

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.1.103

# Mod.9Cr-1Mo 강 구조의 크리프-피로 균열 거동 평가법 개발<sup>§</sup>

이형연<sup>\*†</sup> · 이재한<sup>\*</sup>

\* 한국원자력연구원

## Development of Assessment Methodology on Creep-Fatigue Crack Behavior for a Grade 91 Steel Structure

Hyeong-Yeon Lee<sup>\*†</sup> and Jae-Han Lee<sup>\*</sup>

\* Korea Atomic Energy Research Institute

(Received August 17, 2009 ; Revised December 18, 2009 ; Accepted December 18, 2009)

**Key Words :** Creep-Fatigue(크리프-피로), Crack Growth(균열 성장), Crack Initiation(균열 개시), Mod.9Cr-1Mo Steel(수정 9Cr-1Mo 강), High Temperature Component(고온 기기)

**초록:** 본 연구에서는 프랑스의 RCC-MR A16 절차에 기초하여 Mod.9Cr-1Mo 강(ASME Grade 91) 구조의 크리프-피로 균열 개시 및 성장 평가법을 확장 개발하였다. 현재의 A16 지침은 오스테나이트 스테인리스강에 대해서만 크리프-피로 균열 개시 및 성장 평가법을 제시하고 있지만, 현재 초초임계(USC) 화력발전소는 물론 미래형 원자로 시스템의 구조재료로서 폭넓게 채택되고 있는 Mod.9Cr-1Mo 강에 대한 지침은 제시하지 않고 있다. 본 연구에서는 FMS(페리틱-마르텐사이트강)에 대한 크리프-피로 균열 개시 및 성장 평가법을 제시하고 있고, 구조물에 대한 크리프-피로 균열 거동 평가를 수행하였다. 평가결과는 구조시험을 수행한 결과 얻은 관찰 이미지와 비교하였다.

**Abstract:** In this study, an assessment method on creep-fatigue crack initiation and crack growth for a Mod.9Cr-1Mo steel (ASME Grade 91) structure has been developed with an extension of the French RCC-MR A16 procedure. The current A16 guide provides defect assessment procedure for a creep-fatigue crack initiation and crack growth for an austenitic stainless steel, but no guideline is available yet for a Mod.9Cr-1Mo steel which is now widely being adopted for structural materials of future nuclear reactor system as well as ultra super critical (USC) thermal plant. In the present study an assessment method on creep-fatigue crack initiation and crack growth is provided for the FMS (Ferritic-Martensitic Steel) and assessment on the creep-fatigue crack behavior for a structure has been carried out. The assessment results were compared with the observed images from a structural test.

### 1. 서론

소듐냉각 고속로,<sup>(1)</sup> 고온가스로 및 초초임계(UltraSuperCritical : USC) 화력 발전설비와 같은 고온 구조물의 구조적 건전성은 일반적으로 크리프 손상, 크리프-피로 손상 및 크리프-피로 균열성장 등의 거동에 의해 지배를 받는다.

결함이 존재하지 않는 고온 구조물의 설계는 ASME Section III Subsection NH,<sup>(2)</sup> RCC-MR<sup>(3)</sup> 및 DDS<sup>(4)</sup> 등의

고온 설계기술기준을 이용하여 수행할 수 있다. 반면 결함이 존재하는 고온 구조물의 결함평가 기술기준은 프랑스의 RCC-MR A16,<sup>(5)</sup> 영국의 R5,<sup>(6)</sup> 미국의 API579,<sup>(7)</sup> 유럽의 FITNET<sup>(8)</sup> 등이 있지만, 이들 중 가장 구체적인 평가절차를 제시하고 있고, 실질적으로 적용이 가능한 기술기준은 프랑스의 A16 이다. 그런데 A16 은 오스테나이트 스테인리스강에 대해서만 결함 및 LBB 평가 절차를 제시하고 있고, 현재 미래형 제 4 세대 원자력시스템 및 개량형 화력발전 설비 등에서 사용이 증가하고 있는 Mod.9Cr-1Mo(ASME Grade 91) 강 등의 크롬-몰리브덴강에 대한 평가 절차는 제시하지 않고 있다. Mod.9Cr-1Mo 강은 국내 최초의 초초임계 화력발전소인 500MW 급 당진 5,6 호기는 물론 후속 USC 플랜트에도 채택되고 있다.

§ 이 논문은 2009 년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회 (2009. 4. 23-24, 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, hylee@kaeri.re.kr

본 연구에서는 오스테나이트 스테인리스강에 기초한 A16 의 평가 기술기준을 Mod.9Cr-1Mo 강으로 확대 적용하여 크리프-피로 균열개시(crack initiation) 및 균열성장(crack growth) 평가법을 개발하고, 평가법에 대해 구조시험 결과와 비교 분석함으로써 Mod.9Cr-1Mo 강에 대해 개발한 A16 확장 평가법의 보수성을 정량화하였다.

A16 의 결함평가 부문은 크리프-피로 균열개시 및 균열성장 부분으로 나누어져 있다.

균열개시 평가에 대해 A16 은 균열선단으로부터 특성거리(characteristic distance) ‘d’ 만큼 떨어진 위치에서 계산된 응력 값을 이용하는 소위  $\sigma_a$  접근법을 적용하고 있다. A16 은 특성길이 ‘d’ 값에 대해 오스테나이트 스테인리스강 (여기서부터는 ‘SS’ 로 표기)에 대해서는 50 $\mu$ m 의 값을 제시하고 있지만 Mod.9Cr-1Mo 강(여기서부터는 ‘Gr.91’ 로 표기) 에 대해서는 값을 제시하지 않고 있다. 프랑스 CEA 의 연구자들은  $d=36\mu$ m<sup>9)</sup>의 값을 제안한 바 있다. 본 연구에서는 이 ‘d’ 값의 민감도를 평가하기 위해 ‘d’ 가 50 $\mu$ m 인 경우와 36 $\mu$ m 인 경우에 대해 평가를 수행하고, 두 결과를 비교 분석하였다.

또한 균열성장 평가와 관련하여 A16 은 Gr.91 의 피로 균열성장(FCG)에 대해 일부 영역의 온도에서만 수학적 모델을 제공하고 있고, 크리프 균열성장(CCG)에 대해서는 수식을 제공하지 않고 있다. 그리하여 본 연구에서는 CEA 가 제안한 FCG 모델과 CCG 모델<sup>(10,11)</sup> 및 한국원자력연구원(KAERI)이 개발한 CCG 모델<sup>(12)</sup>을 이용하여 Gr.91 강의 크리프-피로 균열 성장에 대한 평가를 수행하였다. KAERI 에서는 크리프-피로 균열개시 및 균열성장 평가와 관련하여 316L 스테인리스강과 Gr.91 강에 대한 일련의 연구를

수행한 바 있다.<sup>(13-16)</sup> 본 연구에서는 Gr.91 재질의 구조시험 모델에 대해 크리프-피로 균열거동을 평가한 후 구조시험 결과와 비교 분석하였다.

## 2. 결함평가 기술기준 A16 의 개발 현황

RCC-MR A16 기술기준은 Table 1 에서 보는 바와 같이 2002 년판 및 현 버전인 2007 년판에서 모두 오스테나이트 스테인리스강에 대해서만 결함 평가 절차를 제시하고 있고, Mod.9Cr-1Mo 강 에 대한 절차는 제시하지 않고 있다.

A16 의 2007 년판에서는 2002 년판 대비 평가 절차에서는 약간의 수정이 이루어졌지만, RCC-MR 의 물성치 부록인 A3<sup>(17)</sup>에서는 적지 않은 수정이 이루어졌다. A3 에는 현재 18 개의 재료가 등재되어 있지만 물성치 미비로 인해 A16 을 따라 평가가 가능한 재료는 일곱 개(316LN, 316L, 304, 304L, Alloy 800, Mod.9Cr-1Mo, 2.25Cr-1Mo) 정도이다. 각 재료별로 수정 내용은 다르지만 A3 의 개정에서는 특히 피로수명 및 크리프 파단 응력의 변경 부분이 주목할만한 부분이고, 그 외에 항복강도, 응력-변형률 선도 등의 물성치도 일부 변경되었다.

균열개시 평가에 대해 A16 은 Gr.91 에 대해 ‘d’ 값 및 결함 평가법을 제시하지 않고 있다.

Gr.91 재료의 화학조성비는 Table 2 에 제시된 바와 같이 Cr 함량이 8~9.5%, Mo 함량이 0.85~1.05%인 크롬 몰리 합금강이며, 고온에서 크리프 파단강도 및 강도가 우수하고, 경제적이지만 스테인리스강에 비해 제작성이 안 좋으며 특히 소위 ‘Type IV’ Cracking 이라는 용접열영향부(HAZ)-모재 경계면에서의 용접 취약성 문제가 있어 이에 대한 대비가 요구되는 재료이다. Gr.91 재료는 고온 설계 기술기준의 재료로서 1995 년 ASME-NH 에 처음 등재되었다.

균열성장 평가와 관련하여 A16 은 Gr.91 의 피로균열 성장에 대해 525°C 까지만 수학적 모델을 제공하고 있고, CCG 에 대해서는 수학적 모델을 제공하지 않고 있다.

A16 의 개발 주체는 프랑스의 CEA (<http://www.cea.fr>)

Table 1 Development stators of the RCC-MR A16

	A16 (2002)	A16 (2007)
Austenitic S.S.	○	○ <small>Slight modification (A16 &amp; A3)</small>
Mod.9Cr-1Mo.	×	×

Table 2 Chemical composition of the G91 steel (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	V	Nb
0.08	0.20	0.30	Max.	Max.	8.00	Max.	0.85	0.03	0.18	0.06
-	-	-	0.025	0.025	-	0.40	-	-	-	-
0.12	0.50	0.60			9.50		1.05	0.07	0.25	0.10

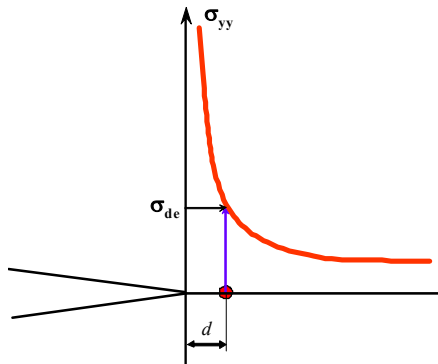


Fig. 1 Sigma-d( $\sigma_d$ ) stress at location 'd' ahead of notch tip

이며, A16은 프랑스의 원전 설계 및 평가 기술기준 제정 협회인 AFCEN ([http://www.afcen.com/index\\_gb.php](http://www.afcen.com/index_gb.php))이 발간하고 있다. CEA는 Gr91 강의 결함 평가절차가 포함된 A16 후속 판을 2011년에 발간한다는 목표 하에 연구개발을 진행 중에 있다.

A16에서는 균열 개시의 평가에서  $\sigma_d$  접근법을 채택하고 있다.  $\sigma_d$  접근법은 노치 또는 균열 형상의 결함에 대한 균열 개시 평가에서 실용적인 방법 중의 하나로써 활용되고 있다.  $\sigma_d$  방법에서는 Fig. 1에서와 같이 SS 재료에서 통상 재료 입자의 크기가 약  $50\mu\text{m}$ 인 점을 감안하여 노치 또는 균열 선단으로부터 균열진전 방향으로  $50\mu\text{m}$  떨어진 위치에서 탄성적으로 계산한 응력인  $\sigma_{dc}$ 를 먼저 계산한다. 이어서 동 위치에서의 소성 성분을 고려하기 위해 탄성적으로 계산된  $\sigma_{dc}$  점으로부터 재료의 인장곡선상으로 노이버 법칙(Neuber rule)을 적용하여  $\sigma_d$ 를 계산하며, 이 응력은 균열개시 평가에 사용된다.<sup>(5)</sup>

크리프-피로 손상을 계산하고, 동 손상의 합이 Fig. 2의 RCC-MR 이직선에 도달하면 균열이 개시되는 것으로 판단하는 개념이다. 즉, SS 재료의  $\sigma_d$  접근법에서는 균열 선단 앞  $50\mu\text{m}$  위치에서 계산된 크리프-피로 손상이 이직선 경계값인 임계치에 도달하면  $50\mu\text{m}$  길이의 균열이 개시된 것으로 간주한다.

그런데 A16에는 Gr.91 강에 대해서는 아직  $\sigma_d$  접근법이 제시되어 있지 않다. CEA의 연구자들은 Gr.91 강에 대해  $d=36\mu\text{m}$ 의 값을 제시하고, 이 때 임계치에 도달하면 길이  $100\mu\text{m}$ 의 균열이 개시된 것으로 판단한다는 접근법을 제안했다.<sup>(9)</sup> 여기서 d 위치  $36\mu\text{m}$ 에서 임계치 도달 시  $100\mu\text{m}$ 의 균열이 발생한다는 것은 직류전위차법(DCPD)을 이용한 실험적 관찰 결과이다.

균열개시의 평가를 위한 A16의 계산절차를 간략히 기술하면 다음과 같다. 균열개시 평가를 위해 먼저 총 변형률( $\overline{\Delta\varepsilon}$ )을 계산한다. 총 변형률은 탄소성 변형률과 크리프 변형률을 독립적으로 계산한 후 식 (1)에서와 같이 선형으로 합산한다.<sup>(5)</sup>

$$\overline{\Delta\varepsilon} = \overline{\Delta\varepsilon_{el+pl}} + \overline{\Delta\varepsilon_{cr}} \quad (1)$$

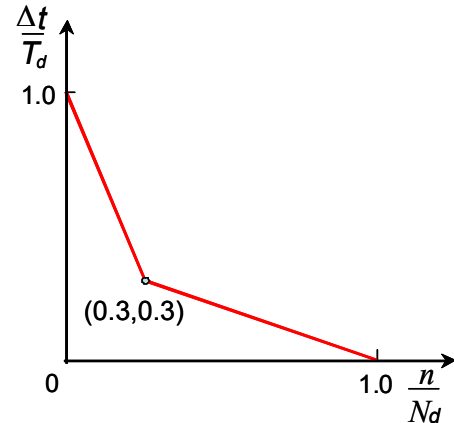


Fig. 2 Creep-fatigue damage envelope in the A16 guide

여기서  $\overline{\Delta\varepsilon_{el+pl}}$ 는 탄소성 변형률이며, 네 개의 변형률 성분을 합산하여 계산한다. 여기서 네 개의 응력성분은 탄성변형률, 일차응력 변화에 따른 소성 증가(plastic gain) 변형률, 응력-변형률 반복곡선(cyclic curve)에서 소성 증가에 따른 변형률 및 삼축(triaxiality) 특성에 따른 소성 변형률이다.<sup>(5)</sup> 또한 크리프 변형률( $\overline{\Delta\varepsilon_{cr}}$ )은 크리프-피로 하중 한 사이클에서 발생하는 변형률을 계산하는 것으로 Gr.91 재료의 경우 크리프 변형률 수식은 RCC-MR A3<sup>(17)</sup>의 Bailey-Norton 식 형태의 식 (2)를 활용한다.

$$\varepsilon_{cr} = c_1 t^{c_2} \sigma^{n_1} \quad (2)$$

여기서  $c_1 = 2.4622 \times 10^{-8}$ 이고,  $c_2 = 0.3608$ ,  $n_1 = 3.1854$ 이다.

일차(primary) 크리프가 종료되는 시간( $t_f$ )은 A3에 제시된  $t_f = 2.869 \times 10^{17} \times \sigma^{-6.9531}$  수식을 이용하여 계산하는데, 여기서는 해당 열하중 조건이 식 (2)의 일차 크리프에 해당되는지 먼저 검토해 야 한다.

피로균열 개시에 관한 손상치(A)는 피로수명 대비 작용하중에서의 실제 발생횟수를 고려하여 계산하고, 크리프 균열 개시에 관한 손상치(W)는 크리프 수명 대비 실제 작용하중에서의 유지 시간의 비율을 고려하여 계산한다.

### 3. 크리프-피로 균열성장 평가

#### 3.1 피로 균열성장(FCG) 평가

A16 기반의 FCG 평가법에서는 피로하중을 받는 결함부에 대해 다음의 (3) 식에서와 같이 최대 응력강도계수(SIF) 범위를 계산한다.

$$\Delta K_{eff} = q \cdot \sqrt{E^* \cdot \Delta J_s} \quad (3)$$

여기서  $q(R)$ 는  $R = K_{min} / K_{max}$  이고, 균열이 닫히는  $R < 0$  일 때  $q = (1 - 0.5R) / (1 - R)$  이고,  $R > 0$  일 때

$q=1/(1-R)$ 이다.  $E^*$ 는 영률로서 평면 응력일 때  $E$ , 평면 변형률일 때  $E/(1-\nu^2)$ 이다.

응력강도계수  $K_I$ 은 다음의 식 (4)로 결정된다.

$$K_I = (\sigma_m F_m + \sigma_b F_b + \sigma_{gb} F_{gb}) \sqrt{\pi c} \quad (4)$$

여기서  $\sigma_m, \sigma_b$  및  $\sigma_{gb}$ 은 각각 막응력, 굽힘응력 및 거시적 굽힘응력을 의미하고,  $F_m, F_b$  및  $F_{gb}$ 은 영향 계수이고,  $c$ 는 결함 표면에서 균열 길이의 반을 의미한다.

2007년판 A16에서 열 및 기계적 하중이 복합적으로 작용할 때 J-적분은 다음의 식 (5)로부터 결정된다.

$$J_s = (\sqrt{J_{el}^{me}} + k_{th}^* \cdot \sqrt{J_{el}^{th}})^2 \quad (5)$$

여기서  $J_{el}^{me}$ 과  $J_{el}^{th}$ 은 각각 기계적 하중 및 열 하중 하에서 탄성적으로 결정된 J-적분이며,  $k_{th}^*$ 은  $J_s$  계산에서 두 가지 옵션의 계산을 가능하게 하는 계수이다.

그러면 특정 결함 위치에서 단위 사이클당의 피로균열 성장길이는 식 (6)으로부터 결정된다.

$$\delta a_i = C [\Delta K_{eff}]^n \quad (6)$$

### 3.2 크리프 균열성장(CCG) 평가

A16의 CCG 평가에서는 식 (7)에서와 같이 기계적 하중 및 열 하중에 따른  $C^*$  적분을 계산하고, 유지시간  $t_{mi}$  동안 식 (8) 형태의 CCG 모델로부터 균열 성장량을 계산한다.

$$C_s^* = (\sqrt{C_s^{me}} + \kappa_{C^*} \cdot k_{C^*th} \cdot \sqrt{J_{el}^{th}})^2 \quad (7)$$

$$(\delta a_c)_i = \int_{t_i}^{t_i+t_{mi}} A [C_i^*(t)]^q dt \quad (8)$$

여기서  $C_s^{me}$ 는 기계적 하중이 작용할 때의  $C^*$  적분이고,  $J_{el}^{th}$ 은 열 하중 하에서 계산된 J 적분이며  $C_i^*(t)$ 는 시간  $t$ 에서의  $C^*$  적분이다. Gr.91 재료의 경우 식 (8) 형태의 CCG 모델이 A16에 제시되어 있지 않기 때문에 Gr.91에 대한 CCG 평가를 위해서는 재료시험을 통해 동 모델을 개발하거나 또는 문헌에서의 인용이 필요하다. 본 연구에서는 KAERI에서 Gr.91 재료의 CT 시편(1/2T 시편, 600°C)을 이용하여 개발한 CCG 모델<sup>(12)</sup>을 적용하였고, 이와 병행하여 CEA가 제시한 CT 시편(1T 시편, 550°C)의 CCG 모델<sup>(10,11)</sup>을 적용하고, 두 결과를 비교 분석하였다.

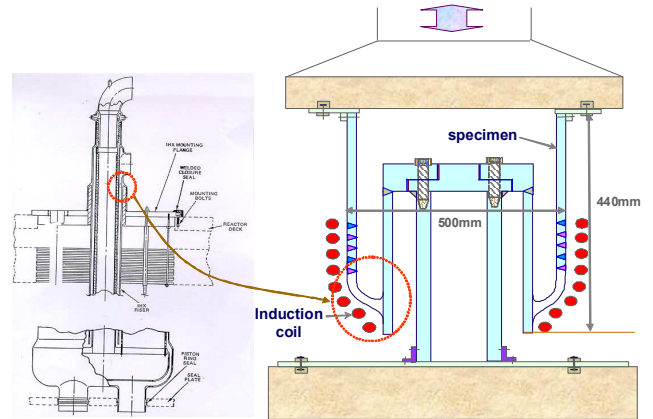
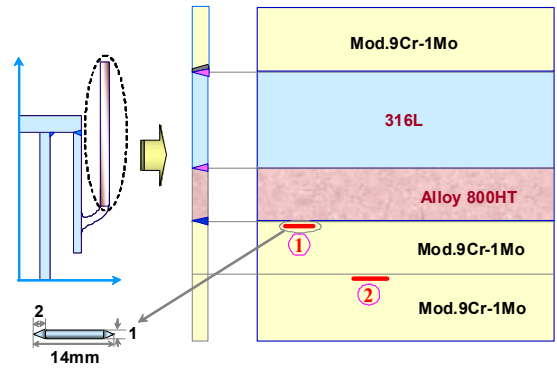


Fig. 3 Y-piece type IHX support structure and test set-up



(a) Axisymmetric model (b) Development figure

Fig. 4 Schematic of the structural specimen

## 4. Mod.9Cr-1Mo 강 구조의 크리프-피로 균열 개시 및 성장 평가

### 4.1 구조시험 모델

본 연구에서는 Gr.91 재료의 구조시험 모델로서 Fig. 3에서와 같은 Y-piece 모양의 중간열교환기(IHX) 지지구조를 구조시험 모델로 선정하고 평가 및 구조시험을 수행했다. 원통형 구조시험 모델의 크기는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 외경 500mm, 높이 440mm이다.

구조시험의 형상 및 전개도 상세는 Fig. 4에 제시한 바와 같이 시편 내부에 Gr.91, 316L 및 Alloy 800HT 등의 세 가지 재료를 사용하였다. 여기서는 Fig. 4(b)에서와 같이 결함 1 및 2의 위치에서 결함평가를 수행하였다.

### 4.2 작용하중

작용하중은 Fig. 5에서와 같이 90~600°C의 온도 범위에서 열 사이클링 하중을 가하고, 두 시간의 유지시간 하중을 가했다. 1회의 크리프-피로 사이클

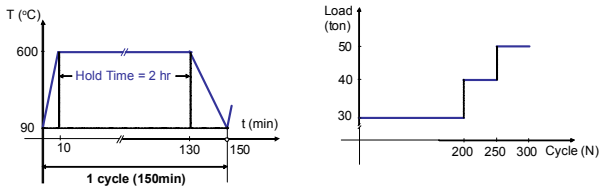


Fig. 5 Thermal and mechanical load conditions

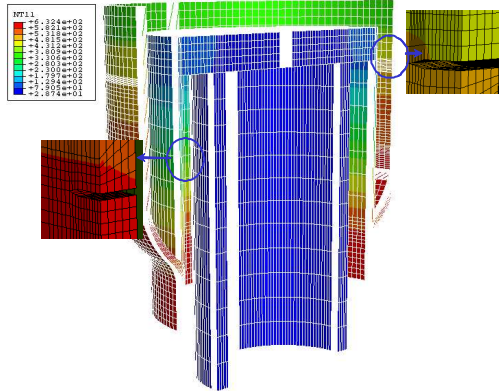


Fig. 6. 3D half symmetric finite element model

에는 약 2.5 시간이 소요되었다. 기계적 하중은 Fig. 5 에서와 같이 200 사이클까지는 30 톤의 하중을, 250 사이클까지는 40 톤의 하중을, 300 사이클까지는 50 톤의 하중을 가했으며, 이들 하중은 시편의 외부 원통에 공칭응력 기준으로 각각 29.9MPa, 39.8MPa 및 49.8MPa 의 응력을 유발하였다. 총 크리프-피로 하중은 300 회가 가해졌으며, 본 구조시편에 대해 구조시험 및 손상관찰 등 일련의 구조시험을 수행하는데 약 6 개월이 소요되었다.

#### 4.3 유한요소해석 모델링

1/2 대칭형의 ABAQUS<sup>(18)</sup> 3 차원 모델은 Fig. 6 에서와 같이 Gr.91 재질의 취약 부위에 2 개의 3 차원 결함부 모델링을 하였고, 전체 경계조건으로서 바닥면을 완전히 구속하였다.

#### 4.4 균열개시 평가

$\sigma_d$  접근법을 이용한 균열개시 평가에서 노치 선단으로부터 36 $\mu$ m 및 50 $\mu$ m 떨어진 곳에서 응력을 계산하기 위해서는 균열선단 앞에서 매우 섬세한 요소망(superfine mesh)의 형성이 요구되며 이는 요소 수가 과대하게 많아지는 문제가 발생할 수 있게 된다.

본 연구에서는 이 같은 문제를 완화하기 위해 선형 탄성 파괴역학(LEFM)의 응력강도계수(K)에 대한 K-장(field) 해법을 적용하였다. SIF 를 의미하는 K 해는 대략적으로 균열길이의 약 10%

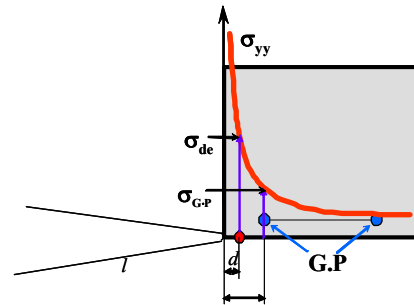


Fig. 7 Calculation of sigma-d stress using FE analysis

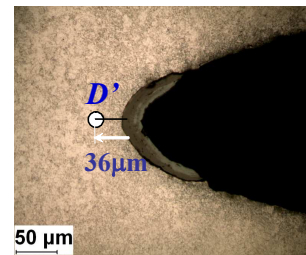


Fig. 8 Observed image at Gr.91 defect (N=200 cycles)

이내에서는 적용이 가능한 것으로 알려져 있기 때문에 매우 섬세한 요소망 대신 Fig. 6 에서와 같이 통상 사용하는 길이 1mm 크기의 균열선단 요소를 이용하고, Fig. 7 에서와 가우스 포인트(G.P)에서 얻은 응력값( $\sigma_{G.P}$ )으로부터 K-장(field) 해를 이용하여 위치 d에서의 응력( $\sigma_{de}$ )을 계산하였다.

균열개시를 평가하기 위해서는 3 절에서 다룬 바와 같이 총 변형률을 먼저 계산해야 한다. 30 톤, 40 톤 및 50 톤의 하중이 가해질 때 Fig. 4(b)의 1 번 결함부에서 계산된 총 변형률은 각각 0.413%, 0.516(%) and 0.621(%)로 나타났다.

본 연구에서는  $\sigma_d$  방법의 d 값에 대해 민감도 해석을 위해 d가 36 $\mu$ m 인 경우와 50 $\mu$ m 인 경우에 대한 평가를 수행하였다. 30 톤의 하중이 가해질 때 d의 값이 36 $\mu$ m 인 경우와 50 $\mu$ m 인 경우의 총 변형률 범위는 각각 0.604(%) , and 0.746(%)로 나타났다.

이들 총 변형률로부터 계산된 Gr.91 의 d 값이 36 $\mu$ m 인 경우와 50 $\mu$ m 인 경우에 대한 크리프-피로 손상의 계산 결과는 다음의 식 (9) 및 식 (10)에서와 같이 계산되었다.

$$(A+W)_{d=36\mu m, Gr.91} = \frac{n}{150} + \frac{\Delta t}{24010} \leq D \quad (9)$$

$$(A+W)_{d=50\mu m, Gr.91} = \frac{n}{286} + \frac{\Delta t}{24010} \leq D \quad (10)$$

위의 계산결과에서 보면 Gr.91 강에서는 크리프

손상을 일으키는 유지응력이 2 시간의 유지시간 동안 빠르게 문턱 값(threshold value,  $P_m + 0.67P_b$ )까지 완화되어 균열개시 이전의 크리프 배양(incubation) 시간이 24,010 시간으로 매우 길게 소요되는 것으로 나타났다. 두 경우 모두 응력완화가 빠르게 진행되어 문턱 값까지 응력이 완화되었기 때문에 크리프 파단 수명은 모두 동일하게 나타났다.

또한 2 시간의 유지시간 하중이 가해진 본 구조시편의 Gr.91 재료에서는 응력완화가 두드러져 피로 손상이 크리프 손상보다 훨씬 지배적인 것으로 나타났다. 이는 통상의 오스테나이트 스테인리스강에서와는 다르게 나타나는 FMS 강의 특징 중의 하나로서, 실제 시편을 이용한 Gr.91 강의 응력완화 시험에서도 유지시간 10 분 안팎에서 70% 정도까지 응력이 완화되는 것이 관찰되고 있는 것과 맥을 같이 하는 것이다. 식 (9), (10)으로부터 평가결과 크리프-피로 손상은  $d=36\mu\text{m}$  인 경우가  $d=50\mu\text{m}$  인 경우에 비해 다소 크게 나타났다.

여기서도 계산위치는 Fig. 4(b)에서 Mod.9Cr-1Mo 강 재질 결함 위치 1 번이다.  $d=50\mu\text{m}$  의 평가결과와  $d=36\mu\text{m}$  의 평가결과는 Fig. 8 의 구조 시험에서 얻은 관찰결과와 비교할 때 모든 평가 결과는 상당히 보수적인 것으로 나타났다. 고온 유지하중 하에서 Gr.91 은 빠른 응력 완화로 인해 크리프 손상이 상당히 줄어든다는 특징이 있다.

4.5 피로 균열성장(FCG) 평가

Gr.91 재료의 FCG 모델은 CEA 가 제시한 550°C 모재에서의 식 (11)을 사용하였다.

$$\frac{da}{dN} = 9.3 \times 10^{-7} (\Delta K_{eff})^{1.83} \quad (11)$$

여기서  $\Delta K_{eff}$  은 유효 응력강도범위이고, (11)식의 적용 범위는  $7 < \Delta K < 37$  ( $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ )이다.

식 (11)을 이용하여 Gr.91 의 균열 성장량을 평가한 결과 그림 4(b)의 결함 1 위치에서 사이클당 균열 성장량은 30 톤 하중에서 식 (6)을 적용하였을 때  $4.04 \times 10^{-5}$  mm 로 계산되었고, 300 사이클 하중이 가해질 때 총 피로 균열 성장량은 0.016mm 인 것으로 계산되었다.

4.6 크리프 균열성장 (CCG) 평가

크리프 균열성장 평가를 위해 본 연구에서는 세 개의 CCG 모델을 적용하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 KAERI 가 모재에 대해 수행한 CCG(0.5T,

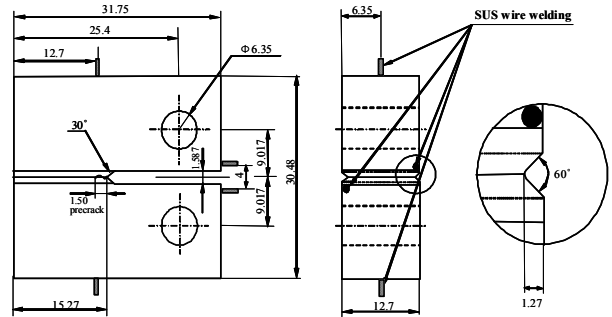


Fig. 9 Schematic of CT specimen (1/2 T, 600°C)

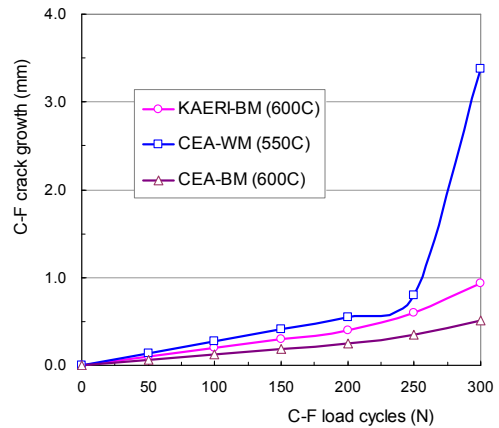


Fig. 10 Creep fatigue crack growth with an application of the secondary creep law

600°C) 모델<sup>(12)</sup>은 식 (12)와 같고, CEA 가 모재에 대해 수행한 CCG(1T, 600°C) 모델<sup>(11)</sup>은 식 (13)과 같으며, 역시 CEA 가 제시한 용접금속에 대한 CCG(1T, 550°C) 모델<sup>(10)</sup>은 식 (14)에서와 같다.

$$\frac{da}{dt} = 1.99 \times 10^{-2} (C_i^*)^{0.78} \quad (12)$$

$$\frac{da}{dt} = 6.1 \times 10^{-3} \cdot (C_i^*)^{0.601} \quad (13)$$

$$\frac{da}{dt} = 1.858 \times 10^{-2} (C_i^*)^{0.678} \quad (14)$$

위의 세 가지 경우에 대해 두 시간의 유지시간 동안 식 (7)의  $C^*$  적분을 계산하고, 이어서 식 (8)을 이용하여 크리프 균열 성장량을 계산한다. KAERI 가 CCG 모델의 개발을 위해 사용한 CCG 시편의 제원은 Fig. 9 에서와 같다.

4.7 크리프-피로 균열성장 평가 및 비교

A16 에서는 피로 균열성장과 크리프 균열성장을 선형적으로 합산하여 크리프-피로 균열 성장량을 계산한다.

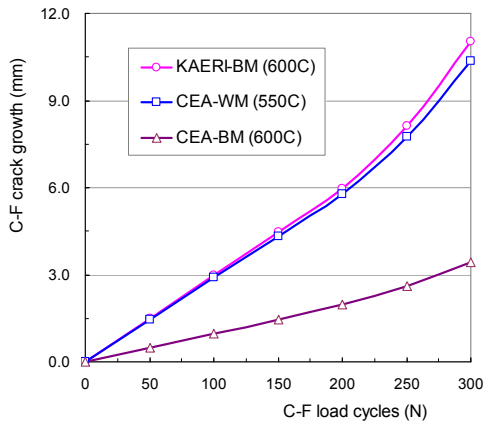


Fig. 11 Creep fatigue crack growth with an application of the primary creep law

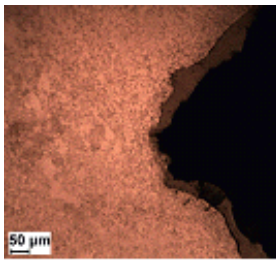


Fig. 12 Creep fatigue crack growth at defect number 2 after 300 cycles

균열 성장량의 평가결과는 먼저 A16 이 제시하는 방법인 일차 크리프 수식을 적용할 경우 Fig. 10 에서 보는 바와 같이 CEA 의 용접금속에 대한 CCG 모델을 적용한 경우에 가장 보수적인 것으로 나타났고, KAERI 의 600°C CCG 모델을 적용한 경우와 CEA 의 600°C CCG 모델을 적용한 경우가 그 뒤를 이었다.

그러나 일차 크리프 수식을 적용한 경우에는 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 균열성장량은 KAERI 모재 모델이 CEA 용접금속 모델보다 약간 더 큰 것으로 나타났고, CEA 모재에서의 균열 성장량이 가장 적은 것으로 나타났다.

Fig. 10 과 Fig. 11 을 비교해보면 크리프-피로 균열 성장량은 일차 크리프 수식을 적용하는 경우 KAERI 모델의 경우 10 배 이상, CEA-용접금속 모델의 경우 약 3 배가 더 크게 나타났다.

일차 크리프가 종료되는 시간은 A3 에 제시된 바와 같이  $t_f = C_3 \sigma^m = 2.869 \times 10^{17} \times \sigma^{-6.9531}$  로 제시되어 있는데, 이를 풀면 일차 크리프 종료 시간은 약 17 시간인 것으로 나타났다. 본 구조시험은 매번 가열-유지-냉각을 반복하는 일차 크리프 조건의 시험이지

만 Fig. 10 및 Fig. 11 을 비교해보면 일차 크리프 수식을 적용하는 경우에 더욱 보수적인 결과가 나오는 것을 알 수 있다.

구조시험에서 300 사이클을 가한 후 관찰한 손상 이미지는 Fig. 12 에서와 같이 균열성장이 일어나지 않았고, 노치 선단에서 둔화 수준의 변형이 발생하였음을 알 수 있다. 따라서 위의 평가 결과는 본 구조시험 문제에서 상당히 보수적인 결과를 주는 것으로 나타났다.

### 5. 결 론

현재 고온 결함평가 절차로서 가장 잘 갖추어진 기술기준은 프랑스의 A16 이지만 이의 적용 범위는 오스테나이트 스테인리스강에 국한되어 있고, 최근 폭넓게 채택되고 있는 Mod.9Cr-1Mo(ASME Grade 91)강에 대한 평가절차는 제시되어 있지 않다.

본 연구에서는 Mod.9Cr-1Mo 강 재료에 대해 A16 절차를 확장시켜 크리프-피로 균열개시 및 크리프-피로 균열성장 평가법을 개발하고, 동 재료로 제작된 IHX 지지구조 모형에 대해 균열개시 및 균열성장 평가를 수행한 후 보수성을 검토하기 위해 Gr.91 재질의 모형을 이용한 구조시험을 수행하고, 이를 평가 결과와 비교 분석하였다.

균열개시 평가와 관련하여  $\sigma_a$  접근법에서  $d=36\mu\text{m}$  인 경우와  $d=50\mu\text{m}$  인 경우에 대해 평가를 수행한 결과  $d$  값이  $36\mu\text{m}$  인 경우가  $50\mu\text{m}$  인 경우보다는 다소 보수적으로 나타났지만 두 결과는 큰 차이를 보이지는 않았다.

균열성장 평가에서는 Gr.91 재료의 피로균열성장 (FCG) 및 크리프 균열성장(CCG) 모델에 대해 CEA 가 제시한 550°C 모델을 적용하였고, 또한 KAERI 가 개발한 600°C 의 CCG 모델을 적용하여 평가를 수행하였다. 평가 결과를 구조시험에서 얻은 결함 이미지와 비교한 결과 KAERI 의 CCG 모델이 가장 보수적으로 나타났고, CEA 의 용접 모델과 CEA 의 모재 모델이 그 뒤를 이었다.

향후 Gr.91 강 의 결함 평가에서 보수성 저감 및 신뢰성 향상을 위해 추가적 구조 시험 연구가 수행될 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 지원을 받아 2009 년도 원자력연구개발사업 (M20701020001-08M0102-00110)을 통해 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Hahn, D-H, et. al., 2007, *KALIMER-600 Conceptual Design Report*, KAERI/TR-3381, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon.
- (2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2007, Section III, Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components, Div. 1, Subsection NH, *Class 1 Components in Elevated Temperature Service*, ASME.
- (3) RCC-MR, Section I Subsection B, 2007, *Design and Construction Rules for Mechanical Components of Nuclear Installations*, AFCEN.
- (4) High Temperature Structural Design Guideline for Fast Breeder Demonstration Reactor (draft), 1999, JAPC.
- (5) RCC-MR, Section I Subsection Z, 2007, Technical Appendix 16, *Design and Construction Rules for Mechanical Components of Nuclear Installations*, AFCEN.
- (6) R5, *Assessment Procedure for the High Temperature Response of Structures*, Issue 3, 2003, British Energy Generation Ltd.
- (7) API579, 2001, API Recommended Practice 579, API.
- (8) FITNET FITNESS-FOR-SERVICE Procedure, 2008, Rev. MK8, ISBN 978-3-940923-00-4, Jan.
- (9) Metheron, Ph., Chapuliot, S., 2005, Fatigue Initiation of Crack Under Mode III and Mixed Mode I+III Loads in a 9Cr Steel, *18th Int. Conf. on SMIRT*, Beijing, China, pp. 1896-1903, August, p.7.
- (10) Ancelet, O., Chapuliot, S., 2007, "Mechanical Behavior of HTR Materials : Developments in Support of Defect Assessment, Structural Integrity and Lifetime Evaluation," *Proceedings of ICAPP 2007*, Nice, France, May 13-18, Paper 7182.
- (11) Ancelet, O., Marie, S., 2008, "CEA Developments in Support of High Temperature Defect Assessment, Structural Integrity Lifetime Evaluation," VAMAS TWA31 Annual Meeting, May, 19th, Imperial College London.
- (12) Lee, H-Y, Kim, J-B, Kim, W.-G, Lee, J.-H, 2008, "Creep-Fatigue Crack Behavior of a Mod.9Cr-1Mo Steel Structure with Weldments," *5th Int. Conf. on Creep-Fatigue Interaction*, IGCAR, India, Sept. 24-26.
- (13) Lee, H-Y, Kim, J-B, Kim, S-H, Lee, J-H., 2006, "Assessment of Creep-Fatigue Crack Initiation for Welded Cylindrical Structure of Austenitic Stainless Steels," *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, 83, pp.826~834.
- (14) Lee, H-Y, Lee, J-H., Kim, B-H., 2006, "Creep-Fatigue Crack Growth Behavior of a Structure with Crack Like Defects at the Welds," *Journal of Mechanical Science and Technology*, 20(12), pp. 2067~2076.
- (15) Lee, H-Y, Lee, S-H., Kim, J-B, Kim, Lee, J-H., 2007, "Creep-Fatigue Damage for a Structure with Dissimilar Metal Welds of Mod 9Cr-1Mo and 316L Stainless Steel," *International Journal of Fatigue*, 29, pp.1868~1879.
- (16) Lee, H-Y, Lee, J-H., Nikbin, K., 2009, "Assessment of High Temperature Crack Behavior for a Structure with Defects," *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of ASME*, Vol.131, pp.031403-1~7, June.
- (17) RCC-MR, Section I Subsection Z, 2007, Technical Appendix 3, *Design and Construction Rules for Mechanical Components of Nuclear Installations*, AFCEN.
- (18) ABAQUS Ver. 6.7, 2008, Simulia.