

액체금속로 고온 구조물의 크립-피로 손상평가 방법 비교 분석

김종범, 이형연, 유 봉, 윤삼손

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 연구에서는 미국, 프랑스, 일본의 고온구조 설계지침서의 크립-피로 손상평가 방법을 살펴보고 고온하중을 받는 불연속 구조물에 대하여 범용 유한요소 해석코드인 ANSYS와 ABAQUS를 이용한 열전달 및 응력해석을 수행하여 각국의 코드 절차에 따른 크립-피로 손상 평가를 하였다. 이들 결과를 점소성 비탄성 구성식을 적용한 비탄성해석 결과와 비교평가하였다. 본 연구에서 분석한 불연속 구조물의 경우에 대한 평가 결과 미국의 ASME Subsection NH에 의한 방법이 비탄성 해석결과에 가장 가까운 결과를 주며, 일본의 BDS에 따른 평가 방법은 적용성이 가장 편리함을 알 수 있었다.

1. 서론

액체금속로 KALIMER[1]의 운전압력은 대기압에 가깝지만 운전온도가 530 °C 정도의 고온이고 노심 입출구 소듐의 온도차가 146 °C 정도에 이르기 때문에 원자로 구조물에 과도한 열응력과 열변형이 발생하고 이로 인한 열스트라이핑 현상과 열피로 현상 및 저주기 피로 현상이 두드러지게 나타나게 되고 이는 주요 구조물의 심각한 손상을 유발할 수 있다. 또한 원자로용기의 직경변화를 유발할 수 있는 라체팅과 구조물의 수명에 중대한 영향을 끼칠 수 있는 크립-피로 상호작용 등이 발생하기 때문에 이에 대한 철저한 대비가 필요하다. 현재 액체금속로의 선진국인 미국과 일본 및 프랑스에서는 각각 독자적인 고온구조설계 지침서를 개발하여 지속적으로 개선·보완하고 있으며 이들의 특징을 간단하게 살펴보면 다음과 같다.

미국의 고온구조 설계지침의 개발은 고온 가스냉각로와 액체금속로의 개발에 사용할 목적으로 1967년 ASME B&PV Code, Section III, Code Case 1331로부터 시작하여 1975년 Code Case 1592, 1977년 Code Case N-47을 거쳐 계속적인 보완을 하여 1995년 Subsection NH[2]로 발전되었다. 그런데 Code Case N-47부터는 고온 가스냉각로나 액체금속로 뿐만 아니라 일반적인 고온구조물에 적용할 수 있도록 하였으며, 현재까지 전 세계적으로 액체금속로 고온 구조물의 구조건전성을 확보할 수 있도록 사용되고 있다.

프랑스는 풀형 액체금속로 실증로인 Superphenix[3]의 개념설계 단계였던 1970년대에는 미국의 Code Case N-47을 사용하였는데 당시의 설계코드가 프랑스에서 설계하는 대용량 풀형 액체금속로 원자로용기와 내부구조물을 설계함에 있어서 고온 좌굴설계와 변형률제어 하중 발생시 탄성추종이 발생하는 경우에 대한 상세한 설명 등이 부족하다고 판단하여 이를 기초로 한 자국의 설계코드를 개발하기 시작하였다[4]. 따라서 1967년 건설한 실험로 RAPSODIE의 운전 경험을 토대로 방대한 연구개발 계획을 수립하여 Code Case N-47로 적용이 부족했다고 판단된 프랑스 재료에 대한 재료사양, 크립-피로 평가, 크립-라체팅 및 크립의 영향을 무시할 수 있는 온도제한치 등을 개발하여 1985년 RCC-MR[5] 코드를 개발하였다. RCC-MR 코드는 실험로 RAPSODIE와 Phenix의 경험과 실증로 Superphenix의 설계 적용 경험을 반영하여 설계제작자의 입장에서 기술적인 적용성을 향상시킨 것으로 평가된다.

일본도 실험로 JOYO의 설계시에는 ASME Section III와 Code Case 1331을 사용하였고 루프형 원형로 MONJU를 개념 설계할 때에도 미국의 코드를 사용하였는데 Code Case 1331의 탄성설계 지침에 따라 설계한 고온 소듐 배관이 과도한 보수성 때문에 너무 길게 되어 이를 줄여 경제성을 향상시키기 위한 목적으로 자국의 설계코드를 구축하기 시작하였다[4]. 1978년 배관설계지침인 PDS와 용기설계지침인 VDS를 개발하여 1984년

액체금속로 1종 기기의 고온설계지침인 BDS[6]로 발전시켰다. BDS의 특징은 방대한 양의 구조물 시험과 재료 시험을 수행한 결과를 반영하여 단순화된 탄성해석 방법을 제시하였고 이를 상세 비탄성해석 결과와 비교하여 코드의 적용성을 검증하였다는 점이다. 미국의 액체금속로인 FFTF와 CRBRP의 경우에 탄성해석 방법에 따른 설계가 과도한 보수성 때문에 곤란하여 상세 비탄성해석을 수행한 사례가 있는데, 일본은 인허가를 받기 위하여 상세 비탄성해석을 수행하는 것이 시기상조라는 판단을 하여 보다 광범위한 탄성해석 및 단순 탄성해석 방법을 개발하였던 것으로 파악된다.

앞에서 살펴본 것과 같이 프랑스와 일본은 ASME 코드를 각각 자국의 액체금속로에 설계 적용시 발생한 과도한 보수성 문제를 극복하기 위하여 ASME 코드의 개념을 기초로 하여 독자적인 코드를 개발하였지만 미국도 자국의 코드의 과도한 보수성을 줄이기 위한 연구노력 끝에 Severud[7]의 방법을 채택한 N-47-29(1989년판)을 발행하였으며 이것을 1995년 Subsection NH로 격상시켰기 때문에 3국의 설계코드를 단순 비교 평가하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 각 설계코드의 크립-피로 손상평가 과정의 특성을 살펴보고 이를 고온하중을 받는 불연속 구조물에 대해 적용한 예제를 통하여 코드의 적용성과 편리성 및 보수성을 분석하였다.

2. 크립-피로 손상평가 방법

2.1 ASME Subsection NH 코드의 방법

Subsection NH는 Section III, Subsection NB의 적용온도 범위를 넘는 고온구조물에 대해 주로 탄성해석방법에 의한 설계를 권장하고 있으며 경우에 따라 비탄성해석에 의한 설계도 허용하고 있지만 이 경우에는 인증된 비탄성해석 방법을 사용하여야 하며 이를 설계보고서에 수록하여야 한다. 여기서는 Subsection NH에 따른 크립-피로 평가와 관련된 사항에 대하여 개략적으로 살펴보기로 한다.

크립-피로에 의한 손상은 크립과 피로에 대한 각각의 누적손상을 계산한 뒤 단순 선형중첩에 의하여 합한 다음 이를 그림 1에 나타낸 크립-피로 손상 포락선(creep fatigue damage envelope)에 적용하여 누적 손상계수가 곡선의 내부에 위치하는 지를 살펴 구조건전성 여부를 판정하게 된다.

탄성해석법에 따른 피로손상 평가 절차를 살펴보면 가해진 하나의 사이클 하중에 대하여 각각의 시간에서의 탄성해석 변형을 범위 성분들을 구하고 이로부터 등가 최대 변형을 범위를 계산한다. 탄성적으로 구한 값은 실제의 비탄성변형을 과소평가하기 때문에 이를 적절하게 보상에 주어야 하는데 다음과 같이 수정된 노이버 법칙(Neuber rule)을 활용한 세가지 보상식 중의 하나를 사용해서 수정 최대 변형을 범위($\Delta \epsilon_{mod}$)를 구하게 된다.

$$\text{(방법 1) } \Delta \epsilon_{mod} = \left(\frac{S^*}{S} \right) K^2 \Delta \epsilon_{max}, \quad \text{(방법 2) } \Delta \epsilon_{mod} = \frac{K^2 S^* \Delta \epsilon_{max}}{\Delta \sigma_{mod}}$$

$$\text{(방법 3) } \Delta \epsilon_{mod} = K_e K \Delta \epsilon_{max}$$

여기서 $\Delta \sigma_{mod}$ 는 $\Delta \epsilon_{mod}$ 에 대한 등가 응력범위를 나타내며 K_e 는 설계코드에 따른 변형률집중계수를 나타내며, 위의 세가지 경우 중에서 첫번째 방법은 국부적인 소성변형과 크립의 영향을 고려한 보수적인 방법인데 K 는 등가 응력집중계수이고 S^* 와 \bar{S} 는 그림 2에 표시되었듯이 각각 $\Delta \epsilon_{max}$ 와 $K \Delta \epsilon_{max}$ 에서의 응력저시값이다. 두 번째의 경우도 수정된 노이버 법칙을 이용한 식인데 첫 번째 방법보다 덜 보수적이고 세 번째 방법이 가장 보수적인 경우이다. 위에서 설명된 절차를 따라 수정 최대 변형률범위를 구하고 나면 다축 응력 소성영향과 포와 송비를 다음과 같이 고려하는 계수 K_v 를 사용하여 최종적인 총 변형률 범위(ϵ_t)를 다음과 같이 구한다.

$$\epsilon_t = K_v \Delta \epsilon_{mod} + K \Delta \epsilon_c$$

여기서 $\Delta \epsilon_c$ 는 등가 크립응력 σ_c 를 하중제어 응력으로 사용해서 구한 크립 변형률 범위이고 K 는 국부 형상집중 계수이다. 식에서 오른쪽 두번째 항은 피로손상값을 구할 때 추가적인 보수성을 부여하기 위하여 크립 손상값을 더한 것을 알 수 있다. 그러면 총 변형률범위를 변형률 피로 곡선에 적용하여 허용횟수를 구하여 피로 손상계수를 계산하고, 누적 피로손상 계수는 작용하는 모든 형태의 사이클 하중에 대하여 설명된 절차와 같은 평가를 반복해서 피로 손상계수를 계산하고 이를 모두 선형적으로 더하여 구한다.

탄성해석법에 따른 크립 손상계수를 구하는 절차를 살펴보기로 한다. 응력 사이클 동안에 응력응답 평가절차는 우선 지속시간 온도(T_{HT})에서의 등시간 응력-변형률 선도(isochronous stress-strain curve)에 j 번째 사이클 형태에 대한 총 변형률 범위(ϵ_i)를 적용하여 응력값 S_j 를 구하고 이를 지속시간 동안의 초기 응력으로 정의한다. 그리고 이를 평균 사이클시간(\bar{t}_j) 동안의 응력이완과 다축 응력상태를 고려해 주기 위하여 많은 실험과 연구를 통하여 설정된 다음 식을 이용하여 이완 응력수준(S_r)을 계산한다.

$$S_r = S_i - 0.8G(S_i - \bar{S}_r)$$

여기서 \bar{S}_r 은 단축 이완 모델에서 이완된 응력수준을 나타내고 G 는 응력사이클의 두 극단 경우 각각에 대한 응력상태에 대해 결정된 다축응력계수(multiaxiality factor)를 나타내며 1보다 크지않은 값이다. 그리고 평균사이클 시간 동안의 하중제어 과도기간이 응력이완에 영향을 미치면 이를 고려해 주어야 하며 이때에는 j 번째 사이클 형태의 하중이 가해지는 동안에 발생하는 최대 온도를 사이클 과도온도(T_{tran}) $_j$ 로 정의하여 과도기간 중에 발생하는 크립손상을 평가하는데 사용한다. 앞에서 언급한 과정을 P 개의 사이클 하중 형태에 대하여 반복하여 그림 3과 같은 응력이력 포락선(envelope stress-time history curve)을 결정한다. 여기서 S_{LB} 는 등가 크립응력(σ_c)의 1.25배를 취한 하한치 응력이완 수준을 나타내고 크립손상 평가에 사용될 응력 포락선은 그림 3의 상한값들을 잇는 굵은 선을 일컫는다. 이 응력 포락선을 q 개의 시간 간격으로 나누어서 각 시간 간격 내에서 편리한 방법으로 계단식 함수로 표현하되 각각의 시간 간격에서의 응력(S_k)과 온도(T_k)를 시간 간격 내에서 최대 크립손상을 나타낼 수 있도록 하는 상수값을 취한다. 이렇게 구한 응력값을 다시 한번 보수성을 주기 위하여 1.5 배를 하여 크립 피단곡선에 적용하여 허용시간을 구하여 크립손상계수를 계산할 수 있다. 이를 각각의 시간 간격에 대하여 반복해서 크립손상 계수를 구하여 모두 선형적으로 더하면 누적 크립 손상계수가 된다.

Subsection NH에서는 크립과 피로현상이 연계된 복합적인 크립-피로 손상계수를 구하는 방법으로 단순히 선형적으로 이들을 더하여 이를 각 사용재료에 따라 정해 놓은 비선형 이직선 설계곡선의 제한치(그림 1)와 비교하는 방법을 채택하고 있는데 이는 사용이 편리하여 프랑스와 일본에서도 같은 방법을 적용하고 있다.

2.2 RCC-MR 코드의 방법

프랑스의 RCC-MR은 액체금속로의 전용 설계코드로 개발되었으며 이는 미국의 Subsection NH나 일본의 BDS와는 달리 설계코드 내용의 각 부분에서 무시할 수 있는 크립 경우(negligible creep)와 크립을 무시할 수 없는 경우(significant creep)에 대하여 분리해서 다루고 있는 특징이 있다. 그리고 RCC-MR도 주로 탄성해석법을 이용하는 방법에 초점을 맞추고 있지만 각 부분에서 탄성해석 절차와 더불어 비탄성해석에 대한 언급을 많이 하고 있음을 알 수 있다. 여기서는 크립을 무시할 수 있는 경우와 크립이 중요한 경우 각각에 대한 크립-피로 손상평가 절차에 대하여 간략히 살펴보기로 한다.

(가) 크립을 무시할 수 있는 경우

크립은 전체 운전 기간 동안에 최대온도가 규정치보다 작거나, 또는 전체 운전 기간이 N 개의 영역으로 나뉘어진 하나의 작용시간 t_i 와 재료가 크립의 영향을 크게 받지 않으면서 유지될 수 있는 최대시간 T_i 의 비의 합이 1보다 작으면 무시할 수 있다. 이 경우는 크립 손상계수는 구할 필요가 없으므로 단지 피로 손상계수를 구하는 절차에 대하여 알아본다. 우선 탄성해석에 의해 계산된 변형률 범위는 소성변형의 영향을 포함할 수 있도록 확대되어야 한다. 따라서 다음과 같이 소성변형의 영향을 고려하는 총 변형률 범위 계산 절차를 따르며 이는 그림 4에 도식적으로 나타나 있다. $\Delta\epsilon = \overline{\Delta\epsilon_1} + \overline{\Delta\epsilon_2} + \overline{\Delta\epsilon_3} + \overline{\Delta\epsilon_4}$

여기서 $\overline{\Delta\epsilon_1}$ 는 탄성 변형률범위이고, $\overline{\Delta\epsilon_2}$ 는 일차응력 범위가 $\Delta[P_m + 0.67(P_b + P_L - P_m)]$ 일 때의 소성증분을 나타내는데 일차응력의 크기가 작은 경우에는 0으로 처리한다. 그리고 확대계수 K_ϵ 을 설계코드에서 구한 뒤 노이버의 방법에 따라 위 식의 오른쪽 세 번째 항을 계산하는데 일차응력의 크기가 작은 경우에는 아래

식으로 계산되며 또한 다축응력 상태 보정계수 K_v 를 설계코드에서 찾아 네 번째 항을 다음과 같이 계산한다.

$$\overline{\Delta\epsilon_3} = (K_\epsilon - 1) \overline{\Delta\epsilon_1}, \quad \overline{\Delta\epsilon_4} = (K_v - 1) \overline{\Delta\epsilon_1}$$

위와 같이 구해진 변형률 범위를 모든 형태의 운전하중에 대하여 계산한 뒤 ASME Subsection NH의 방법과 마찬가지로 누적 피로손상 계수를 구한다.

(나) 크립을 무시할 수 없는 경우

크립변형이 크게 영향을 미치는 것으로 판정어 된 경우에는 작용하는 모든 종류의 하중 사이클에 대해서 누적되는 크립과 피로에 의한 손상을 평가하여야 하며 ASME Subsection NH와 마찬가지로 크립과 피로에 대한 손상을 따로 계산한 뒤 선형적으로 더함으로써 연계 손상평가를 수행하게 된다.

피로 손상계수를 구하기 위한 총 변형률 범위는 탄성해석적으로 구한 값에 소성변형과 크립변형에 의한 영향을 보상해 주어 이를 더함으로써 산정하며 다음 식으로 표현된다.

$$\overline{\Delta\epsilon} = \overline{\Delta\epsilon_{el+pl}} + \overline{\Delta\epsilon_{cr}}$$

위식의 오른쪽 첫 번째 항의 소성에 의한 영향을 고려해 주는 절차는 앞 절의 크립을 무시할 수 있는 경우와 동일하며 크립에 의한 영향을 반영하는 두 번째 항 크립변형률은 다음과 같이 구한다. 지속시간 동안의 최대온도를 θ^* , 지속시간 동안 온도가 크립영향을 나타내는 영역에 있는 시간을 T^* , 사이클 동안의 평균 일차응력 강도를 $Mean \bar{P}$, 응력 범위를 $\overline{\Delta\sigma}^*$ 라 표시한다. 그리고 최소 항복응력값에 대한 대칭계수 K_s (Symmetrization coefficient)를 설계코드에서 찾아 지속시간 동안의 응력 σ_k 를 다음과 같이 계산하여 설계코드에서 제시한 크립 방정식에 적용하여 크립변형률을 구한다.

$$\sigma_k = Mean \bar{P} + K_s \overline{\Delta\sigma}^*$$

크립 파단 손상계수는 각각의 하중 사이클에 대해서 시간의 함수인 온도와 앞에서 구한 지속시간에서의 응력 값(σ_k)을 가지고 $\sigma_k/0.9$ 의 응력수준에 대하여 계산되며, 각 사이클에 대한 값을 선형으로 더하여 누적된 크립 파단 손상계수를 구한다. 이렇게 여러 하중 사이클에 대한 누적 크립 손상계수를 구하는 과정은 ASME Subsection NH보다 단순화되어 크게 다르지만 응력 사이클에서 지속시간이 끝나기 전에 응력완화가 발생하는 것을 고려하기 어렵기 때문에 지나치게 보수적인 결과를 줄 수 있다[8]. 크립과 피로의 연계에 의한 손상평가는 ASME Subsection NH와 마찬가지로 크립과 피로손상 계수들을 그림 1의 이직선 크립-피로 연계곡선에 적용하여 그 건전성 여부를 판단한다.

2.3 BDS 코드의 방법

크립-피로 손상평가의 기본 원칙은 ASME Subsection NH와 유사하나 탄성해석에 의해 개선된 사항들이 포함되어 있다. 일차응력과 이차응력 강도의 합이 수정된 shakedown 한계를 넘을 때 탄성추중계수를 사용하여 탄성추중에 따른 변형률 범위의 확장을 계산하는 지침이 포함되어 있다. 또한 크립손상(Dc)은 상수응력값이 Sg 일 때, 일차 및 이차 응력이완일 때와 첨두응력이완시의 값들의 합으로 구해지는데 이의 절차는 다음과 같다. 피로손상을 계산하기 위한 총변형률범위는 다음식으로 구한다.

$$\epsilon_t = K_\epsilon \epsilon_n + K_T \epsilon_F, \quad \epsilon_n = \frac{S_n}{E}$$

여기서 K_T 는 열침투변형률(ϵ_F)에 대한 탄성 응력집중 계수를 나타내며 K_ϵ 은 공칭변형률(ϵ_n)에 대한 응력집중 계수를 나타내는데 이들은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} K_\epsilon &= (S^* / \bar{S}) \cdot K^2 & \text{when } S_n &\leq 3\bar{S}_m \\ K_\epsilon &= \text{Max}[(S^* / \bar{S}) \cdot K^2, K \cdot K_e] & \text{when } S_n &> 3\bar{S}_m \\ K_e &= 1 + (q-1) \cdot \{1 - (3\bar{S}_m / S_n)\}, & q &= 3.0 \end{aligned}$$

여기서 K 는 등가 응력집중계수를 나타내며 S^* 와 \bar{S} 는 설계코드에서 응력지시값을 나타내며 응력설계응력강

도는 다음과 같이 구한다.

$$3\overline{S_m} = S_{rH} + 1.5S_{mc}, \quad T \geq 425 \text{ } ^\circ\text{C}$$

윗 식에서 좌변은 고온에 대한 일차와 이차응력에 대한 응력강도를 나타내고 우변 첫번째와 두번째 항은 각각 고온에서의 이완응력과 저온에서의 응력강도를 나타낸다. 위에서 응력집중계수 K_t 을 구하는 식에서 보듯이 BDS 코드에서는 Neuber 법칙과 탄성추종법을 따른 값의 최대치를 취함으로써 Neuber 법칙과 탄성추종법을 조합해서 사용하고 있음을 알 수 있다. 주목할 점은 탄성추종계수인 q 의 값은 그림 5에서 보듯이 탄성추종 변형률과 탄성변형률과의 비로 정의되는데 BDS에서는 많은 실험과 비탄성해석 결과에 의해 구한 값인 3.0을 사용하고 있다는 점이다. 이 값은 대부분의 경우 구조물에서 만족할만한 보수적인 값이지만 온도구배가 심하거나 특이한 경우에는 다르게 나타날 수도 있다는 점을 고려해야 한다. 누적 피로손상은 ASME Subsection NH와 같이 각각의 하중 사이클에 대한 피로손상을 선형적으로 더함으로써 구한다.

크립손상은 다음 식에 의해 계산된다.

$$D_C = D_{c1} + D_0^* + \sum_i D_i^* + \sum_j n_j D_j^*$$

이는 편의상 $D_C = D_{CN} + D_{CP}$ 로 표현되는데 D_{CN} 은 일차 및 이차응력에 대한 크립손상이고 D_{C1} 과 D_{C2} 의 합으로 표현되며, D_{CP} 는 침투응력에 대한 크립손상을 나타낸다. 윗식의 오른쪽 네개의 항중에서 마지막 항이 D_{CP} 를 가리키며 앞의 세개의 항들이 D_{CN} 을 나타낸다. D_{C1} 은 S_g 를 계산하는데 사용되며 BDS에서는 0.3을 사용하였고, (i)는 하중 사이클 번호를 나타낸다. BDS의 특징은 설계자의 편의를 위하여 설계코드에 D^* 와 D^{**} 를 온도와 유지시간에 따른 설계곡선으로 나타내어 수록하고 있다는 점이다. 이렇게 피로손상(D_f)과 크립손상(D_C)을 구하고 나면 전체 크립-피로손상은 ASME Subsection NH와 같이 그림 1에 보인 이직선 크립-피로 연계곡선에 적용하여 건전성을 평가한다. BDS 코드의 특징은 피로손상 계산을 위한 총 변형률 범위 결정에 탄성추종 방법을 적용하였고, 크립손상은 일차와 이차 응력 및 침투응력의 유지시간에 대한 영향을 분리하여 평가하여 ASME Subsection NH의 보수성을 줄이려 하였다.

3. 불연속 구조물에 대한 크립-피로 손상 평가 예제

본 연구에서는 미국, 프랑스, 일본의 고온구조 설계코드에 따른 크립-피로 손상 평가를 비교하기 위하여 그림 6과 같은 불연속 구조물을 대상으로 그림 7에 보인 것과 같은 열과도 하중에 대해 열전달해석 및 탄성 열응력해석을 수행하였다. 열전달 해석에는 범용유한요소 해석코드인 ANSYS[9]의 8절점 축대칭 열전달요소인 PLANE78 요소를 367개 사용하였으며 열응력해석에는 PLANE82 요소를 사용하였으며 열과도 하중은 축대칭 구조물의 안쪽에 적용하였고 경계조건은 그림 6에 나타나 있다. 구조물은 스테인레스 316강으로 만들어졌고 모든 물성치[2]는 온도의 함수로 적용하여 실제에 가까운 결과를 얻도록 하였다.

열응력 해석의 결과 발전소 기동을 나타내는 20시간과 정지를 나타내는 440시간에서 각각 최대 응력분포를 얻었으며 20시간일때의 응력강도 분포를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 보듯이 형상 불연속부와 인접한 실린더의 안쪽 위치에서 가장 큰 응력분포를 가짐을 알 수 있으며 여기서는 최대 응력강도점인 절점 409를 대상으로 크립손상과 피로손상을 각국의 코드에 따라 평가하였다.

3.1 3국의 설계코드에 따른 평가 결과 비교

ASME Subsection NH를 따라 평가한 결과는 그림 7의 열과도 하중이 100회 발생하였다고 가정된 경우 피로손상계수를 (방법1)을 사용한 경우 0.54를 얻었고 (방법3)을 사용한 경우는 10보다 커져서 (방법1)이 덜 보수적인 방법임을 확인하였다. 크립손상계수는 (방법1)에 따른 변형률로부터 0.267을 구하였고 (방법3)에 따른 변형률을 사용한 경우 0.317을 구하였다. 두 경우 모두 그림 1의 크립-피로 손상 평가곡선을 적용한 경우 구조적으로 건전하지 않은 결과를 주었는데 이는 본 연구에서 채택한 구조물 형상과 하중조건이 상당히 심한 응력을 일으키는 경우이기 때문이라 판단된다.

RCC-MR에 따른 크립-피로 손상평가는 100회의 하중이 작용하였을 경우 피로손상계수와 크립손상계수가 각각 3.23과 40000이 되었는데 크립손상계수가 큰 이유는 RCC-MR코드에서 크립과단시간을 구하기 위해 적용하는 응력값이 탄소성 변형을 범위를 적용한 응력값을 응력완화를 고려하지 않고 적용하였기 때문에 지나치게 보수적인 것으로 생각된다. BDS 코드를 사용하였을 경우 피로손상계수는 1.33, 크립손상계수는 0.309이 되었으며 세가지 평가코드를 사용한 경우 중에 적용성이 가장 편리함을 알 수 있었다.

이들 결과를 개략적으로 그림 1에 표시하고 표 1에 나타내었는데 ASME Subsection NH의 (방법1)을 따라 손상 평가를 수행한 결과가 가장 덜 보수적이고 RCC-MR이 가장 보수적인 결과를 주었는데 여기서는 실제의 손상계수를 알 수 없어서 평가의 정확성을 논의할 수는 없기 때문에 재료의 고온 비탄성거동을 잘 모사할 수 있도록 개발된 Chaboche 점소성구성식[10]을 이용한 내연적 적분방법을 개발하여 범용 유한요소 해석코드인 ABAQUS[11]의 사용자 부프로그램[12]으로 개발하여 이를 이용한 비탄성 해석을 수행하였으며 비탄성구성식에 사용된 재료상수들은 참고문헌[12]에 수록되어 있다.

3.2 비탄성 해석에 의한 크립-피로 손상평가

탄성해석에 의한 손상평가는 실제로 발생하는 비탄성 변형과 응력이완 등의 영향을 고려하기 위한 복잡한 보정계수를 구하는 과정이 필요하지만 비탄성응력해석을 수행하는 경우에는 이미 이러한 재료거동이 고려된 것이므로 응력해석 자체는 어렵지만 손상 계수 평가절차는 간단하며 여기서는 ASME Subsection NH에서 규정하고 있는 비탄성해석 절차를 따라 평가를 수행하였다. 우선, 피로손상계수를 구하기 위해서는 비탄성 응력해석으로 구한 최대 변형률범위 $\Delta \epsilon_{max}$ 를 설계피로곡선에 적용하고 또한 크립 손상은 구해진 응력값을 이용하여 유효응력 σ_e 를 다음식으로 구한 다음 이를 몇 구간으로 나누어 크립과단곡선에 적용해서 과단시간 T_d 를 구해 계산한다[1].

$$\sigma_e = \bar{\sigma} e^{\left[\left(\frac{J_1}{S_1} - 1 \right) \right]}, \quad J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3, \quad S_1 = \left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \right]^{1/2},$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2}$$

피로손상계수와 크립손상계수는 100회의 하중이 작용하였을 때 각각 0.28과 0.15가 되어 그림 1의 크립-피로 손상곡선 내에 위치하여 구조적으로 건전하다고 평가되었다. 손상계수가 탄성평가의 경우보다 작은 이유는 비탄성해석의 경우가 기동시의 변형을 크기는 탄성해석의 경우보다 크지만 정지시의 변위가 작아져서 전체 변형률 범위가 탄성해석시보다 작게 되었기 때문인데 이는 비탄성해석의 응력과 변형을 이력곡선이 탄성해석의 경우와 차이가 많이 나기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 미국, 프랑스, 일본의 고온구조 설계지침서의 크립-피로 손상평가 방법 과정과 특징들을 비교 분석하고 이를 고온열과도 하중을 받는 불연속 구조물에 대하여 적용하여 보았다. 표 1의 크립-피로 손상평가 결과를 그림 1에 개략적으로 표시하였는데 ASME Subsection NH의 (방법1)이 비탄성 해석평가와 가장 가까운 결과를 주고 BDS를 따른 평가방법이 적용성이 가장 편리함을 알 수 있었다. 하지만 크립-피로 손상 평가에 큰 영향을 주는 사항이 작용한 하중에 의해 발생한 응력을 일차응력과 이차응력으로 구분하는 방법이고, 또한 구조물의 불연속부위에서 발생하는 탄성추종의 영향에 따른 응력재분포를 어떻게 분류할 것인지에 대해서 좀 더 구체적인 연구가 필요하며, 여기서 수행한 한가지 경우만을 갖고 설계코드의 보수성과 정확성을 논의하기는 어렵다고 판단된다. 따라서 국내의 실정에 가장 잘 맞는 손상 평가 방법을 선정하기 위해서 앞으로 좀 더 다양한 종류의 구조물과 열과도하중 및 기계하중에 대해서 비교평가를 계속할 예정이며 구조물의 수명 동안 여러 가지 하중이 복합적으로 작용할 경우의 손상 평가에 대해서도 연구노력을 기울일 예정이다.

참고문헌

- [1] KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97, KAERI, 1997
- [2] ASME B&PV Code, Section III, Subsection NH, ASME, New York, 1995
- [3] Superphenix, Novatome news, Novatome, France, March 1986
- [4] Recommended Practice in Elevated Temperature Design, Vol. I - Current Status and Future Directions, Ed. by A.K. Dhalla, WRC Bulletin 362, April 1991
- [5] RCC-MR, Design & Const. Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Islands, France, 1985
- [6] 고속원형로 제1종 기기의 고온구조 설계방침(BDS), PNC, Japan, 1984
- [7] L.K.Severud, 'Creep-Fatigue Assessment Methods Using Elastic Analysis Results and Adjustment,' WHC, ASME PVP-Vol. 163, Honolulu, USA, 1989
- [8] High Temperature Structural Design, Ed. by L.H.Larsson, MEPL, 1992
- [9] ANSYS User's Manual, Version 5.3, Swanson Analysis Systems Inc., USA, 1997
- [10] J.L.Chaboche and G.Gailletau, 'Integration Methods for Complex Plastic Constitutive Equations,' Comput.Method.Appl.Mech.Engr., pp125-155, 1996
- [11] ABAQUS, Version 5.4, HKS, USA, 1995
- [12] 윤삼순, 이순복, 김종범, 이형연, 유봉, '점소성 구성식의 내연적 적분방법의 개발,' 대한기계학회 논문집 제출 (심사중), 1998

표 1. 미국, 프랑스, 일본의 설계코드에 따른 크립-피로손상 평가 결과 비교

평가 방법	피로손상계수	크립손상계수
ASME Subsection NH (방법1)	0.54	0.267
ASME Subsection NH (방법3)	> 10	0.317
RCC-MR	3.23	40000
BDS	1.33	0.309
비탄성 해석 방법(Subsection NH)	0.28	0.15

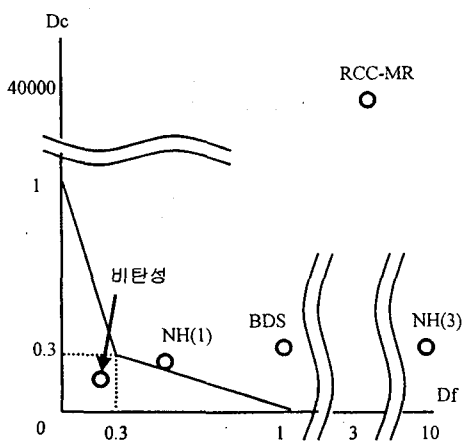


그림 1. 크립-피로손상 평가 포락선

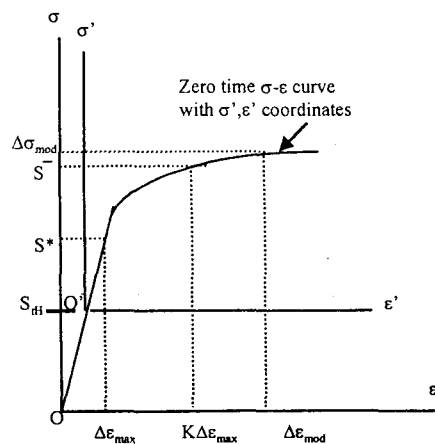


그림 2. ASME Subsection NH에 따른 응력-변형률선도

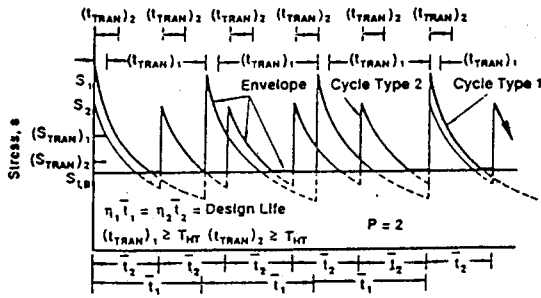


그림 3. 응력이력 포락선(Subsection NH)

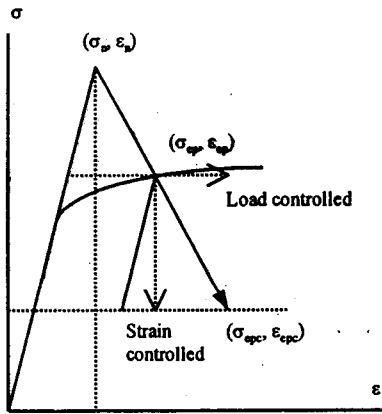


그림 5. 탄성추종 계수 평가도

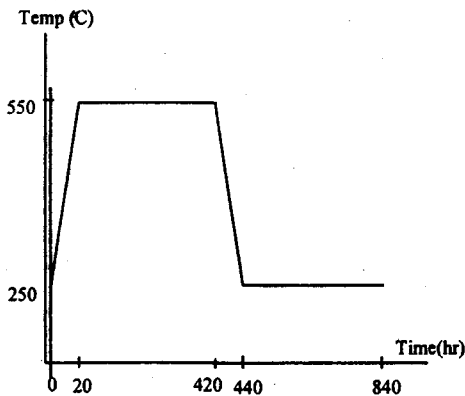


그림 7. 열과도 하중 개략도

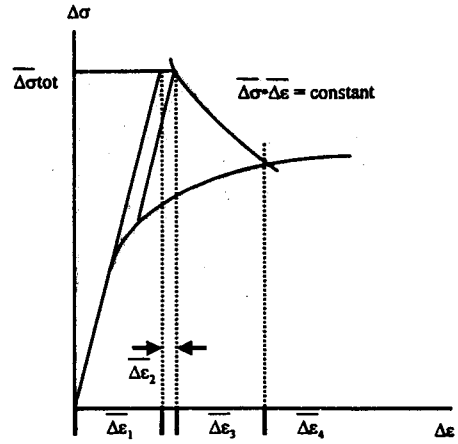


그림 4. 비탄성 변형률범위 예측(RCC-MR)

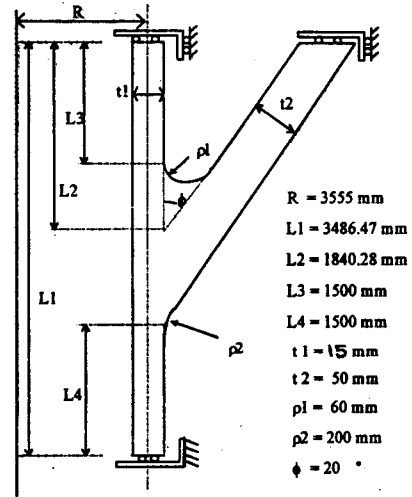
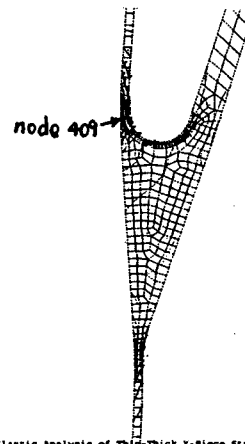


그림 6. 불연속구조물 해석 개략도



Thermal Elastic Analysis of Thin-Thickness Y-Piece Structure

그림 8. 응력강도 분포(20시간)