2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고온설계코드 DDS 의 라체팅 평가절차 분석 및 적용

Analysis and application of ratcheting evaluation procedure of Japanese high temperature design code DDS

이형연, 김종범, 이재한
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

본 연구에서는 반복 이차응력을 받는 환경에서 고온 구조물에 발생하는 진행성 비탄성 변형인 라체팅 평가를 위해 일본의 최근 제정 설계지침인 DDS 의 평가절차를 분석하고 한국원자력연구소가 수행한 라체팅 구조시험 결과를 적용하고 설계코드의 보수성을 분석했다. 기존의 고온구조 설계지침인 미국의 ASME-NH 와 프랑스의 RCC-MR 은 일차응력이 동반된 경우에 대한 평가절차만을 제시하고 있어 고온 자유액면의 상하 온도구배 이동에 따라 이차 막응력이 지배적인 실제 풀형 액체금속로의 라체팅 평가에는 부적합하였다. DDS 는 자유액면 부근의 라체팅 평가절차도 명시적으로 제시하고 있다. 이 설계지침의 보수성을 점검하기 위해 KAERI 의 Y-구조물 라체팅 구조시편을 이용한 시험결과와 비교분석한 결과 DDS 는 실제에 가깝게 라체팅 변형률을 정량적으로 평가하는 것으로 나타났다.

Abstract

In this study, the evaluation procedure of Japanese DDS code which was recently developed to assess the progressive inelastic deformation occurring under repetition of secondary stresses was analyzed and the evaluation results according to DDS was compared those of the thermal ratchet structural test carried out by KAERI to analyze the conservativeness of the code. The existing high temperature codes of US ASME-NH and French RCC-MR suggest the limited ratcheting procedures for only the load cases of cyclic secondary stresses under primary stresses. So they are improper to apply to the actual ratcheting problem which can occur under cyclic secondary membrane stresses due to the movement of hot free surface for the pool type LMR. DDS provides explicitly an analysis procedure of ratcheting due to moving thermal gradients near hot free surface. A comparison study was carried out between the results by the design code of DDS and by the structural test to investigate the conservativeness of DDS code, which showed that the evaluation results by DDS were in good agreement with those of the structural test.

1. 서론

고온에서 운전되는 스테인리스강 재질의 액체금속로 원자로 구조물에서 자중 또는 내압과 같은 일차응력 위에 비교적 큰 이차응력이 반복적으로 작용하면 각 하중 사이클에서 점진적으로 영구 변형이 누적되는 진행성 비탄성 변형(progressive inelastic deformation), 즉 라체팅 현상이 발생할 수 있으며 [1,2] 구조물에 고온 유지하중과 반복하중이 조합하여 작용하면 크리프-피로 손상이 발생할 수 있다[3,4]. 또한 일차응력이 없이 이차응력만으로도 라체팅 현상이 발생할 수 있지만[5] 기존의 ASME-NH[2]와 RCC-MR[6] 등의 설계 코드에서는 일차응력 위에 이차응력이 작용할 경우에 대한 라체팅 평가절차만을 제시하고 있어 실제 액체금속로의 라체팅 평가에 적합하지 못했다. 이에 따라 순수 이차응력에 의해서만 발생하는 라체팅의 평가절차가 개발되기에 이르렀으며 그와 같은 기능을 가진 설계지침 또는 평가지침으로는 일본 DFBR 의 설계코드인 DDS[7,8]와 EU 의 DCRC 가 채택한 Interaction Diagram 법[9] 등이 개발되었으며 프랑스는 RCC-MR 업그레이드 버전에서 라체팅 평가절차가 주요 개정 내용이라고 하지만[10] 아직 개정판이 출간되지는 않은 상태이다.

본 연구에서는 현재까지 나온 각국의 라체팅 평가절차의 주요 특징을 간략히 비교 분석하고, 이중 평가절차가 정량적으로 잘 정립되어 있는 DDS 의 평가절차를 분석하고 이를 KAERI 가 수행한 구조시험결과를 이용하여 DDS 절차의 보수성을 검토하였다.

2. 각 라체팅 평가지침의 특징

지침	Rule	적용 범위 (응력)	장점	단점	기타
ASME-NH*	O'Donnel-Porowski diag.***	일차 (막)+이차 (굽힘)	Well-established for *l.h.s* case load	자유액면 기인 라체팅 적용불가	Bree선도 개념 기초
RCC-MR *	Efficiency rule	일차 (막)+이차 (굽힘) 유효일차응력 도입(P+DQ 와 같은 e유발)	Well-established for *l.h.s* case load	자유액면 라체팅에 적용불가	CEA 개발 실증시험
DDS *	DDS rule	.일차 (막)+이차 (굽힘) .일차 (막)+이차 (막) .이차 (막) / 이차 (굽힘)	-체계적 절차제시 -자유액면 적용가	적용 절차 비교적 복잡	4가지 응력경우고려(DFBR)
DCRC **	Interaction Diagram Method	.일차 (막)+이차 (굽힘) .이차 (막) / 이차 (굽힘)	자유액면 라체팅에 적용가능	개략적 평가법 (상세 절차 무)	UK Leicester 대학 개발
R5 **	UK Shakedown Method	. 모든 경우(3 S_m screening)	*적용범위 넓다.*	-탄성응력 및 잔류응력 평가필요 - 너무 보수적	R5: ε limit 무Shkdwn 요구

* : 설계코드, ** : 평가코드, *** : Modified Bree diagram to cover creep region

미국의 고온설계지침인 ASME-NH는 라체팅 변형에 대한 평가지침에 기존의 Bree선도를 크립영역까지 확장하여 크립-라체팅 변형률에 대한 지침까지 제시하기 위해 O' Donnel-Porowski 선도를

채택하고 있다. 다른 국가들의 평가지침들도 선구자 코드인 ASME-NH의 기본개념을 적용 또는 응용하여 개발된 것이라고 할 수 있다. ASME-NH의 평가절차는 Fig. 1의 Bree선도에서 무차원 일차응력강도, X와 무차원 이차응력강도, Y를 먼저 계산하고 라체팅 영역인 R(R_1,R_2)에 들어갈 경우에만 전수명기간 동안 계산된 총 크립-라체팅 변형률이 설계 허용치인 모재 1%, 용접재 0.5%를 넘지 않을 것을 요구하고 있다. Fig.1에서 무차원 일차응력강도(X)가 영이면 무차원 이차응력강도(Y)가 아무리 증가해도 라체팅 영역 R에 들어가지 않기 때문에 이 선도에서는 일차응력강도가 적절한 크기를 넘어서야 라체팅이 발생한다. 따라서 일차응력이 무시할 정도로 작고, 이차 막응력에 의해 발생하는 액금로의 라체팅을 평가하는 데에는 적합하지 않다는 것을 알 수 있다.

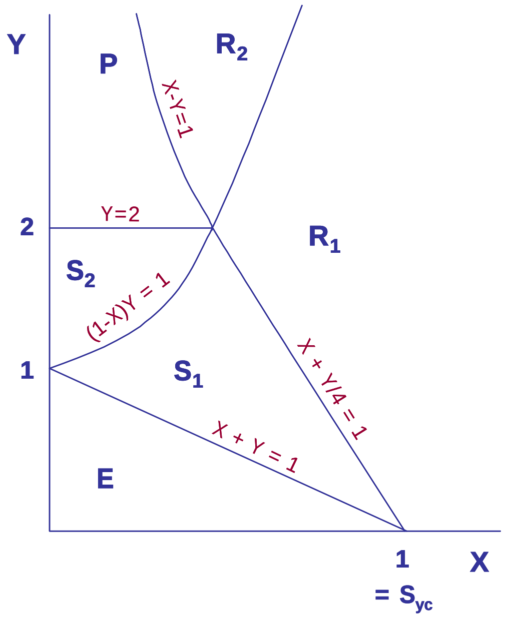


Fig.1 Effective creep stress parameter based on Bree diagram

프랑스의 efficiency rule은 이차응력의 반복작용에 의해 증가하는 유효 일차응력(effective primary stress)를 이용하여 efficiency 선도를 그리고 작용하중에 따라 계산된 efficiency index(V=P/P_{eff})와 secondary ratio, SR(=ΔQ/(P+ ΔQ)가 efficiency 선도(diagram)의 라체팅 영역에 들어가지 않을 것을 요구하고 있다. 이 방법도 적절한 크기의 일차응력이 조합될 경우에 대해 개발되어 자유액면이 이동하는 경우에는 적용이 부적합하다.

영국의 Interaction diagram method(IDM)[9]는 열응력과 일차응력의 함수로 라체팅 경계선을 설정하는 도식적 표현(graphical representation)법으로 수천 가지 경우의 사례해석을 통해 두 개의 Interaction diagram으로 응축(condense)시켰다. 그 하나는 Bree형 선도로 두께방향으로만 온도구배가 존재하는 경우, 다른 하나는 축방향으로도 온도구배가 존재하는 경우이다. 자유액면 이동에 따른 라체팅은 후자의 경우로 IDM도 DDS와 같이 자유액면 이동에 따른 라체팅을 고려할 수 있다. 그러나 이 IDM은 축대칭 원통형 박막 쉘구조물인 경우 그리고 일차응력에 의한 P형 손상이 적은 경우에만 적용이 가능하다. IDM도 efficiency rule에서와 같이 라체팅 영역에 들어가는 것 자체를 설계평가에서 허용하지 않는다. 그러나 DDS와 ASME-NH는 라체팅 영역, R에 진입을 해도 수명기간 동안 총 변형률이 허용치를 넘어서지 않는 범위 내에서는 조건부로 영역 R에 들어가는 것이 허용된다.

또한 영국의 고온평가지침인 R5도 라체팅에 대한 지침으로서 shakedown 법을 제안하고 있다. 이는 통상의 라체팅 발생을 방지하기 위한 shakedown 요건으로 다른 코드들에서도 제시되어 있지만 이는 다른 코드에서의 응력에 대한 $3S_m$의 screening에 해당되는 것으로 너무 보수적인 결과를 준다. 일본의 DDS 코드에 대해서는 다음의 3절에서 자세히 설명한다.

3. 일본 DDS의 라체팅 평가절차

일본의 DDS 코드는 Bree 형의 일차 막응력+이차 굽힘응력뿐만 아니라 일차응력은 작용하지 않고 순수 이차응력만이 작용하는 경우에 대한 라체팅 평가절차도 제시하고 있다. 자유액면이 상하로 이동하면 이차막응력이 원주방향으로 크게 발생하는데 이에 대한 새로운 평가절차와 이차 굽힘응력이 지배적인 경우에 대한 지침도 DDS 는 제시하고 있다.

3.1 변형률 제한치

DDS 에서도 ASME-NH 에서와 같이 라체팅에 대한 제한치는 변형률 제한치의 지배를 받는다. DDS 에서 변형률은 Fig. 2 에서와 같이 크게 세 가지, 즉 크립변형률, 라체팅 변형률 및 탄성추종 변형률로 분류되며 이들 세 가지 변형률의 총 합이 막변형률에 대해서는 1%, 굽힘변형률에 대해서는 2%를 넘지 않을 것을 요구하고 있다. 그러나 DDS 는 ASME-NH 에서와 같이 첨두 변형률에 대한 변형률 제한치(5%)는 두고 있지 않다. 즉

$$e_{EC} + e_{mR} + e_{mEF} \le 0.01 \quad (1)$$

$$e_{EC} + e_{mR} + e_{bR} + e_{mEF} + e_{bEF} \le 0.02 \quad (2)$$

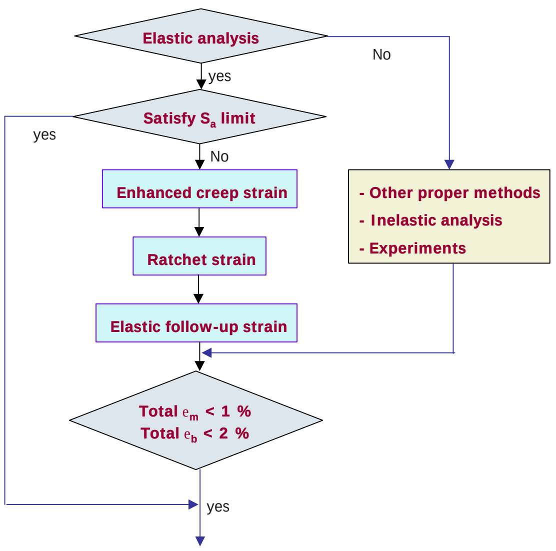


Fig.2 Procedure of strain limit checking in DDS

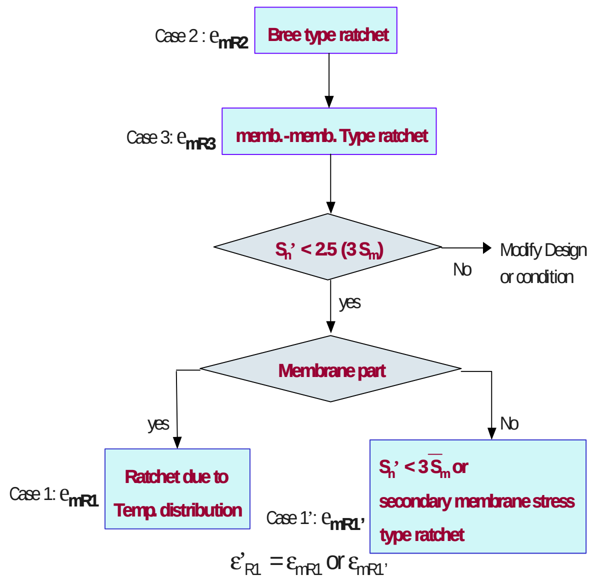
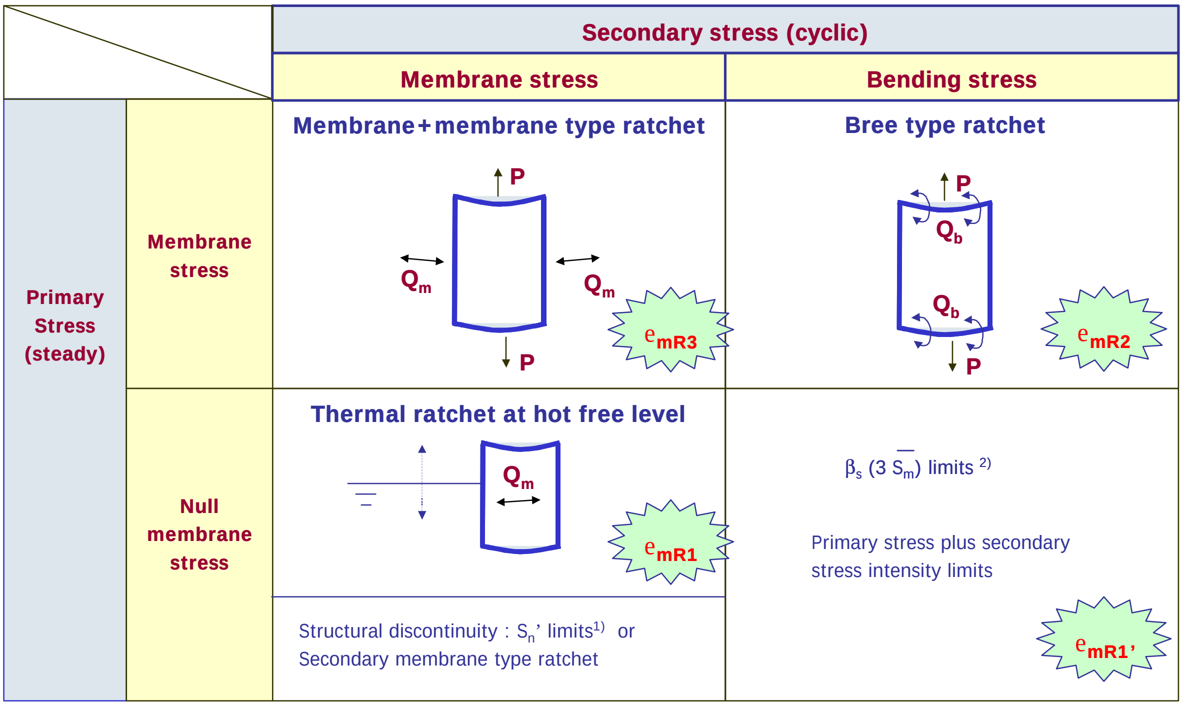


Fig.3 Determination of ratchet strain

DDS 는 라체팅 변형률에 대하여 크게 네 가지로 분류하고 있다. 먼저 일차 및 이차응력이 동시

에 작용하는 경우로서 Fig. 3 및 Fig. 4 에서와 같이 경우 2 와 경우 3 이 있다. 경우 2 는 Bree 형 라체팅으로 평판모델의 일차 정적 막응력과 반복 이차 굽힘응력이 같은 방향으로 작용하는 경우에 기초하고 있다. 경우 3 은 정적 일차 막응력과 반복 이차 막응력이 수직으로 작용하는 평판모델에 기초한 경우이다.

다음은 일차응력은 작용하지 않고 이차응력만 작용하는 경우로서 Fig. 3 및 Fig. 4 에서 경우 1 및 1' 이 여기에 해당된다. 경우 1 은 기기의 쉘 부분에서 자유액면의 이동에 따른 것으로 일차응력은 없고 이차 막응력만이 진행성 비탄성 변형을 일으키는 경우이며 일반적인 이차막응력만이 작용할 때의 변형률 제한치를 제시한 경우이다. Fig. 3 및 Fig. 4 에서 경우 1' 은 기기의 쉘 부분이 아닌 곳에서 순수 이차 막응력에 의해 발생하는 변형률 제한치를 제시하고 있다. 여기서 2.5(3S_m) 제한치는 이차 막응력과 굽힘응력에 따른 과도한 변형을 방지하기 위한 것으로 엘보우의 구조시험 결과에 근거하여 설정된 것이다.



1) Primary plus secondary stress limits for progressive deformation

2) β_s=2.5, It is based on experimental results of elbow to prevent incremental bending strain

Fig.4 Classification of ratchet in DDS

3.2 각 경우별 라체팅 변형률 평가절차

구조물에 작용하는 총 라체팅 변형률은 막 변형률에 대해서는 (3)식과 같이 계산된다. 여기서 구조물의 쉘부분에 대한 경우 1 과 구조물의 쉘부분이 아닌 곳에 대한 경우 1' 는 두 가지 경우 중 하나의 변형률만을 합산한다.

$$e_{mR} = e_{mR1} + e_{mR2} + e_{mR3} \qquad (3)$$

막(membrane)과 굽힘에 대한 총 라체팅 변형률은 (4)식에서와 같이 경우 1 에 대해서 변형률 진행에 관한 설계계수 β_{m+b} 는 β_{m+b}=1.5 로 한다.

$$e_{mR} + e_{bR} = b_{m+b} e_{mR1} + e_{mR2} + e_{mR3} \quad (4)$$

3.2.1 Bree 형 라체트 변형률 (ε_{R1})

정적인 일차 응력과 반복 이차 굽힘 응력이 작용하는 Bree 형 라체팅 변형에서는 온도 구배가 두께방향으로만 존재할 때 라체팅 변형률 평가식은 다음과 같다. 라체팅 선도는 Fig.1 에 제시되어 있다.

$$e_{mR2} = \frac{\sum_i \left\{ (Z_i - 1) S_{yc} + (Z'_i - 1) S_{yH} \right\}}{E} \quad (5)$$

Fig.1 에서 라체팅 영역 R_1 에서의 라체팅 평가를 위한 인자 Z 는 (6)식으로 주어지며

$$Z = 1 + Y - 2Y\sqrt{(1 - X_1 - X_2)} \quad (6)$$

R_2 에서의 라체팅 평가를 위한 인자 Z 는 (7)식으로 주어진다.

$$Z = (X_1 + X_2)Y \quad (7)$$

여기서

$$X_1 = \left\langle P_L + P_b / K_t \right\rangle_{max} / S_{yc}$$
$$X_2 = \left\langle P_L^* + P_b^* / K_t \right\rangle_{max} / S_{yc} \quad (8)$$
$$Y = \left\langle Q + Q^* \right\rangle_R / S_{yc}$$

3.2.2 자유액면의 열라체트 변형률 (ε_{mR1})

실제 풀형 액체금속로의 라체팅에 대한 사례로서 고온 자유액면의 상하 이동에 따라 축방향 온도구배가 발생하고 이로부터 일차응력이 무시할 정도로 작고 이차 막응력이 클 때 발생하는 라체팅 경우이다. 기기의 쉘부분에 대해 라체팅 변형률 계산을 위해서 먼저 인자, L 과 W 를 결정한다.

$$L = \frac{\sqrt[4]{3(1-n^2)}}{\sqrt{D_i t / 2}} \cdot l$$
$$W = \frac{X}{X - 0.5Z} - 1 \quad (9)$$

여기서

$$X = \left\langle P_L + P_L^* + P_b / K_t + P_b^* / K_t + Q_m + Q_m^* \right\rangle_{max} / S_y$$
$$Y = \left\langle Q + Q^* - Q_m - Q_m^* \right\rangle_R / S_y \quad (10)$$

여기서 라체팅 인자 Z 는 (11)식에서와 같이 결정한다.

$$Z = 2\left[X - \frac{\sqrt{3}X}{2(1-n^2)Y} \ln\left(\frac{\sqrt{3X^2 + (1-n^2)Y^2} + (1-n^2)Y}{\sqrt{3X^2 + (1-n^2)Y^2} - (1-n^2)Y} \right) \right] \quad (11)$$

(9)식으로부터 계산된 (L,W)점이 Fig. 5 에서 영역 O 에 있으면 (12)식을 적용하고, 영역 I 에 있으면 (13)식을 적용한다.

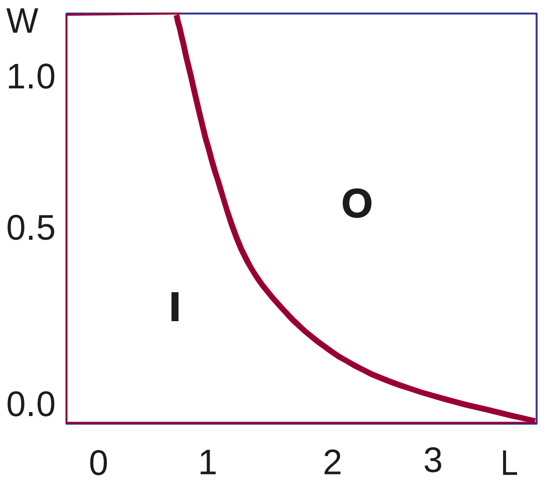


Fig. 5 Ratchetting region

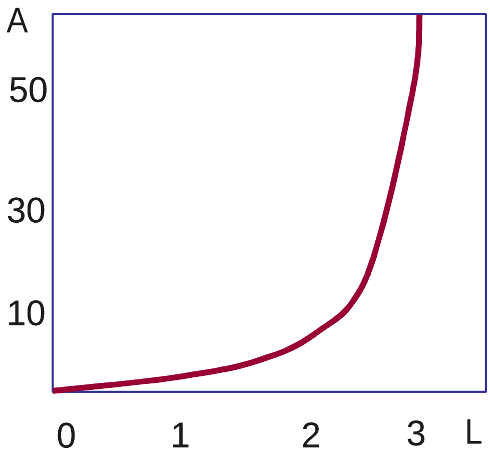


Fig. 6 A's curve

$$e_{mR1} = \sum_i \left(\frac{Z_i S_y}{E} \right) \qquad (12)$$

$$e_{mR1} = A \cdot Z \cdot \frac{S_y}{E} \qquad (13)$$

(13)식에서 상수 A 는 Fig. 6 에서 L 값을 이용하여 결정한다

3.2.3 이차 막응력에 의한 열라체트 변형률 ($\varepsilon_{mR1'}$)

기기의 쉘 부분이 아닌 곳에서 $Sn'(<P_L+P_L^*+P_b+P_b^*+Q+Q^*-Q_{Tb}-Q_{Tb}^*>_R)$ 제한치에 대한 요건이 만족되지 않을 때 즉 $S_n' - 3\overline{S_m} > 0$ 일 때 $\varepsilon_{mR1'}$ 은 (14)식과 같이 표현된다. 이차 막응력에 의한 라체팅 변형률은 (12), (13)식 또는 (14)식 중의 하나로 계산하면 된다.

$$e_{R3} = \sum_i \left(S_n' - 3\overline{S_m} \right) \cdot \frac{2}{E} \qquad (14)$$

여기서 Q_{Tb}:열굽힘 응력이다.

3.2.4 일차 막응력 + 이차 막응력에 의한 열라체트 변형률 (ε_{mR3})

Fig. 7 에서와 같이 정적인 일차 막응력에 반복 이차 막응력이 작용할 때 라체팅 변형률 평가식은 (15)식과 같다.

$$e_{mR3} = \sum_i \left\{ \left(\frac{3S_2}{2 - S_2} \right) \frac{(Y_2 + S_2 - 2) S_{yc}}{E} \right\}_i \qquad (15)$$

여기서

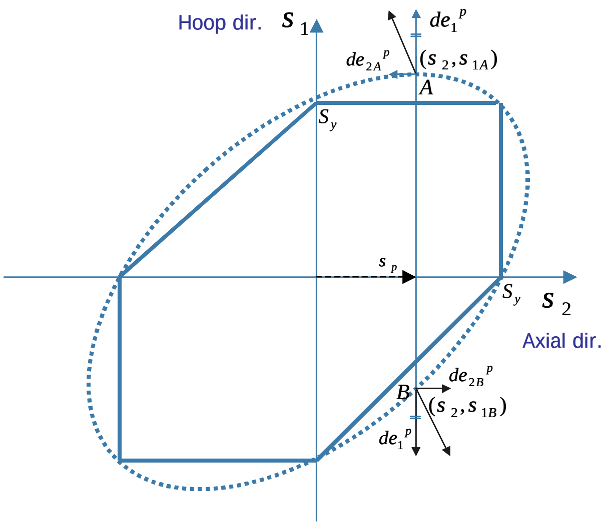
$$Y_1 = \left\langle Q + Q^* - Q_m - Q_m^* \right\rangle_R / S_{yc}$$

$$Y_2 = \left\langle Q + Q^* \right\rangle_R / S_{yc}$$

$$S_2 = X_1 + X_2 \qquad \text{in E in Bree Diagram}$$

$$S_2 = 1 + Y_1 - 2\sqrt{Y_1 \cdot (1 - X_1 - X_2)} \qquad \text{in } S_1 \text{ or } R_1$$

$$S_2 = (X_1 + X_2) \cdot Y_1 \qquad \text{in } S_2 \text{ or } R_2$$



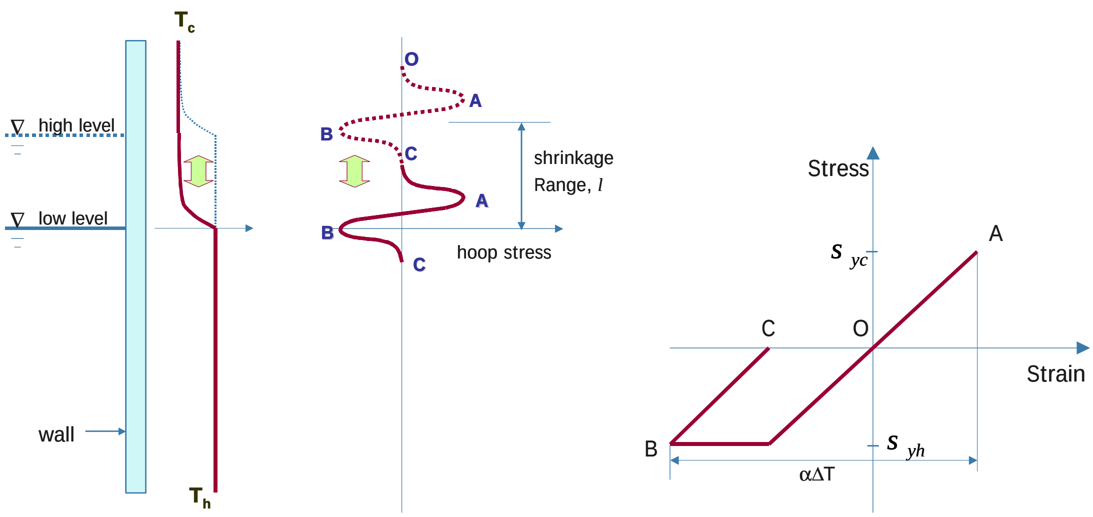
누적 변형률 $de_{2B}{}^{p} - de_{2A}{}^{p}$

Fig. 7 Steady membrane (primary) + cyclic membrane (secondary) type ratchet

3.3 **자유액면 이동에 따른 라체팅 변형 기구**

Fig. 8 **에서 보는 바와 같이 자유액면 이동에 따라 온도분포가 상하로 이동하면 이에 따라 축방향으로 큰** hoop **막응력이 상하로 이동하면서 라체팅 변형을 일으키게 된다. 간편한 라체팅에 의한 변형률 식은 다음과 같다.**

$$\Delta e = a\ \Delta T - 2s_y / E = 2(s_{qm} - s_y)/E \qquad (16)$$



(a) **온도분포 이동** (b) hoop **응력분포이동** (C) **응력-변형률 이력**

Fig. 8 Mechanism of thermal ratcheting under moving temperature gradients

4. Y-구조물의 열라체팅 구조시험

4.1 구조 시편

한국원자력연구소에서 수행한 열라체팅 Y-형 구조시편은 316L 재료이며 형상은 다음과 같다. 가열구간은 Y-구조물 용접부를 중심으로 상하 7.5cm 씩 15cm 를 가열하며 점진적으로 누적되는 라체팅 변형량을 레이저 변위센서를 이용하여 측정했다[11].

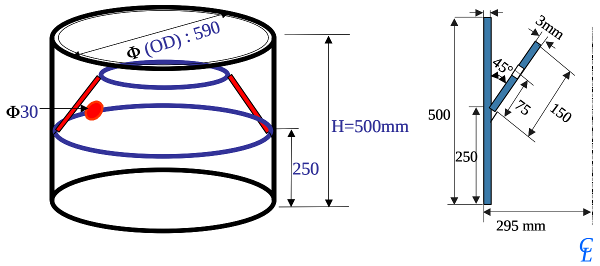


Fig. 9 Configuration of Y-type cylindrical thermal ratchet test specimen

4.2 해석 모델링

시험원통의 열라체팅 거동을 평가하기 위해 본 해석에서는 ABAQUS[12] 축대칭 유한요소 모델을 이용했다. Fig. 9 와 같은 형상의 Y-구조물에 원통에 대해 8 절점 2 차원 요소를 사용하여 모델링하였으며 모델은 271 요소, 1,081 절점으로 구성되어 있다. 재료는 316L 스테인리스강이며 재료의 반복 소성경화거동을 모사하기 위해 ABAQUS 의 등방경화-이동경화가 결합된 combined model 을 이용하였다. 본 해석에서는 자중과 열하중을 고려하였는데 자중에 의한 응력은 열하중에 비해 거의 무시할 수 있는 크기이고 정지 하중이므로 반복응력에 미치는 영향은 무시할 수 있는 수준이었다. 시험원통의 축방향으로 부착한 28 채널의 열전대를 이용하여 Fig. 10 에서와 같은 온도 데이터를 수집하고 이를 해석모델 절점의 열하중으로 작용시켰다.

4.3 구조시험 결과

위에서 언급한 Y-구조시편을 이용하여 18 회에 걸쳐 라체팅 열하중을 가한 결과 Fig. 11 에서와 같이 열하중이 가해짐에 따라 원통의 가운데 부분이 점차 팽창하는 것으로 나타났다. 그림에서 횡축은 원통의 바닥으로부터 측정한 수직높이를 의미하며 측정은 원통의 400mm 높이까지 측정이 되었다. 라체팅 변형 진행 특성을 보면 첫 사이클에서 비교적 크게 변형이 발생하고 그 후에는 거의 일정한 양의 변형이 점진적으로 누적되는 것으로 나타났다. 18 사이클을 기준으로 각 사이클당 평균 변형률은 0.106%인 것으로 나타났다. 따라서 열라체팅 시험 횟수가 1%가 되는 데에는 9.43 사이클이 소요되며 10 번째 사이클부터는 모재의 변형률 제한치인 1%를 초과하게 된다.

5. DDS 를 따른 구조시험 결과의 라체팅 평가

5.1 자유액면 이동에 따른 ε_{mR1} 의 계산절차

고온 자유액면의 이동에 따른 DDS 의 ε_{mR1} 계산절차는 다음과 같다. 먼저 (10)식에서 다음 값들

을 결정한다.

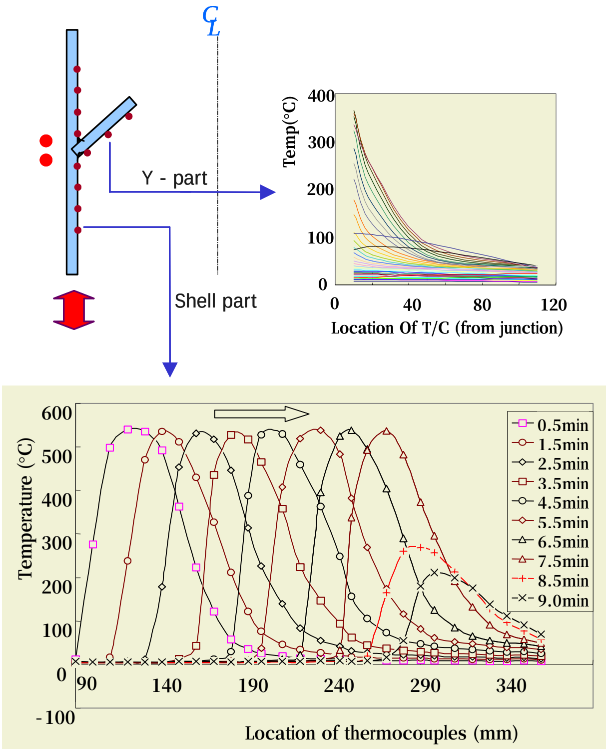


Fig. 10 Measured temperature data for Y-type cylindrical shell

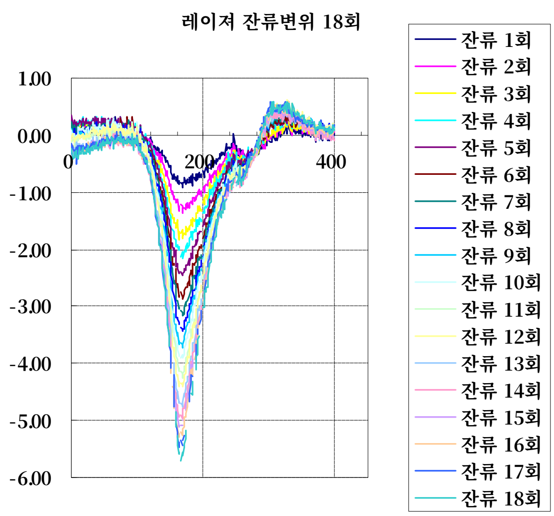


Fig. 11 Measured residual deformation for Y-type cylindrical shell

$$P_L, P_L^*, P_b, P_b^* \approx 0$$

$$Q = 270\,(\text{Mpa}),\quad Q_m = 213.33\,(\text{Mpa}),\ s_y = 135.8$$

$$X = \left\langle P_L + P_L^* + P_b / K_t + P_b^* / K_t + Q_m + Q_m^* \right\rangle_{\max} / s_y = \frac{213.33}{135.8} = 1.57 \tag{17}$$

$$Y = \left\langle Q + Q^* - Q_m - Q_m^* \right\rangle_R / s_y = \frac{56.67}{135.8} = 0.417$$

그러면 라체팅 평가인자 Z 는 (11)식에서 (18)식과 같이 계산된다.

$$Z = 2\left[X - \frac{\sqrt{3}X}{2(1-n^2)Y} \ln\left(\frac{\sqrt{3X^2 + (1-n^2)Y^2} + (1-n^2)Y}{\sqrt{3X^2 + (1-n^2)Y^2} - (1-n^2)Y} \right) \right] \tag{18}$$

$$= 0.885$$

(9)식의 계산을 위해 원통 구조물의 축방향 각 위치별로 Z 값을 계산하면 아래의 표와 같이 Z>0 이 되는 이동거리 구간은 약 45mm 인 것으로 나타났다.

Height*	Z
365mm	-0.637
350	0.784
355	1.146
315	0.244
310	-0.328

∴ 이동거리 l : 45mm
* : 바닥으로부터 높이

이 L 값을 대입하면 (15)식에서와 같이 계산된다.

$$L = \frac{\sqrt[4]{3(1-n^2)}}{\sqrt{D_i t / 2}} \cdot l = 1.935$$

$$W = \frac{X}{X - 0.5Z} - 1 == 0.574 \tag{19}$$

이 (L,W) 점이 Fig. 5 에서 I 영역 내에 있으므로 (12)식을 적용해야 하며 이를 계산하면 (20)식과 같이 1 사이클당 0.0917%가 발생하는 것으로 나타났다.

$$e_{R2} = \sum_i^N \left(\frac{Z_i S_y}{E} \right) = \sum_i^N \left(\frac{1.1484 \times 135.8 \times 10^6}{170 \times 10^9} \right) \tag{20}$$

$$= 0.0917\% \times N$$

시험원통 구조물에서 변형률이 라체팅에 의해서만 발생한다고 가정하고 모재에 대한 1% 막변형률 제한치를 적용하면 위의 변형률이 1%가 되는 사이클 수가 얼마인지 계산하면 횟수 N = 10.9 일 때 1%에 도달하게 된다. 따라서 DDS 평가절차에서 라체팅 사이클이 11 회째부터는 1%가 넘어간다는 것을 알 수 있다.

라체팅 구조시험 결과는 4.3 절에서 설명된 바와 같이 10 번째 사이클부터 막변형률이 제한치인 1%를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 구조시험결과와 설계코드인 DDS 에 따른 열라체팅 구조시험 모델에 대한 평가결과를 비교해보면 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 각국의 설계 또는 해석 지침의 라체팅 평가절차를 비교분석하고, 최근에 개발된 정량적으로 평가절차가 가장 잘 정립된 것으로 판단되는 일본의 DDS 평가법을 심도있게 분석하고 평가절차에 실제 구조시험 결과를 적용하고 설계코드의 보수성을 평가했다.

기존의 고온구조 설계지침인 미국의 ASME-NH 와 프랑스의 RCC-MR 은 일차응력이 동반된 경우에 대한 평가절차만을 제시하고 있어 고온 자유액면의 상하 온도구배 이동에 따라 이차 막응력이 지배적인 실제 풀형 액체금속로의 라체팅 평가에는 부적합하였으며 영국의 Interaction Diagram Method 도 대략적 평가법으로 정밀한 평가에는 한계가 있는 것으로 나타났다. DDS 는 자유액면 부근의 라체팅 평가절차도 명시적으로 제시하고 있는데 본 연구에서는 KAERI 의 Y-구조물 라체팅 구조시편을 이용한 시험결과를 액체금속로의 구조물로 보고 DDS 의 절차를 적용한 결과 DDS 는 실제에 가깝게 라체팅 변형률을 평가하는 것으로 나타났다. 변형률이 라체팅 변형에만 의존한다고 가정할 때 구조시험결과 모재에서 제한치인 막변형률 1%를 초과하는 데에는 11 사이클이 소요되었지만 DDS 를 따른 평가에서는 10 사이클로 계산되어 두 결과가 매우 근사하게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

[1] KALIMER 예비 개념설계 보고서, KAERI/ TR-1636, KAERI., 2000.

[2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III Subsection NH, 2001.

[3] 이형연, 김종범, 유봉, "크리프-피로 하중 하에서 손상을 받은 304 및 316LN 스테인리스강 구조물의 손상평가," 대한기계학회논문집 A 권, 제 22 권 제 12 호, pp.2269~2277, 1998.

[4] 이형연, 김종범, 유봉, "액체금속로 고온배관의 미국 및 프랑스 설계지침을 따른 크리프-피로 손상평가," 2001 년도 제 1 차 재료 및 파괴부문 학술대회, 대한기계학회, pp.178~184, 2001.

[5] 이형연, 김종범, 이재한, "316L 스테인리스강 원통 구조물의 열라체팅 변형시험 및 해석," 대한기계학회, Vol. 26, No. 3, pp. 479-486, 2002

[6] RCC-MR Code, Section I, Subsection RB-3000, 1993, AFCEN, 1985 edition & 1993 addenda.

[7] Wada,H., Otani,T., Fujioka,T., "The Ratcheting Evaluation Methods in Japanese Demonstration FBR Design," *SMIRT 14, F04/2*, p.85-92, 1997.

[8] 고속증식실증로 고온구조 설계지침(안), 일본원자력발전주식회사, 1998.

[9] Riou B. et al, "Last improvement on the ratchetting interaction diagram method," SMIRT 14, F04/4, pp.93-

100, 1997.
[10] Consultant report on high temperature design methods for the KALIMER Fast Breeder Reactor, Serco Assurance, UK, SA/RJCB/04043/R001,2002.
[11] **김종범**, **이형연**, **이재한**, **이종민**, “Y-**형상 원통구조물의 열라체팅 거동시험 및 고찰**,” **한국원자력학회**, 2002 **추계학술대회**, 2002.
[12] ABAQUS *Users manual*, Version 5.8, H.K.S, 2000.