

< 논 문 >

## 화상처리법을 이용한 A533B강의 진전균열특이장 평가

표창률\* · 김영진\*\*

(1996년 4월 24일 접수)

### Evaluation of Growing Crack-Tip Singularity in A533B Steel by Image Processing Technique

C. R. Pyo and Y. J. Kim

**Key Words :** Crack-Tip Singularity(균열선단특이장), Huchinson-Rice-Rosengren Field(HRR장), Image Processing(화상처리), Finite Element Method(유한요소법)

#### Abstract

This paper describes an experimental and numerical study on growing ductile crack-tip behaviors. The hybrid experimental and numerical method by means of a computer image processing technique, was applied to the analyses of both base metal and weld metal CT specimens. In the weld metal specimen, the initial crack-tip was placed in front of fusion line, and the crack orientation was perpendicular to it. Finite element analyses of crack growth behaviors in both base and weld metal specimens made of A533B Class 1 steel were also performed to examine the effects of weldment on near crack-tip fields. A series of experimental studies on crack-tip behaviors have clearly shown the qualitative effects of material properties, especially a hardening exponent. The experimental and numerical results have also shown that weldment does not affect displacement and strain fields near a crack-tip while a stress field is influenced by the difference between yield stresses of both base and weld metals.

기 호 설 명			
$a$	: 균열길이	$ND$	: 주어진 데이터수
$\Delta a$	: 균열진전량	$\nu$	: 푸아송의 비
$\alpha$	: Ramberg-Osgood 경화계수	$r$	: 극좌표계에서 원점에서의 거리
$\alpha'$	: 내삽함수의 계수	$\sigma_b$	: 응력성분
$DIM$	: 해석공간의 차원수	$\sigma_o$	: 항복응력
$\epsilon_{ij}$	: 변형률성분	$u(x_i)$	: $x_i$ 에서의 변위
$\epsilon_o$	: 항복변형률	$U_i$	: 변위성분
$E$	: 탄성계수(Young's modulus)	$\phi$	: 내삽함수의 오차
$\theta$	: 극좌표계에서 원점에서의 각도		
$J$	: J-적분		
$n$	: Ramberg-Osgood 가공경화지수		

#### 1. 서 론

연성재료로 제작된 원자력 압력용기나 배관의 건전성 평가에는 J-적분에 근거한 비선형 파괴역학이 널리 이용되고 있다. (1) 이는 J-적분이 선변형률 소

\*회원, 인덕전문대학 기계과

\*\*회원, 성균관대학교 기계공학부

성이론이 성립하는 범위에서 에너지해방률로서의 물리적 의미를 갖으며, HRR(Hutchinson-Rice-Rosengren) 특이장<sup>(2,3)</sup>에서 강도파라미터로 사용될 수 있기 때문이다. 또한 J-적분은 적분경로에 무관하므로 유한요소법을 이용하여 복잡한 구조기기의 안전성 평가에 사용할 수 있으며,<sup>(4,5)</sup> 간편한 실험 식도 제안되어 있다.<sup>(6,7)</sup>

이와 같이 연성재료에 대해 유용한 성질을 갖는 J-적분을 균열진전문제에 적용할 때, 균열이 진전함에 따라 대규모의 재하(unloading)영역이 발생하여 에너지해방률로서의 의미는 물론 HRR 특이장과 경로독립성도 상실된다. 따라서 균열진전문제에 대한 J-적분의 유효성을 파악하기 위한 많은 수치해석적 연구가 수행되어, 잔여길이(ligament)에 비해 작은 양의 균열진전이면 HRR장이 존재하는 J-적분 지배의 균열진전이 성립하는 것을 입증하였다.<sup>(8)</sup> 또한, 연성균열의 안정성을 논하기 위해 J-적분의 비분인 찢김계수(tearing modulus)도 제안되어 배관계통의 파단전누설(LBB: Leak Before Break) 평가 등에 이용되고 있다.<sup>(9~11)</sup> 그러나 이와 같은 HRR장의 존재에 대한 많은 이론 및 수치해석결과와 비교할 수 있는 실험적인 연구는 극히 미미한 실정이다.

최근에 화상처리와 유한요소법을 연계한 해석방법<sup>(12~15)</sup>과 모아레(Moire)간섭법<sup>(16,17)</sup>을 이용한 방법이 개발되어 실험적 연구가 진행되고 있다. 모아레 간섭법으로 알루미늄합금의 SEN(single edge notch) 시험편에서 균열진전특이장을 측정할 결과, 가공정화지수값이 4~12이면 하중방향으로 HRR특이장이 존재하나 균열진전방향으로는 존재하지 않았다. 또한 가공정화지수값이 15, 47인 경우에는 하중방향으로도 HRR장이 존재하지 않아 재료상수에 따라 큰 차이를 보여주었다. 그러나 이 방법은 미소한 균열진전밖에 측정할 수 없는 단점을 가지고 있다.

이에 반하여 대규모 균열진전문제에도 적용할 수 있는 화상처리(image processing)법과 유한요소법을 연계한 비접촉 변위·응력측정법은 여러가지 파괴역학 해석문제에 적용되었다.<sup>(12,15)</sup> 저자는 최근에 이 방법을 연성재료인 304 스텐레스강으로 제작한 CT(compact tension) 시험편에 적용하여 균열진전에 따른 재하영역의 거동과 파괴역학 파라미터를 구해 명확한 비선형 균열선단거동이 실험적으로 평가하였다.<sup>(15)</sup>

본 연구에서는 저자가 개발한 이 방법을 원자로 압력용기용 A533B강의 모재(base metal)와 용접재(weld metal)의 CT시험편에 적용하여 기존의 304 스텐레스강의 실험결과<sup>(15)</sup> 및 알루미늄합금의 실험결과<sup>(16,17)</sup>와 비교하여 균열진전특이장의 거동을 정량적으로 평가하고자 한다. 또한 용접재의 CT시험편에 대한 유한요소 균열진전 해석을 수행하여 용접부가 균열진전특이장에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

## 2. 해석순서

### 2.1 화상처리법의 개요

Fig. 1은 본 연구의 화상처리법에서 사용된 변위분포의 측정원리를 도식적으로 나타낸 것으로 먼저 측정하고자 하는 부위, 즉 균열선단 근방에 수백개의 점을 주위와 명확히 구별되도록 시험편에 부착한다. 이어서 카메라를 시험기 전방에 설치하여 하중에 의해 변형되는 균열선단의 점들을 촬영하여 화상을 얻는다. 얻어진 화상을 컴퓨터로 읽어들이 각 점들의 중심점을 구해 변형전·후의 각 점들의 위치의 변동에서 각 점의 변위를 구한다. 이렇게 측정된 변위분포를 최소2승법에 의해 유한요소법의 내삽함수로 변환시켜 유한요소해석의 절점변위를 얻는다. 이후에는 유한요소법과 같은 방법으로 변형률분포와 응력분포를 얻을 수 있고, 이를 사용해 J-적분 등의 파괴역학적 거동을 평가할 수 있다.

Fig. 2는 본 연구에서 비선형 파괴역학거동을 평가하기 위한 화상처리법과 유한요소법을 연계한 평가순서를 나타낸 것이다.

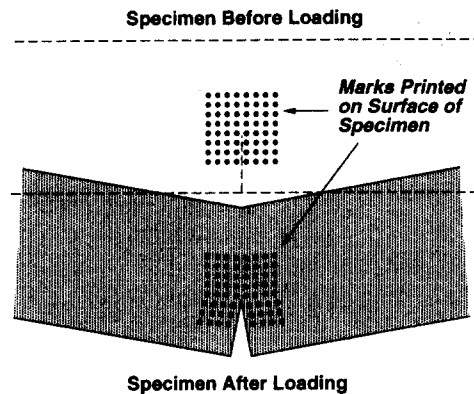


Fig. 1 Artificially printed marks before and after deformation

2.2 화상처리법에 의한 변위측정

화상처리법에 의한 실험에서 측정하고자 하는 부위에 미세한 수 백개 점의 조밀도와 명확성은 정확도에 영향을 미친다. 본 실험에서는 전자회로판의 에칭에 사용되는 건조필름(SF-25SY)을 사용하여 광(光)화학적인 기법을 사용하였다.<sup>(15)</sup> 건조필름을 균열선단 근방에 부착하고 수백개의 점이 실정된 흑백필름을 덮은 후에 아크방전에 의해 청색의 점들을 생성시켰다. 실험에서 하중을 가하며 촬영된 사진은 TV카메라를 이용해 워크스테이션으로 읽어들인다. 이 때 화상은 1024×1024의 화소(pixel)를 갖는다. 화상처리에 의해 각점들의 중심점을 구하고 변형전·후의 동일한 점의 이동량을 비교하여 변위를 구한다.<sup>(13)</sup>

2.3 유한요소 절점변위로의 변환

화상처리에 의해 구한 각 점들의 변위를 유한요소의 절점변위로 변환시키기 위해 각 점들의 변위를 내삽함수로 변환시켜야 한다. 내삽함수를 구하기 위해서는 일반적으로 다항식이나 스플라인(spline)함수에 근거한 최소2승법을 사용하여 주어진 데이터를 평활화(smoothing)한다. 그러나 이 방법은 주어진 데이터와 근사함수와의 차이만 고려하

므로 세밀한 근사를 얻으려고 할 경우에 근사구간을 정의하는 선별방법에 의해 크게 의존하여 해가 진동하는 경우가 많다. 따라서 각각의 값차이 뿐만 아니라 그 미분항도 고려하면 연속성이 좋은 내삽함수를 구할 수 있다. 이것은 화상처리에 의해 얻어진 변위를 미분하여 변형률분포를 구하는 본 해석방법에서 중요한 점으로 본 연구에서는 다음 식을 사용하였다.

$$\phi = \frac{\alpha'}{2} \sum_{i=1}^{ND} \{u(x_i) - \bar{u}(x_i)\}^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{DIM} \int_A \left\{ \frac{\partial u}{\partial x_k} - \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_k} \right\}^2 \quad (1)$$

여기서,  $\alpha'$ 는 계수,  $ND$ 는 주어진 데이터수,  $DIM$ 은 분체가 정의되는 공간의 차원수,  $u(x_i)$ 는  $x_i$ 에서 평활화된 데이터(변위),  $\bar{u}(x_i)$ 는  $x_i$ 에서 주어진 데이터(변위),  $\partial u / \partial x_k$ 와  $\partial \bar{u} / \partial x_k$ 는 평활화된 변위와 주어진 변위의  $x_k$  방향에서의 미분량을 표시한다.

본 연구에서 Fig. 3과 같이 측정하고자 하는 영역을 화상에서의 점들에 관계없이 많은 유한요소들로 분리하였다. 여기서, 유한요소 절점의 변위는 식 (1)의 오차( $\phi$ )를 최소화하여 구할 수 있다. 변형률과 응력분포는 화상에서 얻어진 각 점들의 변위를 유한요소의 절점변위로 변환한 후에 유한요소법과 같은 방법으로 구할 수 있다.

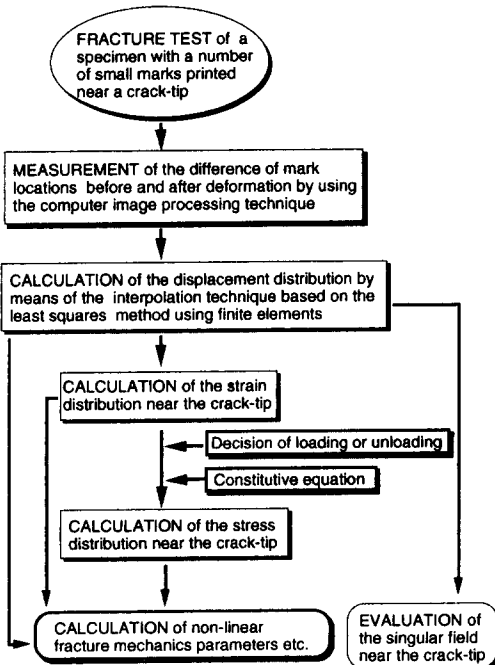


Fig. 2 Flow of analysis

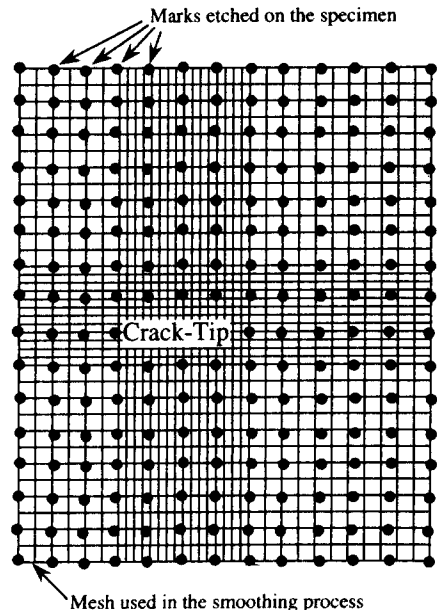


Fig. 3 Mark locations and overlapped finite elements

2.4 균열선단의 특이장

재료의 응력( $\sigma$ )-변형률( $\epsilon$ ) 관계는 다음의 Ramberg-Osgood식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_0$ 는 항복응력,  $\epsilon_0$ 는 항복변형률,  $n$ 은 가공경화지수,  $\alpha$ 는 가공경화계수이다. 이때 균열선단을 원점으로 하는 극좌표계 ( $r, \theta$ )에서 변위 ( $U_i$ )에 대한 HRR 특이장은 J-적분을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_i = \alpha \epsilon_0 \left( \frac{J}{\alpha \epsilon_0 \sigma_0} \right)^{\frac{n}{n+1}} r^{\frac{1}{n+1}} F_i(\theta, n) \quad (3)$$

여기서,  $F_i(\theta, n)$ 는 무차원함수이다. 식 (3)과 같이 J-적분은 균열선단의 특이장에 대한 세기(amplitude)가 된다. 따라서 HRR장의 존재는 변위와 균열선단에서의 거리( $r$ )에 대해 식 (3)을 log-log로 그래프화하여 그 기울기가  $1/(n+1)$ 이 되는지 여부에 의해 확인할 수 있다.

3. 균열진전실험

Fig. 4은 용접된 A533B강에서 채취한 CT시험편의 형상으로 용접부는 균열진전방향에 수직으로 균

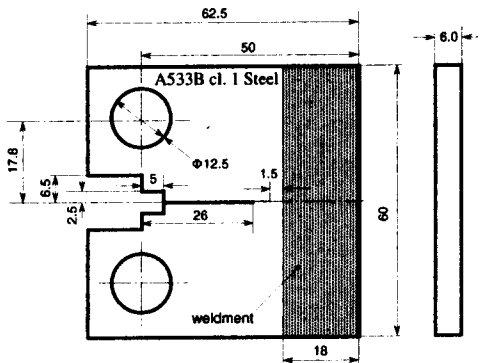


Fig. 4 Configuration and dimension of welded CT specimen made of A533B class 1 steel

열선단 전방에 위치한다. 총 균열길이는 초기균열(26 mm)에서 피로균열을 주어 용접선의 1.5 mm 앞까지 생성시켰다. 용접부의 영향을 조사하기 위해 용접부가 존재하지 않는 동일한 형상의 CT시험편의 실험도 수행하였다. Fig. 5는 상온에서 얻어진 응력-변형률의 관계로 Ramberg-Osgood근사에 의해  $n=10.0$ ,  $\alpha=7.7$ 이 얻어졌다. 그 외의 재료상수와 304 스텐레스강에 대한 재료상수는 Table 1과 같다.

실험은 인장시험기를 이용하여 변위제어형태로

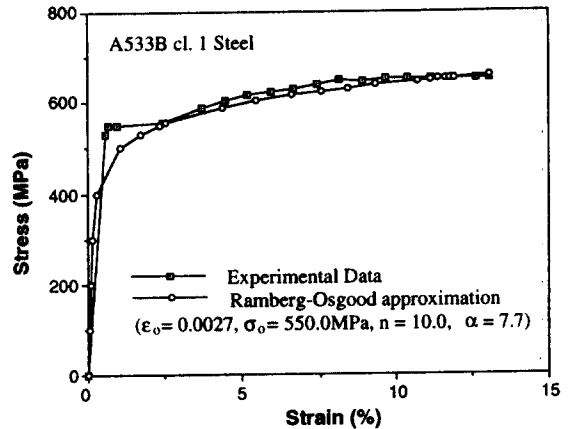


Fig. 5 Uniaxial stress-strain relation of A533B class 1 at room temperature

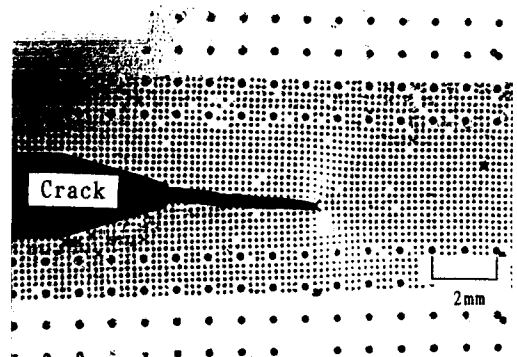


Fig. 6 Mark picture around a crack-tip of A533B class 1 steel ( $\Delta a = 0.1$  mm)

Table 1 Material properties

Material	$\sigma_0$	$\epsilon_0$	n	$\alpha$
A533B class 1 steel	550.0 MPa	0.00267	10.0	7.7
304 stainless steel	234.0 MPa	0.00126	2.4	12.6

수행되어 각각의 하중스텝에서 가해진 하중상태를 그대로 유지하면서 균열선단 근방의 수백개의 점들을 촬영하였다. 사진촬영에는 칼라필름을 사용하여 각각의 점들과 노이즈(noise)를 구별하도록 하였다. Fig. 6은 균열진전량( $\Delta a$ )이 0.1 mm인 경우에 촬영된 사진으로 각점들이 상당히 명료하게 노이즈와 구별되고 있다. Fig. 6에서 균열선단 근방에 두종류의 점들이 존재하며, 작은 점의 직경과 거리는 각각 0.1 mm, 0.2 mm이고, 그 주위에 큰 점의 직경과 거리는 각각 0.2 mm, 1.0 mm이다.

#### 4. 유한요소해석

균열진전실험에서 얻은 하중, 하중선 변위, 그리고 균열진전량에 근거한 2차원 유한요소해석을 A533B강의 모재와 용접재에 대해 수행하였다. 본 수치해석은  $J_2$  유동이론과 미소변형률, 평면응력조건에 근거하였고, 균열진전에 대한 시뮬레이션은 절점해방법(nodal release technique)을 사용하였다. Fig. 7은 CT시험편의 상하대칭성을 이용해 상부만을 모델링한 유한요소망으로서 153개의 8절점 요소(8-noded isoparametric element)와 513개의 절점을 사용하였다. 균열선단과 균열진전방향에 사용된 가장 작은 요소의 직경은 0.4 mm이다. 본 해석에서 응력-변형률관계는 두께 50 mm인 판을 SAW(submerged arc welding)로 용접한 후에 인장시험편(직경 : 5 mm(grip부), 3 mm(인장부))을 채취하여 구한 물성치를 다음 식으로 근사하여 사용하였다.<sup>(18)</sup>

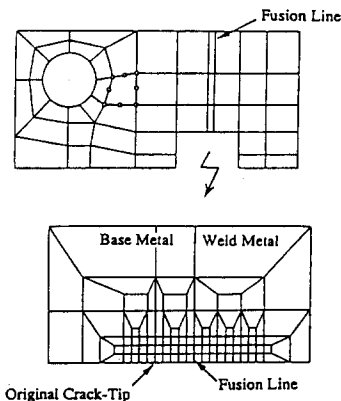


Fig. 7 Mesh subdivision of an upper half portion of CT specimen

모재부의 응력-변형률관계

$$\sigma_o^1 = 550 \text{ Mpa}, E_1 = 206 \text{ GPa}, \nu_1 = 0.3$$

$$\sigma \leq \sigma_o^1 : \epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$\sigma \leq \sigma_o^1 : \epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left\{ \left( \frac{\sigma}{E'} \right)^n - \left( \frac{\sigma_o^1}{E'} \right)^n \right\} \quad \text{for } \epsilon^p \leq 0.02153 \quad (4)$$

여기서,  $E' = 550 \text{ MPa}, n = 2$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left\{ \left( \frac{\sigma}{E'} \right)^n - \left( \frac{\sigma_o^1}{E'} \right)^n \right\} + \epsilon^p$$

for  $\epsilon^p > 0.02153$

여기서,  $E' = 850 \text{ MPa}, n = 10$

$$\sigma_o^1 = 554.87 \text{ MPa}$$

용접부의 응력-변형률관계

$$\sigma_o^2 = 630 \text{ Mpa}, E_2/E_1 = 0.85, \nu_2 = 0.3$$

$$\sigma \leq \sigma_o^2 : \epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$\sigma \leq \sigma_o^2 : \epsilon = \frac{\sigma}{E} + \left\{ \left( \frac{\sigma}{E'} \right)^n - \left( \frac{\sigma_o^2}{E'} \right)^n \right\} \quad (5)$$

여기서,  $E' = 950 \text{ MPa}, n = 8$

위의 식에서 용접부의 항복응력은 모재부의 값보다 약 15% 높은 것을 알 수 있다.

#### 5. 결과 및 고찰

##### 5.1 균열선단 특이장의 변화

단축인장실험에 의한 A533B강과 304 스테인레스강의 가공경화지수는 각각 10과 2.4이다. 2.3절에서 언급한 바와 같이 균열선단을 원점으로 한 극좌표계에서 균열선단으로부터의 거리( $r$ )와 변위( $U_r$ )에 대해 log-log 그래프를 그리면 HRR장이 존재하는 경우에 그의 기울기는 각각 0.091과 0.29가 된다. Fig. 8은 A533B강의 모재 CT시험편에서 균열진전량이 0.26 mm인 경우, log-log화된 극좌표계에서 각도( $\theta$ )가 63°에서 117°까지의 변위( $U_r$ )를 나타낸 것이다. 이 그림에서 균열선단의 비선형영역을 제외하고 HRR장이 존재하고 있으며, 각도가 하중방향에 가까워 질수록 HRR장의 영역이 커짐을 알 수 있다. Fig. 9는 A533B강의 균열진전에 따른 90°방향의  $U_r$ 의 분포로 균열진전초기( $\Delta a = 0.1 \text{ mm}$ )에는 HRR장 주위에 선형탄성특이장(LEFM : 기울기가 0.5)이 존재하고 있으며, 균열

이 더욱 진전함에 따라 비선형영역이 확장하여 HRR장이 축소되어가는 것을 알 수 있다. 따라서 균열진전 초기에 생성된 HRR장은 균열진전과 함께 이동하는 것이 아니라 비선형영역이 확장함에 따라 소멸되어간다. 이러한 결과는 Kobayashi의 모아레간섭을 이용한 알루미늄합금( $n=4\sim 12$ )에 대한 실험결과와도 잘 일치하고 있다.<sup>(16,17)</sup> 본 연구에서는 A533B 용접재의 CT시험편도 실험에서 얻은 변위성분을 이용하여 균열진전특이장의 거동을 평가하였다. 그 결과, 모재의 경우와 같은 결과를 얻어 용접부가 변위장에는 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 10과 Fig. 11은 304 스테인레스강에 대한 실험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10은 균열진전량이

0.21 mm인 경우, 각도( $\theta$ )가  $63^\circ$ 에서  $117^\circ$ 까지의 범위( $U_r$ )를 나타낸다. A533B강의 경우와 같이 HRR장은 하중방향에 가까울수록 넓게 존재하며 그 주위에 선형탄성특이장이 존재하고 있다. Fig. 11은 Fig. 9와 마찬가지로 304 스테인레스강의 균열진전에 따른  $90^\circ$ 방향의  $U_r$ 의 분포로, 초기에 존재한 HRR장이 균열이 진전함에 따라 사라지고 선형탄성특이장에 근사한 기울기로 변환되는 것을 알 수 있다. 이 그림에서 균열선단에서의 거리( $r$ )가 3.5 mm 이내의  $U_r$ 을 보면  $\Delta a$ 가 0.79 mm인 경우가 2.29 mm의 경우보다 크게 나타나 있어 A533B강과 다른 결과를 보여주었다. 이는 본격적인 균열진전에 앞서 큰 둔화(blunting)현상이 생겼다는 것을 나타낸다.

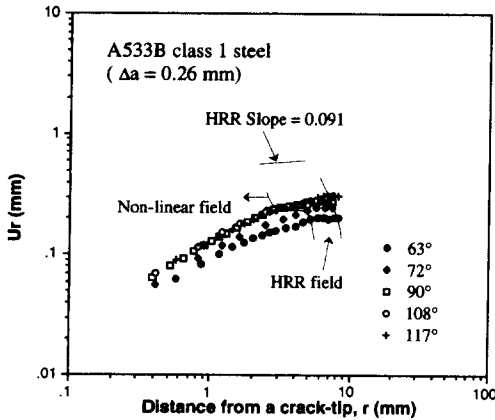


Fig. 8 Relationship of  $U_r$ -displacement vs.  $r$  ( $\Delta a=0.26$  mm, A533B class 1 steel)

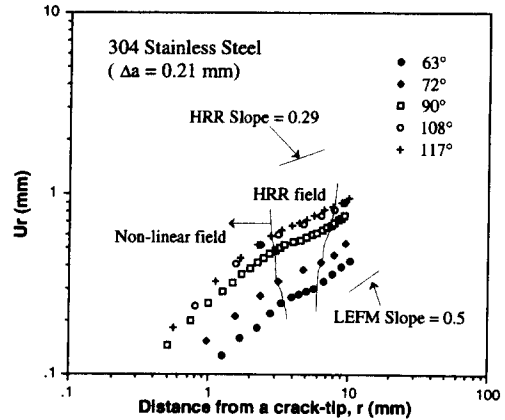


Fig. 10 Relationship of  $U_r$ -displacement vs.  $r$  ( $\Delta a=0.21$  mm, Type 304 stainless steel)

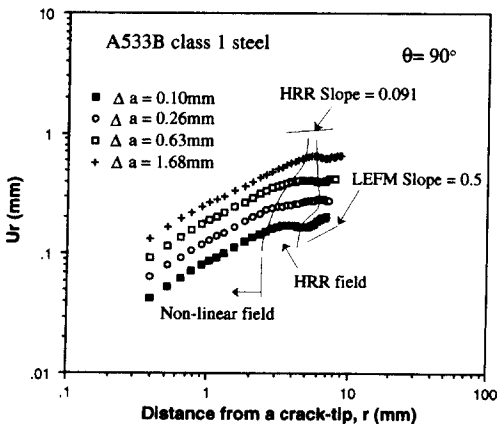


Fig. 9 Transformation of  $U_r$ -field in accordance with crack growth (A533B class 1 steel)

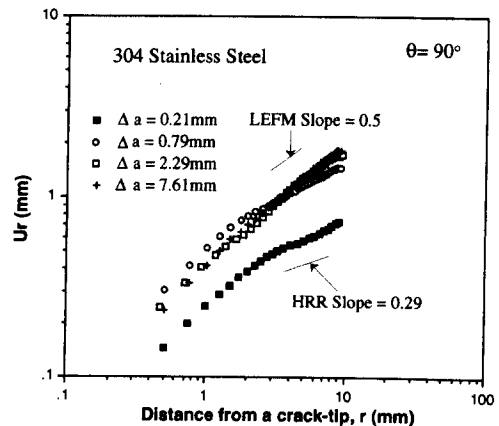


Fig. 11 Transformation of  $U_r$ -field in accordance with crack growth (Type 304 stainless steel)

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 A533B강과 304 스테인레스강에 대한  $U_r$ ,  $U_\theta$ ,  $U_x$ ,  $U_y$ 의 분포를 나타낸다. Kobayashi의 모아레간섭을 이용한 알루미늄합금( $n=4\sim 12$ )에 대한 HRR장의 실험연구는 하중방향인  $y$ 방향의 성분은 HRR장이 존재하지만 균열진전방향인  $x$ 방향의 성분은 HRR장이 존재하지 않고 그 기운기가 거의 선형탄성특이장에 가까운 결과를 보여주었다. Fig. 12에서와 같이 A533B강( $n=10$ )은 알루미늄합금과 같은 결과를 얻었다. 이 둘 두 금속은 하중방향인  $y$ 방향의 성분은 변형이 커서 소성성분이 잘 발달되는 반면,  $x$ 방향의 소성성분은 비교적 작아 소성역 생성에 크게 기여하지 못하는 것으로 생각된다. 이에 반하여 Fig. 13에서

보여지는 바와 같이 304 스테인레스강( $n=2.4$ )은 모든 방향의 성분이 HRR장을 나타낸다. 304 스테인레스강은 균열진전에 앞서 큰 둔화현상에 발생하여  $x$ 방향의 성분에도 소성역이 잘 발달된 것으로 생각된다. 이와 같이 진전균열특이장은 재질특성, 즉 가공경화지수( $n$ )에 크게 의존한다.

5.2 균열선단특이장에 대한 용접부의 영향(유한요소해석)

Fig. 14는  $\Delta a$ 가 0.22 mm인 경우에 A533B강의 모재와 용접재에 대한 잔여길이( $\theta=0^\circ$ )에서 상당소성변형률성분과 균열선단에서의 거리( $r$ )을 무차원화하여 나타낸 그림으로 실선은 HRR장을 나타낸다. 이 그림에서 용접재는 균열선단앞에 용접부가 존재하는 것으로 모재와 같이 HRR장과 일치하는

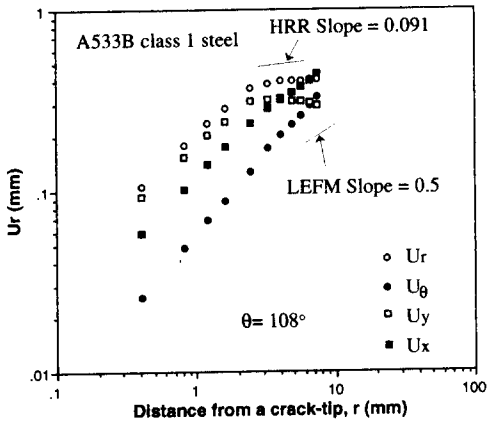


Fig. 12 Distribution of  $U_r$ ,  $U_\theta$ ,  $U_y$  and  $U_x$  displacement fields near a crack-tip for A533B class 1 steel ( $\Delta a=0.29$  mm)

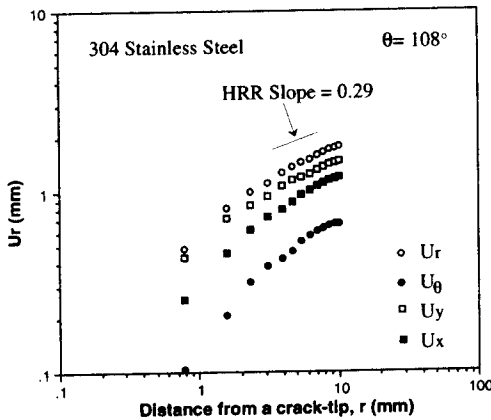


Fig. 13 Distribution of  $U_r$ ,  $U_\theta$ ,  $U_x$  and  $U_y$  displacement fields near a crack-tip for Type 304 stainless steel ( $\Delta a=0.79$  mm)

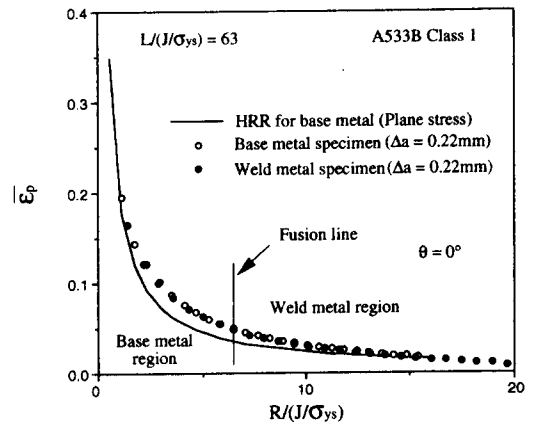


Fig. 14 Distribution of equivalent plastic strain along crack line

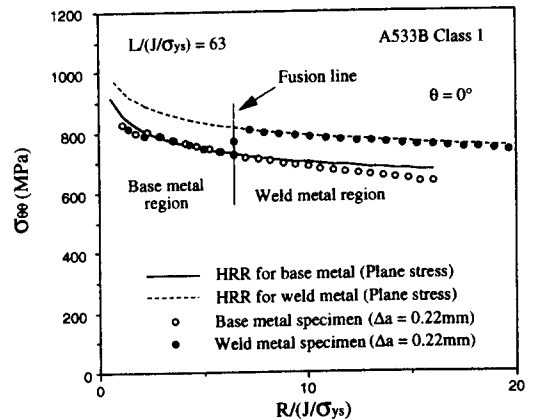


Fig. 15 Distribution of normal stress along crack line

균열선단특이장을 나타내어 용접부의 영향이 없었다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 용접부가 변위 특이장에 어떤 영향도 미치지 않은 실험결과와 일치한다. Fig. 15는  $\Delta a$ 가 0.22 mm인 경우에 응력분포( $\sigma_{90}$ ,  $\theta=0^\circ$ )를 나타낸 그림으로 보체의 경우에는 실선으로 표시된 이론의 HRR장과 잘 일치하나 용접재의 경우에는 용접선(fusion line)에서 점프되는 현상이 나타났다. 이런 점프현상에서 응력의 차이는 약 15%로 항복응력의 차이와 거의 같았다. 이와 같이 응력분포에서는 용접부의 영향을 나타내며 이 차이는 J-적분과 같은 파괴역학파라미터를 구할 때 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

### 6. 결 론

본 연구에서는 인성재료의 균열진전에 따르는 균열선단특이장의 거동을 평가하기 위하여 화상처리(image processing)법을 원자로 압력용기용 A533B강의 모재와 용접재의 CT 시험편에 적용하였다. 또한 이 방법을 적용한 304 스테인레스강의 균열진전 해석결과와 모아래긴집법을 이용한 알루미늄합금의 해석결과와 비교 평가하였고, 용접부의 영향을 고려하기 위해 유한요소법을 이용한 해석도 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 균열진전특이장은 균열선단에서부터 비선형영역, HRR특이장영역, 선형탄성장영역의 3가지 영역으로 구분되며 이들 영역은 재질특성, 균열진전량, 균열선단에서의 각도 등에 따라 변화한다.

(2) 균열진전초기에 생성된 HRR 특이장은 선형탄성장에 의해 둘러싸여지며 하중방향, 즉 소성변형이 큰 방향에 더욱 크게 발달되고 균열진전과 함께 이동하지 않으며 성장해가는 비선형영역에 의해 소멸되어간다.

(3) A533B강( $n=10$ )의 HRR 특이장은 하중방향으로는 존재하나 균열진전방향으로는 존재하지 않아 알루미늄합금( $n=4\sim 12$ )의 HRR특이장과 일치하였다.

(4) 균열선단 앞에 존재하는 용접부는 변위와 변형률의 특이장에는 아무런 영향을 미치지 못하나 응력의 특이장에는 영향을 미친다.

### 후 기

본 연구는 인덕전문대학에서 연구비 일부를 지원

받아 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Rice, J. R., 1968, "A Path-independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, pp. 376~386.
- (2) Hutchinson, J. W., 1968, "Singular Behavior at the End of a Tensile Crack in a Hardening Material," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 16, pp. 13~31.
- (3) 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.
- (4) Pyo, C. R., Okada, H. and Atluri, S. N., 1995, "Residual Strength Prediction for Aircraft Panels with Multiple Site Damage, Using the EPFEAM for Stable Crack Growth Analysis," *Computational Mechanics*, Vol. 16, pp. 190~196.
- (5) Okamura, H., Yagawa, G., Kawakami, T., Urabe, Y., Sato, M. and Sano, J., 1992, "Ductile Crack Growth Under a PTS Event," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 137, pp. 457~465.
- (6) Merkle, J. G. and Corten, H. T., 1974, "A J-integral Analysis for the Compact Specimen, Considering Axial Force as Well as Bending Effects," *Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 96, pp. 286~292.
- (7) 석창성, 김영진, 최용식, 장윤석, 김종욱, 1994, "영광원자력 배관소재의 재료불성치 평가 (I)," 대한기계학회논문집, 제18권, 제5호, pp. 1106~1116.
- (8) Hutchinson, J. W. and Paris, P. C., 1979, "Stability Analysis of J-Controlled Crack Growth," *ASTM STP 668*, pp. 37~64.
- (9) Paris, P. C., Tada, H., Zahoor, A. and Ernst, H., 1979, "The Theory of Instability of the Tearing Mode of Elastic-Plastic Crack Growth," *ASTM STP 668*, pp. 5~36.
- (10) 윤영일, 이영환, 정정섭, 이정배, 최영환, 1990, "파단전누설 개념 적용 평가기술 개발,"



- 한국원자력안전기술원보고서, KINS/AR-057.
- (11) Kim, Y. J., Son, S. H., Choi, J. B. and Chung, H. D., 1993, "Development of Elastic-plastic Integrity Evaluation System for Pressure Vessel and Pipings," *International Journal of Nuclear Engineering and Design*, Vol. 142, pp. 61~68.
- (12) Yagawa, G. and Yoshimura, S., 1986, "On the Dynamic Fracture Toughness and Crack Tip Strain Behavior of Nuclear Pressure Vessel Steel: Application of Electro Magnetic Force," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 97, pp. 195~209.
- (13) Miyoshi, A., Yoshioka, A. and Yagawa, G., 1988, "Strain Measurement of Structures with Curved Surface by Means of Personal Computer Based Picture Processing," *Engineering with Computers*, Vol. 3, pp. 149~156.
- (14) Yoshioka, A., Miyoshi, A., Soneda, N. and Yagawa, G., 1988, "Development of a Strain Measurement Method for Non-plane Specimens by Means of Computer Image Processing," *JSME International Journal*, Vol. 31, pp. 233~239.
- (15) Yagawa, G. and Yoshimura, S., Yoshioka, A. and Pyo, C. R., 1992, "Analysis of Growing Ductile Cracks Using Computer Image Processing," *ASTM STP 1131*, ASTM, pp. 289~313.
- (16) Kang, B. S. J. and Kobayashi, A. S., 1988, "J-Estimation Procedure Based on Moire Interferometry Data," *Trans ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 110, pp. 291~300.
- (17) Dadkhah, M. S. and Kobayashi, A. S., 1989, "HRR Field of a Moving Crack, an Experimental Analysis," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 34, pp. 253~262.
- (18) Yoshimura, S., Yagawa, G., Pyo, C. R., Kashima, K., Shimakawa, T. and Takamatsu, S., 1992, "Stable Crack Growth Phenomena of Welded CT Specimens and Their Simplified Assessment," *Proceedings of 26th ASME PVP Conference*, New Orleans, USA, PVP-Vol. 233, pp. 181~186.