論文 11-2-4

화상처리법에 의한 연성균열의 손상해석시스템 개발

Evaluation of Fracture Damage Analysis System Using Image Processing

표 창 률*
C. R. Pyo

ABSTRACT

This paper describes an experimental study of growing ductile crack-tip behaviors by means of computer image processing technique and finite element method. Here, the displacement field near a crack-tip is first measured by the computer image processing technique. Combined with the finite element technique, strain and stress fields are evaluated from the measured displacement. Then, crack-tip parameters such as J-integral are evaluated using the obtained displacement, strain and stress fields. The present technique is applied to a growing crack problem of tensile CT specimen made of 304 stainless steel. The ductile crack growth behaviors accompanied by unloading are discussed in detail through the comparison between the experimental and the theoretical results.

1. 서 론

원자력 압력용기나 1차계 배관등과 같이 연성재료로 제작된 구조기기의 건전성 평가나 안전성 평가에 J-적분[1]에 근거한 비선형 파괴역학이 널리 이용되고 있다. 이는 J-적분이 전변형률 소성이론이 성립하는 범위에서 에너지해방률로서의 물리적 의미를 갖으며 균열선단 근방에 HRR(Huchinson Rice Rosengren)영역[2,3]이라고 하는 특이응력장에서 강도파라메타로 사용될 수 있기 때문이다. 그리고 J-적분은 경로독립성을 갖고 있기 때문에 유한요소법등을 이용한 복잡한 구조기기의 안전성 평가[4~6]에서 정확도가 높은 해석을 가능케 하며, 실험에서 구한 하중과 변위관계를 이용해 J-적분을 간편하게 구할 수 있는 실험식[7,8]도 제안되어 있다.

이와같이 비선형 탄성체에 대해 유용한 성질을 갖는 J-적분을 연성재료의 균열진전 평가에 적용할 때, 균열선단의 후방에 대규모의 제하(unloading)영역이 발생하여 J-적분이 에너지해방률로서의 의미는 물론 HRR특이장과 경로독립성도 상실되는 문제점이 발생한다. 따라서 균열진전 문제에서 J-적분의 유효성을 파악하기 위하여 많은 연구가 수행되었다. 특히, 균열선단의 상세한

* 인덕전문대학 기계과

유한요소 해석을 통해 ligament에 비해 작은 양의 균열진전이면 HRR장이 존재하여 J-적분 지배의 균열진전[9]이 성립되는 것으로 알려져 있다. 그러나 현실적으로 J-적분은 원래의 유효범위를 넘어서 사용되는 경우가 많아 대규모 균열진전 문제를 기술하기 위한 검토가 요망되고 있다.

이러한 문제에 대하여, 대규모 균열진전시에도 적용가능한 비선형파괴역학 파라메타[10]가 제안되어 다양한 수치해석적 연구[11,12]가 진행되고 있다. 이들 파라메타의 특징은 균열선단에 매우 근접한 적분경로를 설정하는 것과 균열선단근방의 제하, 관성력등 보통의 J-적분에서는 고려하지 않는 효과를 고려하는 것이다. 그러나 J-적분과 같이 실험적으로 간편하게 구할 수 없는 단점을 가지고 있다.

이와같이 균열진전문제에 대한 연구는 주로 수치해석적으로 수행되어 이와 비교할 수 있는 실험적 연구는 미미한 실정이다. 실험적 연구중에 모아레간섭법[13]을 이용한 해석은 미소한 균열진전밖에 측정할 수 없는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 대규모의 균열진전거동을 실험적으로 평가하기 위해 화상처리(image processing)법[14,15]과 유한요소법을 연계한 파괴손상 해석시스템을 개발하였다. 이 시스템을 연성재료인 304 스텐레스강의 균열진전문제에 적용하여 균열진전에 따른 제하영역의 거동과 비선형 파괴역학 파라메타를 구해 지금까지 이론이나 수치해석으로만 구할 수 있었던 비선형 균열선단거동을 실험적으로 평가하였다.

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 설치한다. 균열선단의 점들의 이동을 촬영하기 위해 카메라를 시험기 전방에 설치한 후 하중을 가해 변형되는 균열선단의 점들을 촬영한다. 각 하중상태에서 얻어진 화상을 컴퓨터로 읽어들여 변형전·후의 각 점들의 위치의 변동에서 각 점의 변위를 구한다.

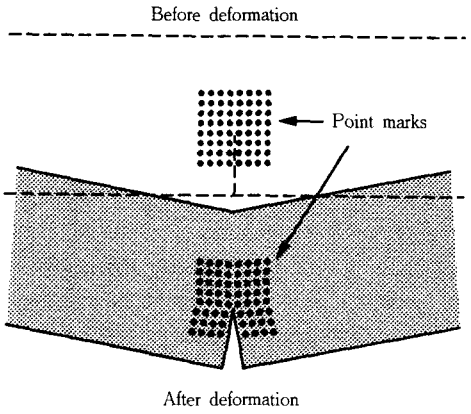

Fig. 1 Artificially printed marks before and after deformation

이렇게 얻어진 변위분포를 최소자승법에 의해 유한요소법의 내삽함수로 변환시킨다. 이 작업에 의해 측정된 각 점의 변위가 유한요소법의 절점변위로 변환된다. 이 후에는 유한요소법과 같은 해석순서로 변형률분포와 응력분포를 얻을 수 있고 이를 이용해 J-적분등의 파괴역학적 거동을 평가할 수 있다. Fig. 2는 본 연구에서 균열진전거동을 평가하기 위한 화상처리법과 유한요소법을 연계한 손상해석시스템의 평가순서를 나타낸 것이다.

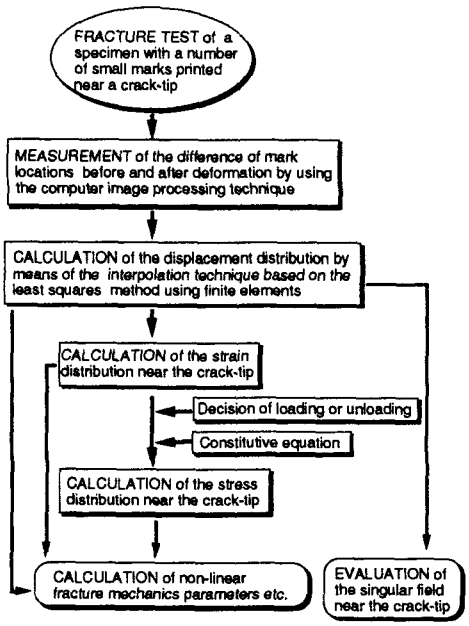

Fig. 2 Flow of analysis

2.2 유한요소 절점변위로의 변환

화상처리에 의해 구해진 각점들의 변위를 유한요소의 절점변위로 변환시키기 위해 각점들의 변위를 내삽함수로 변환시켜야 한다. 내삽함수를 구하기 위해서는 일반적으로 다항식이나 스플라인(spline)함수에 근거한 최소자승법을 사용하여 주어진 데이타를 매끄럽게(smoothing)한다. 그러나 이 방법은 주어진 데이타와 근사함수와의 차이만 고려하므로 세밀한 근사를 얻을려고 할 경우에 근사구간을 정의하는 선별방법에 의해 크게 의존하여 해가 진동하는 경우가 많다. 따라서 각각의 값 차이 뿐만아니라 그 미분항도 고려하면 연속성이 좋은 내삽함수를 구할 수 있다. 이것은 본 해석방법과 같이 화상에서 얻어진 변위를 미분하여 변형률분포를 구할때에 중요한 점으로 본 연구에서는 다음식을 사용하였다.

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

여기서 α'는 계수, ND는 주어진 데이타수, DIM은 문제가 정의되는 공간의 차원수, $u(x_i)$는 x_i에서 매끄럽게된 데이타(변위), $\bar{u}(x_i)$는 x_i에서 주어진 데이타(변위), $\partial u/\partial x_k$와 $\partial \bar{u}/\partial x_k$는 각각 매끄럽게된 변위와 주어진 변위의 x_k방향에서의 미분량을 표시한다.

본 연구에서 측정하고자 하는 영역은 Fig. 3에서 보여지는 바와 같이 시험편 표면에 설정된 점들에 관계없이 많은 유한요소로 분리된다. 그때 유한요소 절점의 변위는 식(1)의 오차(ϕ)를 최소화하여 구할 수 있다.

2.3 변형률·응력분포의 계산

화상에서 얻어진 각점들의 변위가 유한요소의 절점변위로 변환된 후에 변형률분포는 유한요소법과 같은 방법으로 각 절점의 변위를 수치미분하여 얻을 수 있다. 일반적으로 균열진전문제의 탄소성 응력장의 계산은 하중이력을 고려한 증분소성이론에 근거해 행하는 것이 적절하다. 그러나 본 연구에서와 같이 단조증가 하중상태의 연성균열 진전문제는 제하가 생기기 전까지 각 점들의 변형은 전변형률 소성이론으로 근사가 가능한 것에 착안하여 실험에서 얻어진 변형률(ε_{ij})에서 응력(σ_{ij})을 다음식을 이용해 직접 계산하였다.

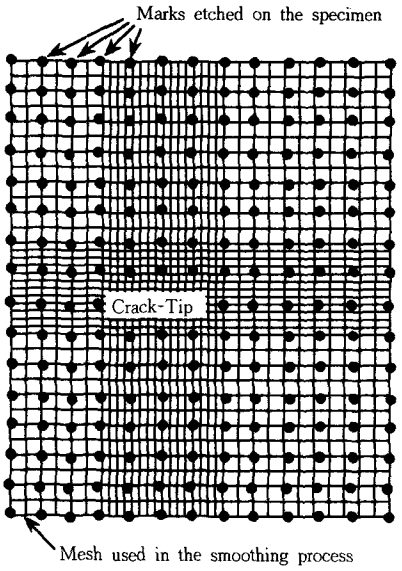

Fig. 3 Mark locations and overlapped finite elements

$$\sigma_{ij} = \frac{2G}{1+3G/H_S}\left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu+(1+\nu)G/H_S}{1-2\nu}\delta_{ij}\varepsilon_{mm}\right) \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서 G는 전단탄성계수, H_s는 소성계수, ν는 푸아송의 비, δ_{ij}는 Kronecker delta이다.

2.4 제하영역(unloading zone)의 판정

연성재료에서 균열이 진전하면 균열선단 후방에 제하영역이 생성되어 J-적분의 유효성이 상실된다. 이러한 균열진전에 따른 제하영역의 거동에 대한 이론적인 연구는 Rice[16]에 의해 수행되었다. Rice는 균열선단을 원점으로 하여 균열진전 방향과 하중(loading)영역과 제하(unloading)영역의 경계면이 이루는 각도가 균열이 진전하기 전에는 90°이지만 안정 균열진전시에는 115°가 된다고 보고하였다. 그러나 이를 뒷받침할 만한 실험적 평가는 아직 이루어지질 않아 본 연구에서는 실험적으로 제하영역의 거동을 평가하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다.

Fig. 4와 같이 균열근방의 다수의 점(본 해석에서는 160개를 사용함)에서 균열진전량과 상당변형률(equivalent strain)을 그래프화하여 상당변형률

값이 증가한 뒤 거의 일정하게 되는 점을 제하의 발생시점으로 판정하였다. 그러나 제하에 따르는 탄성변형률의 감소량을 정확히 파악하기는 매우 어려워 완전제하의 판정은 수행하지 않았다.

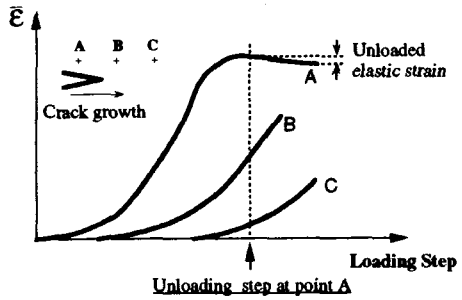

Fig. 4 Strain histories at points beside a growing crack

2.5 제하를 고려한 J-적분의 계산

J-적분은 일반적으로 다음과 같이 정의된다.

$$J=\int_{\Gamma}\left(Wn_1-\sigma_{ij}n_j\frac{\partial u_i}{\partial x_1}\right)d\Gamma \quad \cdots\cdots (3)$$

여기서 Γ는 균열선단을 둘러싼 적분경로, W는 변형률에너지 밀도, n_i는 Γ상의 단위 법선벡터, u_i는 변위벡터는 나타낸다. 본 연구에서는 균열선단을 둘러싼 매우 작은 적분경로를 설정하고 제하영역의 거동을 고려하여 J-적분을 평가하였다. 이러한 경로적분은 균열진전문제의 파괴역학 파라메타로 사용되는 T*-적분[10]과 유사한 정의가 된다. 이와 같이 J-적분을 변형시킨 파괴역학 파라메타를 본 논문에서는 "균열선단의 J-적분(near crack-tip J)"으로 명명한다. 균열선단의 J-적분은 일반적인 유한요소해석과 같이 경로적분을 사용하였고 다음과 같은 방법으로 제하거동를 고려하였다.

식(3)에서 변형률에너지밀도(W)의 계산은 소성역이 충분히 발달된 뒤에는 제하를 고려하여도 W는 큰 영향이 없으므로 제하를 무시하여 평가하였다. 또한, 제2항중 σ_{ij}의 평가는 적분경로상에서 2.4절에서 언급한 제하발생의 유무를 판정한 뒤에 제하가 발생하지 않은 곳에서는 식(2)에서 얻은 값을 사용하였고, 제하가 발생한 곳에서는 상대적으로 작은 값을 갖기 때문에 "0"으로 간주하였다.

3. 균열진전 실험

Fig. 5는 본 연구에서 사용된 CT(compact tension)시험편의 형상을 나타낸다. 재료는 원자로 압력용기에 사용되는 304 스텐레스강으로, 균열길이(a)는 피로균열을 포함하여 115mm이다. 재료상수로 Young's Modulus(E)는 1.9×10^5MPa, 푸아송 비(ν)는 0.27, 항복응력(σ_0)은 234.0MPa, 항복변형률(ε_0)은 0.00126이다.

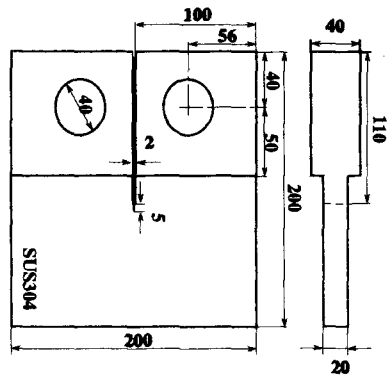

Fig. 5 Configuration and dimension of specimen

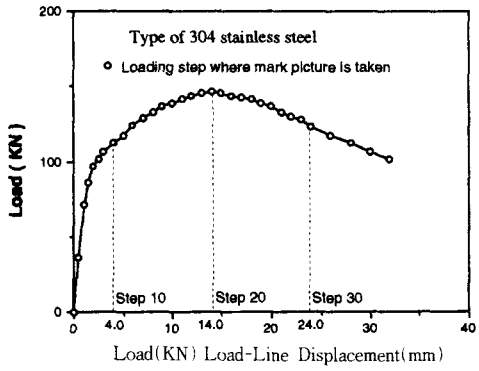

Fig. 6 Load vs. load-line displacement curve

화상처리에 의한 실험에서 측정하고자 하는 부위에 미세한 수백개점의 조밀도와 명확성은 정확도에 영향을 미친다. 본실험에서는 전자회로에 사용되는 필름을 사용하여 아아크 방전을 이용한 광(光)화학적인 에칭기법을 사용하여 각 점들을 청색으로 부착하였다. 사진촬영에는 칼라필름을 사용하여 각 점들과 노이즈(noise)를 구별하도록 하였다. 실험은 인장시험기를 이용하여 변위제어 형태로 수행되어 각각의 하중스텝에서 가해진 하중

상태를 그대로 유지하면서 균열선단 근방의 수백 개의 점들을 촬영하였다. Fig. 6은 실험에서 얻어진 하중과 하중선변위(load line displacement)의 관계로 작은 원은 사진이 촬영된 하중스텝을 나타낸다.

Fig. 7은 하중스텝 28(Δa=7.61mm)에서 촬영된 사진으로 상당한 균열진전에 의해 변형되었음에도 불구하고 각점들이 상당히 명료하게 노이즈와 구별되고 있다. Fig. 7에서 균열선단 근방에 세 가지 크기의 점들이 존재하며, 중앙의 가장 미세한 점의 직경과 거리는 각각 0.1mm, 0.2mm이고 그주위에 중간크기의 점의 직경과 거리는 각각 0.2mm, 1.0mm이다.

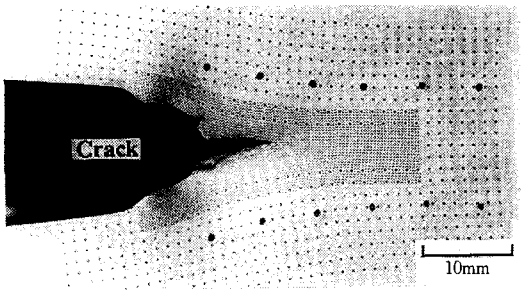

Fig. 7 Mark picture around a crack-tip of Type 304 stainless steel(Δa=7.61)

4. 결과 및 고찰

4.1 변형률의 분포

Fig. 8는 Δa가 0.21mm인 경우에 y방향의 미소변형률(infinitesimal strain) 분포로서 균열선단 근방에는 50%를 넘는 매우 큰 변형률이 존재한다. 따라서 이 변형률분포를 그린변형률(Green's strain)에 근거해 계산해본 결과, 균열선단 근방에서 약 20%정도 높은 변형률분포를 얻었다. 그러나 균열선단 근방을 제외하고 미소변형률과 그린변형률의 차이가 크지 않아 본 해석에서는 미소변형률에 근거해서 해석을 수행하였다.

4.2 제하영역의 거동

Fig. 9는 균열진전에 따르는 제하의 발생영역을 시험편 표면에 측정한 균열진전량(Δa)에 대해 표시한 것이다. Fig. 9에서 "+" 표시는 제하판정을

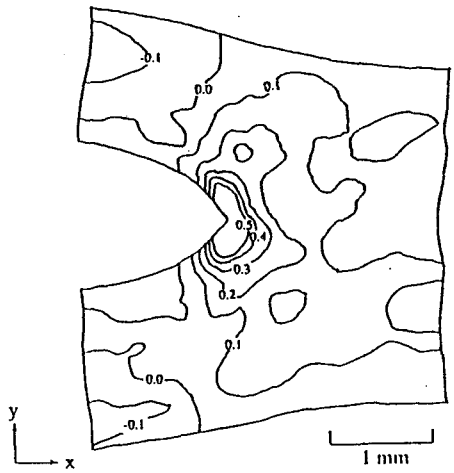

Fig. 8 Distribution of infinitesimal strain in y-direction(Δa=0.21mm)

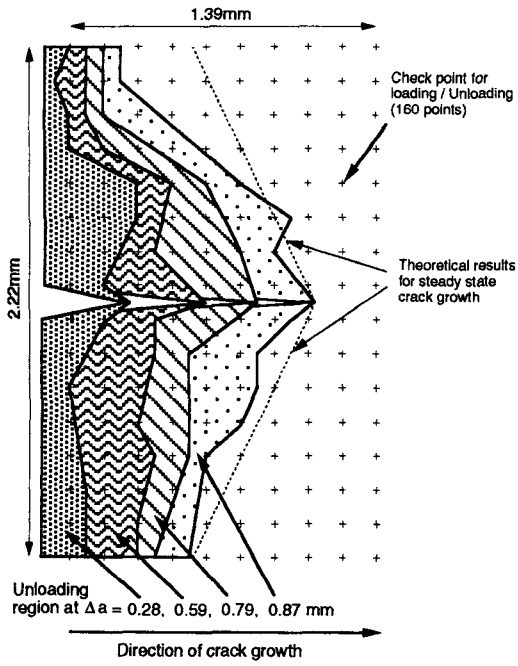

Fig. 9 Extension of elastic unloading region in accordance with crack growth

수행하기 위해 균열선단에 선정한 160개의 점으로, 제하의 여부는 각각의 하중스텝에서 모든 점에 대해 균열진전에 따르는 상당변형률을 그래프화하여 판정하였다. Fig. 9에서 균열진전의 초기

(Δa=0.28, 0.59mm)에는 균열진전 방향과 제하/부하(unloading/loading)의 경계가 이루는 각도가 약 90°이나 균열이 진전함에 따라 이 각도가 커지면서, 균열이 약 0.87mm 진전한 지점에서 약 120°가 되었다. Rice는 완전소성의 평면변형률 조건에서 균열진전 방향과 제하/부하의 경계가 이루는 각도가 균열진전초기에는 90°, 균열진전시에는 115°가 된다고 보고하였다. 따라서 본 해석에서 구한 결과는 Fig. 9에서 점선으로 표시되는 Rice의 결과와 잘 일치하고 있다.

4.3 파괴역학 파라메타의 경로분포

Fig. 10은 본 연구에서 J-적분값을 구하기 위해 사용한 적분경로를 나타내고 있다. 균열선단에서 가장 먼 적분경로는 가로 1.66mm, 세로 2.08mm이고 적분경로간 거리는 0.10mm로 모두 10개의 경로로 균열선단에 인접한 경로를 설정하였다.

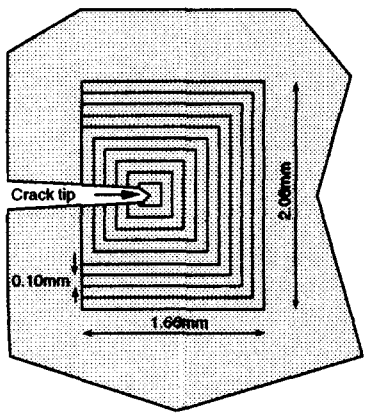

Fig. 10 Integration paths for the near crack-tip J-integral calculation

Fig. 11와 Fig. 12는 균열진전량(Δa)이 0.04mm와 0.79mm에서 얻어진 균열선단의 J-적분(Near Crack-tip J)을 균열선단에서의 거리에 대해 구한 그림이다. 참고데이타로 실험에서 얻어진 하중과 변위곡선에서 구한 J-적분값(Merkle-Corten's J)[7]도 함께 표시하였다. 균열선단에서의 거리 0.6mm 이하의 경로에서 얻어진 J-적분값은 0.6mm이상에서 얻어진 J-적분값에 비해 경로독립성이 상실된 경향을 보여주며, Δa가 0.04mm인 경우에 비해 Δa가 0.79mm인 경우가 더욱 두드러진다. 이것은 진전균열선단의 매우 근접한 영역에서 발생하는 프로세스영역(process zone)[9]이 적분경로에 포함되었기 때문으로 균열이 진전함에 따라 프로세스 영역이 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 균열선단에서의 거리 0.6mm이상의 경로에서 구한 J-적분값은 양호한 경로독립성을 유지하고 있고 Merkle-Corten의 J-적분값과 잘 일치한다.

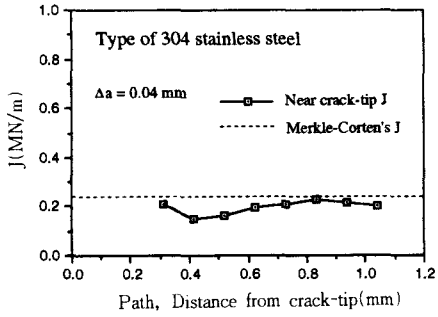

Fig. 11 Distribution of the near crack-tip J-integral (Δa=0.04mm)

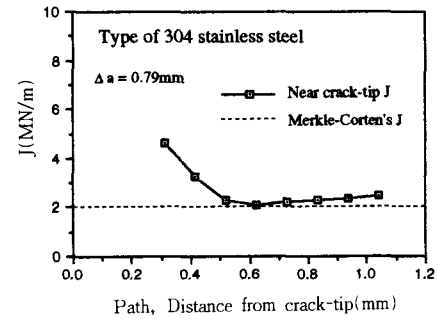

Fig. 12 Distribution of the near crack-tip J-integral (Δa=0.79mm)

4.4 균열진전저항곡선

Fig. 11과 Fig. 12에서와 같이 비교적 경로독립성이 유지되는 균열선단에서의 거리 0.6mm이상에서 구한 J-적분값을 평균내어 구한 값과 시험편 표면에서 측정한 균열진전량에 대해 얻어진 균열진전 저항곡선을 Fig. 13에 나타내었다. 또한 이 그림에서 Merkle-Corten식을 이용한 J-적분[7]과 Ernst등에 의한 변형 J-적분[8]을 나타내고 있으며 이들 2개의 J-적분값은 균열진전에 따라 증가하며 서로 잘 일치하고 있다. 균열진전 초반에 제하을 고려한 J-적분값은 다른 2개의 J-적분값과 잘 일치

하지만 일정량의 균열진전후에는 증가하지 않고 거의 일정하였다. 이런 결과는 균열진전 문제에서 구한 T*-적분과 같은 경향을 보여주고 있어 수치해석결과와 잘 일치하고 있다.

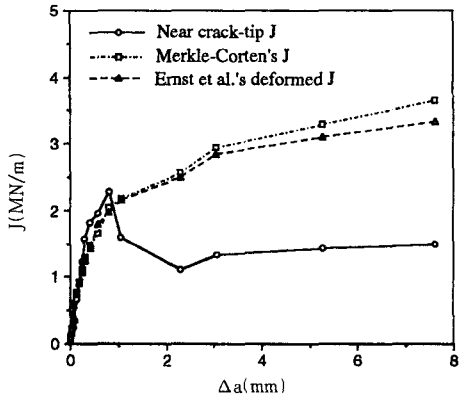

Fig. 13 Crack growth resistance curve for Type 304 stainless steel

5. 결 론

실험의 화상처리을 이용한 변위측정법과 유한요소법에 의한 계산역학적 방법을 연계하여 연성재료중의 진전균열 선단근방의 거동을 평가하는 손상해석시스템을 개발하였다. 이것을 304 스텐레스강의 CT시험편의 균열진전문제에 적용하여 균열진전에 따르는 제하영역의 거동과 비선형 파괴역학 파라메타에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 균열진전시에 제하영역의 거동은 이론의 결과와 잘 일치하였다.
2) 균열선단의 J-적분은 균열선단에 매우 근접한 경로를 제외하고 경로독립성을 갖는다.
3) 균열선단의 J-적분은 소규모 균열진전에는 종래의 실험에서 구한 J-적분과 잘 일치하였고, 대규모의 균열진전에는 T*-적분과 같이 일정한 값을 유지하였다.

본 연구는 인덕전문대학에서 연구비 일부를 지원받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1) J.R. Rice, A path-independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, pp. 376~386, 1968.
2) J.R. Rice, and G.F. Rosengren, 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, 1968.
3) J.W. Hutchinson, 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, 1968.
4) H. Okamura, G. Yagawa, T. Kawakami, Y. Urabe, M. Sato, and J. Sano, Ductile crack growth under a PTS event, Nuclear Engineering and Design, Vol. 137, pp. 457~465, 1992.
5) S. Yoshimura, G. Yagawa, C.R. Pyo, K. Kashima, T. Shimakawa, and S. Takamatsu, Simplified stable crack growth analyses of welded CT specimens-comparison study GE/EPRI, reference stress and R6 methods, International Journal of Pressure Vessel and Piping, Vol. 63, pp. 293~302, 1995.
6) S. Yoshimura, C.R. Pyo, G. Yagawa, and H. Kawai, Finite element analysis of three dimensional fully plastic solutions using quasi-nonsteady algorithm and tetrahedral elements, Computational Mechanics, Vol. 14, pp. 128~139, 1994.
7) J.G. Merkle, and H.T. Corten, 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, 1974.
8) H.A. Ernst, P.C. Paris, and J.D. Landes, Estimations on J-integral and tearing modulus from a single specimen test record, ASTM STP 743, pp. 476~502, 1981.

9) J. W. Hutchinson, and P. C. Paris, Stability analysis of J-controlled crack growth, ASTM STP 668, pp. 37~64, 1979.
10) S. N. Atluri, T. Nishioka, and M. Nakagaki, Incremental path-independent integrals in inelastic and dynamic fracture mechanics, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 20, pp. 209~244, 1984.
11) C. R. Pyo, H. Okada, and S. N. Atluri, An elastic-plastic finite element alternating method for analyzing wide-spread fatigue damage in aircraft structures, Computational Mechanics, Vol. 16, pp. 62~68, 1995.
12) C. R. Pyo, H. Okada, and S. N. Atluri, 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, 1995.
13) B. S. J. Kang, and A. S. Kobayashi, J-Estimation procedure based on moire interferometry data, Trans ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 110, pp. 291~300, 1988.
14) G. Yagawa, and S. Yoshimura, On the dynamic fracture toughness and crack tip strain behavior of nuclear pressure vessel steel : application of electromagnetic force, Nuclear Engineering and Design, Vol. 97, pp. 195~209, 1986.
15) A. Miyoshi, A. Yoshioka, and G. Yagawa, Strain measurement of structures with curved surface by means of personal computer based picture processing, Engineering with Computers, Vol. 3, pp. 149~156, 1988.
16) J. R. Rice, W. J. Drugan, and T. L. Sham, Elastic-plastic analysis of growing cracks, ASTM STP 700, pp. 189~221, 1980.