

‘96 추계 학술 발표회 논문집

한국원자력학회

## 칼리머 노내 상부구조물 하단부의 열 스트라이핑 분석

김중범, 이형연, 유 봉

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

본 논문에서는 칼리머 액체금속로의 노내 상부구조 하단부에 발생하는 열 스트라이핑을 해석할 수 있는 단순방법을 제안하였고 또한 인코넬 718 강으로 만든 라이너를 적용하여 노내 상부구조 하부에 발생하는 열 스트라이핑 문제를 해소하거나 줄이기 위한 방안을 제시하였다. 해석의 결과 현재 예비설계된 칼리머 노내 상부구조 하단부는 스트라이핑 하중으로부터 건전함을 예측할 수 있었다.

### 1. 개 요

칼리머 액체금속로(KALIMER, Korea Advanced Liquid Metal Reactor)[1]는 국내의 원자력개발 중장기 연구에 따라 예비 개념설계 단계에서 제안된 고온의 액체 소듐을 냉각제로 사용하는 원자로로서 높은 열효율과 소듐 비등에 대한 여유도, 자연 순환에 의한 잔열제거 및 원자로 구조물에 대한 낮은 압력하중을 특징으로 들 수 있다. 반면에 정상운전시 533°C의 고온 소듐 환경과 146°C에 이르는 고온 플레넘과 저온 플레넘의 온도차에 의한 열응력, 크립 및 피로에 대한 분석이 필요하며 또한 노심을 통과한 소듐이 노심출구 지역에 위치한 노내 상부구조 하부에 열 스트라이핑 문제를 발생시켜 이에 대한 분석이 요구된다.

열 스트라이핑(Thermal striping)은 각기 다른 온도를 갖는 두개 이상의 열흐름이 혼합되는 부분에서 유체의 혼합이 원활하지 않을 때 구조물에 발생하는 불규칙한 열 변동 현상을 일컫는데 이로 인하여 심한 열응력과 고주파수 피로가 발생하게 된다. 이때 온도 변동 주파수는 일반적으로 0 ~ 3 Hz 정도가 되는 것으로 알려져 있으며[2] 유체가 소듐인 경우는 소듐의 우수한 열전달 특성 때문에 더욱 주의가 요구되고 있다.

본 연구에서는 이러한 스트라이핑 현상이 예상되는 칼리머 노내 상부구조 하단부에 대한 간단한 스트라이핑 해석 절차를 제시하고 또한 인코넬 718로 만든 라이너를 노내 상부구조 하단부에 설치하는 것을 설계에 반영하여 스트라이핑 문제를 해소하고자 하였다.

## 2. 노내 상부구조물의 하단부의 열 스트라이핑

칼리머 노내 상부구조는 탈착식 구조물로 그 하단부가 노심출구 부근에 위치하고 있고 따라서 상대적으로 크기가 작은 기계적 하중보다는 열 하중에 지배받게 된다. 칼리머의 현재 개념설계 개발 단계에서 아직 자세한 설계자료와 열유동 자료가 확보되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 정상운전시 노내상부구조에 대한 열 스트라이핑 해석을 단순화하여 수행하였고 또 스트라이핑 응력을 줄이기 위하여 그림 1에 보인 것과 같이 인코넬 718 라이너의 채택을 제시하였다.

칼리머 노내상부구조의 하부판과 하부판에 부착된 쉬라우드 튜브는 노심 출구로부터 각각 90cm 와 5cm 정도 위에 위치하고 있기 때문에 정상운전시 노심을 구성하는 각각의 핵연료 집합체에서 서로 다른 온도와 속도로 통과한 소듐이 혼합되면서 노내상부구조물의 하부판과 쉬라우드 튜브에 심한 열 스트라이핑 하중이 작용할 것으로 예상된다.

### 2.1 스트라이핑 하중 계산

열 스트라이핑 하중 계산은 열유동 시험 및 해석을 필요로 하며 여기에는 노심 열유동 해석을 통한 노심출구의 스트라이핑 포텐셜 예측과 적절한 소듐 혼합 시험을 수행하여 노심출구를 빠져나온 소듐이 구조물의 표면에 도달하는 과정에서 발생하는 스트라이핑 감쇠량을 산정하는 것이 포함된다. 그리고 또한 실험적으로 얻어진 소듐과 구조물 표면 사이의 막계수(Film coefficient)를 사용한 열전달 해석을 통하여 구조물 표면의 온도분포를 구하면 이것으로부터 열응력을 계산할 수 있게 된다.

그러나 현단계에서 칼리머에 대한 스트라이핑 응력 계산을 위한 시험이나 열유동 해석이 이루어지지 않았기 때문에 본 연구에서는 지금까지의 경험과 ALMR 자료[3]를 참조하여 근사한 가정치를 설정하여 해석을 수행하였다.

노심출구에서 인접한 각각의 핵연료 집합체를 통과한 소듐 냉각재의 최대 온도차가 구조물이 겪을 수 있는 최대 스트라이핑이고 이를 스트라이핑 포텐셜이라 부른다. 이 온도차는 노심을 통과하는 소듐의 혼합 평균온도의 증가량보다 일반적으로 큰 값이고 노심의 제어봉 집합체와 인접한 핵연료 집합체 사이에서 발생하며 여기서는 최대 스트라이핑을 ALMR[4] 경우인 197°C ~ 210°C 에 근사한 값인 200°C 로 가정하였다.

노내 상부구조 하부구조에서의 소듐 스트라이핑은 노심출구를 빠져나온 소듐이 섞이면서 위로 흐르기 때문에 그 크기가 줄어들게 된다. 이러한 스트라이핑 감쇠는 모형을 만들어 실제의 조건을 부여한 유동 시험을 통해서 잘 예측될 수 있는데 물 모의 시험결과와 유동의 상대속도와 유동이 혼합되는 부근의 형상 및 노심 출구면으로부터의 구조물의 거리에 따라 약 20 ~ 80%의 감쇠를 보이는 것으로 알려져 있다[4]. 또한 소듐 환경에서의 감쇠는 소듐의 높은 열전도 특성 때문에 물에서의 경우보다 약 20% 정도 큰 것으로 알려져 있다. 그러나 현재 칼리머에 대해서는 시험이 진행되고 있지 않기 때문에 정확한 감쇠량은 구할 수가 없고 따라서 본 연구에서는 해석의 보수성을 위하여 노내 상부구조 하부판과 쉬라우드 튜브에 대하여 감쇠량을 고려하지 않고 그

림 2에 보이는 것과 같이 스트라이핑 포텐셜 크기를 갖는 4 주기의 사인파형을 하중으로 사용하였다.

## 2.2 열전달 해석 및 해석조건

스트라이핑 하중을 받는 구조물의 열응력은 스트라이핑 침투 두께에 따라 결정되는데 노내 상부구조물 하단부의 평판이나 튜브 구조에 대하여 일차원 열전달 해석을 수행함으로써 보수적인 평가를 수행할 수 있다. 구조물과 유체 사이의 막을 통한 스트라이핑 감쇠는 막계수와 스트라이핑 주파수에 의존하는데 스트라이핑을 받는 환경에서의 동적 막계수는 일반적으로 알려져 있지 않다. 따라서 변수해석을 통하여 보수적이고 적합한 막계수와 스트라이핑 주파수를 선정하게 되는데 여기서는 막계수 값을 28400, 284000 및 454400 J/sec-m<sup>2</sup>-°C를 사용하고 스트라이핑 주파수로 0.5, 1.0 및 2 Hz를 각각 사용하였다.

일차원 열전달 해석은 범용 유한요소 해석코드인 ANSYS[5]의 4절점 열전달 요소인 PLANE55 요소를 사용하여 수행하였고 해석에 사용된 재료는 노내 상부구조물의 주재료인 316 스테인레스강과 상부구조물 하부판에 스트라이핑 방지용으로 설치할 인코넬 718강이며 스트라이핑 하중의 평균 온도인 533°C에서의 물성치를 각각 사용하였다. 스테인레스 316강에 대한 밀도와 비열 및 열전도도는 각각 7746 Kg/m<sup>3</sup>, 576.1 J/Kg-°C, 21.3 W/m-°C이고 인코넬 718강에 대한 밀도와 비열 및 열전도도는 각각 8039 Kg/m<sup>3</sup>, 496.4 J/Kg-°C, 18.52 W/m-°C이다.

그림 3과 그림 4는 각각 여러 가지 스트라이핑 주파수와 막계수 값에 따른 스트라이핑 침투 깊이를 보여주고 있는데 이는 해석 결과인 스트라이핑 이력치를 포괄하는 곡선을 얻음으로써 구해졌다. 해석결과 구조물 표면으로부터 약 0.3cm 정도의 깊이에는 표면으로부터의 스트라이핑이 미소한 양만큼만 전달되었고 또한 표면으로부터 0.7cm 정도의 깊이에서는 거의 스트라이핑이 전달되지 않음을 알 수 있었다. 그리고 다음절에서 설명되듯이 구조물 표면에서의 예상되는 스트라이핑 응력이 스테인레스 316강의 허용치를 넘을 것으로 예측되기에 고온에서의 항복응력이 큰 재질인 인코넬 718강을 구조물의 표면에 라이너로 설치하여 스트라이핑 응력이 직접적으로 스테인레스 316강인 노내 상부구조물의 하부판에 직접 발생하지 않도록 제안하였고 인코넬 718 라이너의 두께는 해석의 결과를 토대로 잠정적으로 0.6cm로 정하였다. 또한 하부판에 부착된 쉬라우드 튜브도 인코넬 718강을 사용하며 두께는 잠정적으로 0.6cm로 하였다.

그림 3과 그림 4에서 스트라이핑 주파수가 커질수록 스트라이핑 침투 깊이는 감소하고 막계수가 284000 J/sec-m<sup>2</sup>-°C보다 커지면 스트라이핑 감쇠에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 반면에 막계수가 28400 J/sec-m<sup>2</sup>-°C일 때에는 막계수가 284000 J/sec-m<sup>2</sup>-°C일 때와 비교하면 감쇠가 약 40% 정도 발생함을 알 수 있다. 그림 5는 스테인레스 316강과 인코넬 718강을 각각 해석하였을 때의 결과를 비교하였는데 표면에서의 거리에 따른 온도분포가 거의 차이가 없음을 볼 수 있었고 그림 6은 참조로 일정한 시각에서 구조물의 스트라이핑 이력을 보여주고 있으며 최대 스트라이핑 기

울기를 볼 수 있다.

### 2.3 스트라이핑 응력 계산

스트라이핑 응력은 구조물의 표면이 실제로는 감소된 스트라이핑 하중을 받지만 감소를 무시한 하중값을 사용함으로 보수적으로 평가될 수 있으며 그림 6에서 보면 스트라이핑이 표면에서 약 0.13cm 정도 깊이까지 선형적으로 작아짐을 알 수 있다. 스트라이핑 응력 계산식은 다음과 같이 표현될 수 있다(부록 1 참조).

$$\sigma_{\text{striping}} = E\alpha (1 - 0.13/t) (T_{\text{striping}}/2)/(1-\nu)$$

여기서  $t$ 는 구조물의 벽 두께이며  $T_{\text{striping}}$ 는 구조물 표면에서의 스트라이핑 진폭을 나타낸다.  $E$ ,  $\nu$ , 및  $\alpha$ 는 각각 영률, 포와송비 및 열팽창계수를 나타낸다. 노내 상부구조의 하부판을 두께 2.5cm 인 316 스테인레스강으로 설계하고 인코넬 718 라이너를 설치하지 않은 경우에는 하부판 표면에서의 열응력이 표 1의 물성치[6]를 이용하면 147.1MPa로 계산되고 이는 항복응력 116MPa 보다 는 크지만 고온구조 설계코드인 ASME Code Case N-47[7]에서 요구되는 설계 허용치  $\overline{3S_m}$  (533°C 일때 238MPa)보다는 작은 값이다. 그러나 60년 수명에 대한 스트라이핑 하중의 주파수가  $1.89 \times 10^9$ 에 달하고 고온구조 설계코드에 명시된 피로한도 적용 범위인  $1 \times 10^6$ 를 크게 상회하기 때문에 고온에서의 구조적 건전성을 입증하기 위한 상세해석이 추가적으로 요구된다. 한편, 노내 상부구조물 하부판에 인코넬 718 라이너를 설치하는 경우에는 표 1에 보인 것과 같이 인코넬 718 강의 기계적 물성치[6]를 위 식에 대입하고 앞의 해석에서 구해진 구조물 표면에서의 스트라이핑 진폭 값인 190°C와 인코넬 718 라이너와 쉬라우드 튜브의 두께 0.6cm를 사용하여 표면에서의 열응력 133.2MPa를 얻었다. 이는 인코넬 718 강의 물성치의 확보를 통하여 고온구조 설계코드의 설계 허용치  $\overline{3S_m}$ 를 구한뒤 비교평가가 요구되나 533°C일 때 인코넬 718의 항복응력이 882.3MPa인 점을 고려하면 매우 작은 값으로 구조적으로 건전할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 열 스트라이핑 하중을 받는 노내 상부구조물의 하부판을 보호하기 위하여 고온에서의 성질이 우수한 인코넬 718 강을 라이너로 도입하였고 그 타당성이 입증되었다. 또한 실제 환경에서는 온도변동이 비주기적일 것이고 구조물에 작용되는 스트라이핑 하중이 감소된 것을 고려하면 실제의 응력은 위에서 보인 수치보다 낮을 것으로 예측된다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 칼리머의 노심을 통과한 소듐이 노내 상부구조 하단부에 발생시키는 열 스트라이핑에 대하여 단순 일차원 열전달 해석을 수행하고 제시된 스트라이핑 응력식을 이용하여 열응력을 간단하게 계산하였다. 해석의 결과 스트라이핑 주파수가 커질수록 스트라이핑 침투 깊이는 감소하고 노내 상부구조 하부판과 소듐 사이의 막계수가 284000 J/sec-m<sup>2</sup>-°C 보다 크면 스트라이

핑 감쇠에 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 또한 노내 상부구조의 스테인레스 316 하부판만으로는 열응력이 커서 고온에서의 건전성을 확보하기 어려울 것으로 판단되지만 하부판의 바닥면에 고온에서의 성질이 우수한 인코넬 718 을 라이너로 부착하여 스트라이핑 문제를 해소할 수 있을 것으로 보였다. 앞으로 해석의 정확도와 신뢰성을 높이기 위하여 스트라이핑 포텐셜과 감쇠량을 구할 수 있는 시험 및 상세 열전달 해석과 응력해석이 요구된다.

참고문헌

1. 액체금속로 요소기술 개발, KAERI/RR-1528/94
2. A. Biswas, P.Chellapandi, S.C. Chetal, and S.B. Bhoje, "Fracture Mechanics Approach To Derive Thermal Striping Limit For SS 316" , IWFGR/90, IAEA, 1990
3. Preapplication Safety Evaluation Report for the Power Reactor Innovative Small Module (PRISM) Liquid Metal Reactor, NUREG-1368, US NRC, 1994
4. Private Communication with M. Patel, GE, 1996
5. ANSYS, Version 5.2, Swanson Analysis Systems Inc. , USA
6. Aerospace Structural Metals Handbook, Battelle Columbus Lab., USA, 1980
7. ASME B&PV Code, Code Case N-47, ASME, New York, 1992

표 1. SS 316 과 인코넬 718 의 기계적 물성치 (533°C)

	Yield Strength (MPa)	Poisson's Ratio	Elastic Modulus (GPa)	Mean Thermal Expansion Coefficient( $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ )
SS 316	116	0.304	157	18.1
I-718	882.3	0.273	171.7	14.35

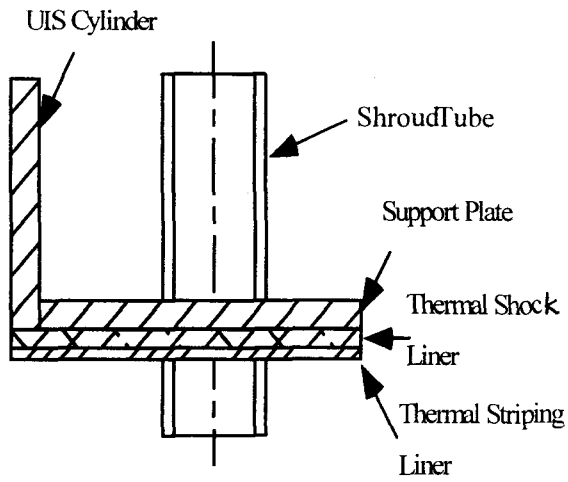


그림 1. UIS 하단부 개략도

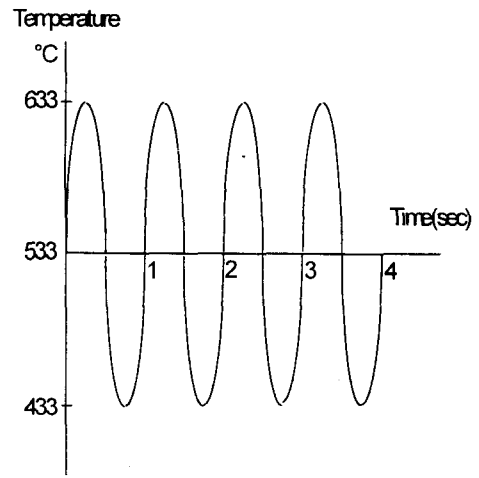


그림 2. 스트라이핑 하중선도 (4 사이클)

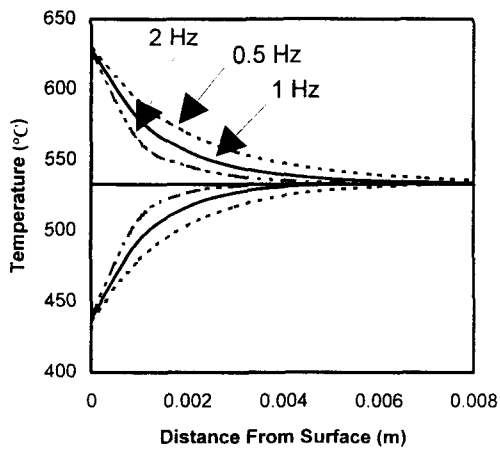


그림 3. 주파수에 따른 스트라이핑 침투

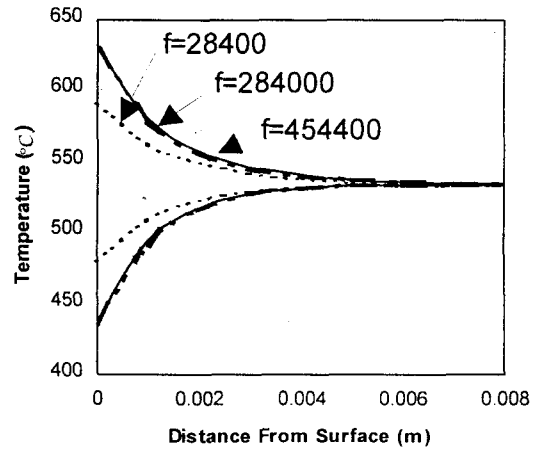


그림 4. 마계수에 따른 스트라이핑 침투

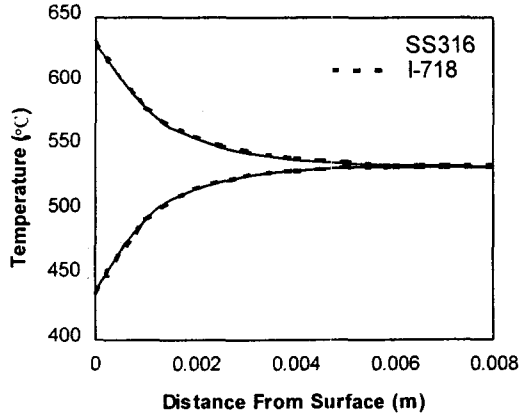


그림 5. SS316과 I718의 스트라이핑 침투 비교

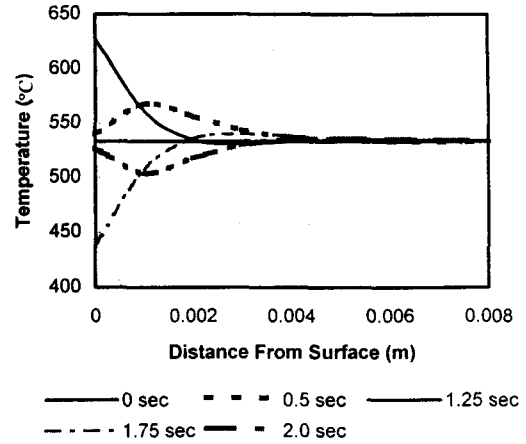
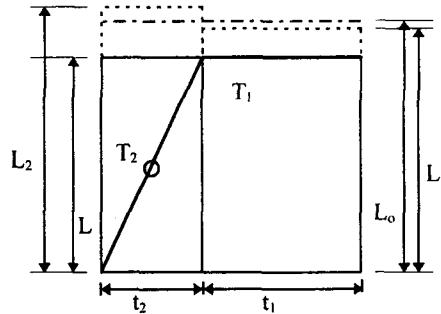


그림 6. 스트라이핑 해석시 순간 온도분포

부록 1. 스트라이핑 응력 계산

$$\begin{aligned}
 L_1 &= L(1 + \alpha T_1) & (1) \\
 L_2 &= L(1 + \alpha T_2) & (2) \\
 \sigma_1 &= \frac{E}{1 - \nu} \frac{L_1 - L_0}{L_1} \\
 \sigma_2 &= \frac{E}{1 - \nu} \frac{L_2 - L_0}{L_2} & (3)
 \end{aligned}$$



위 그림에서 보듯이 오른쪽 사각형은 일정온도  $T_1$ 을 받고 왼쪽 사각형은  $T_b$  부터  $T_1$  까지 선형 온도분포를 받고 있으며 평균값은  $T_2$  이다. 여기서 외력이 없으므로  $\Sigma F=0$  를 이용하면  $\sigma_1 t_1 + \sigma_2 t_2 = 0$ . 식 (1) - (3)을 대입하면  $L_0 = t / (t_1 / L_1 + t_2 / L_2)$  이다. 왼쪽 사각형의 최대응력  $\sigma_2$ 은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu} \frac{L_2 - L_0}{L_2} = \frac{E\alpha(T_2 - T_1)t_1}{(1 - \nu)t} \frac{1}{1 + \alpha \left( \frac{t_1 T_2 + t_2 T_1}{t} \right)} \quad \text{앞식의 오른쪽 항에서}$$

$\alpha \left( \frac{t_1 T_2 + t_2 T_1}{t} \right)$  는  $10^{-3}$  or  $10^{-4}$  크기이므로 무시할 수 있으며 따라서 오른쪽 항은  $\frac{E\alpha(T_2 - T_1)t_1}{1 - \nu t}$  가 된다. 그리고  $T_2 - T_1 = (T_b - T_a)/2$  를 대입하면  $\sigma_2 = \frac{E\alpha}{1 - \nu} \left(1 - \frac{t_2}{t}\right) \frac{T_b - T_a}{2}$  이다. 여기서  $t_2$  는  $T_b$  에서  $T_a$  까지 선형온도구배를 받는 두께를 나타낸다.