

탄소강의 피로균열에 대한 탄소성파괴 해석에 관한 연구 A Study on the Elastic Plastic Fracture Analysis for Carbon Steel with a Fatigue Crack

이종형*, 정형식**, 유덕상***, 김영문****
Jong-Hyung Lee*, Hyung-Sik Jeong**, Duck-Sang Yoo***, Young-Moon Kim****

<Abstract>

This paper is to provide some of the analysis procedures of the FAD(Failure Assessment Diagram), which is applied to the safety test of the atomic pressure vessels and other structures. Harrison proposed R-6 Diagram, and Bloom developed the method of DPFAD(Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram). Analysis of J-integration of the plastic materials give the failure test curve for the materials with serious work hardening effect. J value was obtained from both FEM(Finite Element Method) and the experiment using compact type specimen for J=JIC, and the results were compared. In this study, the results of analysis using DPFAD and the factors affecting DPFAD in Static fatigue and fracture were reviewed. It was shown that the concept of DPFAD can be applied to test the safety of the structures.

Key Words : Elastic plastic fracture, Fatigue crack, FAD, DPFAD

1. 서론

산업의 발달과 함께 각종장치산업 설비의 대형화 및 고성능화가 이루어짐에 따라 사용조건 또한 가혹화 되고 있다. 만일 주요 장치설비와 관련하여 안전사고가 발생할 경우에는 매우 큰 인적 물적 재산이 손실되며 사회적으로 큰 문제가 발생됨으로 구조물의 안전관리 문제가 더욱 중요시 되고 있다. 각종 기기 및 구조물 등은 여러 가지 가혹한 환경의 과정을 통하여 사용이 중지되거나 가동중에 파괴(fracture)가 발생된다.

재료의 파괴양식은 파괴가 발생하기 전에 발

생하는 소성변형상태에 따라 취성파괴(brittle fracture)와 연성파괴(ductile fracture)로 나눌 수 있다. 연성파괴 보다는 취성파괴가 더 위험하므로 이에 대한 연구가 먼저 시작되었으며, 이 분야를 선형탄성파괴역학 (LEFM: Linear Elastic Fracture Mechanics)이라 하고, 후자를 탄소성파괴역학(EPFM: Elastic Plastic Fracture Mechanics)이라 한다.

현재까지 EPFM의 발전에 의해 원자력산업계에 EPFM을 이용하여 저인성압력 용기의 수명 연장, 핵 증기 공급계통(NSSS: Nuclear Steam Supply System)내에서의 발견된 결함에 대한 건전성평가뿐만 아니라 배관계통의 설계에도

* 정회원, 금오공과대학교 기계공학부 교수
** 정회원, 현대아이앤아이스틸(주) 포항공장
*** 정회원, 거창기능대학 교수
**** 금오공과대학교 대학원

* Professor, School of Mechanical Engineering, K.I.T
** Manager, Hyundai INI STEEL Company, Pohang Plant
*** Professor, Geo Chang Polytechnic College
**** Student, School of Mechanical Engineering, K.I.T

적용하기에는 탄소성파괴의 Data의 축적이 적고, 파괴방법의 적용성 및 평가의 정량성에 관해서 충분한 검토가 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 구조물의 파괴조건을 간편하고 안전한 동시에 상당한 정도로써 평가할 수 있는 파손평가곡선에 대한 각각의 특성 및 개요에 대해 연구하고, 특히 재료의 비선형부분을 해석할 수 있는 전변형이론파손평가선도(DPFAD)의 구축 및 적용성에 대해서 검토를 하고, 해석 및 실험결과와의 비교에 의해서 파손평가선도(FAD)에 영향을 미치게 하는 인자에 대해서 검토를 한다.

2. 실험 방법

2.1 기계적 성질 시험

2.1.1 시편 및 기계적 성질

본 기계적성질 시험에 사용한 재료는 고인성 재질로 널리 사용되는 니켈-크롬-몰리브덴강(SNCM439 steel)이며 재료의 화학적 조성은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical Composition of SNCM439 Steel

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.36 ~0.43	0.15 ~0.35	0.60 ~0.90	≤0.03	≤0.03	1.60 ~2.00	0.60 ~1.00	0.15 ~0.30

Table 2 Mechanical Properties of specimens

Tensile strength σ_U (MPa)	Yield strength σ_Y (MPa)	Elongation δ (%)	Elastic modulus E (GPa)
480	170	35	219.00

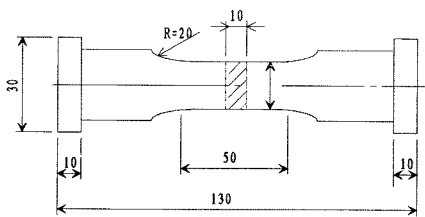


Fig.1 Geometry of tensile specimen

시편은 국내 K사에서 생산된 환봉재(D=160mm)를 C-R방향으로 절단 후 Fig.1과

같은 형상과 크기로 기계가공을 한 후 KS B 0801-2의 규정에 따라 시험 하였으며, 그 결과를 Table 2 에 나타내었다.

2.2 탄소성 파괴인성시험

EPFM을 적용하기 위해서는 재료물성치인 탄소성파괴인성값(J_{IC})을 측정하여야 한다. 탄소성파괴(Elastic-Plastic fracture)의 특징은 균열 선단에 큰 소성변형을 동반하면서 균열이 진전하기 시작하여, 비교적 낮은 속도로 균열이 진행해 가는 파괴양식을 말한다. 이러한 탄소성파괴의 균열진전을 기계공학적인 개념으로 기술하기 위하여 탄성파괴의 균열진전 시작을 기술하기 위하여 탄성파괴(elastic fracture)의 파괴인성치(fracture toughness) K_{IC} 를 사용할 경우, 균열선단의 큰 소성역 때문에 시험편의 크기가 매우 커지게 되어 실험상 여러 문제점이 발생하게 된다. 그래서 Begley와 Landes가 작은 크기의 시험편으로 탄소성파괴의 균열진전 시작을 기술하기 위해 Rice가 제안한 J-적분(J-Integral)을 사용하였다. 그들은 초기균열선단이 완전둔화(full blunting)된 후, 새로운 균열이 진전되기 시작할 때의 J값을 J_{IC} 라고 하고 이를 탄소성파괴의 파괴인성치로 제안하였다. 그 후에 많은 실험을 거쳐 J_{IC} 의 측정방법을 ASTM과 JSME에 의해서 각각 표준화 되었다. 파괴인성시험은 ASTM E399와 E813에 따라 수행하였으며 이는 취성파괴로부터의 안전성을 조사하는데 필요한 평면변형을 파괴인성(Plane strain fracture toughness)을 결정하기 위해서이다.

2.2.1 시편

파괴인성치 측정을 위한 시편은 Fig.2와 같이 ASTM E813에 의한 규정된 것과 유사한 1/2 CT(Compact Tension)시험편을 사용하였고, 시험편의 재질은 인장시험편과 같은 재질인 SNCM439 강을 사용했다.

시험편의 채취는 국내 K사에서 생산되는 SNCM439강인 환봉(D=160mm)을 C-R(R-C)방향으로 절단하여 가공하였다.

시험편의 열처리에는 약820℃에서 1시간 풀림(annealing)을 한 후 노냉하여 시험편을 1차 기계가공을 한 후, 시험편의 노치를 0.3mm 와이어컷팅머신으로 2차가공하였다.

완성된 시편의 잔류응력(residual stress)을 제거하기 위하여 약620℃에서 저온풀림을 하였다. 모든 시편에 ASTM E813의 규정에 따라 $P_{fmax}=1800kg$, $R=0.1$ 의 조건하에서 피로 예균열(pre-crack, $a_f=1.27mm$)을 내었다. 균열이 있는 시편의 초기균열길이(a_0)는 폭(W)의 약 0.525배가 되게 하였다.

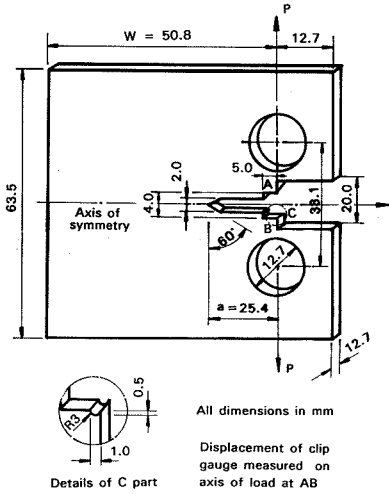


Fig.2 Geometry of Compact Type Specimen

2.2.2 시험조건과 장비

파괴인성시험에는 만능재료시험기(INSTRON Model 1350, 10tonf)가 사용되었다. 파괴인성시험은 상온에서 수행하였고, 시험장치의 개략도를 Fig.3에 나타내었다.

하중작용선변위(load line displacement)를 측정하기 위하여 균열개구변위게이지(COD Gage; crack opening displacement gage, 게이지길이:5mm)를 사용하였고, 하중-하중 작용선범위의 구배(하중에 대해서는 $\times 10$, 하중작용선변위에 대해서는 $\times 20$)를 확대하는데 영점조절회로(zero suppression circuit)를 사용하였다. 하중은 영(zero)에서부터 $0.4P_1$ 까지 3분간 가하여졌다.

균열진전의 측정은 다시편법을 사용하였으며, 시험중 하중-하중선(점) 변위곡선을 연속적으로 기록하며 하중을 제거한 후 약 300℃에서 10분간 가열착색법(heat tinting)으로 균열진전량을 표시한 후 시편을 절단하였다.

균열길이의 측정은 파단 된 시편을 노치를

포함한 균열길이 a_p 와 함께 균열진전량 Δa 를 0.025mm의 정밀도로 배율50배인 현미경으로 측정하였다.

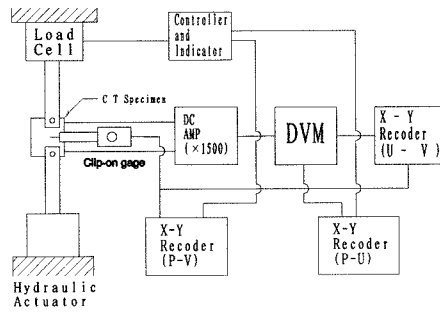


Fig.3 Schematic diagram of testing system

2.3 파손평가선도 구축

2.3.1 전변형이론파손평가선도(DPFAD)

파손평가선도(FAD)중에서 소성변형 및 재료의 탄소성분야까지 해석할 수 있는 전변형이론파손평가곡선(DPFAD)식을 유도하여 구축하였다. DPFAD의 X축 성분을 S_r , Y축의 성분을 K_r 이라할 때, X축 증가량에 대한 Y의 변형량을 수치해법을 이용하여 구하면 Fig.4와 같은 선도를 얻을 수 있다. 여기서 S_r 은 $S_r = \sigma_{fs} / \sigma$, $\sigma_{fs} = (\sigma + \sigma_0) / 2$ 이므로 축의 X증가하중은 제한을 받는다. 이것은 제한하중선(limit load)이라 하며 제한하중선을 넘으면 소성붕괴(Plastic collapse)가 발생하여 공학적으로 의미가 없다.

본 연구에서 DPFAD에 영향을 미치는 요인 즉, 가공경화지수(n), 형상계수(a/W)에 따른 FAD를 구하여 다른 파괴평가곡선과의 비교 및 적용성 등을 알아본다.

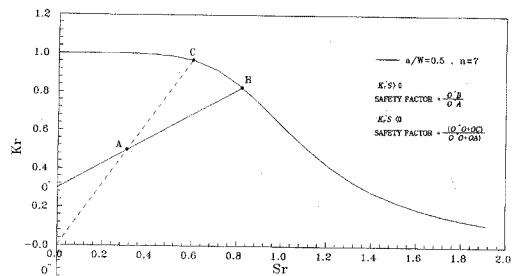


Fig.4 Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram

3. 실험 결과 및 고찰

3-1 탄소성파괴인성치

탄소성파괴해석(EPFM)에서 가장 중요한 인자인 J_{IC} 에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 수치해석을 위한 CT시편의 메시(mesh)를 Fig.5에 나타내었고, 수치해석의 가상균열진전법에 의한 결과와, J_{IC} 실험에 의한 결과값을 구하여 Table 3에 나타내었다. 탄소성파괴인성치(J_{IC})측정에서 CT시편의 파단된 모습을 Fig.6에 나타내었다.

Table 3 Result of numerical analysis and test for compact tension specimens(1/2 CT)

Specimen	균열길이 (mm)		$J_R(0)=J_{IC}$	J_0	$K_{Ic} = \sqrt{\frac{J_e}{JR}}$	$S_r = \frac{P}{P_0}$	
	a_0	Δa	KJ/m ²	KJ/m ²			
Test	No.1	26.67	0.498	103.02	67.59	0.81	0.80
	No.2	26.38	0.172	97.83	82.80	0.92	0.61
	No.3	26.65	0.985	114.76	101.40	0.94	0.48
	No.4	26.24	1.307	112.02	29.14	0.51	1.02
	No.5	26.58	0.730	107.15	75.61	0.84	0.69
Mean value	26.42	0.660	106.96	71.31	0.80	0.72	
Numerical Analysis	-	29.10	29.96	117.65	78.44	0.77	0.88

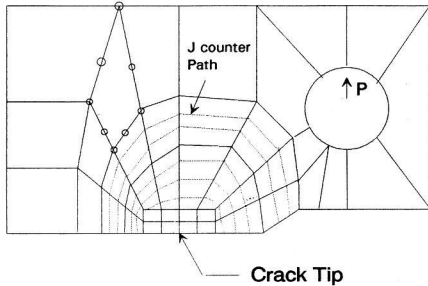


Fig.5 Finite element idealisation P in the compact tension specimen for various load factor values

하중점변위(load point displacement)에 대한 J-적분값(J-intergral)의 변화를 수치해석에 의한 해와 실험에 의한 해를 Fig.7에 나타난 것과 같이 하중변위에 대한 J값이 변위값이 증가할수록 약간의 차이를 발견할 수 있으나 거의 일치함을 알 수 있다.

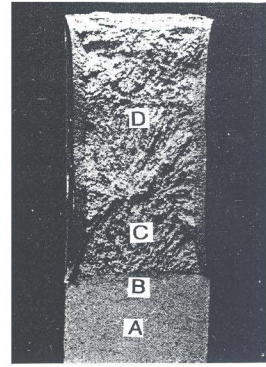


Fig.6 Macro-photograph of fracture surface CT specimen

A: Machine notch B: Fatigue fracture
C: Crack extension D:Fast fracture

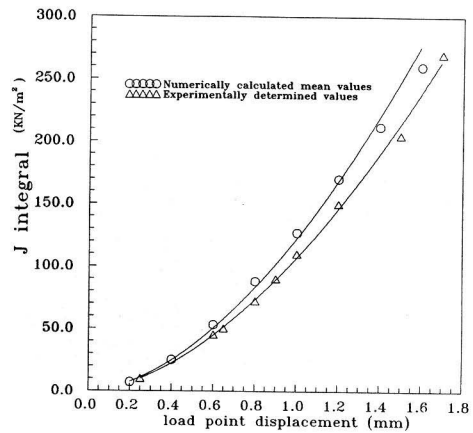


Fig.7 Experimentally and numerically determined values of J for CT specimen

3-2 전변형이론 파손평가선도(DPFAD)

FAD와 DPFAD를 구축해본 결과 FAC의 형태가 서로 크게 다르다는 것을 알 수 있다. 이것은 변형율경화의 유무와 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

그러므로 재료의 구조형상이 특이하고 높은 변형율을 수반하는 재질에 대해서는 DPFAD의 적용이 필요하다.

DPFAD에 영향을 미치는 인자에 대해서 검토한 결과 a/W 에 따른 FAD의 변화를 Strip Yield Model(R6)과 비교하여 Fig.8에 나타내었다. 여기서 n 값이 일정할 때 a/W 의 값이 작을수록 FAD는 더 안전측으로 위치하는 것을 알 수 있다.

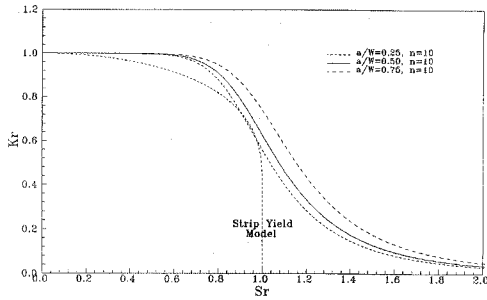


Fig.8 EPRI J-based failure assessment diagrams for a compact tension specimens with various a/W ratios.(n=10)

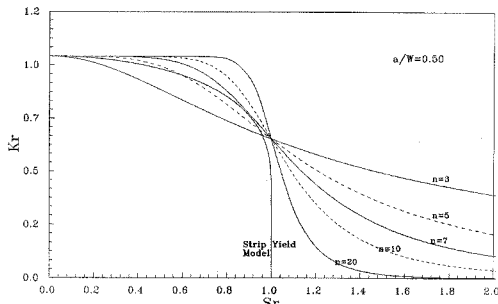


Fig.9 Comparison of Failure assessment diagrams for a compact tension specimen with n value computed.

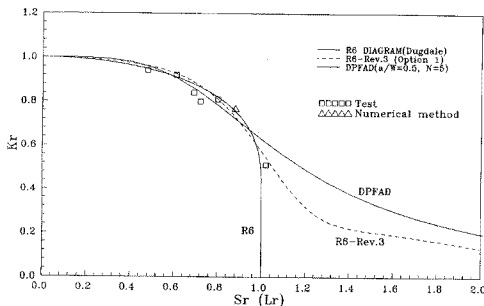


Fig.10 Failure assessment diagram of numerical method and test result

가공경화지수(Working hardening exponent)에 따른 DPFA의 변화를 Strip Yield Model(R6)과 비교하여 Fig.9에 나타내었다. 그림에서 a/W의 값이 일정 할 때 n값이 작을수록 FAC의 기울기가 완만한 것을 알 수 있다. 이것은 재료가 제한하중점(limit load)안에서는 가공경화지수가 클수록 안전성이 높다는 것을 알 수 있다.

끝으로 수치해석에 의한 해와 실험에 의한 결과를 Fig.10의 파괴평가선도에 도시하였다. 파괴평가곡선에 타점한 결과 대부분의 점들이 FAD내부에 위치하는 것으로 보아 SNCM439에 대해서는 비보수적인 결과를 보여주고 있다고 결론지어진다.

각각의 파괴평가선도에서 알 수 있듯이 같은 평가점이라도 FAD에 따라 각각 달리 안전-불안전을 평가할 수 있다.

그러므로 구조물설계나 기계의 가동 시 재질의 특성에 따라 높은 변형율시효를 하는 재질에 대해서는 DPFA를 사용해야 하고, 만약 다른 재료의 적용시에는 신중히 검토해야 할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 J적분을 이용하여 원자력발전소 압력용기 등의 결함을 내포하는 구조물에 대한 건진성평가(structure integrity assessment)법으로 파손평가도(failure assessment diagram)법을 이용하여 안전성을 검토하여 보았다. CT 시험편을 이용한 탄소성파괴인성치 실험과 수치해석에 의한 결과를 각각 구하여 파손평가곡선에 적용하여 보았고, 전변형이론파손평가곡선(DPFA)에 영향을 미치는 요인과 구조물에 대한 적용성 여부를 검토해 보았다.

이하의 연구범위에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 실험과 수치해석에 의한 결과를 파괴평가선도에 타점한 결과 대부분의 실험점이 파괴평가곡선의 내측에 위치하고 있다.
- (2) 탄소강의 파괴하중 추정에 DPFA법을 유효하게 적용할 수 있는 것을 확인했다. 특히 불안정이동점이 FAC의 불연속부의 영향을 받지 않는 경우, FAD를 사용해서 파괴하중을 안전측에 양호한 정도로 예측할 수 있다.
- (3) 본 연구에서 사용한 탄소강 정도의 연성균열전저항이 있는 재질의 파괴하중의 만족도는 J_{IC} 와 J-R곡선의 기울기의 변화에 반하여 상승하는 경향이 있지만 J-R곡선의 기울기의 변화에 민감하다.
- (4) 가공경화지수의 변화에 따라 FAD를 구축

한 결과 소성붕괴점내에서는 n 값이 클수록 FAD는 더 안전측에 있고, a/W 의 변화에 따라서는 a/W 값이 작을수록 FAD안에서는 더 안전측에 있다는 것을 알 수 있다.

(6) 이상에서 파괴평가곡선개념을 구조물의 건전성평가에 적용한다면 간편하게 그 안전성을 평가할 수 있는 장점이 있다.

참 고 문 헌

1) J.R. Rice, 1968, "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", Journal of Applied Mechanics, Vol.35, pp.379-386.
2) Carpinteri, A, Marege, C., and Savadori, A., 1985, "Ductile-Brittle Transition by Varying Structural Size", Engineering Fracture Mechanics, Vol.21, No.2, pp.263-271.

3) Begley, J.A. and Landes, J.D., 1972, "The J-Integral as a Fracture Criterion", ASTM STP 514, P. 1.
4) ASTM Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness, 1988, E813-87,ASTM, Vol.3.1, pp. 668-700.
5) 일본기계학회기준, 탄소성파괴인성 J 시험방법, 1981, JSME S001-1981, JSME, pp.1-142.
6) BLEACKLEY. M. H. "A numerical study of energy criteria in fracture mechanics," Ph. D., Thesis, University of Wales, 1981.

(2005년 8월 23일 접수, 2006년 3월 20일 채택)