

## PTS 사고하에서 $J$ - $Q$ 해석법을 이용한 표면균열의 구속효과 고찰

김진수\* · 최재봉\* · 김윤재\* · 김영진†  
(2001년 4월 13일 접수, 2001년 10월 8일 심사완료)

### Consideration of Constraint Effect of Surface Cracks Under PTS Conditions Using $J$ - $Q$ Approach

Jin-Su Kim, Jae-Boong Choi, Yun-Jae Kim and Young-Jin Kim

**Key Words:** Pressurized Thermal Shock(가압열충격),  $J$ -Integral( $J$ -적분), Constraint Effect(구속효과), Surface Crack(표면균열),  $J$ - $Q$  Approach( $J$ - $Q$  접근법),  $Q$ -Stress( $Q$ -응력)

#### Abstract

In recent years, the integrity of Reactor Pressure Vessel(RPV) under pressurized thermal shock (PTS) accident has been treated as one of the most critical issues. Under PTS condition, the combination of thermal and mechanical stress by steep temperature gradient and internal pressure causes considerably high tensile stress at the inside of RPV wall. As a result, cracks on inner surface of RPV may experience elastic-plastic behavior which can be characterized by  $J$ -integral. In such a case, however,  $J$ -integral may possibly lose its validity due to the constraint effect. The degree of constraint effect is influenced by the loading mode, crack geometry and material properties. In this paper, in order to investigate the effect of clad thickness and crack geometry on constraint effect, three dimensional finite element analyses were performed for various surface cracks. Total of 27 crack geometries were analyzed and results were presented by a two-parameter characterization based on the  $J$ -integral and the  $Q$ -stress.

#### 1. 서론

원자로 압력용기는 원자력발전소 각 주요기기 중 안전성 측면에서 가장 중요한 구조물로 분류된다. 일반적으로 원자로 압력용기의 건전성 평가를 위해서는 탄성 파괴역학 이론에 기초한 평가 방법을 사용하고 있다. 그러나 이러한 탄성 파괴역학적 평가 방법은 지나친 보수성을 내포하고 있으며, 따라서 원자로 압력용기의 정확한 파괴거동을 예측하기 위해서는 탄소성 파괴역학적 평가 방법이 필요하다. 실제로, 국제 공동 연구과

제인 NESCS<sup>(1)</sup>(Network for Evaluating Structural Components)에서는 균열이 존재하는 원자로 용기에 가압열충격(pressurized thermal shock) 사고가 발생한 경우, 연성찢김에 의해 균열 진전이 시작된다는 내용을 보고한 바 있다. 비상 운전조건 중 하나인 가압열충격은 냉각재상실사고(loss of coolant accident)와 같은 비상사고가 발생하여 비상노심냉각계통(emergency core cooling system)이 가동되면서 냉각수가 원자로의 노심대(beltline)로 흘러 들어오는 사고를 말한다. 이로 인해 원자로 압력용기 내벽에는 급격한 온도구배가 발생하며, 내압으로 인한 응력과 더불어 큰 인장응력을 유발시킨다. 이 경우, 원자로 내벽에 존재하는 균열은 인장응력 상태로 인해 비선형 파괴거동을 나타낼 수 있다.

이러한 비선형 파괴거동의 경우 탄소성 파괴역

\* 회원, 성균관대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

학적 평가 방법을 통해 안전성을 평가하게 된다. 탄소성 파괴역학은  $J$ -적분에 기초하고 있으며,  $J$ -적분에 기초한 HRR 응력장이 실제 구조물에 존재하는 균열부위 응력상태를 정확하게 예측한다고 가정하고 있다. 그러나 구조물의 기하학적 형상, 균열 깊이, 하중상태, 재료물성치 등에 따른 구속효과의 차이로 인해 실제 구조물의 응력장은 HRR 응력장과 크게 다르게 나타날 수 있으며,  $J$ -적분에 의한 평가방법이 지나치게 보수적인 결과를 초래할 수 있다. 따라서 구조물의 구속상태를 정확히 평가하기 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔으며, 새로운 제 2의 매개변수를 이용한  $J$ - $T$ <sup>(2)</sup> 해석법과  $J$ - $Q$ <sup>(3)</sup> 해석법이 제시되었다.  $J$ - $T$  해석은 균열선단에서의 구속상태를 정량화하기 위해  $T$  응력을 도입한 것으로 탄성응력장에서만 적용할 수 있다. 따라서 탄소성 거동을 나타내는 구조물의 실제 응력상태를 정확하게 예측하지 못한다는 단점이 있다. O'Dowd와 Shih<sup>(3)</sup>는 이러한 단점을 보완하여 탄소성 거동하에서 구속상태를 평가하기 위한 파라미터로  $Q$  응력을 제안하였다.

Miyazaki 등<sup>(4)</sup>은 클래드하부균열(subclad crack)에 대해 구속효과를 고려한 유한요소해석을 수행하였으며, 파괴인성치의 감소를  $Q$  응력을 통해 설명하였다. Shum 등<sup>(5)</sup>은 가압열충격 사고 하에서의 균열선단 응력분포를 2차원 유한요소해석에 의한  $J$ - $Q$  해석법을 통해 구하였다. 또한 심도준 등<sup>(6)</sup>은 2차원  $J$ - $Q$  해석을 통해 가스배관에 대한 구속효과를 정량화하였다.

저자들은 전보<sup>(7)</sup>에서 내압이 존재하는 경우와 가압열충격 사고가 발생한 경우에 대해 2차원 유한요소해석을 수행하여 균열 깊이와 클래드 두께의 변화에 따라 구속이 감소한다고 밝힌 바 있다. 그러나 이러한 연구들은 2차원 유한요소해석을 통해 얻어진 결과로 반타원 표면균열의 실제 형상을 고려하여 원자로 압력용기에 존재하는 표면균열에 대한 정확한 구속상태를 예측한 연구는 보고된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 반타원 표면균열선단에서의 구속상태를 명확히 파악하기 위해 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 가압열충격 사고에 해당하는 주증기관 파단 사고(Main Steam Line Break; MSLB)가 발생한 경우에 대해 수행하였으며,  $J$ - $Q$  해석을 통해 구속효과를 정량적으로 평가하였다.

## 2. $J$ - $Q$ 해석법

### 2.1 HRR 응력장

Hutchinson<sup>(8)</sup> 및 Rice와 Rosengren<sup>(9)</sup>은 비선형 탄성재료에서  $J$ -적분을 이용하여 균열선단 응력분포를 예측하였다. 이 때 비선형 탄성재료는 다음과 같은 Ramberg-Osgood 응력 변형률 관계식을 만족한다고 가정하였다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_0$ 는 기준응력(reference stress)으로 일반적으로 항복응력을 사용하며  $\epsilon_0$ 는  $\sigma_0/E$ ,  $\alpha$ 와  $n$ 은 각각 재료상수와 재료 가공경화지수이다.

$J$ -적분을 이용한 균열선단 응력분포 및 변형률 분포는 다음과 같으며, 이를 HRR 특이장이라 정의한다.

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \left( \frac{I}{\alpha \sigma_0 \epsilon_0 I_n r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tilde{\sigma}_{ij}(\theta, n) \quad (2)$$

$$\epsilon_{ij} = \alpha \epsilon_0 \left( \frac{I}{\alpha \sigma_0 \epsilon_0 I_n r} \right)^{\frac{n}{n+1}} \tilde{\epsilon}_{ij}(\theta, n) \quad (3)$$

여기서,  $I_n$ 은 가공경화지수에 따른 상수,  $\tilde{\sigma}_{ij}$ 와  $\tilde{\epsilon}_{ij}$ 는  $\theta$ 와  $n$ 으로 표현되는 무차원 함수값으로서, 평면응력상태와 평면변형률상태에 따른 값들을 Shih<sup>(10)</sup>가 제시한 바 있다.

### 2.2 $J$ - $Q$ 이론

$J$ -적분에 기초한 HRR 응력장은 구조물의 구속상태에 따라 균열선단 응력장을 정확히 나타내지 못할 수 있다. 이를 보완하기 위해 O'Dowd와 Shih<sup>(3)</sup>는 구속 효과를 나타내는 수정계수인  $Q$ 를 도입한  $J$ - $Q$  이론을 제안하였다.  $Q$ 는 평면 변형률 상태에서 균열선단에서의 응력 삼축성(triaxiality)을 나타내는 매개변수로서, 구속상태를 정량화한 값이다. O'Dowd와 Shih는 소성역 내부의 균열선단 응력분포를 급수형태로 나타내었으며, 이를 급수의 첫째 항에 해당하는 HRR 응력장과 나머지

지 고차항으로 구분하였다. 유한요소해석을 통해 고차항이 균열선단에서 일정하게 나타난다는 것을 확인하였으며, 다음과 같이 고차항의 크기를 Q라 정의하였다.

$$\sigma_{ij} \approx (\sigma_{ij})_{\theta=0} + Q\sigma_o\delta_{ij} \quad \left( |\theta| < \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

여기서,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta이다.

식 (4)를 일반화하기 위해 O'Dowd와 Shih는 소규모 항복해인  $r/(J/\sigma_o)=2$ 인 지점에서의 HRR 응력장을 도입하였으며, 이 때 Q는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Q = \frac{\sigma_{\theta\theta} - (\sigma_{\theta\theta})_{HRR}}{\sigma_o} \quad \text{at } \theta=0, \quad \frac{r\sigma_o}{J}=2 \quad (5)$$

식 (5)에서 보는 바와 같이 Q는 유한변형률이 발생하는 영역(finite strain region) 밖에서 정의되며 균열진전 특성을 대표할 수 있는  $r/(J/\sigma_o)=2$ 에서의 값을 이용한다. 또한 이 때 Q 응력이 정의되기 위해서는  $r/(J/\sigma_o)$ 가 2~5인 영역에서 실제응력장과 HRR 응력장의 차이가 일정하게 유지되어야 한다. J-Q 해석법에 대한 자세한 설명은 참고문헌 (7)에 기술되어 있다.

### 3. 유한요소해석

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 클래드된 원자로 압력용기 내벽에 축방향 표면균열이 존재할 때,

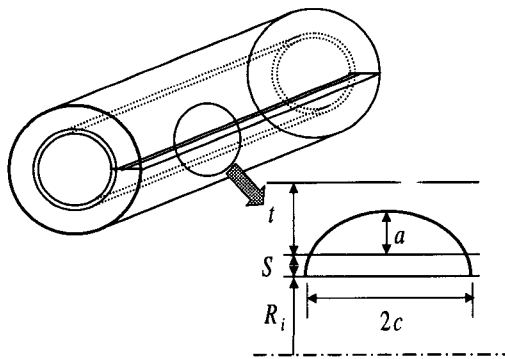


Fig. 1 A schematic illustration of the model

실제 응력분포를 J-적분에 기초한 HRR 응력분포와 비교함으로써 구속효과를 정량화하였다. 실제 응력분포를 계산하기 위해 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>(11)</sup>를 사용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 모델은 국내에서 현재 가동중인 A 발전소의 원자로 압력용기이며 내반경은 1993.90 mm, 모재의 두께는 200.15 mm이다. 모재와 클래드 부재는 각각 SA533 Grade B 탄소강(3/4Ni-1/2Mo-1/3Cr-V), 스테인리스 강(23Cr-12Ni)을 사용하였으며, 재료물성치는 가압열충격 사고에 대한 국내 비교 평가 연구<sup>(12)</sup>에서 제시한 자료를 사용하였다.

균열 형상은 Table 1에 제시한 바와 같이 변화시켰으며, 이를 통해 각 파라미터의 영향을 파악할 수 있도록 하였다. 일반적으로 원자로 압력용기에 설치된 클래드부는 용접 특성상 균일하지 않으며 약 3~5 mm의 두께로 분포되어 있다. 이를 고려하여 클래드 두께를 3.18, 4.76 mm로 변

Table 1 Finite element analysis matrix

No.	$R_i$ , mm	$t$ , mm	$S$ , mm	$a/t$	$a/c$
1	1993.90	200.15	3.18	1/8	1
2					1/2
3					1/3
4				1/6	1
5					1/2
6					1/3
7				1/4	1
8					1/2
9					1/3
10			4.76	1/8	1
11					1/2
12					1/3
13				1/6	1
14					1/2
15					1/3
16				1/4	1
17					1/2
18					1/3
19			1/8	1	
20				1/2	
21				1/3	
22			1/6	1	
23				1/2	
24				1/3	
25			1/4	1	
26				1/2	
27				1/3	

화시켰으며 클래드부가 존재하지 않는 경우에 대한 해석을 수행하여 클래드부의 영향을 명확히 파악하고자 하였다. 일반적으로 클래드부는 가압 열충격 사고시 탄소성거동을 보이며 이로 인해 균열면 응력장에 큰 영향을 미친다고 알려져 있다.<sup>(13)</sup> 균열 형상 변화에 따른 영향을 알아보기 위해 균열 깊이  $a$ 는 원자로 압력용기 안전성 평가에 일반적으로 사용되는  $t/4$  및 얇은 균열인  $t/6, t/8$ 로 변화시켰다. 균열 형상비의 변화가 해석 결과에 미치는 영향을 파악하기 위해 균열형상비  $a/c$ 는 1, 1/2, 1/3로 변화시켰다. 따라서 본 연구에서는 총 27개 형상에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 비상조건에 해당하는 MSLB 사고가 발생한 경우에 대해 수행하였

다. Fig. 2는 해석에 사용한 MSLB 사고의 온도, 압력, 열전달계수의 변화를 나타낸다.

유한요소모델은 Fig. 3과 같이 대칭성을 고려하여 원자로 압력용기의 1/4만을 모델링하였으며, 해석에 사용된 모델은 20절점 사각주요소(quadratic brick element)로 구성하였다.

균열선단에서의 응력장과 변형률을 해석하기 위해서는 균열선단 근처에서 매우 정교한 요소망이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 균열선단에 요소망을 집중적으로 구성하였다. 각 모델에 대한 초기 둔화노치반경은 각각의 리가먼트의 1/100,000로 설정하였고, 모든 경우에 대해 소규모 변형률 이론(small strain theory)을 적용하였다.

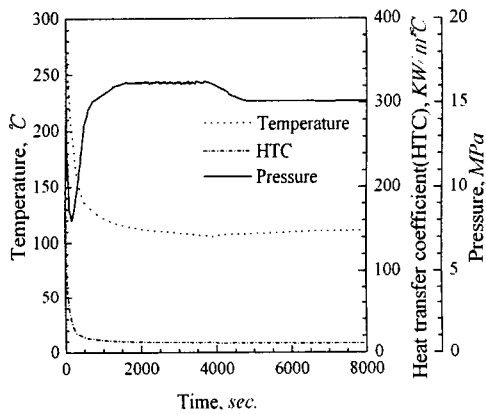


Fig. 2 Temperature, pressure and heat transfer coefficient distribution for MSLB

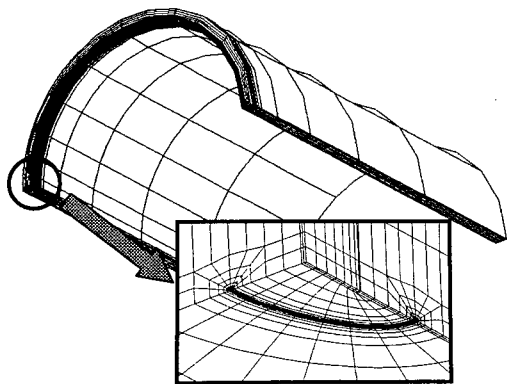


Fig. 3 A typical finite element mesh (No. 17 in Table 1)

#### 4. 해석결과

##### 4.1 구속효과의 정량화

$J$ -적분은 영역적분법에 의해 계산된 값을 사용하였으며, 이를 식 (2)에 대입하여 HRR 응력장을 구하였다. 균열선단의 실제 응력장은 유한요소모델의 리가먼트(ligament)를 구성하는 각 절점(node)에서의 평균 응력값을 이용하여 계산하였다. Fig. 4는 클래드 두께가 3.18 mm,  $a/t=1/8$ ,  $a/c=1$ 인 경우에 대한 균열선단에서의 HRR 응력장을 유한요소해석을 통해 얻은 실제 응력장과

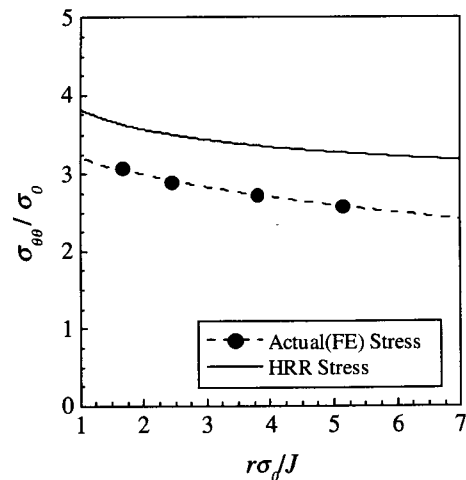


Fig. 4 Comparison between actual and HRR stress distribution at  $J_{max}$  (No. 10 in Table 1)

비교한 것이다. 전체 영역에 걸쳐 HRR 응력장이 실제 응력장에 비해 높게 나타났으며,  $r/(J/\sigma_0)$ 가 3~5인 영역에서 실제 응력장과 HRR 응력장의 차이가 비교적 일정하게 유지되었다. 이는  $J$ -적분을 이용한 평가 방법이 원자로 압력용기의 낮은 구속상태를 고려하지 못함으로써 보수적인 해석결과를 초래한다는 것을 의미한다.  $r/(J/\sigma_0)=2$ 인 지점에서의 응력장의 차이는 유한변형률 (finite strain) 영역의 영향으로  $r/(J/\sigma_0)=5$ 인 지점에서의 값과 차이를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는  $r/(J/\sigma_0)=3$ 인 지점에서의 두 응력장의 차이를  $Q'$ 이라 정의하고, 구속효과를 나타내는 파라미터로 사용하였다.

전체 균열형상에 대해 최대  $J$ -적분은 약 700~900초 사이에서 발생하였다.  $Q'$ 는 구조물의 기하학적 형상, 균열깊이, 하중크기 등에 따라 다르게 나타나며, 일반적으로 하중이 증가함에 따라  $Q'$ 의 절대값이 비례하여 증가한다.

본 연구에서는 동일 하중하에서 균열형상변화가 구속효과에 미치는 영향을 파악하기 위해  $J$ -적분이 26.3 kN/m인 상태에서의  $Q'$  값을 비교하였다. 또한 구조물에 미치는 최대 구속효과를 평가하기 위해 최대  $J$ -적분 발생지점에서의  $Q'$  값을 비교하였다. Fig. 5는 클래드 두께가 3.18mm인 경우,  $J$ -적분이 26.3 kN/m인 지점에서의  $Q'$  분포를 결합형상변화에 따라 나타낸 것이다. 균열깊

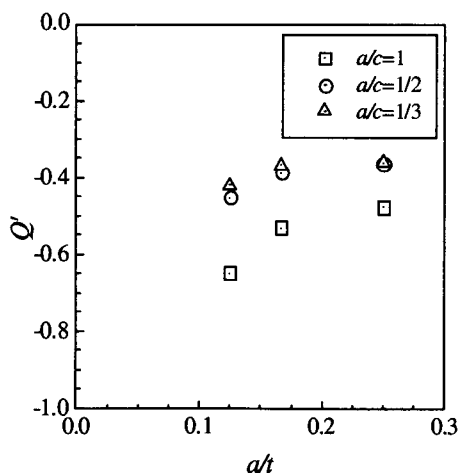
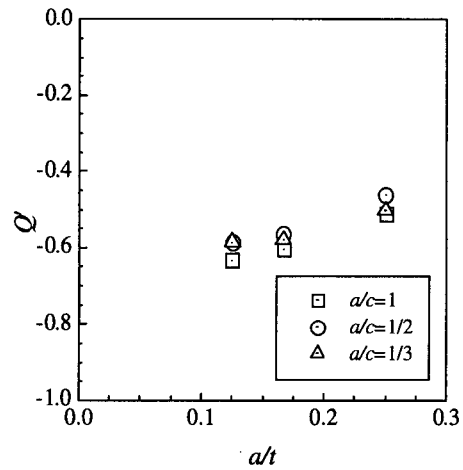
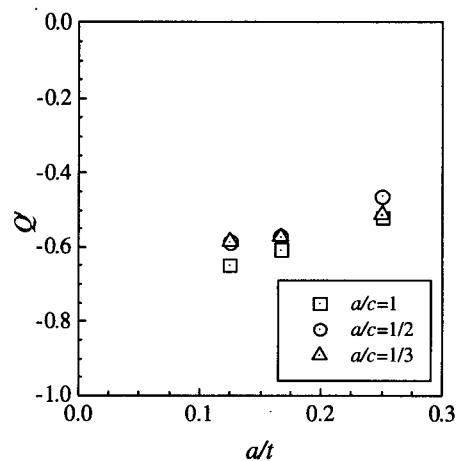


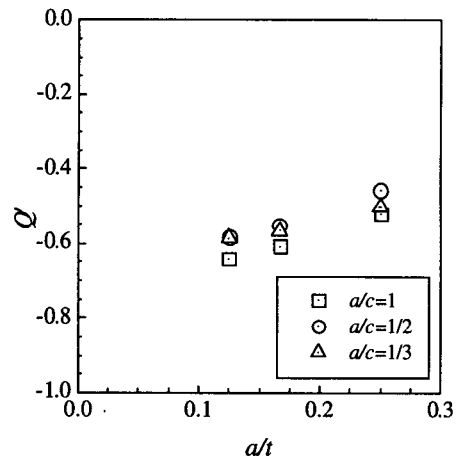
Fig. 5 Comparison of  $Q'$  distribution for  $J=26.3$  kN/m (clad thickness=3.18mm)



(a) No cladding



(b) Cladding = 3.18 mm



(c) Cladding = 4.76 mm

Fig. 6  $Q'$  values for various clad thickness

이  $a$ 가 깊어지고, 균열길이  $c$ 가 커질수록  $Q'$ 의 절대값은 감소하였다. 이와 같은 결과는 얇은 균열이고, 균열길이  $c$ 가 작은 균열일수록 더 큰 구속효과가 발생한다는 것을 의미한다. 균열길이 가 얇아질수록  $a/c$ 의 변화에 따라  $Q'$ 가 민감하게 변화하였다.  $a/t$ 가 1/8인 경우,  $a/c$ 가 1에서 1/3로 감소하면  $Q'$ 의 절대값은 약 26% 감소한다.

Fig. 6은 최대  $J$ -적분 발생 시점에서 각 클래드 두께에 따른  $Q'$  분포를 나타낸 것이다. 모든 경우에 대해  $Q'$  응력은 음수를 나타내었으며 -0.35~-0.65로 변화하였다.  $Q'$ 가 음수인 경우는 구속효과에 의해  $J$ -적분으로부터 예측된 HRR 응력장이 실제 응력장보다 크게 나타난다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 저자들의 전보<sup>(7)</sup>에서 수행하였던 2차원 유한요소해석결과와 유사하나 2차원 해석결과보다 절대값 기준으로 최대 40% 작은 것으로 나타났다. 이 경우 2차원 해석결과는 구속효과를 지나치게 크게 반영하게 된다. Fig. 7은 클래드 두께가 3.18 mm인 경우, 2차원 해석결과와 3차원 해석결과를 비교한 것이다. 따라서 구조물의 정확한 구속효과를 예측하기 위해서는 3차원 유한요소해석을 통한 해석이 필요하다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 모든 경우에 대해 균열깊이비  $a/t$ 가 커질수록  $Q'$ 의 절대값은 감소하며, 결합형상비  $a/c$ 가 커질수록  $Q'$ 의 절대값은 감소한다. 이러한 경향은 동일  $J$ -적분하에서의 결과와 일치한다. 클래드 두께변화는 Fig. 6에서 보는

바와 같이 구속상태에 대해 큰 영향을 미치지 않으며, 이러한 경향은 모든 경우에서 동일하게 나타났다. 이와 같은 결과는 2차원 해석에서는 클래드 부의 인장응력이 균열면을 성장시키는데 큰 영향을 미치는 반면, 반타원 표면균열의 경우에는 클래드 부의 대부분이 구속되어있고 부분적으로 균열면에 속해 있으므로 균열선단 응력장에 미치는 영향이 크지 않기 때문이다.

Fig. 6에서와 같이 가압열충격사고시 큰 구속효과가 발생하는 것은 주증기관 파단사고의 경우, 열응력으로 인한 높은 인장응력이 균열선단에서의 구속상태를 더욱 낮게 만들기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 내압으로 인한 응력은 1차 응력, 일응력은 2차 응력으로 분류할 수 있다. 가압열충격 사고와 같이 1차 응력과 2차 응력이 동시에 작용하는 경우, 구조물의 구속상태는 낮게 나타나며, 이는 상대적으로 파괴 가능성이 감소한다는 것을 의미한다. 가압열충격 사고시에는 열응력으로 인해 정상조건보다  $J$ -적분값이 더 크게 계산되며 이로 인해 구조물의 파괴 가능성은 더욱 큰 것으로 예측된다. 그러나 낮은 구속상태를 고려한다면 실제 파괴 가능성은 상당히 낮은 것으로 판단된다. 따라서 가압열충격 사고시 원자로 용기에 대한 정확한 파괴역학해석을 위해서는 구속효과를 고려한 해석이 필요한 것으로 사료된다.

4.2.  $J_{eff}$  계산

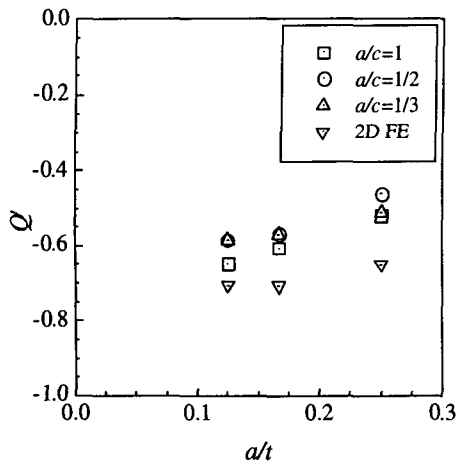


Fig. 7  $Q'$  comparisons between 2D and 3D finite element analyses (clad thickness=3.18mm)

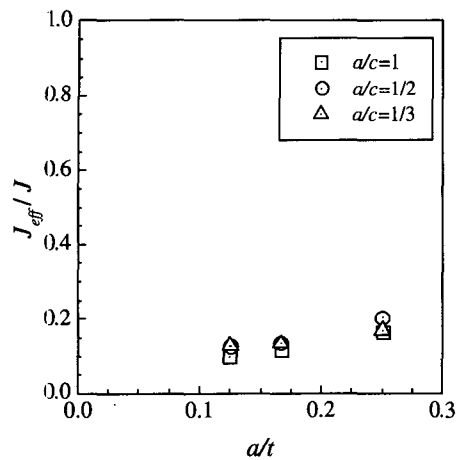


Fig. 8  $J_{eff}/J$  ratios (clad thickness = 3.18mm)

원자로 압력용기의 구속상태를 고려한 J-적분 값을  $J_{eff}$ 라 정의하면 균열선단에서의 응력장은  $J_{eff}$ 를 이용하여 HRR 특이장의 형태로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \left( \frac{J_{eff}}{\alpha \sigma_0 \epsilon_0 J_n r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tilde{\sigma}_{ij}(\theta, n) \quad (6)$$

식 (4)와 (6)을 이용하면 J-적분과  $J_{eff}$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{J_{eff}}{J} = \left( 1 + \frac{Q'}{\left( \frac{E}{\alpha \sigma_0 J_n r_c} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tilde{\sigma}_{\theta\theta}} \right)^{1+n} \quad (7)$$

여기서,  $r_c$ 는 무차원화된 거리  $r\sigma_0/J$ 를 나타낸다.

식 (7)은  $Q'$  응력의 산출을 통해 구조물의 구속상태를 고려한 파괴 파라미터  $J_{eff}$ 를 계산할 수 있음을 의미한다.

Fig. 8은 클래드 두께가 3.18 mm인 경우, 식 (7)로부터 계산된  $J_{eff}$ 와 J-적분의 비를 나타낸다. 클래드 두께가 구속효과에 미치는 영향은 경미하므로 클래드 두께변화에 따른  $J_{eff}$ 와 J-적분의 비는 기술하지 않았다. 전체적으로  $J_{eff}$ 는 J-적분에 비해 4~10% 정도로 작게 나타난다. 이와 같은 경우 J-적분이  $J_{lc}$ 보다 큰 경우라 할지라도 실제 구조물의 구속상태를 고려한  $J_{eff}$ 는 J-적분에 비해 상당히 작게 나타나므로 실제 파괴는 발생하지 않게 된다.

일반적으로  $Q'$ 가 -0.1의 값을 가질 경우, 이는 J-적분을 이용한 안전성 평가가 균열선단에서의 응력분포를 항복응력의 10% 만큼 과대평가한다는 것을 의미한다. 또한  $Q'$ 와 비례하여 구조물의 안전성을 평가하는 파괴 파라미터인 J-적분이 과대 예측된다.

본 연구의 해석결과는 원자로 압력용기에 존재하는 균열에 대해 J-적분을 이용한 안전성 평가를 수행할 경우, 파괴 파라미터의 관점에서 구속상태를 고려한 J-적분에 비해 약 5~10배 과대 평가한다는 것을 의미한다. 결함형상에 대한  $Q'$  응력을 정량화하여 나타내면 다음과 같다.

$$Q' = -1.23(a/c)^2(a/t)+1.99(a/c)(a/t)+0.25(a/t)+$$

$$0.13(a/c)+0.64 \quad (8)$$

이와 같은 J-Q 해석기법을 이용하면 원자로 압력용기의 응력장을 정확히 예측할 수 있을 것으로 판단되며, 이러한 해석기법을 균열평가 기준에 적용하면 기존의 평가 기준보다 정확한 평가가 가능할 것으로 기대된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 가압열충격 사고의 하나인 MSLB 사고시, 원자로 압력용기에 대한 구속효과를 정확하게 평가하기 위해 J-Q 해석을 수행하였다. 이를 위해 축방향 반타원 표면균열에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 균열형상을 변화시켜 민감도에 대해 분석하였다. 해석결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) J-적분에 기초한 응력장은 항복응력의 46~64% 만큼 과대 예측하였다.

(2) 2차원 해석에서 큰 영향인자로 평가되었던 클래드 두께 변화는 3차원 표면균열에서는 구속효과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 2차원 해석 결과는 3차원 해석에 비해 구속효과를 과대 예측하는 것으로 나타났다.

(3) 가압열충격 사고시 J-적분은 실제 구속상태를 고려한 J-적분에 비해 5~10배 과대 예측한다. 따라서 원자로 압력용기내에 존재하는 균열의 정확한 해석을 위해서는 구속효과를 고려한 해석이 필요하다.

## 후 기

본 논문은 한국과학기술기획평가원의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Moinereau, D. Faidy, C. Bhandari, S., Guichard, D., Valeta, M.P. and Courtois, M., 1998, "NESC Spinning Cylinder Thermal Shock Experiment. French Contribution to the Pre Test Fracture Analysis Evaluation," '98 ASME PVP-Vol. 362, pp. 261~279.

- (2) Betegon, C. and Hancock, J.W., 1991, "Two-Parameter Characterization of Elastic-Plastic Crack-Tip Fields," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 58, pp. 104~110.
- (3) O'Dowd, N. P. and Shih, C. F., 1991, "Family of Crack-Tip Fields Characterized by a Triviality Parameter-I. Structure of fields," *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, pp. 989~1015.
- (4) Miyazaki, N., Ikeda, T., and Ochi, K., 1996, "Constraint Effects of Clad on Underclad Crack," *Journal of Pressure Vessel Technology*, pp. 480~483.
- (5) Shum, D.K., Theiss, T.J. and Rolfe, S.T., 1994, "Application of J-Q Fracture Methodology to the Analysis of Pressurized Thermal Shock in Reactor Pressure Vessels," *Fracture Mechanics: Twenty-Fourth Volume, ASTM STP 1207*, pp. 152~168.
- (6) 심도준, 최재봉, 장영균, 김영진, 김철만, 2000, "구속효과를 고려한 가스배관 결함의 2차원적 파괴거동 해석에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제25권, 제1호, pp. 61~69.
- (7) 김진수, 최재봉, 김영진, 2000, "구속효과를 고려한 원자로 압력용기 균열선단에서의 응력분포 예측," *대한기계학회논문집*, 제25권, 제4호, pp. 756~763.
- (8) Hutchinson, J. W., 1968, "Singular Behavior at the End of Tensile Crack Tip in a Hardening Material," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 16, pp. 13~31.
- (9) Rice, J. R., and Rosengren, G. F., 1968, "Plane Strain Deformation near a Crack Tip in a Power-Law Hardening Material," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 16, pp. 1~12.
- (10) Shih, C.F., 1983, *Tables of Hutchinson-Rice-Rosengren Singular Field Quantities*, Brown University.
- (11) Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc., 1998, ABAQUS/Standard ver. 5.8-1.
- (12) 정명조, 2000, "원자로 용기의 가압열충격 Round Robin 해석," 한국원자력안전기술원, KINS/RR-029.
- (13) 김진수, 구분걸, 최재봉, 김영진, 박윤원, 2001, "가압열충격 사고시 클래드 하부균열 안전성 평가 방법에 관한 연구," *대한기계학회논문집*, 제25권, 제7호, pp. 1139~1146.