소듐냉각고속로 원형로 중간열전달계통 고온배관의 파단전누설 예비평가

이사용[†]·김낙현^{*}·구경회^{*}·김성균^{*}·김윤재^{**}

Preliminary Leak-before Break Assessment of Intermediate Heat Transport System Hot-Leg of a Prototype Generation IV Sodium-cooled Fast Reactor

Sa Yong Lee[†], Nak Hyun Kim^{*}, Gyeong Hoi Koo^{*}, Sung Kyun Kim^{*} and Yoon Jea Kim^{**}

(Received 1 June 2016, Revised 17 June 2016, Accepted 27 June 2016)

ABSTRACT

Recently, the research and development of Sodium-cooled Fast Reactors (SFRs) have made progresses. However, liquid sodium, the coolant of an SFR, is chemically unstable and sodium fire can be occurred when liquid sodium leaks from sodium pipe. To reduce the damage by the sodium fire, many fire walls and fire extinguishers are needed for SFRs. LBB concept in SFR might reduce the scale of sodium fire and decrease or eliminate fire walls and fire extinguishers. Therefore, LBB concept can contribute to improve economic efficiency and to strengthen defense-in depth safety. The LBB assessment procedure has been well established, and has been used significantly in light water reactors (LWRs). However, an LBB assessment of an SFR is more complicated because SFRs are operated in elevated temperature regions. In such a region, because creep damage may occur in a material, thereby growing defects, an LBB assessment of an SFR should consider elevated temperature effects. The procedure and method for this purpose are provided in RCC-MRx A16, which is a French code. In this study, LBB assessment was performed for PGSFR IHTS hot-leg pipe according to RCC-MRx A16 and the applicability of the code was discussed.

Key Words : sodium-cooled reactor, leak-before break, elevated temperature, creep-fatigue crack growth

기호설명	C_G	: 임계균열 길이
	C_i	: 초기 균열 길이
a : 균열의 깊이, 균열의 길이	C_{L}	: 감지가능한누설균열 길이
A : 피로사용계수, 크리프-피로사용계수	C _P	: 관통시점의 내면균열 길이
A,q: 크리프 균열 성장 재료상수	Cs	: 점근 균열 길이
C, n : 피로 균열 성장 재료상수	C^*	: 크리프 균열성장 매개변수
Cd : 감지가능한관통균열 길이	d	: 특성거리
	Е	: 탄성계수
* 책임저자, 회원, 한국원자력연구원	E^*	: 등가 탄성계수
sylee86@kaeri.re.kr	h	: 배관의 벽두께
IEL : (042)806-0054 FAX : (042)868-2857 * 하국워자력연구원	i	: 하중사이클 종류 인덱스
** 고려대학교	J	: 탄소성 파괴역학 매개변수

- Jam : 구조물에 작용하는 J-적분값
- Js
 : A16.7300의 방법으로 계산된 구조물에 작용

 하는 J-적분값
- J_{el} : J-적분의 탄성 성분
- K_I : 모드 I의 응력집중계수
- K_{eff} : 유효 응력집중계수
- Q_{det} : 누설감지능
- n_i : 기기의 수명기간 동안 발생한 i 타입 사이클
 횟수
- Nai : 균열개시 전까지 i 타입 사이클 횟수
- q : 균열의 닫힘, 평균응력에 따른 상수
- t : 크리프 온도 이상에서 유지시간
- T : 크리프파단수명
- W : 크리프 사용 계수
- Δε₁ : 탄성변형률
- Δε2 : 1차응력 변화에 따른 소성 변형률
- Δε₃ : 응력-변형률 반복곡선에 따른 소성 변형률
- Δε₄ : 응력삼축도에 따른 소성변형률
- Δ_{cfl} : 크리프변형률 범위
- σ_d : 균열선단에서 d 만큼 떨어진 위치의 응력

 σ_{kd} : σ*의 0.5배로 정의 되는 응력

1. 서 론

최근 사용후핵연료 문제가 대두되면서, 사용후핵 연료를 재활용하여 자원 효율성 극대화하고 장반감 기 핵종을 연소시킬 수 있는 고속로가 주목 받고 있 다. 액체 소듐을 냉각재로 사용하는 소듐냉각고속로 (SFR)은 그 실현가능성 관점에서 다른 노형에 비해 더 주목 받고 있지만, 냉각재로 사용하고 있는 소듐 이 누설될 경우 화재로 이어질 수 있기 때문에 SFR 에서 소듐냉각재의 누설은 최소한으로 제한되어야 한다.

파단전누설(LBB) 개념은 냉각재 경계에 존재하는 균열의 불안정성장이 발생하기 전에 누설을 감지하 여 냉각재 경계의 파단을 근본적으로 방지하는 것이 다. SFR의 소듐냉각재는 반응성이 매우 큰 물질이므 로 공기 중의 수분과 쉽게 반응하여 화재가 발생 할 수 있다. 따라서 소듐냉각재의 대량누설은 대형화재 로 이어질 수 있는데LBB개념을 도입하여 소듐냉각 재의 누설을 감지설비의 감지능 수준으로 제한하면 화재의 규모 역시 미약한 수준으로 제한 할 수 있다. 이렇듯 SFR의 설계에 LBB 개념을 적용하여 얻을 수 있는 장점들이 많지만 SFR은 크립을 유발하는 고온환경에서 운전되기 때문에 경수로의 LBB 평 가방법을 그대로 적용 할 수 없다. 따라서, SFR을 개발하는 국가들은 SFR에 적용 할 수 있는 고온 LBB 평가 방법을 개발 하고 있다. 대표적으로 프 랑스와 영국에서 각각 RCC-MRx A16⁽¹⁾과 R6⁽²⁾의 기술기준을 제시하고 있으며, 일본의 경우 연구개 발 중인 평가기술을 아직까지 공개하고 있지 않으 나 2016년 중에 JSME 기술기준에 등재 될 것으로 예상된다.

국내의 경우도 PGSFR이 개발 중이며, 소듐화재 소화/방화 설비 감축과 가동중검사 수행 위치의 최 적화와 감소에 따른 경제성 향상과 파괴역학적 평가 를 통한 심층방어 안전성 증진을 위해 LBB개념을 도입하고자 한다. PGSFR의 LBB 개념 도입을 위해 서 RCC-MRx A16을 준용하는 평가 절차를 수립하 였으며, 수립된 평가 절차에 따라 RCC-MRx A16의 방법을 적용하여 PGSFR IHTS에 대한 LBB 평가를 수행하고 결과를 분석하였다

2. PGSFR LBB 평가 절차

PGSFR의 LBB평가 절차는 기본적으로 RCC-MRx A16의 방법을 따르고 있다.

2.1 평가지점 선정

각 운전조건에 대한 최대응력 발생영역을 선택한 다. 최대응력 발생 영역을 선정하는 방법에는 균열 이 없는 구조물에 대한 선형탄성해석 또는 다른 해 석방법을 적용 할 수 있다. 평가 지점은 다음의 조건 에 따라 선정한다.

- 피로손상을 유발하는 주요 천이하중을 받는 영역
- 막응력에 대한 국부굽힘응력의 비가 가장 큰 영역
- 막응력, 국부굽힘응력이 크게 발생하는 영역
- 용접부와 같이 재질이 취약한 영역

2.2 초기결함 선정

선정된 평가 지점에 초기 결함을 가정한다. 결함 의 형상은 타원형의 면결함으로 가정하며, 최대 주 응력 방향과 결함의 면이 수직하도록 한다. 최대 주 응력 방향이 하중에 따라 달라지는 경우 최대성장을 유발하는 방향으로 한다. 검사 중 발견된 결함에 대 한 평가를 수행 할 때는 RCC-MRx A16.3200에 따라 결함 형상을 단순화하여 고려한다.

2.3결함평가

LBB 개념의 적용을 위해서는 피로나 크리프에 의 한 손상 가능성이 매우 낮음을 입증해야 한다. 따라 서 LBB 평가에 앞서 결함평가를 수행하여 피로나 크리프에 의한 균열 개시 및 성장을 평가해야 한다. PGSFR의 LBB 평가를 위한 결함평가는 RCC-MRx A16.3320을 따른다. 재료에 따른 크리프를 고려해야 하는 온도는 RCC-MRx A3.31⁽³⁾을 따른다.

균열 개시 평가는 가정된 초기결함의 선단에서 균 열이 성장하기 시작하는지 여부를 결정하는 과정인 데 다음과 같이 평가한다. 균열 선단에서 특성거리 d 만큼 떨어진 위치의 응력범위로부터 결정된 탄소성 변형률범위에 대응하는 피로수명과 피로하중 횟수 를 알면 피로사용계수 A를 결정 할 수 있고 A가 1을 초과 할 때 균열이 개시하는 것으로 판정한다. 이때, 응력범위 Δσ_d는 A16.7220의 크리거식(Creager's formula)에 의해 계산된다. 균열 성장 평가는 피로와 크리프에 대해 각각의 균열성장식에 따라 평가한다. 크리프를 무시하는 경우와 고려해야 하는 경우의 자 세한 평가방법은 다음과 같다.

2.3.1 크리프를 무시하는 경우

기기의 운전온도가 RCC-MRx A3.31의 크리프 온 도 미만일 경우 피로 균열개시 및 피로 균열성장 평 가를 수행한다.

피로 균열개시 평가는 피로사용계수 A가 1보다 큰 경우 균열이 개시하는 것으로 판정한다. 피로사 용계수 A를 계산하기 위해 RCC-MRx A16.7200의 방법에 따라 Δσ_d를 결정한다. Δσ_d에 대한 변형률범 위 Δε_i를 식(1)과 같이 계산한다.

$$\Delta \varepsilon_i = \Delta \varepsilon_1 + \Delta \varepsilon_2 + \Delta \varepsilon_3 + \Delta \varepsilon_4 = \Delta \varepsilon_{el+pl} \qquad (1)$$

이때, 사용되는 비탄성 변형률은 RCC-MRx A16.7250의 크리거-노이버(Creager-Neuber) 절차에 따라 계산한다.

σ_d방법에 의해 계산된 Δε_i를 이용하여 피로사용계
 수 A를 결정한다.

$$A = \sum A_i = \sum \frac{n_i}{N_{ai}} \tag{2}$$

A가 1보다 크면 균열이 개시하므로 잔여수명 n_{ir}에 대한 균열성장 평가를 수행한다

균열성장 평가를 위해서 각 하중 사이클 종류의 유효응력확대계수 ΔK_{eff}를 결정한다. 유효응력확대 계수는 식(3)과 같이 계산한다.

$$\Delta K_{eff} \equiv q \sqrt{E \Delta J_s} \tag{3}$$

균열개시 후 잔여수명 n_{ir}에 대한 균열성장은 식 (4), (5)와 같다.

$$\frac{da}{dN} = C \left| \Delta K_{eff} \right|^n \tag{4}$$

$$\left(\delta a_{fa}\right)_i = \sum_{N=0}^{N_{tr}} C \left|\Delta K_{eff}\right|^n \tag{5}$$

균열성장 평가에 따른 최종 균열은 리가먼트 파단 방지를 위해서 RCC-MRx RB3251의 요건을 만족해 야한다.

최종균열 선단에서의 균열진전력은 J_{IC}이하로 제 한된다. 최종균열에 대한 불안정유발 하중은 각 운 전수준의 하중보다 커야 한다.

2.3.2 크리프를 고려하는 경우

기기의 운전온도가 RCC-MRx A3.31의 크리프 온 도 이상일 경우 다음과 같은 절차를 따라 결함평가 를 수행한다.

균열개시평가에 크리프를 고려하는 경우에는 크 리프-피로사용계수 A와 크리프사용계수 W의 좌표 (A, W)가 크리프-피로 관계선도보다 높이 위치하면 균열이 개시하는 것으로 판정한다. 균열이 개시할 경우, 원점과 점(A, W)를 잇는 직선과 크리프-피로 관계선도의 교점을 이용하여 잔여수명을 결정하고 잔여시간에 대한 균열성장 평가를 수행한다.

크리프-피로사용계수 A를 계산하는데 필요한 변 형률 범위 Δε는 식(6)과 같이 구한다.

$$\Delta \varepsilon_i = \Delta \varepsilon_{el+pl} + \Delta \varepsilon_{fl} \tag{6}$$

크리프변형률 범위 Δεn은 RCC-MRx A16.7270의

크리거-노이버 절차에 따라 계산한다. 계산된 Δε,를 이용하여 크리프-피로사용계수 A를 결정한다.

$$A = \sum A_i = \sum \frac{n_i}{N_{ai}} \tag{7}$$

크리프사용계수 W는 식(8)과 같이 계산한다.

$$w = \frac{t}{T} \tag{8}$$

이때, 크리프파단수명 T는 크리프파단 선도에서 σ_{kd} 에 대응 하는 시간이다. σ_{kd}는 RCC-MRx A16.7271.2 에 따라 결정한다.

잔여수명에 대한 피로균열성장량과 크리프균열성 장량의 합으로 한다. 각 균열성장량은 다음과 같이 계산한다.

피로균열성장 :

$$(\delta a_{fa})_i = c[(\Delta K_{eff})_i]^n \tag{9}$$

크리프균열성장 :

$$(\delta a_{fl})_i = \int_{t_i}^{t_i + t_{mi}} A(C_i^*(t))^q \, dt \tag{10}$$

따라서 총 균열성장량은 δ a₀+δ a_n과 같다.

결함평가에 따른 최종 균열은 리가먼트 파단을 방 지하기 위한 요건으로 RCC-MRx RB3251을 만족해 야 한다. 또한 리가먼트의 크리프 파단을 방지하기 위해 RB3252의 요건을 만족해야 한다.

최종균열 선단에서의 균열진전력은 JIC이하로 제 한된다. 최종균열에 대한 불안정유발 하중은 각 운 전수준의 하중보다 커야 한다.

2.4 LBB 판정

LBB 개념이 성립하려면 임계균열길이 C_G와 감지 가능한 관통균열길이 C_d가 다음과 같은 조건을 만족 해야 한다.

$2C_d < 2C_G/\alpha$

이때, α 는 안전계수로써 일반적으로 2를 취한다. C_d와 C_G는 다음의 절차에 따라 결정된다. 2.4.1 감지가능한누설균열 길이(CL)

감지 가능한 균열길이는 감지가능한 최소 누설량 으로부터 RCC-MRx A16.3430에 따라 식(11)과 같이 계산된다.

$$C_L = \left[Q_{\text{det}} \frac{6\mu_{Na}hE^3}{\pi^3 \Delta P(k_m\sigma_m - k_b\sigma_b)^3} \right]^{\frac{1}{4}}$$
(11)

단, 이 식은 탄성 균열 열림만 고려하고 있으며, 균 열의 열림으로 형성된 유로를 흐르는 유체의 거동이 층류인 경우에만 유효하다.

탄소성 균열 열림과 누설 거동이 난류인 경우에는 RCC-MRx A16.3430의 대체 수식을 사용한다.

2.4.2 관통시점의 내면균열 길이(C_P)

초기에 가정한 미 관통 표면 균열이 관통균열로 성장하였을 때, 내면의 균열길이 Cp는 RCC-MRx A16.3441의 방법으로 구한다. RCC-MRx A16.3441a 의 마스터커브에서 Cs를 읽는다. 마스터커브에서 읽 은 Cs와 Ci의 관계에 따라 다음과 같이 Cp가 결정된다.

> C_i ≤ (4/3)C_s 일 때, 2C_p=2C_s+0.5C_i C_i>(4/3)C_s 일 때, 2C_p=2C_i

2.4.3 감지가능한관통균열 길이(Cd)

균열의 성장에 따라 외면의 균열 길이가 C_L이 됬 을 때, 내면의 균열길이(감지가능한 관통균열길이) C_d는 RCC-MRx A16.3442b~d의 선도를 이용해 결정 한다. A16.3442b~d의 선도는 아래의 조건에 따라 선 택한다.

> C_P≤10h, C_i≤(4/3)C_s일 때, A16.3442b C_P≤10h, C_i>(4/3)C_s일 때, A16.3442c C_P>10h일 때, A16.3442d

이때, C_p는 관통균열의 내면길이, C_i는 초기균열의 내면길이를 의미한다.

2.4.5 임계균열 길이(C_G)

임계균열길이 C_G는 NUREC-1061 Vol. 3⁽³⁾ Appendix A 에 따라 J-T방법으로 결정한다. 재료의 파괴저항(J-R) 곡선으로부터 구한 J_{mat}-T선도와 구조물의 J_{app}-δa곡선으 로부터 구한 J_{app}-T 선도의 교점에 대응하는 δa와 초 기균열길이의 합으로 임계균열길이 C_G를 결정한다. 130

3. PGSFR IHTS 고온배관의 LBB 평가

RCC-MRx A16을 기초로 수립된 PGSFR의 LBB 평가 절차의 타당성을 검토하고 개선점을 도출하기 위해 IHTS 고온배관에 대한 평가를 수행하였다. 여 기서 재료상수 및 역학 매개변수는 2010년판 RCC-MRx A3에 제공된 것을 사용하였다.

3.1 평가대상 및 하중

평가대상은 실제 설계가 진행중인 PGSFR의 IHTS 배관 중 고온배관을 선정하였다. IHTS 고온배관은 9Cr-1Mo-V강으로 설계되며 배관의 벽두께는 15.88 mm이다. Fig. 1은 평가대상의 유한요소모델을 나타낸 다. 평가대상의 운전수준 A의 일차하중은 자중과 내 압 0.5 MPa이며, 이차하중은 200°C에서 528°C로 가열 하여 6720시간 유지 후 200°C로 냉각되는 주기의 반복 하중을 180회 가정하였다. Fig. 2는 평가대상이 받는 운전수준 A의 하중주기를 나타낸 것이다. 운전수준 C 의 하중은 소듐-물반응 압력 3.5 MPa로 가정하였다.



Fig. 1 FE model of hot-leg for PGSFR IHTS



3.2 평가지점 선정 및 초기결함 가정

평가지점을 선정하기 위해 수행된 유한요소해석 결과 Fig. 3과 같이 part6로 명명된 곡관의 응력강도 가 가장 큰 것으로 확인되었다. 따라서 평가지점은 part6의 곡관으로 선정하였다.

가상 초기결함을 가정하기 위해서 평가대상지점 의 응력분포 형상과 주응력 방향을 고려하였다. Fig. 4, 5에서 알 수 있는 것과 같이 최대 응력 발생지점 은 곡관의 측면부이며 주응력 방향은 원주방향이다. 따라서 주응력 방향에 결함의 면이 수직하도록 길이 방향의 내면결함을 가정하였다. 가정된 초기결함의 길이와 깊이는 각각 12 mm, 6mm 이다.



Fig. 3 Time history of stress intensity under level A condition



Fig. 4 Stress distribution at the evaluated location



Fig. 5 Stress distribution at the evaluated location

3.3 결함평가

결함평가에 필요한 파괴역학 매개변수들은 RCC-MRx A16.8000에서 제시하는 해를 통해 구할 수 있 다. A16.8000은 다양한 배관형상과 균열형상에 대한 파괴역학 매개면수 해를 제공한다. 따라서 결함평가 에는 A16.8000에서 제공하는 파괴역학 매개변수 해 를 이용해 평가를 수행하였다. 2012년 판 RCC-MRx A3에는 제공되지 않는 9Cr-1Mo-V강의 재료물성은 2010년판 RCC-MRx A3를 참고하였다. 균열개시 평 가에 사용되는 σ_d방법을 위한 특성거리 d는 2010년 판에서도 제공되지 않아 0.05mm로 가정하였다.

3.3.1 균열개시 평가

크리프-피로 사용계수 평가 결과 식(6)과 같이 계 산된 총 변형률범위는 1.35% 이며 여기에 대응하는 피로수명은 44.2회 이다. 가정된 180회 주기에 대한 크리프-피로 사용계수 A는 4.07이다. 크리프 사용계 수 평가 결과 σ_{kd} 는 164.79MPa로 계산되었으며, 여 기에 대응하는 크리프파단 수명은 169만 시간이다. 60년 수명과 80% 가동율을 가정하면 42만 시간에대 한 크리프 사용계수 W는 0.21이다. 이를 크리프-피 로 관계선도에 나타내면 Fig. 6과 같다. 점 (A, W)가 크리프-피로 관계선도를 초과함으로 균열이 개시하 는 것으로 판정하며 잔여수명은 162.11회 이다.

3.3.2 균열성장 평가

피로 균열성장 평가에 사용되는 파괴역학 매개변 수 ΔK_{eff}는 3.316MPa√m 이며, 수정한계하중방법으 로 계산되었다. 식(9)에 잔여수명 162.11회를 곱하여 피로 균열성장량을 0.46mm로 계산하였다. 피로균열 성장 재료상수 C와 n은 각각 2.77×10⁻⁷, 1.94이며, A3 에서 제공하는 값을 보간하여 얻었다.



Fig. 6 Crack initiation evaluation (creep-fatigue curve)

크리프 균열성장은 식(10)을 식(12)와 같이 전개하 여 계산하였다. C*가 아래의 식(13)과 같이 Jel과 참 조응력, 참조변형률로 계산되는 것을 이용하였다. 잔 여수명 162.11회와 회당 유지시간 6720시간을 고려 하여 108만시간으로 계산된 크리프 균열성장량은 0.79mm이다. 크리프 균열성장 재료상수 A, q는 각각 0.003076, 0.6이며, 이차 크리프 멱법칙 상수 C, n은 각각 1.58×10⁻²³, 8.5479를 사용하였다.

$$\begin{split} \delta a &= \int_{t_i}^t A(C^*(t))^q dt = \int_{t_i}^t A\left(J_{el}\left[\frac{E\dot{\varepsilon}_{ref}}{\sigma_{ref}}\right]\right)^q dt \ (12) \\ &= \left[A\left(\frac{J_{el}E}{\sigma_{ref}}\right)^q\right] \\ &\left(\int_{t_i}^{t_{ffp}} \left(K\varepsilon_{ref}^x \sigma_{ref}^y\right)^q dt + \int_{t_{ffp}}^t \left(C\sigma_{ref}^n\right)^q dt\right) \\ &C^* &= J_{el}\left[\frac{E\dot{\varepsilon}_{ref}}{\sigma_{ref}}\right] (13) \end{split}$$

균열성장평가 결과 총 균열성장량은 1.25 mm이 다. 최종균열의 J_s는 0.057 MPa·mm로 평가되었으며 9Cr-1Mo-V강의 J_{IC}는 476.17 MPa·mm이므로 균열은 안정하다. 이때, JIC는 RCC-MRx A3에 제공되지 않 음으로 Fig. 7에 나타낸 실험결과를 활용하였다. 리 가먼트 파단을 방지하기 위해 아래의 요건중 1개를 만족해야한다.

$$\begin{split} P_m &\leq S_m \\ P_L &\leq 1.5S_m \\ P_L + P_b &\leq 1.5S_m \end{split}$$

리가먼트에서 평가된 막응력 Pm은 31.59 MPa이며, 허용응력 Sm은 134.8 MPa이므로 일차하중에 의한 손상방지 요건을 만족한다.





3.4 LBB 평가

RCC-MRx A16.8000에는 곡관에 존재하는 관통균 열에 대해서는 파괴역학 매개변수 해가 아직 제공되 지 않고 있다. LBB 평가에서는 관통균열을 가정하 므로 파괴역학 매개변수를 계산하기 위해서 유한요 소해석을 수행하였다. Fig. 8은 유한요소모델을 나타 낸 것이다.



Fig. 8 FE model of through-wall crack in elbow

3.4.1 CL 및 Cd

식 (11)의 k_m, k_b는 A16.8321.5에 제시되어 있다. σ_m, σ_b는 A16.8611의 해에 따라 각각 22.7 MPa, 11.24 Mpa로 계산되었다. 누설감지능의 10배로 정의되는 Q_{det}은 분당 10 g으로 가정하였다. 가정사항을 고려 하여 계산된 C_L은 22.03 mm이다.

막응력과 굽힘응력의 비로 결정되는 마스터커브 의 X값은 0.67이며 Fig. 9의 마스터커브로 결정된 점근균열길이 C_s는 34.15 mm이다. 초기 균열길이 는 22.03 mm로 가정하면, C_i<(4/3)C_s의 조건에 해당 한다. 따라서 2C_p는 79.32mm이다. C_p가 배관 벽두 께의 10배 보다 작고 C_i<(4/3)C_s인 조건에 맞는 C_d 결정 선도는 A16.3442b이며 2C_d값을 120.65mm로 결 정하였다.



Fig. 9 Master curve for crack growth with stress components

3.4.2 C_G 및 LBB 성립여부

임계균열길이를 결정하기 위해 J-R곡선에서 얻어 진 J_{mat}-T선도와 유한요소해석으로 계산된 J_{app}-T 곡 선을 Fig. 10과 같이 한 평면에 도시하였다. J_{app}-T 곡 선은 유한요소모델의 균열길이를 초기균열로부터 일정하게 증가시키면서 작성되었으며 Fig. 10에서 교점에 대응하는 유한요소모델의 균열길이를 임계 균열길이 C_G로 결정하였고 그 값은 158.83mm이다. 따라서 LBB 판정기준 2C_G/α는 α를 2로 할 때, 158.83 mm이다.

A16.3442b에 따라 결정된 C_d는 120.65mm로 LBB 판정 기준을 만족한다.



Fig. 10 Determination of critical crack size (J-T curve)

4. 결 론

본 연구에서는 PGSFR의 경제성 향상과 심층방어 개념의 안정성 증진을 위해서 LBB 개념을 도입하고 자 RCC-MRx A16을 기초로 PGSFR LBB평가 절차 를 수립하였다. 또한 PGSFR LBB 평가 절차에 따라 PGSFR IHTS 고온배관에 대한 평가를 수행하였다. 이상의 연구수행 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다. (1) 예비평가 결과 PGSFR IHTS 고온배관 곡관부 의 C_d는 현재의 RCC-MRx 코드에서 규정이 제시되 지 않고 있는 상태이며, 유사한 조건을 사용한 경우

오므로 최종 판정을 내릴 수 없는 상태이다. (2) 또한 2012년 판 RCC-MRx는 LBB 평가에 필요 한 9Cr-1Mo-V 강의 재료물성을 제공하지 않는다. 따

LBB 개념이 성립하는 값과 성립하지 않는 값이 나

라서 현재 시점에서 LBB 평가 결과의 신뢰도를 논하기 어렵다.

(3) RCC-MRx A16의 (파괴)역학 매개변수 계산을 위한 해와 해를 계산하기 위해 필요한 상수가 충분 히 제공되지 않으므로 유한요소해석으로 대체가 필 요한 부분이 많다.

(4) 앞에서 논의한 것과 같이 RCC-MRx는 현재 평 가 방법론 자체도 미완성 상태이고 특히 9Cr-1Mo-V 재료에 대한 물성치가 미비하기 때문에 코드의 개정 이 필요하며, PGSFR에 적용하기 위한 LBB 평가방 법론도 RCC-MRx의 개정과 연계하여 지속적으로 연 구개발이 필요한 점을 확인하였다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Afcen, 2012, "Guide for prevention of fast fracture, Leak before Break analysis and defect assessment," *RCC-MRx Sec.III*, Sub. Z, App. A16
- (2) British Energy, 2000, "Assessment of the integrity of structures containing defects," R6-rev. 4.(3)
- (3) Afcen, 2010, "Properties groups for materials general," RCC-MRx Sec.III, Sub. Z App.A3
- (4) USNRC, 1984, "Evaluation of Potential for Pipe Breaks," NUREG-1061, Vol.3.
- (5) Kim, Y. J., Jae, J. H., Kim, J. S., Kim, D. J. and Kim, H. W., 2015, "Evaluation of Leak-Before Break for IHTS of PGSFR," *KAERI/CM-2214*