'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER UIS 하단부의 고주기 피로손상 분석

High Cycle Fatigue Damage Analysis of KALIMER UIS Bottom Plate

김종범, 이형연, 이재한, 구경회, 유봉
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

노심을 구성하는 여러가지 집합체들을 통과한 소듐이 서로 다른 집합체 환경으로 인해 큰 온도차를 갖고 혼합하는 과정에서 불완전 혼합으로 인한 임의적인 온도요동 현상을 나타내는데 이것이 노심출구 위에 위치한 KALIMER UIS 하단부에 열스트라이핑 하중으로 작용하여 고주기 피로손상을 유발하게 된다. 본 연구에서는 고주기의 열스트라이핑 하중을 받는 UIS 하단부에 대해 일차원 열전달해석을 통한 피로손상 단순해석 절차를 제시하고 UIS 하단부를 축대칭 해석하여 제시한 단순평가 절차의 타당성을 확인하였다. UIS 하부판을 열스트라이핑 하중으로 보호하기 위해 인코넬 718 라이너의 도입을 제안하였고 해석결과 인코넬 718 라이너를 부착한 UIS 하부판은 개념 설계단계에서 적절한 것으로 평가되었다.

Abstract

The KALIMER Upper Internal Structure(UIS) bottom region is subjected to a high cycle thermal striping load during steady state operation due to the mixing of the sodium jets from different core assemblies with various velocities and temperatures. In this paper, a simple procedure for UIS striping analysis was proposed and the Inconel 718 liner plate was introduced to protect the UIS bottom plate from severe thermal striping load. The proposed simple procedure for the calculation of high cycle fatigue damage has been confirmed reasonably by an axisymmetric analysis of the UIS bottom structure. The analysis results of this study indicated that the conceptually designed UIS by attaching the Inconel 718 liner plate under the UIS bottom plate could be protected against severe thermal striping load by attaching.

1. 서론

열스트라이핑 현상은 정상운전시 고온과 저온의 유체가 불완전 혼합하여 주변구조물에 임의로 요동하는 온도하중을 가하게 되는 현상을 일컫는데 예를 들면 노심의 핵연료집합체를 통과하는 고온 소듐과 제어봉집합체를 통과하는 저온 소듐이 노내상부구조물(UIS)

하부 영역에서 불완전 혼합하여 UIS 하부 구조물에 불규칙하게 요동하는 온도하중을 유발하는 경우를 들 수 있다. 요동하는 온도하중이 구조물의 표면에 작용하면 큰 열응력이 발생할 수 있고 고주기 열피로 현상에 의한 균열이 발생하고 진전해서 구조물의 기능상실을 초래할 수 있기 때문에 건전성 평가를 위한 상세한 분석과 대비책이 요구된다.

임의적인 온도 요동의 특성과 유체와 구조물 표면 사이의 경계층 효과로 인한 감쇠 영향 및 스트라이핑 하중에 대한 구조물의 거동에 대한 실험 및 해석 방법의 개발과 관련하여 많은 연구가 진행되어 왔다. Tenchine[1]은 난류 소듐 유동의 경계층 감쇠에 대해 연구하여 감쇠효과는 온도요동의 주파수와 비례하여 증가한다는 점을 알아내었고, Zhukov[2]는 BN-350 에 사용된 것과 유사한 형태의 7 개 핵연료집합체 모델을 이용하여 서로 다른 온도의 소듐 젯 혼합에 관한 실험을 수행하여 온도요동의 크기에 미치는 소듐 젯 속도비의 영향을 분석하였다. 7 개의 핵연료집합체 모델에서 중심 집합체를 통과하는 소듐속도를 상대적으로 낮추었을때 온도요동은 더 커지는 것을 관찰하였고 또한 온도요동의 주파수 성분이 주로 0.5Hz 와 10Hz 사이에 있으며 집합체 출구로부터 멀어질수록 고주파 성분이 많아짐을 관찰하였다. Wakamatsu[3]는 두개의 핵연료집합체 모델을 사용하여 집합체를 통과해서 분사되는 소듐 젯의 속도 및 분사 위치와 구조물과의 거리를 변화시키는 실험을 통하여 표면감쇠 효과를 분석하였다. 고온소듐과 저온소듐의 분사속도는 서로 같은 크기로 0.34m/s 에서 6.72m/s 로 변화시켰을 때 구조물 표면에서의 감쇠는 속도가 증가됨에 따라 감소하고 온도요동의 크기는 거리에 의존함을 알 수 있었지만 두개의 집합체를 통과하는 소듐의 속도비의 영향은 고려하지 않았다. 그리고 소듐 대신 물을 사용한 실험 결과는 예측한 것과 같이 소듐의 경우가 열전도도가 크기 때문에 물을 사용한 경우보다 감쇠효과가 작은 것으로 나타났다.

Muramatsu[4]는 액체금속로의 노심과 UIS 를 모사하는 소듐 젯 실험을 통해 구조물 표면 부근에서 온도 요동의 주파수 성분을 평가하였는데 유체와 구조물의 경계층을 이루는 박막의 내외면과 경계층과 구조물 표면의 전달함수에 대해 입출력 비가 큰 우세한 주파수 범위가 3Hz~10Hz 임을 알아내었다. 그리고 구조물 표면에서 유체로부터 구조물표면으로 열전달 기구와 경계층의 필터효과로 인하여 고주파성분은 급격히 감쇠하는 것으로 나타났고 구조물 표면에서의 온도요동 주파수는 설치한 열전대의 위치에 따라 다르지만 주로 0.5Hz~10Hz 사이에 있다. 하지만 이 실험에서 전달함수는 노즐의 속도와는 무관한 것으로 분석되었는데 이는 Wakamatsu[3]의 결과와는 차이가 있다. Ushakov[5]는 7 개의 핵연료집합체 모델을 만들어 이를 통과한 소듐온도의 요동 특성을 조사하였는데 온도요동의 주파수는 주로 0.7Hz~4Hz 로 나타났다. Lee[6]는 액체금속로 이차배관의 분기관 부근에서 서로 다른 온도의 소듐이 불완전 혼합하여 배관에 열스트라이핑 하중을 가할 때 이로 인한 피로균열의 거동을 Green 함수법을 개발하여 분석한 바 있다.

일반적으로 노심을 구성하는 핵연료집합체를 통과하는 소듐의 속도는 제어봉집합체를 통과하는 소듐의 속도보다 크며 이러한 속도비는 유동의 혼합에 영향을 미치게 되는데[7], 속도비가 작아지면 온도요동의 감쇠도 작아진다. 즉, 제어봉집합체를 통과하는 유속이 주변의 핵연료집합체를 통과하는 유속에 비해 작을 때 감쇠가 작아져서 온도요동의 크기는 커짐을 알 수 있다. KALIMER 노심의 개념설계에서 핵연료집합체를 통과하는 소듐 속도

는 약 4~5m/s 이고 제어봉집합체를 통과하는 소듐속도는 약 1~2m/s 또는 이보다 작기 때문에[8] UIS 하부에 달려있는 제어봉안내관은 큰 스트라이핑 하중을 받을 것으로 예상된다. UIS 하단부의 스트라이핑 분석을 수행하기 위해서는 노심 출구로부터 흘러나와 난류거동을 하며 요동하는 소듐 온도의 진폭과 주파수 성분 등의 요동 특성을 파악하는 것이 필수적이고 또한 실험을 통하여 유체와 구조물 표면 사이에서의 온도요동 감쇠효과를 알아야 한다. 하지만 KALIMER 개념설계 단계에서 아직까지 UIS 스트라이핑 분석을 위한 실험이 수행되지 않았기 때문에 여기서는 구조건전성을 확보하기 위해 KALIMER UIS 의 스트라이핑 영향 분석을 위해 문헌과 공학적 판단에 근거하여 보수적인 가정한 값들을 사용하였다.

본 연구에서는 현재 단계의 KALIMER 노심 개념설계에 근거하여 열스트라이핑 하중을 받는 UIS 하단부의 열응력 평가를 위한 단순 절차를 제시하고 열스트라이핑 방지 대책을 제안하였다.

2. UIS 열스트라이핑 해석

풀형 액체금속로인 KALIMER[9]의 UIS 는 원자로헤드에 매달려 있는 구조로 개념설계되어 있는데 전체길이가 약 865cm 이고 외경이 240cm 이며 하부판은 노심 출구로부터 약 90cm 위에 위치하고 있다. UIS 의 실린더부 두께와 하부판의 두께는 2.5cm 이며 제어봉안내관 쉬라우드(Shroud) 튜브는 하부판 아래로 연장 설치되어 그림 1 에 보인 것과 같이 노심 상단으로부터 단지 5.0cm 떨어져 있다. 원자로 내에 위치한 전자펌프에 의해 노심으로 공급된 저온 소듐(386°C)은 노심을 통과하면서 뜨거워지는데 핵연료집합체를 통과한 소듐의 온도는 160°C 정도 증가하는데 비하여 제어봉집합체를 통과한 소듐의 온도는 4~7°C 정도만 증가할 뿐이어서 노심출구와 UIS 하단부 사이에서 160°C 정도의 온도차를 갖는 고온과 저온 소듐이 혼합하게 되며 이때 불완전 혼합으로 인한 온도요동이 발생하게 된다. 온도요동의 크기는 유체의 혼합과 유체와 구조물 표면 사이의 경계층 효과로 감쇠되는데 이렇게 감쇠된 온도요동이 구조물 표면에 정상운전 중 고주기 피로 손상을 유발할 수 있다.

열스트라이핑 하중으로 인해 구조물의 표면이 고주기 피로 손상을 받아 균열이 발생하게 되면 구조물의 기능 손상을 초래할 수 있기 때문에 균열진전 거동 분석을 포함한 상세한 구조 건정성 평가가 요구된다. 그러므로 열스트라이핑 하중을 받는 구조물에 대해서는 우선적으로 고주기 피로 손상에 의한 균열발생 여부를 평가해야 하는데 이는 다음과 같은 3 단계로 구성된다. 첫째, 노심집합체를 통과하는 소듐의 온도차에 의해 발생하는 열스트라이핑 퍼텐셜(Potential)의 크기와 유체 혼합에 의한 열스트라이핑 하중의 감쇠량을 평가해야 하고 둘째, 소듐과 구조물 사이의 경계층을 포함한 열전달 해석을 수행하여 구조물 내에서의 온도분포 양상을 구하고 셋째, 구조물의 열응력 및 변형률 해석에 의한 구조건전성 평가를 수행한다.

2.1 열스트라이핑 하중

노심을 구성하는 집합체들을 통과한 소듐의 최대 온도차를 스트라이핑 퍼텐셜이라 정의하는데 이는 주로 핵연료집합체를 통과한 소듐과 제어봉집합체를 통과한 소듐의 온도차에 의해 발생하며 일반적으로 불확실성 요소 때문에 원자로내의 고온소듐과 저온소듐의 온도차보다 큰 값을 갖는다. 노심출구 위에 위치한 UIS 하단부에서의 열스트라이핑 하중은 노심출구로부터의 열스트라이핑 퍼텐셜이 유동의 혼합에 의한 감쇠가 발생하여 작아지게 되는데 감쇠량은 실제의 형상과 조건을 모사한 실험에 의해서 가장 잘 예측될 수 있다. 노심 집합체들을 통과하는 서로 다른 온도의 소듐 유량과 속도비, 고온과 저온소듐의 혼합 영역의 모양과 혼합조건 및 노심출구로부터 구조물까지의 거리에 따라 감쇠량은 달라진다. 여기서는 열스트라이핑 하중을 받는 UIS 하부판의 거동분석을 수행하기 위해 감쇠를 고려하지 않고 보수적으로 스트라이핑 퍼텐셜이 구조물 경계층에 작용한다고 가정하였다.

그림 2 에 보인 것과 같이 KALIMER 노심의 개념설계[8]에서 내부 핵연료집합체와 인접한 제어봉집합체를 통과한 소듐의 최대 온도차는 약 160°C 인데 본 해석에서는 미국의 ALMR(Advanced Liquid Metal Reactor)[10]에 사용되었던 스트라이핑 퍼텐셜[11]에 가까운 값인 200°C 를 사용하여 해석의 보수성을 더하였다.

2.2 단순 일차원 파라미터 열전달 해석

열스트라이핑 하중의 여러가지 주파수 성분과 유체와 구조물표면 사이의 막계수를 여러가지로 설정한 파라미터 해석을 수행하여 열스트라이핑 하중이 구조물 표면에서 감쇠하는 현상을 분석하였다. 해석의 단순화를 위하여 Muramatsu[4]와 Ushakov[5]의 실험결과를 토대로 주파수범위를 0.1Hz 부터 10Hz 로 설정하여 각 주파수성분에 대해 사인파 형태의 온도하중을 사용하였다.

열응력은 구조물 내부로 열스트라이핑 하중이 침투하는 깊이에 의존하는데 해석 대상인 UIS 하단부에 대한 일차원 열전달해석으로 보수적인 평가를 수행할 수 있다. 실제 UIS 하부판의 일부 영역에만 열스트라이핑 하중이 가해지지만 전체면에 하중이 가해진다고 가정하면 일차원 열전달해석이 가능해지고 또한 보수적인 결과가 예상된다. 유체와 구조물의 경계층에서 열스트라이핑의 감쇠는 막계수와 주파수 성분에 의존하며 실험적인 동적 막계수는 그 복잡성 때문에 일반적으로 알려져 있지 않다. 경계층 감쇠 효과를 조사하기 위한 많은 실험적 연구가 수행되었지만 그 결과는 각각의 독특한 환경을 갖고 있는 모든 액체금속로에 공통적으로 사용될 수 없다. 따라서 공학적 판단에 근거하여 막계수 값들을 28400, 56800, 113600, 284000 및 454400J/sec-m^2-℃ 의 5 가지 값으로 설정하고 또한 열스트라이핑 하중의 주파수를 0.1, 0.5, 1, 2, 5 및 10 Hz 의 6 가지 값을 설정하였으며 막계수와 주파수 값들을 조합한 30 가지 경우에 대해 표면 감쇠효과와 구조물의 내부로 열스트라이핑이 침투하는 거동을 분석하였다.

상용유한요소 해석코드인 ANSYS[12]의 4 절점 열전달요소인 PLANE55 를 사용한 일차원 열전달해석을 수행한 해석모델은 그림 3 에 나타나 있고 모델의 길이는 3.7cm 이다. UIS 하부판은 316SS 로 만들어지며 두께는 2.5cm 이고 노심으로부터의 열충격에 대비하여 하부판에 같은 재질인 316SS 로 용접한 열충격 라이너의 두께가 1.2cm 인데 본 해석에서

하부판이라 함은 이들을 합친 두께 3.7cm 를 일컫는다. 사인파 형태의 열스트라이핑 하중의 평균온도는 노심출구 소듐의 평균온도인 530°C 로 가정하였고 온도의 상하 변동폭은 앞에서 설명한 것과 같이 보수적인 값인 200°C 로 설정하였다. UIS 하부판의 바닥면에 열스트라이핑 하중을 가하고 윗면은 정상운전시 고온소듐 온도인 530°C 를 적용하였다. 열전달해석에서 시간적분을 위한 시간증분 요건은 다음과 같다.

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

여기서 h 는 요소의 길이, k 는 열전도 계수, r는 밀도, c 는 비열을 나타낸다[13]. 316SS 의 물성치를 적용하면 시간증분 한계는 0.1sec 가 되는데 본 해석에서는 0.028sec 를 사용하였다. 평균온도인 530°C 에서 316SS 의 밀도, 비열, 열전도 계수는 각각 7744 Kg/m^3, 576.7 J/Kg-°C, 21.4 W/m-°C 이고 인코넬 718 에 대한 값들은 각각 8039 Kg/m^3, 496.4 J/Kg-°C, 18.52 W/m-°C 이다.

UIS 하부판에 대한 열전달 해석결과는 시간에 대한 온도의 변화로 나타나는데 구조물 두께 방향으로의 열스트라이핑 침투경향을 살펴보기 위해 각 위치에서의 시간이력결과의 포락선을 작성하여 비교하였다. 그림 4 와 그림 5 는 각각 28400 과 454400 J/sec-m^2-°C 의 막계수를 사용하였을 때 0.1, 0.5, 1, 2, 5 및 10 Hz 의 6 가지 주파수값의 열스트라이핑 침투거동을 보여주고 있다. 열스트라이핑 하중의 주파수가 커지면 표면 근처에서의 온도요동 크기가 많이 감쇠되고 두께 방향으로의 열스트라이핑 침투깊이는 막계수값에 상관없이 거의 일정함을 알 수 있다. 그림 6 과 그림 7 은 열스트라이핑 하중 주파수가 각각 0.5Hz 와 10Hz 일 때 28400, 56800, 113600, 284000 및 454400 J/sec-m^2-°C 의 5 가지 막계수값을 사용한 경우에 대해 두께방향으로 열스트라이핑 침투와 표면 감쇠 효과를 보여주고 있다. 열스트라이핑 하중의 주파수가 비교적 고주파인 10Hz 인 경우에는 막계수값이 작아짐에 따라 표면에서 감쇠현상이 크게 일어나고 저주파인 0.5Hz 인 경우에는 표면에서의 감쇠가 10Hz 인 경우와 비교하면 비교적 작음을 알 수 있다. 또한 두께 방향으로 스트라이핑 침투깊이는 0.5Hz 인 경우가 10Hz 인 경우보다 현저하게 커짐을 알 수 있다.

해석 결과 구조물 내부의 열스트라이핑 침투깊이는 주파수 성분에 크게 영향을 받고 구조물 표면에서의 감쇠 효과는 주로 막계수에 의존함을 알 수 있었다. 열스트라이핑 하중의 고주파 성분은 구조물 내부 두께 방향으로 깊이 침투하지 못하고 막계수값이 작아지면 표면에서 급격하게 감쇠하였다. 막계수와 주파수값을 조합한 30 가지 경우의 표면 감쇠 현상을 그림 8 에 나타내었는데 10Hz 의 스트라이핑 하중은 막계수가 28400 J/sec-m^2-°C 일때 표면에서 온도폭이 81%나 감쇠하는데 비하여 0.1Hz 경우는 같은 값의 막계수일 때 13% 감쇠하였다. 막계수가 454400 J/sec-m^2-°C 일 때 10Hz 의 스트라이핑 하중은 표면에서 9% 감쇠하는데 비하여 0.1Hz 경우는 단지 1%만 감쇠하였다. 이와 같이 주파수와 막계수의 조합에 따른 표면 감쇠 정도의 차이가 무척 크기 때문에 실제 적용 대상인 구조물에 대해서 보다 정확한 분석을 수행하려면 실험에 의해 실제에 가까운 스트라이핑 감쇠값과 주파수 성분을 구하는 것이 필수적이다. 만일 실험 수행이 어려운 경우는 구조건전성을 확보하기 위해 여러가지 불확실성을 고려한 가장 보수적인 값들을 사용하여야 할 필요가 있다.

가장 전형적인 스트라이핑 하중의 주파수 성분인 1Hz 의 경우 30 년 수명 동안 구조물

에 $9.5x10^8$ 회 작용하게 되는데 이는 ASME B&PV Code[14]의 설계 피로곡선의 데이터 범위인 $1x10^6$ 사이클을 크게 넘어서기 때문에 적절한 피로손상 평가를 수행하기 어렵다. 따라서 수명 기간 동안 작용하는 스트라이핑 하중의 작용회수를 포함하는 설계 피로곡선을 확보할 수 없다면 UIS 하부판을 열스트라이핑 하중으로부터 보호할 방지책을 마련하여 하부판의 구조 건전성을 확보해야 한다. 한가지 방법은 노심 출구와 UIS 하부판 사이에 배플판을 설치하여 열스트라이핑 하중이 하부판에 영향을 주지 않도록 하는 것인데 이 경우 배플판이 핵연료 재장전을 위한 IVTM 의 움직임을 방해할 수 있으므로 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 이러한 배플판 대신에 UIS 하부판에 내피로 성질이 우수한 것으로 알려진 인코넬 718 로 만든 라이너를 밀착 설치함으로써 하부판에 스트라이핑 하중이 미치는 영향을 줄이고, 또한 하부판 아래로 연장 설치된 제어봉안내관 쉬라우드 튜브도 인코넬 718 로 제작함으로써 스트라이핑 하중에 의한 피로 손상을 최소화하도록 하였다. 인코넬 718 라이너의 적절한 두께를 결정하기 위하여 316SS 와 인코넬 718 라이너를 설치한 경우의 스트라이핑 하중에 대한 열전달 거동을 비교해석한 결과 두 재질 사이의 스트라이핑 열전달 특성이 거의 비슷하여 앞에서 수행한 316SS 의 해석결과를 사용하여 라이너의 두께를 다음과 같이 결정하였다.

그림 4 에서 그림 7 에 나타난 결과들로부터 열스트라이핑 하중을 받은 구조물 내부의 온도진폭은 두께 방향으로 0.3cm 정도 깊이에서 아주 작아지며 0.1Hz 인 저주파 성분의 경우를 제외하고는 0.6cm 정도의 깊이에선 온도진폭이 거의 사라진다고 볼 수 있다. 따라서 KALIMR UIS 하부판에 설치할 인코넬 718 라이너의 두께는 잠정적으로 0.6cm 로 결정하였다.

2.3 단순해석을 통한 열스트라이핑 응력 계산과 구조건전성 평가

열스트라이핑 하중의 구조물 표면에서 감쇠율은 주파수와 막계수에 따라서 1%에서 81% 의 큰 차이를 보이기 때문에 실험결과로부터 구한 실제 주파수성분과 표면 감쇠율이 아닌 다른 특정값을 가정하여 사용할 때는 많은 주의가 필요하다. 본 연구에서는 설계 안전을 고려해서 여러가지 보수적인 가정을 하였는데, 노심으로부터의 열스트라이핑 퍼텐셜을 보수적으로 큰 값을 설정하였고 이 값이 구조물 표면에 도달하기까지 유동혼합에 의한 감쇠 영향을 배제하였으며 또한 표면의 경계층을 통해 구조물 표면에서 요동하는 온도진폭을 소듐 온도진폭의 95%로 가정하였다.

만일 요동하는 온도하중이 평판의 아주 작은 영역에 작용하여 평판의 표면에만 영향을 줄 경우 그 영역에서 온도요동으로 인한 변형은 주위 영역에 의해 완전히 구속되었다고 가정하여 이차원적으로 구할 수 있는데 이때 이축 열응력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

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

여기서 ΔT 는 표면에 작용하는 온도요동의 상하 변동폭이다.

UIS 하부판에 작용하는 열스트라이핑 하중이 판 전체에 균일하게 작용하고 하부판의 두께 방향으로 깊이 t_S 까지 선형적으로 작아진다고 가정하여 이에 해당하는 이축 열응력을 계산하는 단순식을 전개하였는데 하부판의 양단에는 굽힘을 억제하는 경계조건을 사용하였다. 즉, 하부판의 스트라이핑 침투 깊이 영역에서는 선형 온도구배를 갖고 나머지

두께에서는 일정한 평균온도값을 갖는 경우이므로 판두께 전체적으로로는 비선형 온도구배 문제가 된다. 열스트라이핑 응력은 다음과 같이 유도되었다.

$$\sigma_{striping} = \pm E\alpha\,(1 - 0.5\,t_s / t)\,(T_{striping}/2)/(1\text{-}v) \qquad (3)$$

여기서 $T_{striping}$ 은 온도요동의 상하 변동폭, t 는 판두께, t_s 는 스트라이핑 침투깊이를 나타내며 침투깊이는 판두께의 일부에 해당한다. 이를 검증하기 위해 ANSYS 의 8-절점 열전달요소인 SOLID70 과 8-절점 구조요소인 SOLID45 를 사용한 해석을 수행한 결과는 위에서 유도한 단순식을 사용한 결과와 1% 이내로 일치하여 유도한 식의 타당성을 확인할 수 있었다. 530°C 에서 316SS 의 영률, 포와송 비 및 열팽창계수는 각각 156.1GPa, 0.29, $18.36x10^{-6}$/°C 이고 인코넬 718 의 경우는 각각 171.7GPa, 0.273 및 $14.35x10^{-6}$/°C 이다. 해석에 사용된 표면에서의 온도요동 상하폭은 소듐 온도요동 상하 변동폭의 95%인 190°C 이다.

인코넬 718 라이너를 부착하지 않았을 경우 316SS 하부판의 스트라이핑 응력은 스트라이핑 침투깊이를 0.3cm 로 고려하였을 때 368MPa 가 되고 이는 항복응력인 117MPa[14]을 크게 넘는 값으로 좀 더 구체적인 분석을 위해서는 탄소성 해석이 요구된다. 스트라이핑에 의한 국부 영역의 변형률 범위는 0.36%인데 이는 탄성적으로 구한 값이어서 실제의 탄소성 변형률보다는 작은 값이다. 탄성 변형률 값인 0.36%를 ASME 코드[14]의 설계 피로곡선에 적용하면 허용 사이클 수가 3700 회인데 이는 1 억 사이클을 상회하는 스트라이핑 주파수를 고려하면 무척 작은 값으로 UIS 하부판은 피로손상으로 인한 균열이 발생하고 구조 건전성을 잃게 된다. KALIMER UIS 하단부의 열스트라이핑 퍼텐셜은 본 해석의 값보다 작아질 것이고 유동의 혼합으로 인한 감쇠 효과가 크고 또한 하부판에서 온도분포가 균일하지 않고 비주기적일 것이기 때문에 열응력과 변형률이 작아질 것으로 예측되지만 고주기 피로손상을 고려하면 현 단계에서는 인코넬 718 라이너를 부착하지 않은 UIS 하부판은 타당하지 않을 것으로 판단된다.

하부판에 두께 0.6cm 의 인코넬 718 라이너를 설치했을 경우는 열스트라이핑 응력은 310MPa 이 되고 탄성적으로 구한 변형률은 0.32%이다. ASME Code 는 인코넬 718 의 설계허용강도와 설계피로곡선을 제시하고 있지 않지만 530°C 일 때 항복응력이 890MPa 인 점을 고려하면 응력으로 인한 문제는 없을 것으로 예상되고 또한 설계피로곡선도 10^9 사이클일 때 변형률범위가 0.4% 이상일 것으로 예측되기 때문에 피로손상도 발생하지 않을 것으로 판단되지만 이는 인코넬 718 에 대한 데이터를 확보하여 추가 검증할 필요가 있다. 본 연구에서는 앞에서 설명한 것과 같이 여러가지 보수적인 가정들을 사용하였는데 문헌을 참조하여 보수성을 조금 줄여서 스트라이핑 퍼텐셜을 200°C 대신 150°C 를 사용하고 유동혼합에 의한 감쇠를 30%, 구조물 표면 감쇠를 10% 적용하면 스트라이핑 응력은 앞에서의 결과의 절반 크기인 154MPa 로 작아지고 탄성적으로 구한 변형률도 절반 크기인 0.16%로 작아져서 구조건전성이 크게 증가할 것으로 판단된다.

UIS 하단부 구조물을 신뢰성 있게 설계하기 위해서는 상세한 해석과 실험이 요구되는데 본 연구에서는 열스트라이핑 방지책으로 UIS 하부판에 인코넬 718 라이너를 부착하는 것을 제시하였고 이는 개념설계 단계의 요건을 만족시키는 것으로 평가되었다

2.4 축대칭 해석을 통한 단순해석 방법의 타당성 검토

앞에서 UIS 하부판의 열스트라이핑 단순해석 절차를 제시하였는데 이는 다음과 같은 가정에 바탕을 둔 것이다. 첫째, 실제의 열스트라이핑 하중은 하부판의 국소 영역에 작용할 것이지만 국소영역의 거동은 열스트라이핑 하중이 하부판 전체에 균일하게 작용하는 경우와 큰 차이를 보이지 않을 것으로 예측하였다. 따라서 하부판 전체에 균일하게 하중이 가해진다고 볼 수 있으므로 단순 일차원 열전달해석이 가능하였다. 둘째, UIS 하단부는 그림 1에 보인 것과 같이 실린더부와 하부판 및 상부의 지지판으로 구성된 상자 모양을 이루고 있고 내부에는 고온소듐을 담고 있게 되어 정상운전시 열팽창하게 되지만, 하부판이 열스트라이핑 영향을 받는 두께가 전체두께에 비해 작기 때문에 하부판의 양단은 굽힘을 억제하는 경계조건을 적용할 수 있고 이를 이용하여 단순 열스트라이핑 응력 계산식을 유도하였다. 본 절에서는 단순해석 절차의 타당성을 검토하기 위하여 상자모양의 UIS 하단부를 축대칭 모델로 작성하여 하부판에 균일한 열스트라이핑 하중이 작용하는 경우와 국부적인 열스트라이핑 하중이 작용하는 경우를 비교분석하였다.

그림 9는 축대칭 유한요소해석 모델을 보여주고 있는데 점선은 변형전의 모델을 나타낸다. 실린더부의 외경은 120cm, 상부판 윗면과 하부판 아래면의 거리는 95cm, 상부판과 실린더의 두께는 2.5cm, 하부판의 두께는 열충격 라이너를 포함하여 3.7cm로 하였다. 해석에는 ANSYS의 4절점 축대칭 열전달 요소인 PLANE75와 4절점 구조요소인 PLANE42에 축대칭조건을 부여하여 사용하였는데 전체 요소개수는 2691개이고 절점수는 2892개이며 하부판의 두께 방향으로의 메시는 일차원 해석의 경우와 같도록 하였다. 열스트라이핑 하중은 단순해석 경우와 같은 크기를 사용하였는데 가장 전형적인 주파수 성분인 1Hz와 가장 보수적인 막계수인 454400 J/sec-m^2-°C를 적용하였고 스트라이핑 하중이 작용하지 않는 면들은 고온소듐 평균온도인 530°C가 작용하도록 하였다. 국부적인 열스트라이핑은 중심축에서 26cm 떨어진 곳에서 폭 2.8cm 구간에 작용하는 것으로 가정하였다.

먼저 하부판에 균일한 열스트라이핑 하중이 작용한 경우를 단순 일차원 열전달해석 결과와 비교하면 하부판의 두께 방향으로 열스트라이핑 침투 경향과 표면 감쇠는 일차원 열전달해석 경우와 같은 결과를 나타내었다. 구조물의 변위를 그림 9에 나타내었는데 전체적인 열팽창 거동을 보여주고 있으며 하부판의 양단의 굽힘변형은 발생하지 않았는데 이는 단순해석에서 가정한 경계조건의 타당성을 뒷받침해준다. 하부판의 두께 방향으로의 열응력 분포를 선형화하여 그림 10에 보였는데 막응력과 굽힘응력은 상당히 작고 표면 부근에서 피크응력이 지배적인 것을 볼 수 있다. 표면에서의 최대 온도차는 193.6°C이고 열스트라이핑 응력은 ± 382MPa인데 단순 계산식을 적용하면 ± 375MPa가 되어 차이가 2%에 불과하다. 열스트라이핑 하중에 의한 고주기 피로 평가는 피크응력에 상응하는 변형률 범위를 구하여 적용하여야 하는데 탄성해석으로 구한 변형률 범위를 ASME 코드[14]에 적용해서 탄소성 등가 변형률 범위를 다음 식으로 계산한다.

$$\Delta e_{equivalent} = \frac{\sqrt{2}}{2(1+n)} \sqrt{(\Delta e_x - \Delta e_y)^2 + (\Delta e_y - \Delta e_z)^2 + (\Delta e_z - \Delta e_x)^2 + \frac{3}{2}(\Delta g_{xy}^2 + \Delta g_{yz}^2 + \Delta g_{zx}^2)} \qquad (4)$$

반경방향으로의 변형률 범위는 해석결과 0.35%여서 단순해석 결과와 거의 일치하였고 탄소성 등가 변형률범위는 0.49%로 계산되었다. 이를 설계 피로곡선에 적용하면 허용 사이

클 수가 1370 회가 되어 30 년 수명동안 누적손상계수가 1 을 훨씬 초과한다.

하부판에 열스트라이핑 하중이 국소부위에 작용하는 경우를 해석한 결과 상자모양의 UIS 하단부의 전체 거동과 하중이 작용한 영역의 두께 방향으로의 온도분포 결과는 거의 비슷함을 알 수 있었다. 하지만 국소영역의 열응력과 변형률은 국소영역 주변의 영향을 받아 조금 감소하였다. 그림 11 은 국소영역에서 반경방향으로의 열응력분포를 보여주고 있는데 표면에서의 응력은 약 3.3% 감소하였고 탄소성 등가 변형률 범위는 0.486%가 되어 균일 스트라이핑 하중의 경우보다 1% 정도만 감소하여서 균일 스트라이핑 하중을 작용한 경우와 거의 비슷한 결과를 나타내었다. 0.486% 변형률 범위에 대한 허용 사이클 수는 1460 회로 마찬가지로 피로손상이 극심할 것임을 알 수 있다. 참고로 프랑스의 액체금속로 전용 설계코드인 RCC-MR[15]의 탄소성 등가 변형률 범위를 계산하는 식은 다음과 같다[16].

$$\Delta\varepsilon = (2/3)\,\alpha\,\Delta T\,(1+\nu)/(1-\nu) \qquad (5)$$

위 식을 적용한 등가 변형률 범위는 0.43%이고 RCC-MR 코드의 설계 피로곡선에 적용하면 허용 사이클 수가 1070 회가 되어 ASME 코드를 사용한 것과 큰 차이가 없다.

축대칭 열전달 및 열응력해석을 수행한 결과 하부판에 균일한 열스트라이핑 하중을 가한 결과와 일차원 단순해석 결과가 거의 일치하였고 또한 하부판의 국소영역에만 열스트라이핑 하중을 작용시킨 경우 해석결과가 하부판 전체에 균일하게 하중을 작용시킨 경우와 큰 차이를 보이지 않음으로써 본 논문에서 제시한 단순해석 절차가 타당함을 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 극심한 열스트라이핑 하중을 받는 UIS 하단부에 대한 일차원 열전달 해석을 통한 단순 해석절차를 제시하고 수행하였는데 실제 실험 결과가 없기 때문에 보수적인 가정값들을 사용하였다. 단순해석 방법의 타당성은 축대칭 해석을 수행하여 확인하였다. 해석 결과 구조물 내부로 열스트라이핑 침투 깊이는 주로 주파수 성분에 의해 영향을 받으며, 구조물 표면에서의 열스트라이핑 하중 감쇠는 주로 막계수에 의존함을 알 수 있었다. ASME 코드의 설계 피로곡선을 적용하면 316SS 자체만으로는 구조 건전성을 확보하기 어렵기 때문에 내피로 성질이 우수한 인코넬 718 라이너를 하부판에 부착하여 스트라이핑 하중 영향을 받지 않도록 하였고, 인코넬 718 라이너는 피로손상을 받지 않을 것으로 예상되었다. 따라서 인코넬 718 라이너를 부착한 UIS 하부판의 설계는 개념설계 단계에서 타당한 것으로 평가되었지만 다음 설계 단계에서 좀 더 상세한 해석과 실험이 요구되며 또한 제작성이 떨어지는 인코넬 718 라이너의 적절한 부착 방법을 개발하는 것이 요청된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을

전한다.

참고문헌

1. Tenchine, D., "Boundary Layer Attenuation in Turbulent Sodium Flows," IAEA Specialists' Meeting on Correlation between Material Properties and Thermohydraulics Conditions in LMFBRs, Aix-en-Provence, France, Nov. 1994
2. Zhukov, A.V., Ivanov and E.Ph., Kovtun, S.N., "Experiments on Mixing of Sodium Jets of a Different Temperature in Space above Fuel Pin Heads in Fast Reactor Subassembly of BN-350 and BN-600 Types," IAEA Specialists' Meeting on Correlation between Material Properties and Thermohydraulics Conditions in LMFBRs, Aix-en-Provence, France, Nov. 1994
3. Wakamatsu, M., Nei, H. and Hashiguchi, K., "Attenuation of Temperature Fluctuations in Thermal Striping," J.of Nuclear Science and Tech., 32, No.8, 1995, pp752-762
4. Muramatsu, T., Development of Analytical Model of Evaluating Temperature Fluctuation in Coolant(XII), PNC TN9410 98-013, Japan, 1998
5. Ushakov, P.A. and Sorokin, A.P., "Modeling of Temperature Distribution and Pulsation in Fast Reactor Units," IAEA Specialists' Meeting on Correlation between Material Properties and Thermohydraulics Conditions in LMFBRs, Aix-en-Provence, France, Nov. 1994
6. Lee, H.Y, Kim, J.B, Yoo, B, "Assessment of Fatigue and Fracture on a Tee-Junction of LMFBR piping under thermal striping phenomenon," J. Korean Nuclear Society, 31, No.3, 1999, in press.
7. Personal Communication with Chung, H., ANL, IL, 1998
8. Kim, Y.K., Memorandum – KALIMER Core Design, KAERI, Korea, Mar., 1998
9. Park, C.K., et.al, KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea, 1997
10. Preapplication Safety Evaluation Report for the Power Reactor Innovative Small Module Liquid Metal Reactor, NUREG-1368, US-NRC, 1994
11. Personal Communication with Patel, M., GE, CA, 1996
12. ANSYS Users Manual, Ver. 5.5, ANSYS Inc., PA, 1998
13. Hughes, T.J.R., The Finite Element Method – Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Prentice Hall International Inc., 1987
14. ASME B&PV Code, Section III, Subsection NH, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, 1995 Edition, ASME, NY, 1995
15. RCC-MR, Section I, Subsection B: Class 1 Components, Design and Construction Rules for Mechanical Compondnts of FBR Nuclear Islands, AFCEN, 1995 Edition, France, 1995
16. Drubay, D. And Acker, D.,"Evaluation of Thermal Striping Risks: Limitation of Cracks Initiation and Propagation," IAEA Specialists' Meeting on Correlation between Material Properties and Thermohydraulics Conditions in LMFBRs, Aix-en-Provence, France, Nov. 1994

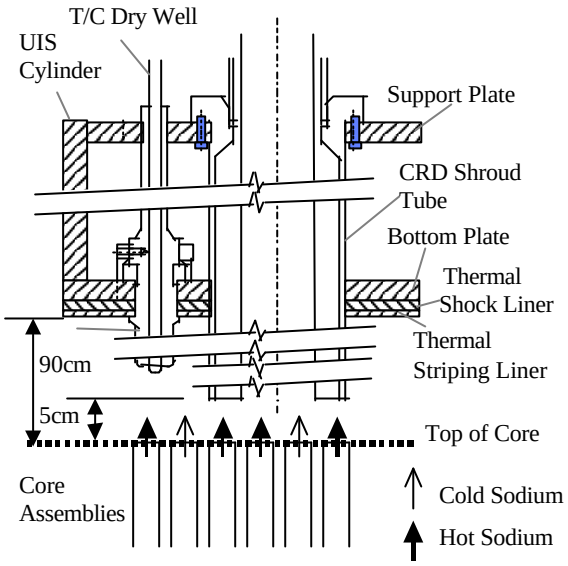

그림 1. KALIMER UIS 하단부 개략도

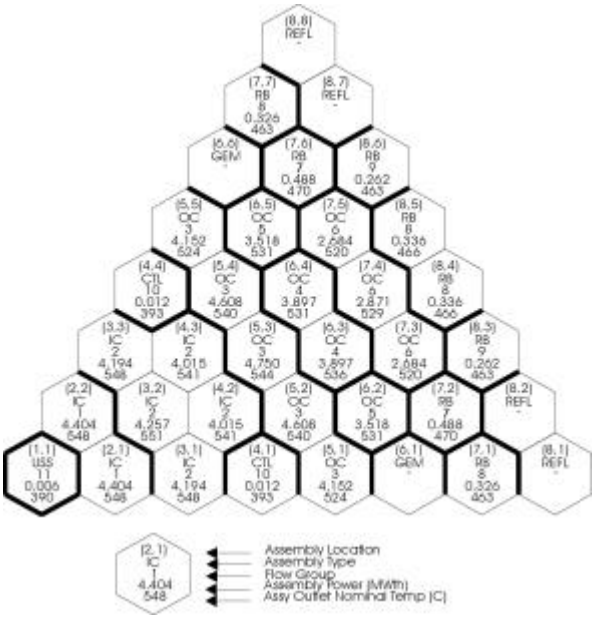

그림 2. KALIMER 노심 개념설계

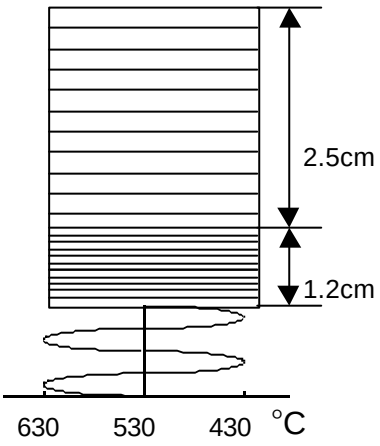

그림 3. 유한요소해석모델 및 하중

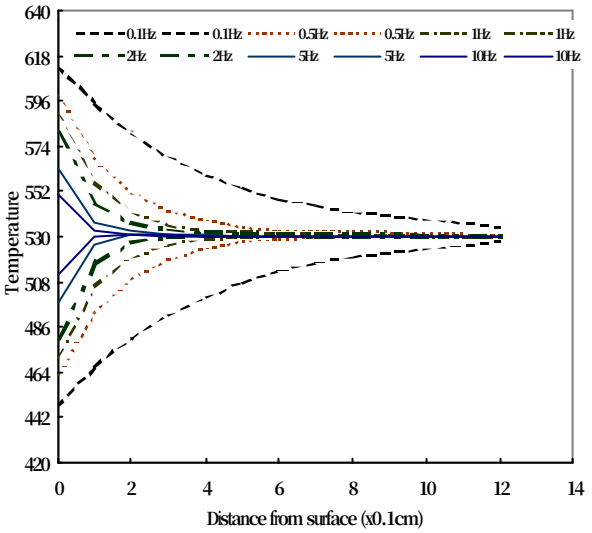

그림 4. 주파수에 따른 스트라이핑 침투
(막계수=28400 J/sec-m^2-℃)

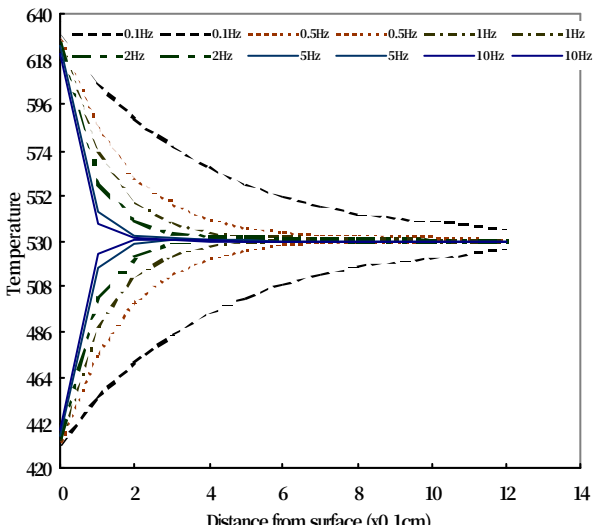

그림 5. 주파수에 따른 스트라이핑 침투
(막계수=454400 J/sec-m^2-°C)

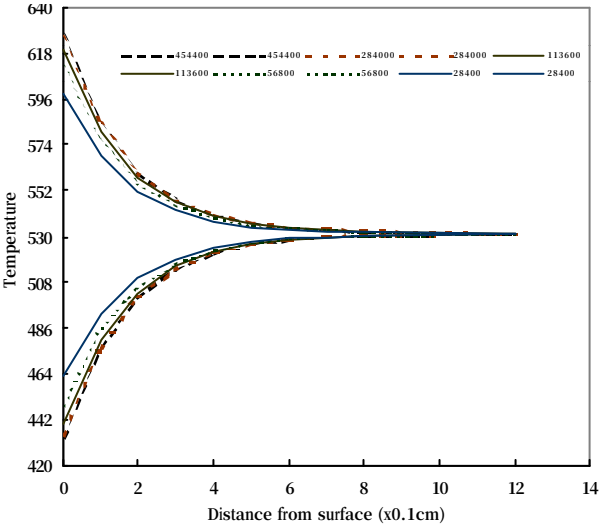

그림 6. 막계수에 따른 스트라이핑 침투
(주파수=0.5Hz)

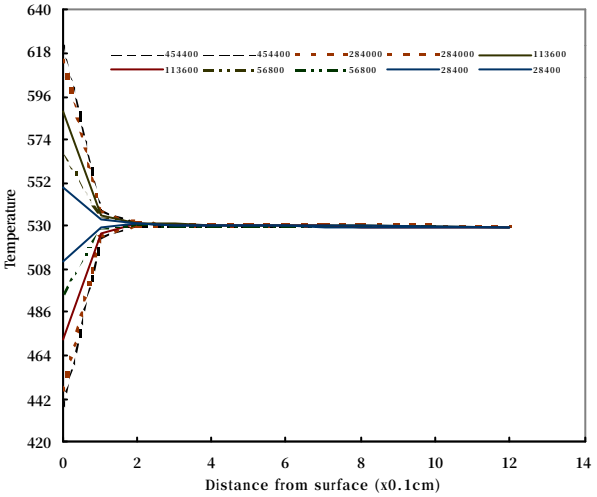

그림 7. 막계수에 따른 스트라이핑 침투 (주파수=10Hz)

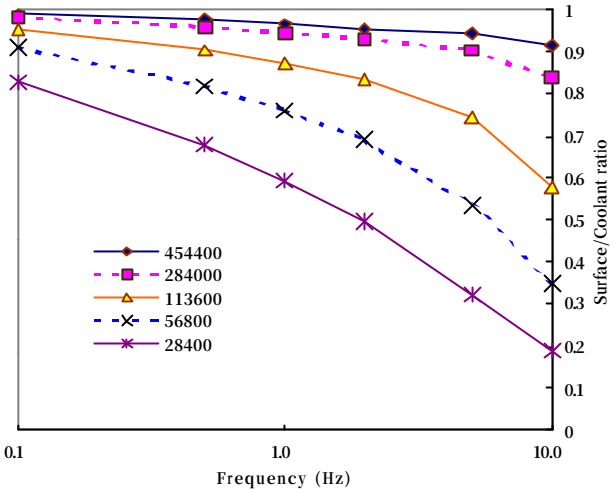

그림 8. 소듐 온도요동에 대한 구조물 표면 온도요동 비율

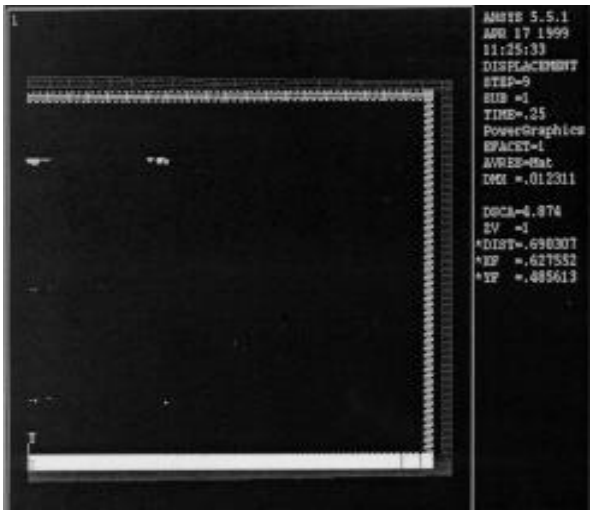

그림 9. UIS 하단부 축대칭 모델 및 균일 열스트라이핑 하중시 변위

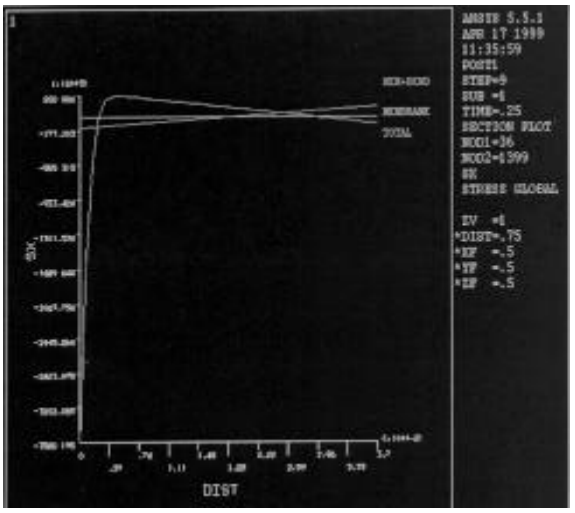

그림 10. UIS 하부판 두께방향으로 선형화된 응력분포

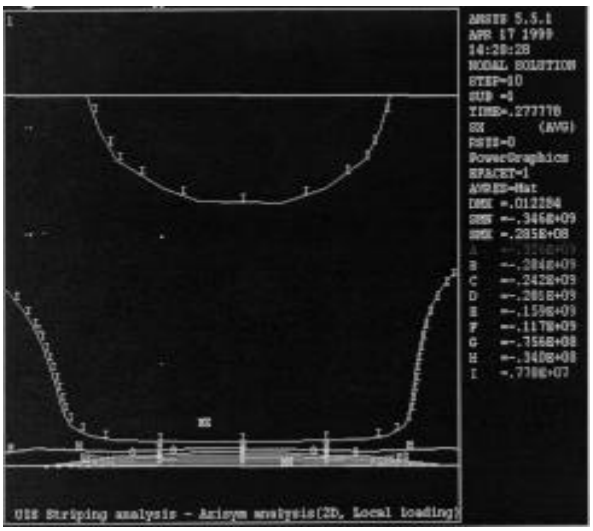

그림 11. UIS 하부판 국소영역의 반경방향 응력분포(국소 열스트라이핑하중 적용)