

RCC-MR A16에 따른 고온 구조물의 크립피로 균열성장 평가

Assessment of Creep-Fatigue Defect Growth for High Temperature Structure Using RCC-MR A16 Procedure

박창규, 김종범, 이재한

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 연구는 고온 액체금속로 설계코드인 프랑스 RCC-MR A16에서의 파단전누설(LBB) 절차를 분석하고 고온 원통구조물의 균열에 대하여 크립피로 균열성장 평가 절차에 따라 성장량을 평가하였다. 균열성장 평가에서의 하중은 축방향 인장력과 원자로의 가열-유지-정지를 모사하는 열하중이 반복되는 것을 고려하였다. 고온 원통구조물의 원주방향 관통균열 대한 균열성장 평가 결과 성장량은 매우 작게 평가되었으며 실제 시험에서도 균열 성장은 발생하지 않았다.

Abstract

In this study, the Leak Before Break(LBB) procedure of RCC-MR A16 which is the Design Code of Liquid Metal Reactor is evaluated and the creep-fatigue defect growth for high temperature cylindrical structure is assessed. In defect growth assessment, the tension load in axial direction and the thermal transient load with hold time are applied. From the result of defect growth assessment for circumferential throughwall defect in high temperature cylindrical structure, total growth is very small and the defect growth is not rarely occurred in creep-fatigue structural test.

1. 서 론

액체금속로인 KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor)는 고온에서 운전되므로 구조물의 안전성과 구조건전성을 확보하기 위해서 보수적인 설계코드의 적용이 필요하다. 구조물은 기본적으로 결함이 존재하지 않도록 설계해야 하지만 실제 대부분의 구조물들은 처음부터 재료에 결함이 존재하거나 용접, 제작 및 설치 중에 만들어진 균열 또는 균열이 발생할 수 있는 결함을 포함하고 있기 쉽고 또한 운전하중에 의해서 결함이나 균열이 발생하기도 한다[1].

액체금속로에 초기 결함이나 균열이 존재한다고 구조물이 바로 위험해지는 것은 아니다. 결함이 임계 크기보다 작다면 구조물에서의 결함 및 하중의 형태에 따라 아임계 균열 성장을 할 수도 있고 성장이 멈추기도 하므로 원자로 구조물의 운전에는 큰 영향을 미치지 않을 수도 있다. 하지만 초기 균열이 임계크기보다 커지면 불안정 성장을 하여 구조물을 관통하여 누설이 발생할 수도 있고 균열이 점차 성장하여 파단에 이를 수도 있다. 이러한 액체금속로 고온구조물에 대한 심층적인 안전성과 구조건전성을 확보하기 위해서는 파단전누설 및 균열 성장 평가 기술 개발이 요구된다[2].

KALIMER-600은 원자로 내부의 일차소듐 냉각재 온도가 510℃이고 목표 운전 수명은 40년 이상으로 설계된다. 만일 원자로 구조물에 균열이 존재하게 되면 운전기간 중 원자로를 정지했다가 정상 운전상태로 재가동이 반복되는 하중에 의하여 균열부에서는 크리피로 균열이 성장할 수 있다. 원자로 선진국에서 개발한 고온구조물 설계 코드로는 ASME-NH[3], RCC-MR[4], R5/R6[5] 등이 있지만 본 연구에서는 2002년 개정된 프랑스 고온설계 코드인 RCC-MR의 A16[6]에서의 파단전누설 적용 절차를 분석하고 관통 균열이 있는 원통구조물이 고온 유지시간을 갖는 반복 열하중과 인장하중을 받는 경우에 대한 크리피로 균열성장을 평가하였다.

2. 파단전누설 절차

액체금속로에서의 파단전누설(LBB) 평가 목적은 누설이 발생하는 균열부에서 구조 파단이 일어나기 전에 유체가 담긴 배관이나 용기와 같은 구조물들의 누설을 운전 상태에서 감지하는 것이 가능한 지를 결정하기 위한 것이다[6]. RCC-MR의 A16은 파단전누설과 균열 평가에 관한 내용을 제공하는데 파괴역학 개념에 기초한다.

그림 1은 RCC-MR A16에서의 파단전누설 적용 판단 절차를 개략적으로 나타낸 것인데 다음과 같다.

- i) 파단전누설 적용 대상물을 균열이 없는 구조물로 가정하고 최대응력이 발생하는 부분을 선택한다. 최대응력은 주로 피로 손상을 발생시키는 온도 천이구역이나 막응력에 대한 굽힘응력의 비가 가장 큰 부분에서 발생한다.
- ii) 선택된 영역에서의 균열 성장과 안정성을 평가하기 위한 미관통/관통 균열을 설정한다. 균열성장은 사이클당 응력편차가 가장 큰 사이클에 대하여 평가하고 안정성은 최대 하중이 가해지는 상태에서 인장응력이 최대인 순간에 대하여 평가한다.

- iii) 일정 하중 사이클이 작용한 후 미관통 균열이 성장한 크기를 계산한다. 초기 반타원형 균열이 사이클 후에도 반타원형 균열인지를 평가한다. 또한 최종 하중이 가해진 상태에서의 균열에 대한 불안정성 또는 급속 파단 발생 여부를 분석한다.
- iv) 미관통 균열이 성장하여 관통이 이루어지면 감지 가능한 누설량에 대한 감지 가능한 균열의 크기를 계산한다. 하중에 의해 감지 가능한 관통균열은 먼저 외부 표면으로 관통이 이루어져야 하는데 외부 표면에서의 관통 균열의 크기가 감지 가능한 균열 크기로 성장하면 이때의 내부표면에서의 균열 크기도 결정한다.
- v) 탐지 가능한 관통균열의 불안정성 또는 급속 파단 해석을 통하여 관통균열의 임계 크기($2C_G$)와 허용 가능한 관통 균열의 크기($2C'_G=2C_G/2$)를 결정할 수 있다(그림 2). 파단전누설은 감지 가능한 외부 표면의 균열 크기가 허용 가능한 관통균열의 크기보다 작을 때 적용 가능하다.

감지 가능한 최소 누설량을 Q_{min} 라고 할 때 감지 가능 누설량은 $Q_{det}=10Q_{min}$ 으로 결정한다. Q_{det} 가 결정되면 감지가능 균열의 길이($2C_L$)와 폭(δ)을 계산한다.

감지 가능한 반타원형 균열의 폭은 막응력과 굽힘응력 그리고 균열 길이의 함수로 정의된다.

$$\delta = \delta_{el} \frac{E \cdot \epsilon_{ref}}{\sigma_{ref}}, \quad \epsilon_{el} = \frac{4 \cdot C_L}{E} \cdot (k_m \sigma_m - k_b \sigma_b) \quad (1)$$

단, $(k_m \sigma_m - k_b \sigma_b) > 0$ 인 경우에만 적용한다.

감지 가능한 균열의 길이는 식 (2)로 표현된다.

$$C_L = \left[\frac{Q_{det}}{\pi^3 \cdot \Delta P \cdot (k_m \sigma_m - k_b \sigma_b)^3} \cdot \frac{6 \cdot \mu_{NA} \cdot h \cdot E^3}{\pi^3 \cdot \Delta P \cdot (k_m \sigma_m - k_b \sigma_b)^3} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

여기서, $k_m, \sigma_m, k_b, \sigma_b$ 는 A16에서 정의되는 값이고 ΔP 는 내외면의 압력차, h는 시편의 두께를 나타낸다.

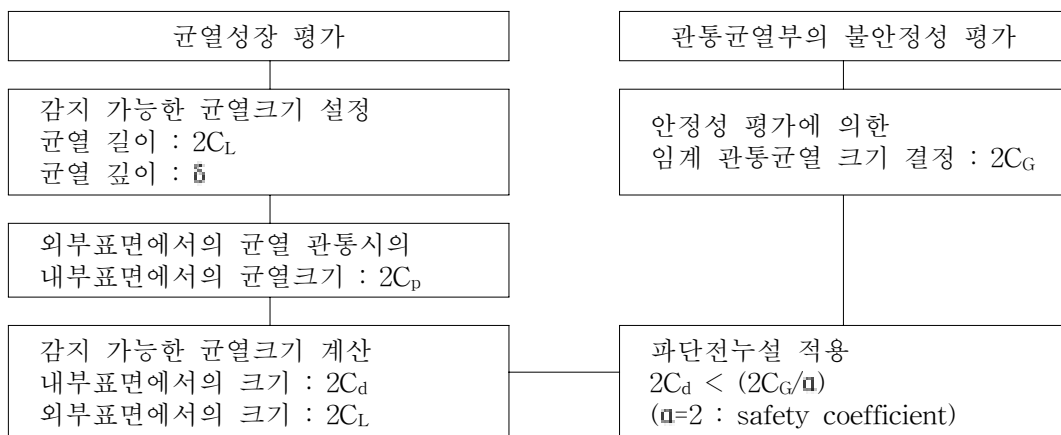


그림 1 RCC-MR A16에서의 파단전누설 적용 판단 절차

감지가능 균열의 크기가 결정되면 외부 표면에서 관통이 발생할 때의 균열 크기($2C_p$)를 계산한다. 초기 균열 크기를 $2C_i$ 라 할 때, A16의 master curve에서 구한 $2C_s$ 를 $2C_i$ 와 비교하여 $2C_p$ 를 결정하는데 $2C_i$ 가 $2C_s$ 보다 클 경우에는 $2C_p=2C_s$ 를 적용하고 $2C_i$ 가 $2C_s$ 보다 작을 경우에는 $2C_p=2C_i$ 를 적용한다.

관통 균열이 발생하면 반타원형 균열은 형상이 점차 변하게 된다. 균열이 변화하는 양상은 $2C_i$ 와 $2C_s$ 의 크기에 따라 다르다. 그림 2-(a)와 같이 $2C_i$ 가 $2C_s$ 보다 작으면 관통이 이루어진 후의 균열은 내부와 외부에서 동시에 점차 커진다. 하지만 그림 2-(b)처럼 $2C_i$ 가 $2C_s$ 보다 크면 $2C_i$ 가 $2C_s$ 보다 작아질 때 까지 내부 균열의 크기는 일정하게 유지되고 외부 균열만 성장하게 된다. 균열이 성장하여 $2C_i$ 가 $2C_s$ 보다 작게 되면 균열은 앞의 경우와 동일하게 내부와 외부에서 동시에 성장하게 된다. 그림 2는 $2C_i$ 와 $2C_s$ 에 따른 균열성장 양상을 나타낸 것이다.

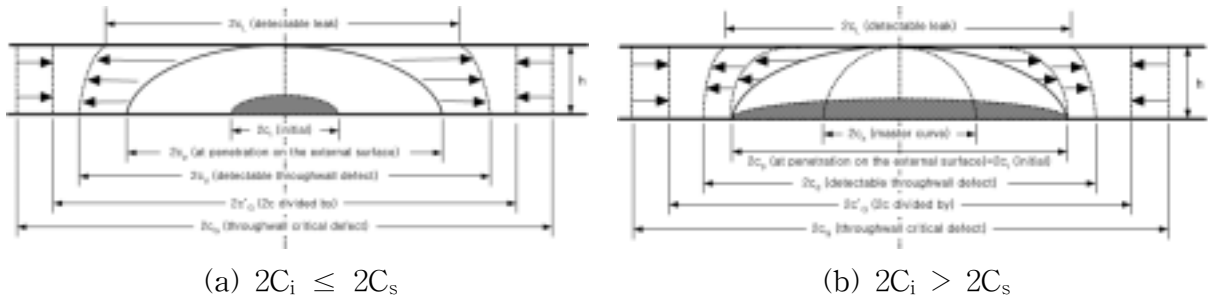


그림 2 초기 균열 크기에 따른 균열 성장 양상

3. 균열성장 평가

주기적인 반복 하중을 받는 구조물의 구조건전성에 주로 영향을 주는 것은 피로 하중이지만 고온에서 운전되는 액체금속로의 경우에는 크립의 영향도 고려해야 한다. 2002년 개정된 RCC-MR A16에서는 다양한 구조 형상에 대하여 크립피로 균열 발생 시작과 균열성장 방법 등을 제시하였고 하중 제어조건과 하중의 종류 등에 따라 매개변수의 구성식과 관계식을 세분화 하였다. 그림 3은 RCC-MR A16 크립피로 균열성장 평가 절차를 나타낸 것이다.

3.1 피로균열 성장

피로 균열성장은 균열이 있는 구조물이 반복하중을 받을 때 발생하는 것으로 매개변수로 응력강도계수 K 를 사용하여 식 (3)으로 표현된다.

$$\delta a_f = C[\Delta K_{eff}]^n \quad (3)$$

여기서 E^* 는 탄성계수를 나타내는데 평면응력 조건에서는 $E^* = E$ 이고 평면변형률 조건에서는 $E^* = E/(1-\nu^2)$ 이다.

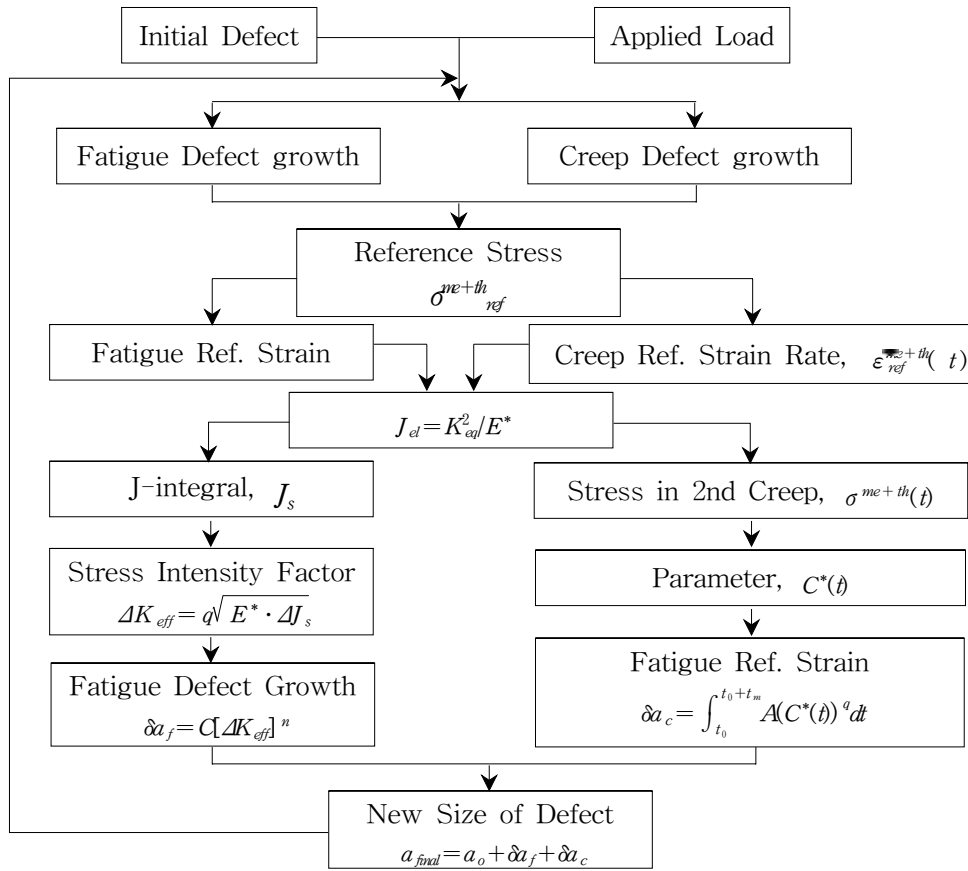


그림 3 RCC-MR A16 크립피로 균열성장 평가 흐름도

식 (3)에서 ΔK_{eff} 는 유효응력강도계수를 나타내는데 $\Delta K_{eff} = q\sqrt{E^* \cdot \Delta J_s}$ 의 관계식으로 표현된다. 결국 ΔK_{eff} 는 J_s 의 함수로 나타내어 지는데 이는 하중의 종류와 제어 조건에 따라 달라진다. 즉, 기계적 하중만 작용하는 경우, 열 하중만 작용하는 경우 그리고 두 하중이 조합되어 작용하는 경우에 대하여 하중 제어 조건 또는 변형률 제어 조건에 따라 J_s 를 적용하는 관계식이 달라진다.

기계적 하중과 열하중이 동시에 작용하여 두 하중을 조합하여 적용하는 경우의 J_s 는 식 (4)와 같다.

$$J_s = \left[\sqrt{J_{el}^{me}} + \frac{\sigma_{el}^{me+th}}{\sigma_{el}^{me+th}} \sqrt{J_{el}^{th}} \right]^2 \cdot \frac{E \cdot \epsilon_{ref}^{me+th}}{\sigma_{ref}^{me+th}} \quad (4)$$

여기서, ϵ_{ref} 와 σ_{ref} 는 각 하중상태에서의 참조 변형률과 참조 응력을 각각 나타낸다.

3.2 크립 균열성장

크립 균열성장은 균열이 있는 구조물이 크립이 발생하는 온도 영역에서 일정시간(t_m) 동안 유지될 때 발생하는데 그 성장량은 식 (5)로 표현된다.

$$\delta a_c = \int_{t_0}^{t_0+t_m} A(C^*(t))^q dt \quad (5)$$

여기서 $C^*(t)$ 는 크립 균열성장에 사용되는 매개변수로서 하중의 종류와 하중 조건에 따라 다르게 정의된다.

기계적 하중과 열하중이 동시에 작용할 경우에서의 $C^*(t)$ 는 식 (6)을 적용한다.

$$C^*(t) = \left[\sqrt{J_{el}^{me}} + \frac{\sigma^{me+th}(t)}{\sigma_{el}^{me+th}} \sqrt{J_{el}^{th}} \right]^2 \cdot \frac{E \cdot \bar{\epsilon}_{ref}^{me+th}(t)}{\sigma_{ref}^{me+th}(t)} \quad (6)$$

3.3 원통구조물의 크립피로 균열성장 평가

크립피로 균열성장 평가에 사용되는 모델은 외경이 60cm, 높이가 50cm, 두께가 0.7cm인 원통구조물로서 실제 원자로 구조물에서는 원자로용기의 축소모델 또는 배관 모델로 간주할 수 있다. 균열은 원주방향 관통 결함을 인위적으로 만들었는데 외부표면에서의 길이는 10mm, 내부표면에서의 길이는 9.8mm로 설정하였다. 하중은 축방향으로 50톤의 인장하중이 작용하고 정상상태에서 구조물의 외부표면 온도는 550℃, 내부표면은 530℃이다. 열하중은 1 사이클이 상온 정지상태에서 정상상태 도달시까지의 가열시간은 8분, 정상상태 유지시간은 1시간, 정상 상태에서 상온으로의 냉각시간은 1시간으로 이루어지는데 전체 100사이클을 실시한다. 그림 4는 원통구조물의 균열 형상 및 정상상태에서의 축방향 온도분포를 나타낸 것이다. 구조물의 재료는 316 SS를 사용하였는데 온도에 따른 재료의 물성치를 표 1에 나타내었다.

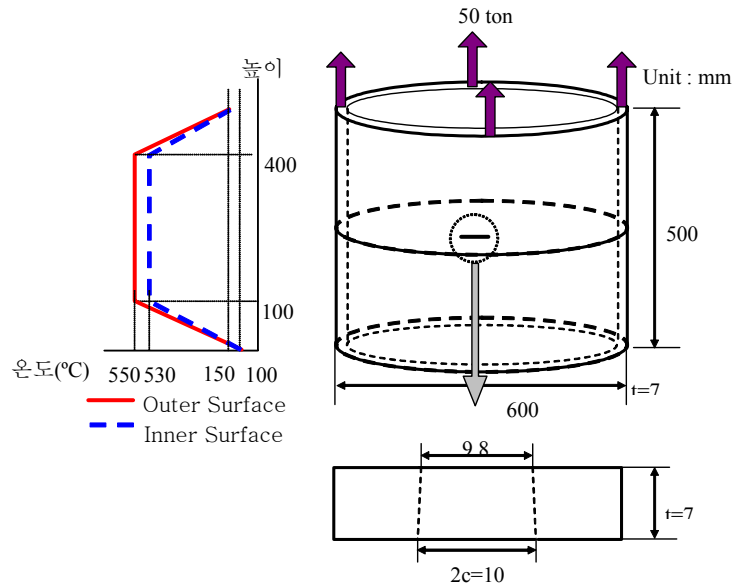


그림 4 원주방향 관통 균열이 있는 원통구조물과 축방향 온도분포

표 1 316 SS의 온도에 따른 물성치

Temperature (°C)	Thermal Expansion (-)	Elastic Modulus (GPa)	Poisson Ratio (-)
21	1.5119e-5	195.40	0.27
93	1.5749e-5	190.44	0.27
260	1.6968e-5	179.75	0.28
371	1.7619e-5	170.79	0.29
530	1.8360e-5	156.09	0.30
550	1.8469e-5	153.33	0.30

피로 균열성장 평가에는 식 (3)을 사용하는데 316 SS 재료에 대하여 $C=4.662 \times 10^{-7}$, $n=2.339$ 이다[7].

인장 하중과 열하중이 동시에 작용하므로 유효응력강도계수를 구하기 위한 J_s 는 식 (4)를 적용한다. 원통구조물의 관통균열에 대한 응력강도계수 K_I 는 식 (7)로 구한다.

$$K_I = (\sigma_m F_m + \sigma_b F_b + \sigma_{gb} F_{gb}) \sqrt{\pi \cdot c} \quad (7)$$

여기서, c 는 균열 길이의 반, h 는 구조물의 두께를 나타내고 F_m , F_b , F_{gb} 는 구조물 및 균열의 형상에 따라 정의되는 상수값이다.

응력강도계수로부터 참조응력과 참조변형률을 구하고 이로부터 J-적분값과 유효응력강도계수를 구하면 $J_s = 3.977 \times 10^{-4} \text{ MPa} \cdot m$, $\Delta K_{eff} = 7.846 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 가 된다. 이 값들과 식 (3)으로부터 사이클당 피로 균열성장량은 $da/dN = 5.769 \times 10^{-5} \text{ mm/cycle}$ 이 된다.

크립 균열성장 평가에는 식 (5)를 적용하는데 재료 상수는 $A = 1.117 \times 10^{-2}$, $q = 0.673$ 이다[8]. 축방향 인장력과 열하중이 동시에 작용하기 때문에 매개변수 $C^*(t)$ 는 식 (6)을 이용한다. 크립변형은 시간에 의존하는 값이므로 일정시간에 대한 크립 영역에서의 응력을 구해야 한다. 316 SS에 대한 이차 크립식을 이용하여 유지시간이 100시간인 경우 크립 영역에서의 응력은 식 (8)로 구한다[9].

$$\sigma^{me+th}(t) = [(n-1)B \cdot E \cdot t + (\sigma^{me+th}(t=0) - \sigma^{me})^{1-n}]^{\frac{1}{1-n}} + \sigma^{me} \quad (8)$$

식 (8)로부터 참조응력과 참조변형률을 구하고 매개변수 $C^*(t)$ 를 계산하여 단위시간당 크립균열 성장량을 구하면 $da/dt = 1.556 \times 10^{-4} \text{ mm/H}$ 가 된다.

RCC-MR A16 절차에 따른 전체 크립피로 균열성장량은 피로 균열성장량과 크립 균열 성장량의 단순합으로 계산되는데 100사이클, 100hr 동안 유지할 경우에 대한 균열성장량은 $2.133 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 가 된다.

4. 결론

본 연구에서는 KALIMER-600에 파단전누설 개념을 적용하기에 위해 고온 구조물 설계 코드인 RCC-MR A16에 따라 파단전누설 개념을 예비 설정하여 그 평가 절차를 분석하여 기술하였고 열하중과 인장하중이 반복적으로 가해질 때 균열이 있는 원통구조물에서의 균열성장 평가 기술을 구축하였다.

파단전누설은 감지 가능한 균열의 크기를 결정하고 구조물의 안전성을 고려하여 임계 관통균열의 크기를 결정하여 파단전누설 적용여부를 판단한다. 균열성장 평가는 개정된 RCC-MR A16 평가 절차에 따라 축방향 인장하중과 두께방향 온도구배가 있는 원통구조물에서의 원주방향 관통균열의 성장에 관한 평가를 수행하였는데 100시간, 100사이클 후의 크립피로에 의한 원주방향 균열성장량은 $2.133 \times 10^{-2} mm$ 정도로 매우 작은 것으로 평가되었는데 실제 크립피로 구조 시험에서도 균열 성장이 발생하지 않았다.

향후 추가적인 하중 사이클을 적용한 고온 구조물의 크립피로 균열 성장시험을 수행하고 균열 발생, 균열 성장 시작 및 균열 성장량 평가 기술을 연계 개발하여 소듐누설 탐지 기술 및 누설량 평가기술 개발 등과 함께 고온 구조물의 파단전누설 평가 기술로 정립해 나갈 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

- [1] 이재한 외, 액체금속로 기계설계 기술개발, KAERI/TR-2704/2004, 한국원자력연구소, 2004.
- [2] 박창규 외, 고온구조물의 파괴역학적 평가 및 크립피로 균열성장 해석, KAERI/TR-2708/2004, 한국원자력연구소, 2004.
- [3] ASME B&PV Code, Section III, Division 1, Subsection NH, Class 1 Components in Elevated Temperature Service, 2001.
- [4] RCC-MR, Design and Construction Rules for Mechanical Components of FBR Nuclear Islands, AFCEN, 2002.
- [5] The R5 Procedures : Assessment of Structural Integrity at High Temperature, Berkeley Nuclear Laboratories Report R5, Nuclear Electric plc, UK.
- [6] A16 : Guide for Leak Before Break Analysis and Defect Assessment, 2002.
- [7] Marie S., Delaval C., "Fatigue and Creep-Fatigue Crack Growth in 316 Stainless

Steel Cracked Plates at 650C", Int. Journal of PVP, Vol.78, pp847-857, 2001.

- [8] Wakai T. and Aoto K., "A Study on the Guideline of Defect Assessment Procedures for Large Scale Fast Breeder Reactor Components (1) Development of Creep-Fatigue Crack Growth Assessment Procedure", JNC TN9400 2000, JNC, 2000.
- [9] Yun-Jae Kim, Jin-Su Kim, Nam-Su Huh, Young-Jin Kim, "Engineering C-integral estimates for generalized creep behavior and finite element validation", Int. Journal of PVP, Vol 79, pp427-443, 2002.