

UIS 하단부의 0.6cm 두께의 인코넬 718 라이너는 열과도하중이 작용할 경우 두께방향 온도구배를 전체 과도온도의 33% ~ 58%까지 담당하고 1.2cm 두께의 열충격방지 라이너는 과도온도의 38% ~ 43%의 온도구배를 담당하며 2.5cm 두께의 UIS 하부판은 과도하중의 7% ~ 30% 정도의 온도구배만 갖는 것으로 나타났다. UIS 하부판에 작용하는 최대응력은 116MPa 로 허용응력을 충분히 만족시킴을 확인하였으며 열충격방지 라이너를 개념설계에서 설정한대로 1.2cm 두께로 적용하는 것이 타당하다고 분석되었다.

앞으로 열과도하중이 생산되면 UIS 하단부의 경계조건을 적용한 3 차원 해석을 수행하여 구체적인 설계 타당성을 분석할 예정이다.

감사의 글

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

참고문헌

1. C.K. Park, et.al, KALIMER Design Coecept Report, KAERI/TR-888/97, 1997
2. 김종범,이형연,이재한,구경회,유봉, “KALIMER UIS 하단부의 고주파수 피로손상 분석”,’ 99 춘계학술발표회, 한국원자력학회, 1999
3. 한도희 외, “KALIMER 핵심개념 예비 안전해석 보고서”, KAERI/TR-1616/2000, 2000
4. Y.M.Kwon, Analysis of Umprotected Loss of Flow for Breeder Core KALIMER, LMR/SA131 – AR-07 Rev.0/99, 2000

5. ANSYS Users Manual, Ver. 5.5, ANSYS Inc., PA, 1998
6. ASME B&PV Code, Section III, Subsection NH, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, 1995 Edition, ASME, NY, 1995

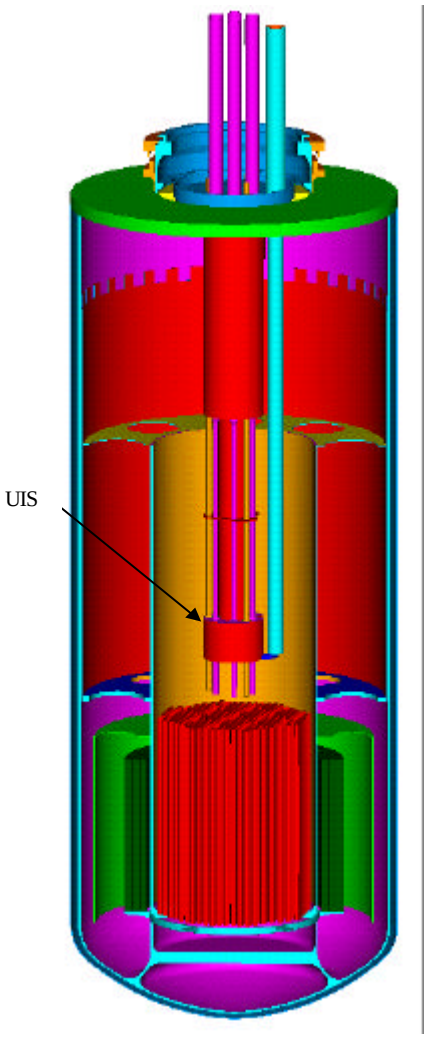

그림 1. KALIMER 원자로 개략도

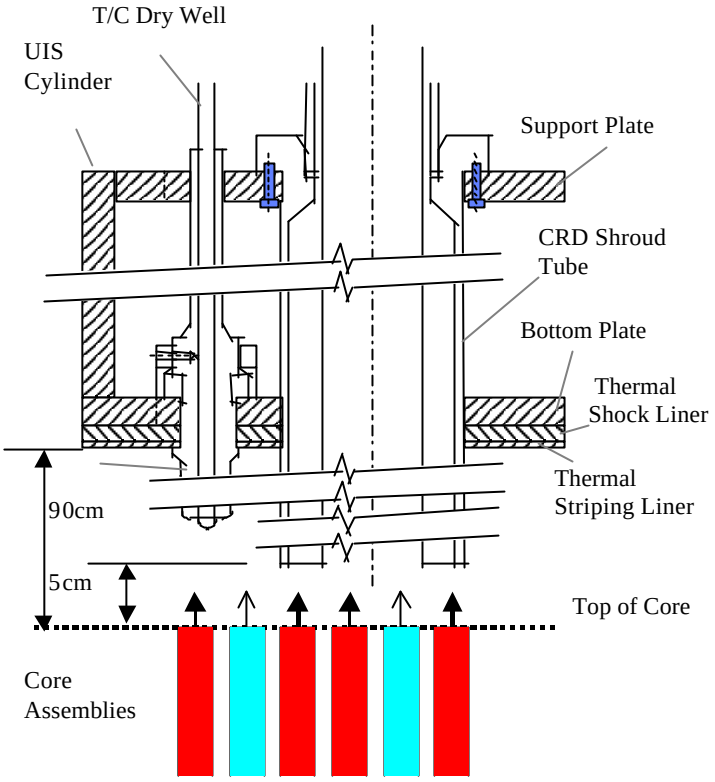

그림 2. UIS 하단부 개념설계 개략도

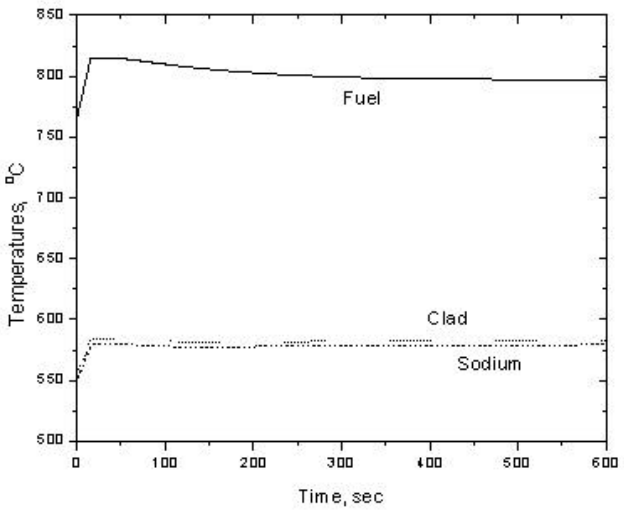

그림 3. Peak Temperature of Fuel and Coolant (UTOP)

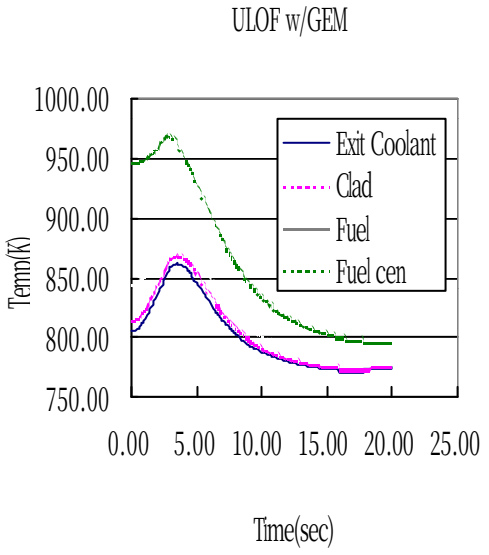

그림 4. Temperature of Fuel and Coolant (ULOF with GEM)

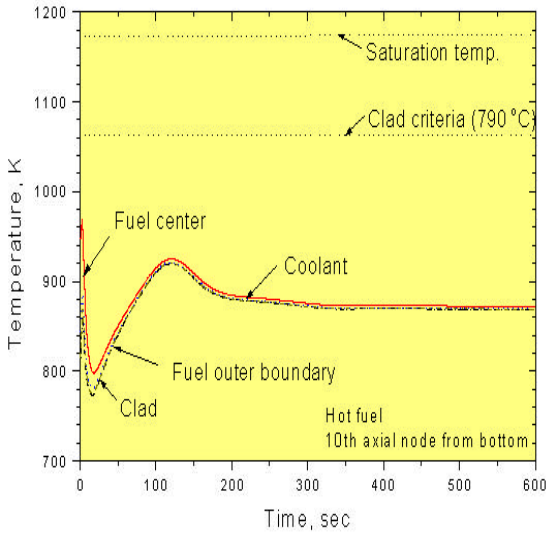

그림 5. Temperature of Fuel and Coolant (ULOF/LOHS)

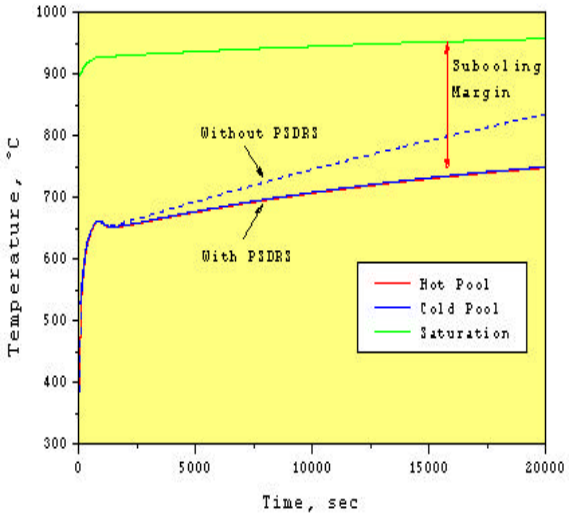

그림 6. Temperature of Coolant (ULOHS w/ or w/o PSDRS)

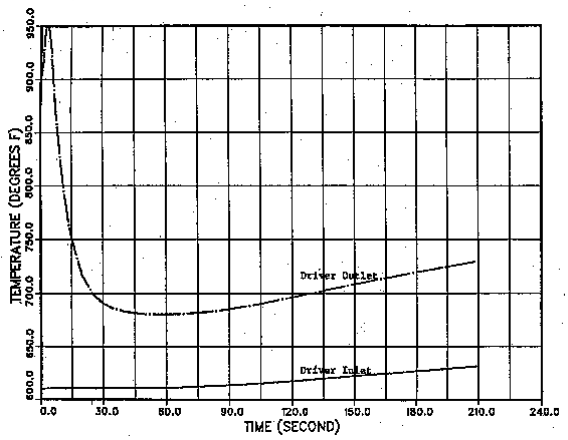

그림 7. Temperature of Driver Inlet and Outlet (Reactor Scram with LOF/LOHS)

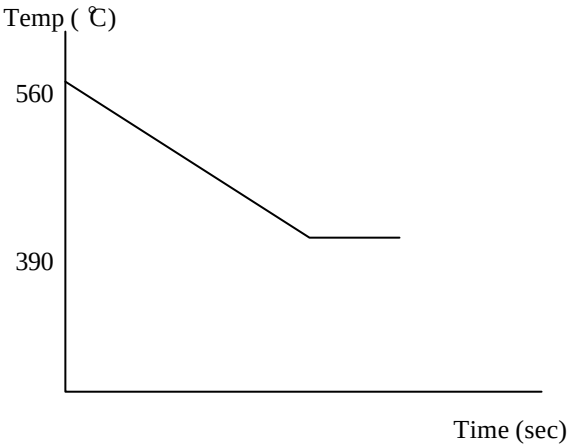

그림 8. **사례해석 열과도하중**

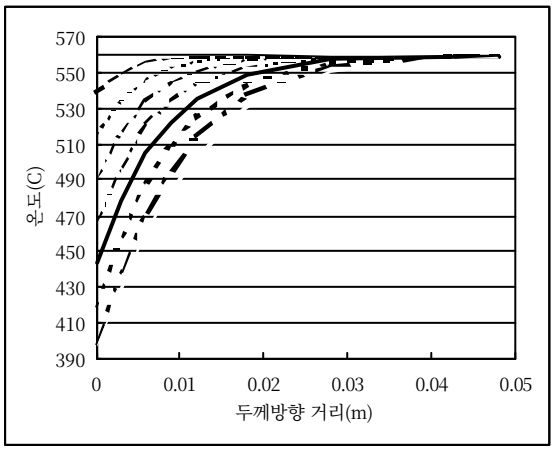

그림 9. **두께방향 거리에 따른 온도분포** (Film=25400J/sec-m^2-°C)

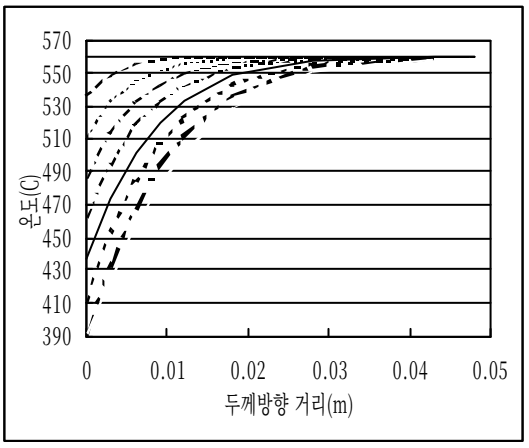

그림 10. **두께방향 거리에 따른 온도분포** (Film=113600J/sec-m^2-°C)

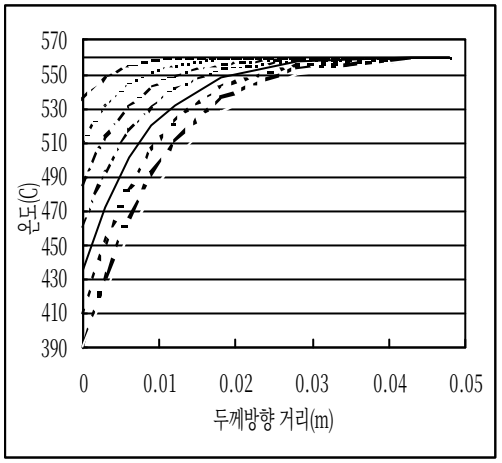

그림 11. 두께방향 거리에 따른 온도분포
(Film=254000J/sec-m^2-℃)

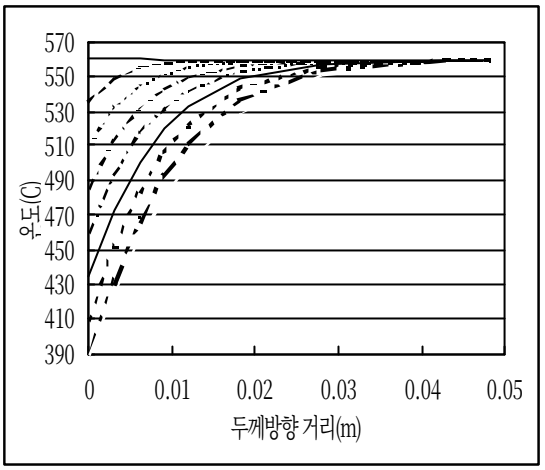

그림 12. 두께방향 거리에 따른 온도분포
(Film=454400J/sec-m^2-°C)

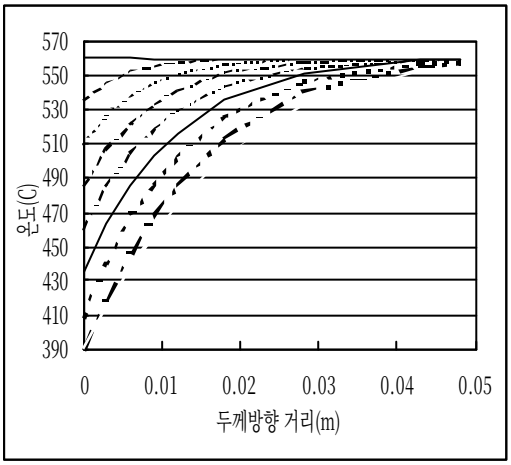

그림 13. 두께방향 거리에 따른 온도분포
(Cooling rate=2.5°C/sec)

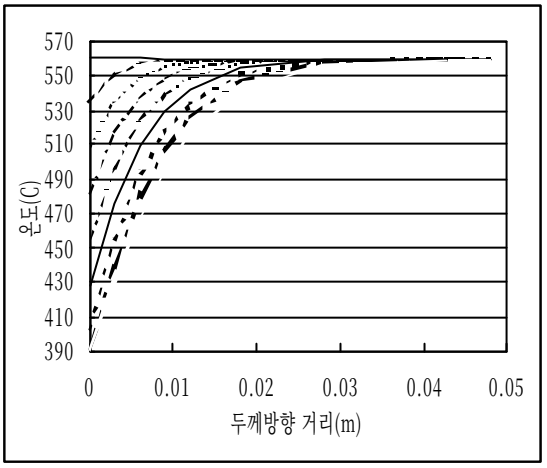

그림 14. 두께방향 거리에 따른 온도분포
(Cooling rate=8.5°C/sec)

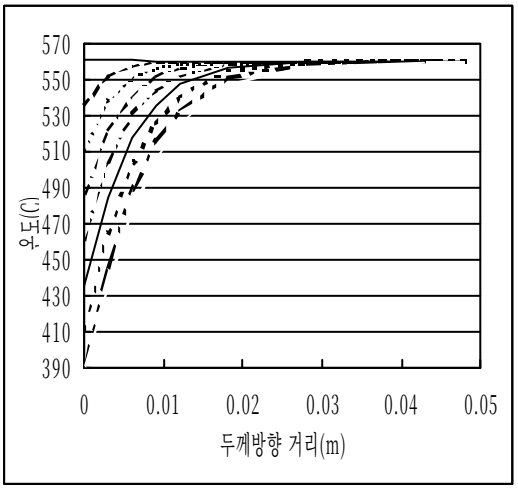

그림 15. 두께방향 거리에 따른 온도분포
(Cooling rate=10°C/sec)