

# 큰 진폭의 반복하중 조건에서 R-ratio에 따른 J-적분 정량화

남현석\*·김윤재†·김진원\*\*

## Quantification of R-ratio effect on J-integral under large-amplitude cyclic loading condition

Hyun Suk Nam\*, Yun Jae Kim† and Jin Weon Kim\*\*

(Received 3 August 2016, Revised 28 November 2016, Accepted 13 December 2016)

### ABSTRACT

This paper presents a method to quantify R-ratio effect on J-integral under large-amplitude cyclic loading condition. Generally, monotonic tearing resistance curves are used to assess stability of cracked nuclear piping under seismic loading. However, it is well known that fracture toughness decrease at cyclic loading condition, according to R-ratio. For this reason, it is important to quantify the J-R curves under cyclic loading condition. To quantify the R-ratio effect, correction method which was proposed by Tranchand<sup>(1)</sup> is considered. This method considers crack opening area in order to calculate modified J-integral. This method leads to an increase of fracture toughness. At R=0.5 case, this method is good agreement with monotonic J-R curves. However, results show that this method has a limit to apply a large R-ratio case.

**Key Words :** Cyclic loading condition (반복하중조건), Fracture toughness test (파괴인성시험), R-ratio (최대/최소 하중비), FE analysis (유한요소해석)

### 기호설명

$\sigma_y$  = yield strength

$\epsilon^{pl}$  = plastic strain

$\alpha$  = backstress tensor

$C$  = kinematic hardening modulus

## 1. 서 론

원자력 발전소를 비롯한 다양한 플랜트 구조물은 수 많은 압력 용기 및 배관들로 구성되어 있으며 이러한 설비들은 다양한 종류의 하중이 발생할 시에 발전 설비

에 손상을 초래 할 수 있다. 특히 후쿠시마 원자력 발전소 사고 이후에 설계기준을 초과한 지진하중 조건에서의 배관의 건전성에 대한 중요성이 더욱 커지고 있으며, 관련 연구가 활발히 진행 되고 있다. 지진하중과 같은 반복 하중 조건에서는 하중비 및 다양한 하중 조건에 따라 재료의 파괴인성이 달라지는 것이 다양한 연구자들에 의해 확인 되었으며, 이에 대한 정량화가 필요한 상황이다.<sup>(1-5)</sup> 따라서 본 연구에서는 다양한 하중비의 반복 하중 조건에서 파괴인성시험결과를 토대로 유한 요소 해석기법을 이용하여 재료의 파괴인성을 정량화 하는 기법에 관련한 연구를 수행하여 기존 연구자들에 의해 제안된 방법의 적용가능범위를 확인하였으며, 이를 토대로 추가적인 연구 방향에 대해 제안 하였다.

## 2. 시험결과 요약

본 연구는 Kim<sup>(6)</sup>의 논문에서 수행한 정적 및 반복하

† 책임저자, 회원, 고려대 기계공학부  
kimy0308@korea.ac.kr  
TEL: (02)3290-3372 FAX: (02)929-1718

\* 고려대학교 기계공학부

\*\* 조선대학교 원자력공학과

중조건에서의 파괴인성시험결과를 토대로 진행되었다. 하중조건에 따른 파괴인성시험과 함께 하중조건에 따른 재료물성 정의를 위해 정적 및 반복하중조건에서 인장시험이 수행 되었으며, 본 장에서는 이에 대해 간단히 요약하였다.

본 연구는 원전 1차 계통 구조물에 많이 쓰이는 저합금강 중 하나인 SA508 Gr.1a 배관재를 고려하여 진행 하였으며, 고려되어진 모든 시험은 상온에서 수행되었다.

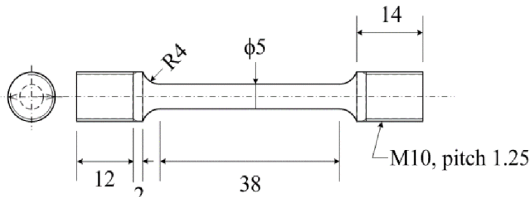
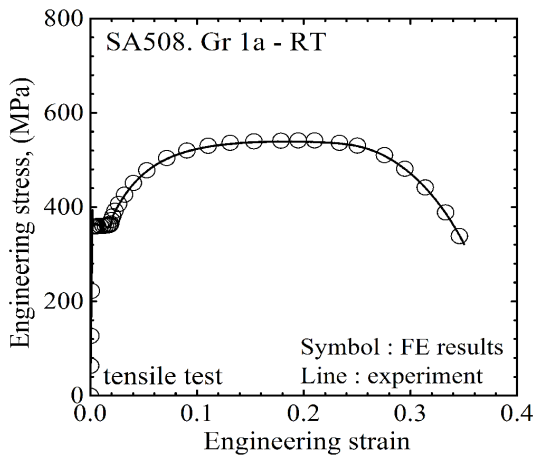
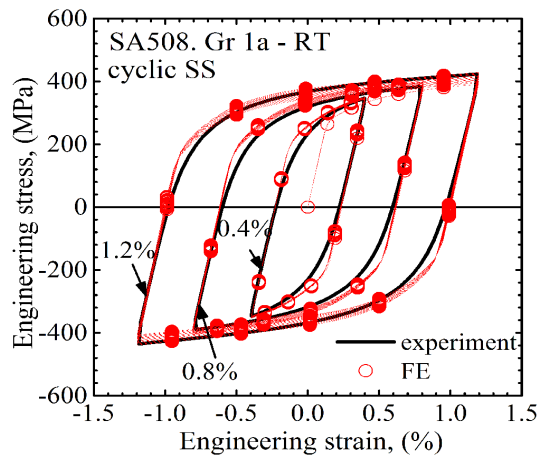


Fig. 1 Schematic illustration of tensile specimen



(a)



(b)

Fig. 2 Tensile test results : (a) monotonic loading condition, (b) cyclic loading condition)

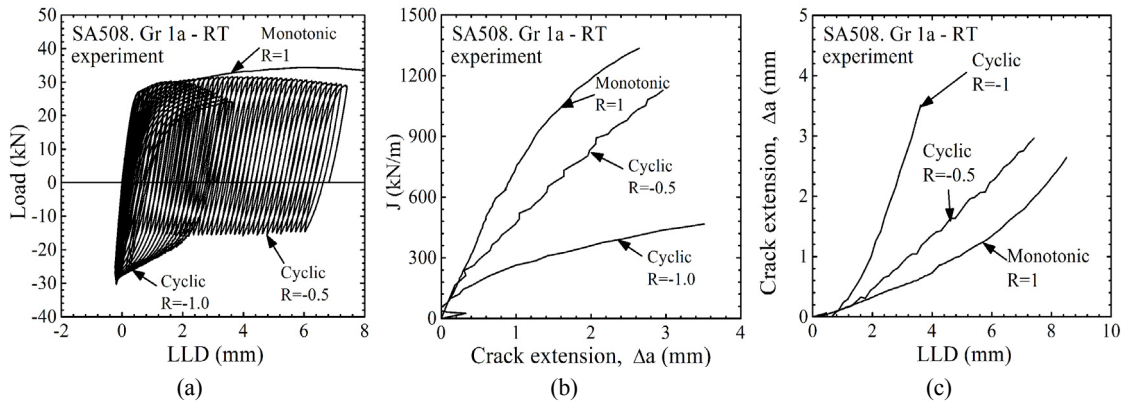


Fig. 3 C(T) test results : (a) load-LLD curve, (b) J-R curve, (c) LLD-Δa curve

## 2.1 정적, 반복하중조건에서의 인장시험결과

Kim<sup>(5)</sup>의 논문에서는 하중조건에 따른 재료물성 정의를 위해 정적하중조건과 반복하중조건에서 인장시험을 수행하였다. 두 하중조건에서 같은 형상의 시편이 사용되었으며, 시편의 도면은 Fig 1에 나타내었다. 정적 하중조건에서의 인장시험은 변형률 속도  $3.95 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 에서 수행되었으며, 시험결과는 Fig 2(a)에 나타내었다. 반복 하중조건에서의 재료물성을 정의하기 위해 수행한 반복하중조건에서의 인장시험은 0.4%, 0.8%, 1.2%의 변형률 범위에서 변위제어로 수행되었으며, 안정화된 반복 응력-변형률 선도를 Fig. 2(b)에 나타내었다.

## 2.2 정적, 반복하중조건에서의 파괴인성시험결과

파괴인성시험의 경우도 앞선 인장시험과 마찬가지로 정적하중조건과 반복하중조건으로 분류하여 시험이 진행되었다. 두 하중조건에서 시험 모두 IT C(T)

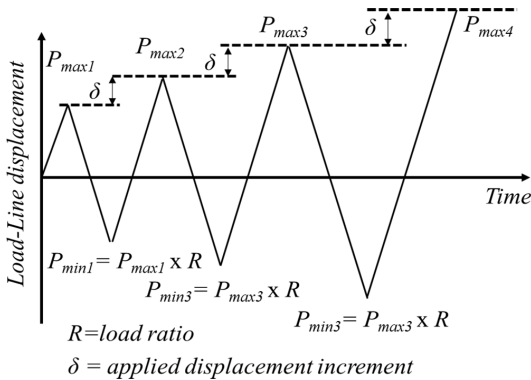


Fig. 4 Loading scheme for cyclic C(T) test from ref (5)

시편이 사용되었다. 정적 하중조건에서의 파괴인성시험은 0.9mm/min의 속도로 수행되었으며, 시험결과는 Fig. 3에 나타내었다. 반복하중조건에서의 시험의 경우 Fig. 4와 같은 방법으로 하중이 인가되었으며, 최대하중과 최소하중의 응력비 즉 R-ratio에 따라 2가지 종류의 (R=0.5, -1.0) 시험이 수행되었다. R-ratio에 따른 파괴인성 시험결과는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3 (b)의 J-적분의 경우 ASTM E1820<sup>(6)</sup>의 절차를 따라 계산되었다. 시험결과를 확인하면 하중조건에 따라 재료의 저항성이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 유한요소해석

본 연구에서는 상용전산해석코드인 ABAQUS<sup>(7)</sup>에서 제공하는 균열전전해석 기법을 토대로 정적, 반복하중조건에서의 파괴인성시험결과를 모사하였으며, 이를 토대로 J-R 선도 정량화 기법에 관련한 연구를 진행하였다. 이를 위해 본 장에서는 유한요소해석에 입력데이터로 사용되는 재료물성 정의방법과 함께 사용된 유한요소해석기법에 대해 간략히 정리하였고 이를 토대로 계산한 해석결과를 기술하였다.

#### 3.1 재료물성 정의

반복하중조건에서 재료의 소성거동을 표현하기 위해서는 항복곡면이 모든 방향으로 등방적으로 팽창한다는 등방경화 이론과 항복곡면의 중심이 이동한다는 이동경화 이론을 고려하여야 한다.<sup>(8)</sup> 이러한 재료의 거동을 표현하기 위해 Fig. 5에 나타낸 것 같이 등방경화 이론과 비선형 이동경화이론을 조합한 복합경화 이론이 제안되었다. 본 연구에서는 Chaboche<sup>(9,10)</sup>

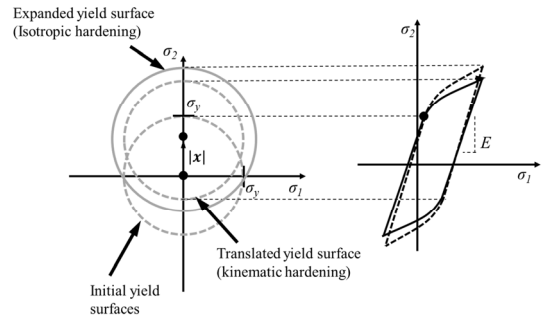


Fig. 5 Combined hardening model from ref (8)

등에 의해 제안된 3차 비선형 이동경화이론을 조합한 복합경화 이론을 고려하여 연구를 수행하였다.

재료의 등방경화 성분은 등가응력을 등가 소성변형률의 함수로 정의한 것이며, 아래와 같이 간단한 형태의 지수함수로 정의할 수 있다.

$$\sigma_y = \sigma_{y0} + Q(1 - e^{-b\varepsilon^{pl}}) \quad (1)$$

식 (1)에서  $\varepsilon^{pl}$ 는 등가 소성변형률을 나타내며  $\sigma_{y0}$ 는 초기 항복응력의 크기이다. 그리고  $Q$ 와  $b$ 는 재료의 매개변수로써 탄성영역의 최대크기와 기울기의 변화율을 의미한다. ABAQUS에서 입력 데이터로 사용되는 등방경화 매개변수  $Q$ 와  $b$ 를 반복하중조건에서의 인장시험결과를 토대로 아래와 같이 결정하였다.

$$Q = 250\text{MPa}, b = 0.2 \quad (2)$$

이동경화 이론의 항복함수는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\sigma, p) = \left( \frac{3}{2} (\sigma' - \alpha') : (\sigma' - \alpha') \right)^{1/2} - \sigma_{y0} \quad (3)$$

위 식에서  $\sigma$ 는 편차응력,  $\alpha$ 는 백 응력(backstress) 텐서를 의미한다. 이동경화모델의 거동은 배응력의 이동에 의해 지배된다. 본 연구에서 고려하고 있는 비선형 이동경화 모델의 백 응력은 식 (4)와 같은 형태로 주어진다.

$$d\alpha = \frac{2}{3} C d\varepsilon^{pl} - \gamma \alpha dp \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{C}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \varepsilon^{pl}}) \quad (5)$$

위 식에서 상수  $C$ 는 이동경화 계수를 의미하며,  $\gamma$ 는 소성 변형률의 증가에 따른 이동 경화계수의 감소분을 의미하는 계수이다. 그러나 식 (5)와 같이 1차 exponential 함수로 정의된 백 응력만으로는 실제 물성을 완벽히 모사할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Chaboche<sup>(9,10)</sup> 등의 연구자들은 3개의 비선형 이동경화 모델을 중첩시킨 모델을 식 (6)과 같이 제안하였다.

$$\alpha_1 = \frac{C_1}{\gamma_1} (1 - e^{-\gamma_1 \epsilon^{pl}}), \alpha_2 = \frac{C_2}{\gamma_2} (1 - e^{-\gamma_2 \epsilon^{pl}}),$$

$$\alpha_3 = C_3 \epsilon^{pl}; \gamma_3 = 0 \tag{6}$$

반복하중조건에서의 인장시험결과를 토대로 3차 비선형 이동경화 모델의 상수를 아래와 같이 결정하였다.

$$C_1 = 2 \times 10^5 \text{ MPa}, C_2 = 3.5 \times 10^4 \text{ MPa}, C_3 = 4466 \text{ MPa}$$

$$\gamma_1 = 1 \times 10^4, \gamma_2 = 420, \gamma_3 = 10 \tag{7}$$

결정된 복합경화 모델상수를 입력데이터로 사용하여인장시험에 대한 유한요소해석을 수행하였다. ABAQUS에서 제공하는 3차원 8절요소(C3D8)를 사용하였으며 기하학적 대변형을 고려하여 해석을 수행하였다. 해석의 효율성을 위해 시험형상의 대칭조건을 활용하여 1/8모델을 사용하였다. 반복하중조건에서의 인장시험 해석결과를 시험결과와 비교하여 Fig. 2(b)에 나타내었다. 결정된 재료구성방정식이 시험결과를 잘 모사하는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 Debonding option을 이용한 균열진전해석

본 연구에서는 하중조건에 따른 재료의 파괴인성을 정량화 하기 위하여 유한요소해석 프로그램을 이용하여 파괴인성시험결과를 모사하였으며 이를 위해 ABAQUS에서 제공하는 Debonding option을 사용하였다. 본 절에서는 Debonding option에 대한 상세한 소개와 유한요소 해석절차 및 해석결과에 대해 기술하였다.

상용전산해석 프로그램인 ABAQUS에서는 시험에서 획득한 균열진전데이터를 토대로 특정 파손기준이 만족하면 균열진전 절점의 구속을 풀어 균열진전을 모사하는 option을 제공하고 있다. 파손기준이 되는 입력 데이터는 응력기준, COD (Crack Opening Displacement) 기준, 균열진전량 기준으로 총 세가지를 제공하고 있다. 본 연구에서는 전체 시험시간에 따른

균열진전량을 시험적으로 측정하였으므로 Fig. 3 (c)의 LLD (Load Line Displacement) -  $\Delta a$ 값을 파손기준으로 사용하였다. 결정된 파손기준을 토대로 하중조건에 따른 파괴인성 시험결과에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 C(T)시험편에 대한 유한요소 매쉬망을 Fig. 6에 나타내었다. 2차원 4절요소(CPE4)를 사용하여 해석을 수행하였으며, debonding option을 구현하기 위해 2차원 대칭 모델을 사용하였다. 또한 평면 변형률 조건을 고려하여 해석을 수행하였다. 각 하중조건에 따른 파손기준을 토대로 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 계산된 J-적분은 시험결과 계산한 것과 마찬가지로 ASTM E1820<sup>(6)</sup>의 절차를 따라 계산되었다. 해석결과와 시험결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

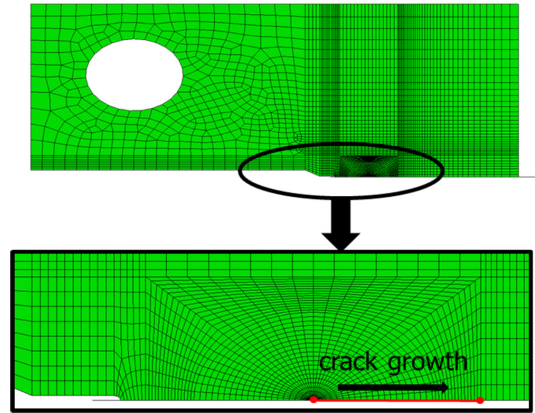


Fig. 6 FE mesh of C(T) specimen

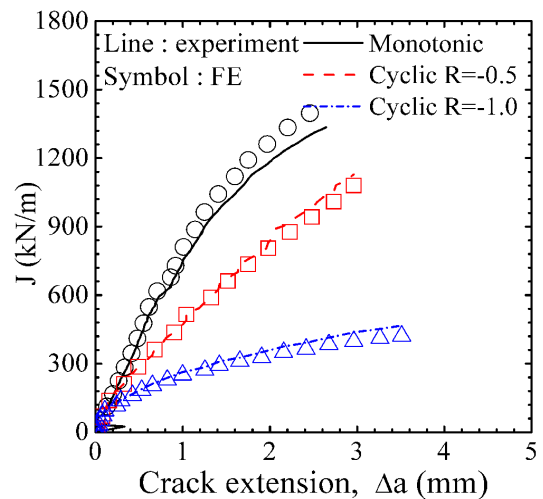


Fig. 7 Comparison of experimental results with FE results

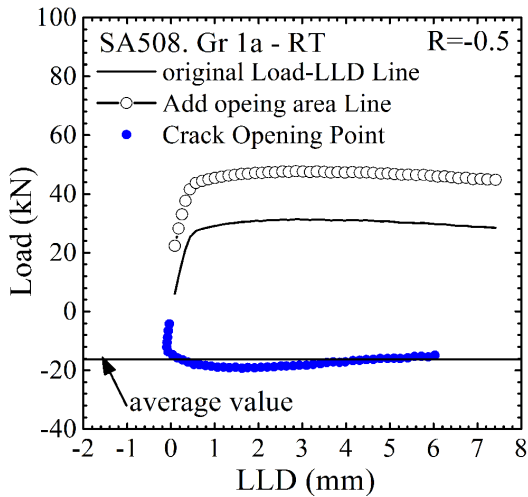


Fig. 8 Schematic of crack opening area method

#### 4. R-ratio에 따른 J-적분 정량화

Fig. 7에 나타내었듯이 J-R선도는 R-ratio에 따라 다른 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 영향에 대한 분석을 하고자 많은 연구자들에 의해 관련 연구가 진행 되었으며, 본 논문에서는 앞선 연구자들에 의해 발표된 기법을 간략히 소개하고 본 연구에서의 적용 가능성을 확인해보았다.

##### 4.1 J-적분 정량화 기법 소개

Tranchand<sup>(1)</sup> 등에 의한 연구에 따르면 R-ratio에 따

른 J-R 선도를 계산함에 있어 단순히 선도 양(+)의 면적을 고려해주는 것이 아니라 Fig. 8과 같이 균열의 열림을 고려한 면적을 사용해 주어야 한다는 연구결과를 발표하였다. 이를 위해 각 사이클에서 균열이 열리는 시점에 대한 측정이 필요하다.

##### 4.2 분석 결과

측정상의 이유로 시험결과에서 각 사이클에서 균열이 열리는 시점에 대한 정확한 분석을 하는 것에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 Debonding option을 통해 계산된 균열 열림시점을 계산하였으며, 계산결과를 Fig. 9와 같이 나타내었다. R=-0.5인 경우 하중의 최저점에서 다시 하중이 인가되는 지점에서 균열이 열리는 것을 확인할 수 있으며, R=1.0인 경우에는 균열 닫힘현상으로 인하여 일정하중 이상이 되어 균열이 열리는 것을 확인할 수 있다. 유한 요소해석결과를 통해 추출된 균열 열림시점을 토대로 산출한 J-R선도를 Fig. 10에 나타내었다. R=-0.5의 경우 정적하중조건에서의 J-R선도와 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 R=-1.0인 경우에는 정적하중조건에서의 결과와 상이한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

해석결과를 분석해보면 R-ratio가 -0.5인 경우에는 Tranchand<sup>(1)</sup>에 의해 제안된 균열 열림시점을 고려한 J-적분 평가기법이 R-ratio에 따른 J-R선도를 정량화 시키는 것을 확인할 수 있지만 하중비가 작아지는 경

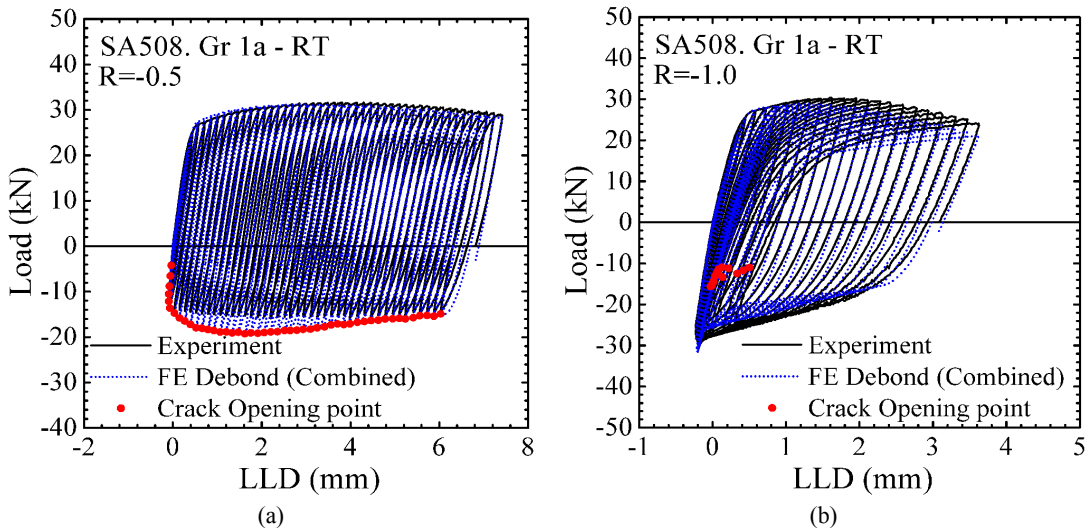


Fig. 9 Extraction of crack opening point (a) at R=-0.5, (b) at R=-1.0

우에는 제안된 방법의 적용에 한계가 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 R=1.0인 경우 균열 단합현상이 발생하여 추가적으로 에너지가 소모되어 나타나는것으로 사료된다. 이와 같은 분석결과를 토대로 균열 열림시점을 고려한 반복하중 조건에서의 J-적분 평가기법은 균열의 단합현상이 발생하지 않을때는 유효하게 사용될 수 있지만, 균열 단합현상이 발생할 시에는 추가적인 고려가 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 R-ratio에 따른 J-R선도 정량화 기법에 관련한 연구결과를 기술하였다. 시험 및 유한요소해석결과를 토대로 Tranchand<sup>(1)</sup>에 의해 제안된 균열 열림시점을 고려한 반복하중 조건에서의 J-적분 평가기법의 적용가능 범위에 대해 확인하였다. 유한요소해석결과를 토대로 제안된 기법은 균열 단합현상이 발생하지 않을때는 유효하게 사용될 수 있지만, 균열 단합현상이 발생할 시에는 추가적인 고려가 필요하다는 것을 확인할 수 있었다. 현재 이와 같은 한계를 해결하기 위한 다양한 연구가 본 연구자에 의해 진행되고 있으며 향후 다양한 하중조건에서 적용하는 것을 최종 목표로 하고 있다. 이와 같은 연구결과는 큰 변위의 반복하중조건이 작용하는 구조물의 파손 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

### 후 기

본 연구는 2013년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다. (NRF-2013M2A8A1040924) 본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20141520100860)

### 참고문헌

- (1) Tranchand, B., Chapuliot, S., Aubin, V., Marie, S., Bourgeois, M., 2014, "Ductile fracture analysis under large amplitude cycles", *Proc. of PVP2014 Conference, PVP 2014-28426*
- (2) Mogami, K., Hayashi, T., Ando, K. and Ogura, N., 1990, "Elastic-plastic fatigue-crack growth and tearing instability behavior under cyclic loads", *Int. J. of Pres. Ves. & Piping*, Vol. 44, pp. 85~97.
- (3) Sek, C. S. and Murty, K. L., 2000, "A study on the decrease of fracture resistance curve under reversed cyclic loading", *nt. J. of Pres. Ves. & Piping*, Vol. 77, pp. 303~311.
- (4) Singh, P. K., Ranganath, V. R., Tarafder, S., Prabha Prasad, Bhasin, V., Vaze, K. K. and Kushwaha, H.S., 2003, "Effect of cyclic loading on elastic-plastic fracture resistance of PHT system piping material of PHWR", *Int. J. of Pres. Ves. & Piping*, Vol. 80, pp. 745~752.
- (5) Kim, J. W., Choi, M. R. and Kim, Y. J., "Effect of loading rate on the fracture behavior of nuclear piping materials under cyclic loading condition", *Nucl. Eng. & Tech.*, Vol. 48, pp. 1376~1386.
- (6) ASTM, 2011, "Standard test method for measurement of fracture toughness", *ASTM E1820-11*.
- (7) ABAQUS 6.13. User's Manual, 2013, Dassault Systems
- (8) Dunne, F. and Petrinic, N., 2005, "Introduction to computational plasticity", Oxford University Press.
- (9) Chaboche, J. L., 1986, "Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity", *Int. J. of Plast.*, Vol. 2, No. 2, pp. 149~188.
- (10) Chaboche, J. L., 1989, "Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity", *Int. J. of Plast.*, Vol. 5, No. 3, pp. 247~302.