韓國海洋工學會誌 第11卷 第3號, pp.29~38, 1997. 8

◉ 論 文

표면균열재의 피로균열 관통거동에 따른 어코스틱에미션

남기우* · 김선진** · 이건찬*** · 오정환**** · 오세규** · 이주석*****

(97년 6월 7일 접수)

Acoustic Emission during Fatigue Crack Penetration Behavior of Surface Cracked Plate

Ki-Woo Nam* · Seon-Jin Kim** · Kun-Chan Lee*** · Jung-Hwan Oh**** · Sae-Kyoo Oh** · Joo-Suk Lee*****

Key Words : Leak Before Break(파단전누설), Fatigue(피로), Crack Penetration Behavior(균열관통거동), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Acoustic Emission(음향방출)

Abstract

Crack penetration behavior by fatigue crack propagation and measurements of *AE* before-and-after crack penetration were examined using SS41 steel plate. Experimental crack shape of SU type was in good agreement with calculated shape rather than S type. Crack propagation behavior on the front surface appears not to change markedly after penetration. However, crack growth on the back surface appears to accelerate as reported by author. As a crack propagates, *AE* occurred heavily just before penetration. Then, it decreases and crack is penetrating. A transition from plane strain to plane stress was observed by fractographic study. At this time, separation of fracture surface was shown which affects *AE* occurrence.

1. 서 론

파단전누설 *(LBB)*설계법에 있어서는 표면에 발생한 미소 균열이 성장해서 판 두께를 관통하기까지의 수명과 관통 시의 균열 형상 또는 균열이 관통한 직후부터 앞면과 뒷면에서의 균열 길이가 같은 2차원 균열로 성장하기까지의 성장 특성을 평가할 필요가 있다. 이와 같은 관점에서, 판 두께를 관통하기까지의 균열 성장 거동에 관해서는 많은 연구자들에 의해 연구가 실시되었다[1)~3)]. 그리고, 3차원 표면 균열이 관통해서 완전한 2차원 균열로 성장하기까지의 거동에 관해서는 저자들에

* 부경대학교 재료공학과
** 부경대학교 기계공학과,
*** 부경대학교 학연기계공학과 대학원
**** 부경대학교 해양산업개발연구소
***** 한국기계연구원

의하여 많은 연구가 실시되어 왔다[4)-9)].

피로 하중을 받는 구조물에는 X선탐상법, 초음파탐상법 등을 통하여 검출된 결함에서 파괴역학적으로 안전성을 평가하여 왔다. 최근에는 재료 내부의 소성변형, 균열 진전에 따르는 탄성에너지의 해방인 *AE*(*acoustic emission*)는 변형에 민감하고, 동적으로 검출할 수 있다는 장점을 가지고 있어, 재료 강도의 연구 수단 뿐만 아니라 비파괴검사의 측면에서도 새롭고 유력한 수법이 되고 있다. *AE*는 다른 비파괴검사방법에 비교하여, 구조물중의 결함이 가동 상태에서 성장할 가능성이 있는 것을 검출 할 수 있고, 연속 감시가 가능하다는 장점으로 인하여 대형 구조물의 안전성 평가에 널리 응용되고 있다. 이러한 장점 때문에 *AE*를 사용한 피로 균열 진전에 대한 평가가 많이 실시되어져 왔지만, 대부분의 연구는 2차원 균열의 피로 균열 진전에 대한 것이고[10), 11)], 파단전누설 설계법의 기초적인 연구로서 3차원 균열의 균열 진전과 관통거동에 관한 것은 전무한 실정이다. 따라서 대형 플랜에 있어서 표면 균열이 피로 하중에 의하여 성장하여 판 두께를 관통하는 경우에 있어서, 파단전누설 거동의 관점에서 *AE*를 사용한 연속 감시가 가능하다면 균열이 발생하여 기기의 점검시 발견하지 못하는 치명적인 경우는 없을 것이므로, 안전성 및 경제성 확보를 위하여 매우 중요한 것이다.

이와 같은 관점에서, 본 연구에서는 피로 균열 진전에 따르는 균열 관통 거동을 평가하고, 균열 관통 전후를 *AE*로 계측한 결과를 비교 검토하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

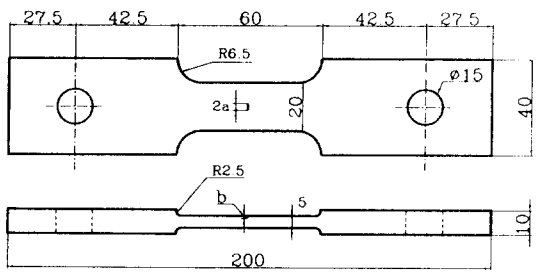
본 실험에 사용한 재료는 일반 구조용 압연강판(*SS*41)이며, 화학성분과 기계적 성질을 *Table* 1에 나타낸다. 시험편은 *Fig.*1에 나타내듯이 (*A*) *S*형 시험편과 균열진전 형상을 비교하기 위한 (*B*) *SU*형 시험편의 두 종류를 사용하였다. *SU*형은 *Fig.*2에 나타내듯이 면외변형을 자유롭게 받도록 상하단에 핀으로 지지하여 시험기의 치구에 고정하였다. 시험편은 밀링머신을 사용하여 평면 가공하고, 노치는 방전 가공에 의하여 가공하였다. 시험편의 칫수 및 시험조건을 *Table* 2에 나타낸다.

Table 1 Chemical composition (%) and mechanical properties of test material

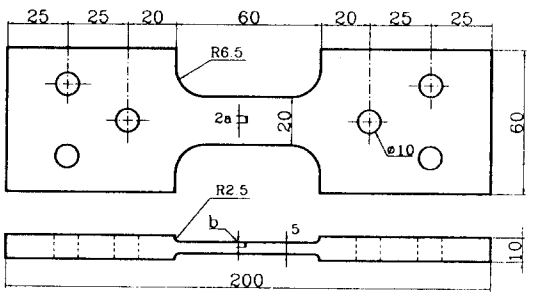
Material	C	Si	Mn	P	S
SS41	x100			x1000	
	14	23	59	16	16
	Yield stress (MPa)		Tensile strength (MPa)		Elongation (%)
	309		442		33

Table 2 Specimen dimensions and test conditions

Specimen No.	Specimen geometry				Sterss	R
	t (mm)	2W (mm)	$2a_o$ (mm)	b_o (mm)	$\Delta\sigma$ (MPa)	
S-1	5	20	5.0	2.2	230	0.1
S-2	5	20	6.0	2.3	203	
S-3	5	20	6.0	2.5	184	
SU-1	5	20	6.0	2.3	184	
SU-2	5	20	6.0	2.3	159	



(A) S type specimen



(B) SU type specimen

Fig.1 Dimensions of specimens ; all dimensions in mm

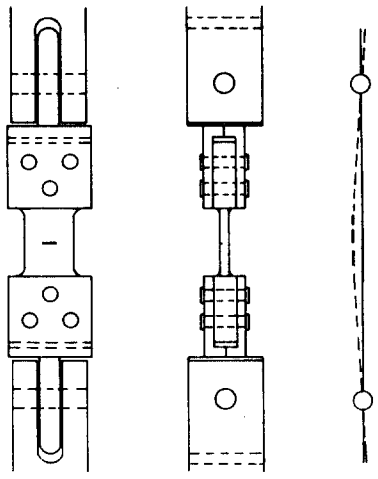


Fig.2 Jig to provide freedom for out-of-plane displacement

피로 시험은 만능피로시험기를 사용하여 실온 대기중에서 실시하였다. 또, 시험시의 제어는 정현파를 사용하고, 주파수는 1~10 *Hz*, 응력비는 $R=0.1$의 하중 제어로 하였다. 시험편의 균열 진전은 관통 전후를 관찰하고, 표면 균열의 측정은 쌍안 실체현미경을 사용하여 노치가공면(앞면) a_s와 균열이 관통한 면(뒷면) a_b를 측정하였다. 균열깊이 b는 비치마크법에 의하여 파단후에 측정하였다. 또, 파단후 주사형 전자현미경을 사용하여 파면 관찰을 실시하고, 관통 전후의 파면과 AE의 미시적 발생기구에 대하여 검토하였다.

표면 균열의 진전 및 관통에 따르는 파괴거동을 해석하기 위하여 균열진전과정에서 발생되는 *AE*를 측정하였다. 방출되는 *AE*의 측정은 *Fig.*3에 나타낸 것과 같이 *PAC*사의 $R-30$센서(공진 주파수 150*kHz*)를 사용하였고, 잡음제거를 위하여 시험편의 균열을 중심으로 상하에 센서2개 ($R-15$)를 부착하였다. 그리고 시험편에서 발생하는 *AE*신호를 민감하게 측정하기 위하여 시험편에 접촉매질인 그리스를 바른 후 센서를 부착하였다. 또한 피로실험시 시험편의 핀구멍등에서 발생하는 외부잡음을 제거하기 위하여, 지그 부분과 시험편 사이에 두꺼운 고무를 사용하여 압착하였다. 시험편의 마찰에 의한 잡음을 조사하기 위하여 균열이 없는 시험편을 사용하여 예비 실험을 실시하였고, 상하부 치구 주위에는 진흙을 사용하여 actuator에서 발생하는 잡음을 흡수하도록 하였다. 피로시험기에서 발생하는 백색잡음은 300mV정도였으며, 잡음제거를 위하여 임계전압을 316mV로 설정하였다.

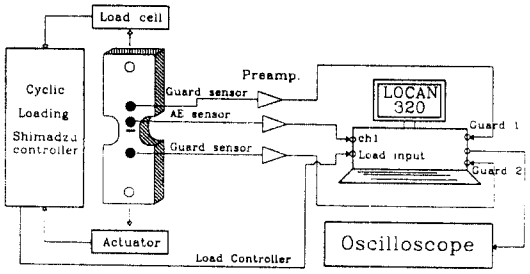


Fig.3 Block diagram of experimental setup for acoustic emission measurements

3. 응력확대계수의 평가

응력확대계수 평가는 균열이 관통하기 전에는 식 (1)에 나타내는 Newman-Raju의 식을 사용하여 평가하였다[12].

$$K=(\sigma_m+H\sigma_b)\sqrt{\pi b}/Q\cdot F \tag{1}$$

또한, 피로 균열이 판 두께를 관통한 후의 앞면과 뒷면에서의 응력확대계수 K_{a_s}, K_{a_b}는 식(2)와 식(3)으로 평가하였다[4].

$$K_{a_s}=\delta(a_e)/\delta(a_s)\cdot\sigma\sqrt{\pi a_s}\cdot F(\eta_s) \tag{2}$$

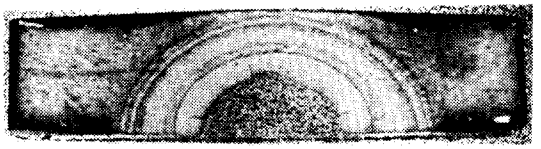
$$K_{a_b}=\delta(a_e)/\delta(a_b)\cdot\sigma\sqrt{\pi a_b}\cdot F(\eta_b) \tag{3}$$

4. 실험결과 및 고찰

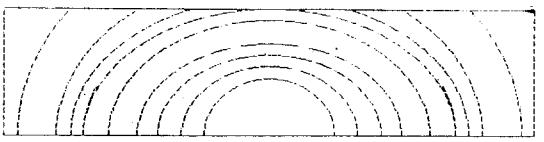
4.1 피로균열의 성장거동

본 실험에서 얻어진 거시적인 피로파면의 양상을 *Fig.*4에 나타낸다. *Fig.*4의 (A)는 초기 노치길이 a_o가 2.5*mm*인 $S-1$시험편의 결과이고, (C)는 초기 노치 길이 a_o가 3.0*mm*인 $SU-1$시험편의

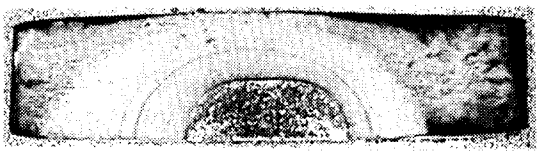
결과이다. 이 그림에서 (*A*)는 거의 반원형의 형상을 유지하고 있고, (*C*)는 약간 타원형의 형상의 띄고 있다. *Fig.*4의 (*B*), (*D*)는 계산에서 얻어진 균열 형상이다.



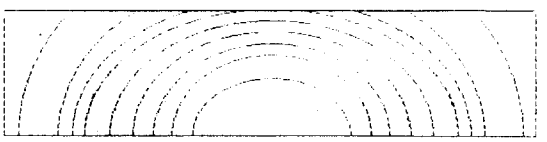
(A) Specimen S-1 (experiment)



(B) Specimen S-1 (calculated)



(C) Specimen SU 1 (experiment)



(D) Specimen SU-1 (calculated)

Fig.4 Fatigue fracture surfaces

*Fig.*4와 같은 비치마크에서 얻어진 균열의 종횡비 (b/a)와 계산에서 얻어진 균열의 종횡비 (b/a)를 비교하여 *Fig.*5에 나타낸다. 실험에서 얻어진 *S*−1시험편의 피로균열은 초기 균열형상과 비슷하게 진전하여 반원에 가깝고, 균열 관통 시에 실측된 종횡비는 약 0.82이다. 한편, 계산에서 얻어진 종횡비는 균열이 성장함에 따라서 저하하고, 균열 관통시의 종횡비는 약 0.71이다. 이것에 대하여, 면외 변형을 자유롭게 받도록 양단을 핀으로 고정한 *SU*−1시험편의 경우는 실험과 계산이 매우 좋은 일치를 보여 주고 있다. 이와 같이 두 종류의 시험편에서 종횡비가 다르게 나타나는 이유는 다음과 같다. 즉, 계산에 사용한 Newman-Raju의 응력확대계수 평가식은 무한원방에서 인장력이 작용하는 것으로 가정하고 있다. 그 때문에 시험편의 면외 변형은 자유롭다. 그러나 *S*−1시험편의 경우는 핀 구멍에 핀으로 고정하여 하중을 부하 하였기 때문에, 시험편의 면외 변형이 구속되어, 종횡비가 크게 나타난 것이라고 생각된다. 그러나 *SU*−1시험편의 경우는 위에서도 설명하였듯이 면외변형이 구속되지 않도록 양단을 핀으로 지지하였기 때문에 무한 원방에서 하중이 작용하는 것과 같은 효과를 가져 왔기 때문에 실험과 계산의 종횡비가 매우 잘 일치한다[7].

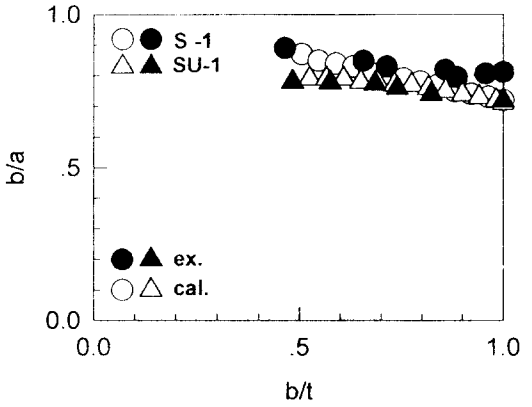
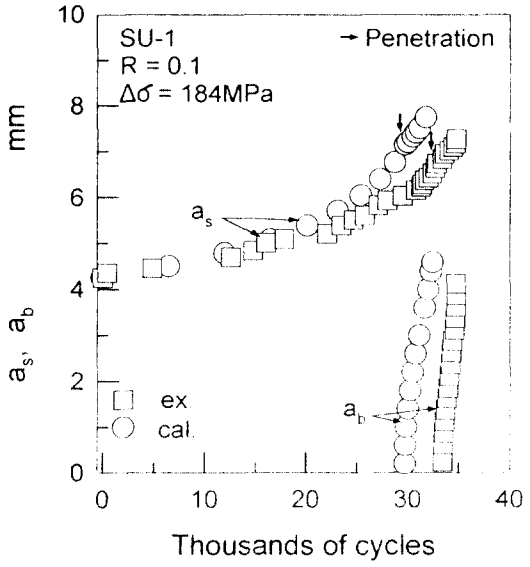
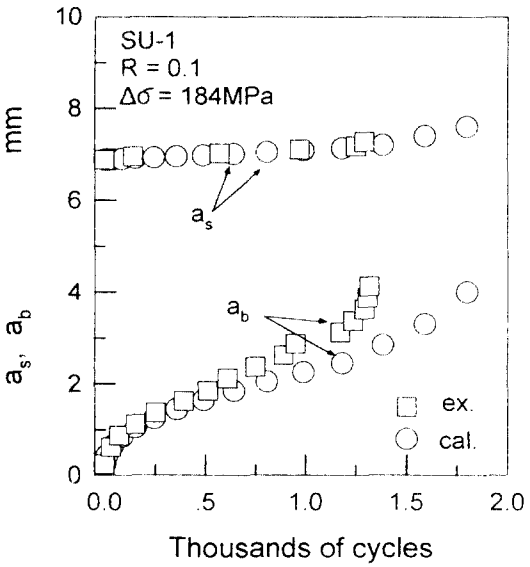


Fig.5 Comparison of the experimental aspect ratios and the calculated aspect ratios

양단을 핀으로 지지한 표면 노치 시험편에서 얻어진 $a-N$곡선의 일례를 *Fig.*6에 나타낸다. (*A*)는 표면 노치에서 발생한 균열이 두께를 관통하기 전후에 있어서 앞면과 뒷면에서 성장한 전체의 균열길이를 나타낸 것이다. (*B*)는 관통후 앞면과 뒷면에서 성장한 균열길이를 나타낸 것이다. 여기서 a_s는 초기 노치를 가공한 앞면의 균열성장량을 나타낸 것이며, a_b는 균열 관통 후 뒷면의 균열 성장량을 나타낸 것이다. (*A*)에서는 균열 발생 등의 영향을 제거하기 위해서 앞면에서의 균열 길이가



(A) crack growth before and after penetration



(B) crack growth after penetration

Fig.6 Comparison of experimental values and calculated values of crack growth in SU-1 specimen

1.3*mm*진전하였을 때의 하중 반복수를 0으로 하였다. 앞면에서의 균열전파 거동 ($a-N$ 곡선)은 균열이 뒷면에 관통한 후에도 큰 변화는 없고, 연속적인 거동을 나타내고 있다. 이것에 대하여 뒷면에서는 매우 빠른 균열 성장 거동을 나타내고 있다. (*B*)에서 뒷면의 균열성장특성은 저자가 보고한 다른 문헌에서와 같은 거동을 보이고 있다[4) 9)].

시험편의 앞면에서 피로균열이 1.3*mm*성장하여 뒷면에 관통하기까지의 하중반복수 (N_p)와 균열이 관통하여 뒷면의 균열 길이가 2*mm*에 도달하는 하중반복수 (N_{a_b})의 실험과 계산을 *Fig.7*에 나타낸다. 실험과 계산에서 얻어진 피로균열 관통수명 (N_p)과 균열길이가 2*mm*에 도달하는 하중반복수 (N_{a_b})는 매우 좋은 일치를 보이고 있다. 그러나 (N_{a_b})의 경우는 계산쪽이 약간 크게 나타나고 있다. 이것은 실험에 사용한 시험편의 판폭이 적어서 관통후 균열 선단에 소성변형이 크게 형성 되므로서, 균열진전이 빠르게 진행되었기 때문이라고 생각한다.

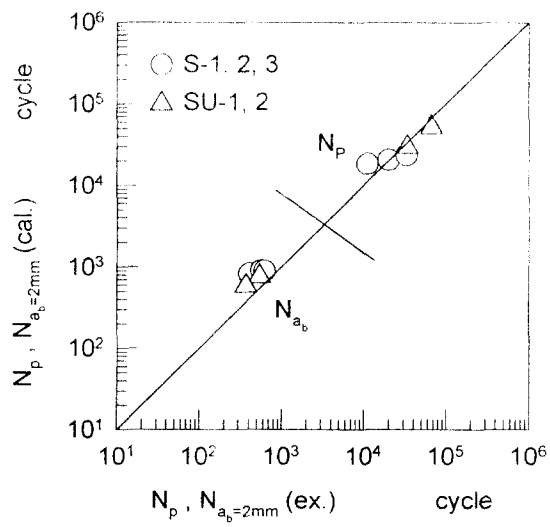


Fig.7 Comparison of experimental values and calculated values of N_p and N_{a_b}

또 (*A*)와 (*B*)에서 계산은 피로균열전파 식 (4)와 Newman-Raju 식 (1)과 식 (2), (3)에 의한 응

력확대계수의 변동폭 ΔK를 사용하여, *Fig.*4의 (*B*), (*D*)와 같은 균열형상과 $a-N$곡선을 계산한 것이다. 실험결과와 계산결과는 비교적 좋은 일치를 보이고 있음을 알 수 있다.

실험에서 얻어진 종횡비, $a-N$곡선 및 식 (1), (2), (3)등을 사용하여 얻어진 da/dN과 ΔK와의 관계를 *Fig.*8에 나타낸다. 이 그림은 하중작용 방식이 다른 두 종류의 시험편, 즉, *S*형과 *SU*형에서 얻어진 결과이다. 균열이 판두께를 관통하기 이전과 이후의 결과를 함께 나타낸 것으로, da/dN과 ΔK와의 관계는 하중작용 방식에 관계없이 다음 식으로 정리 될 수 있음을 알 수 있다.

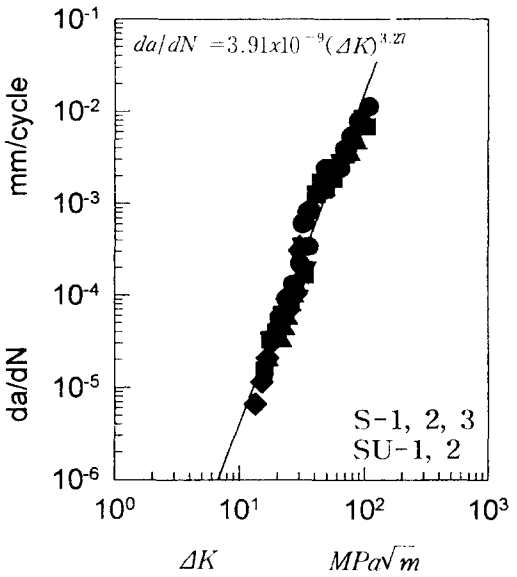


Fig.8 Crack growth rate versus stress intensity factor range at the front and back side of plates

$$da/dN = 3.91 * 10^{-9} (\Delta K)^{3.27} \quad (4)$$

여기서 da/dN는 균열진전속도(*mm/cycle*)이고, ΔK는 응력확대계수($MPa\sqrt{m}$)이다.

4.2 균열관통과 *AE*와의 관계

표면균열이 두께방향으로 진전하여 관통함에 있어서, 관통전후의 *AE*발생량을 조사하기 위하여 균열이 판 두께를 관통하기 훨씬 이전부터 *AE*발생량을 계측하였다.

SU-1시험편에서 얻어진 하중반복수, 균열 길이 및 *AE*사상수와의 관계를 *Fig.*9에 나타낸다. 여기서 하중반복수 (*N*)는 초기 노치에서 성장한 전체 균열성장량 동안의 반복수이다. *AE*의 계측은, 주파수는 1*Hz*에서 $N=112,750$사이클 근처부터 실시하였으며, 두께의 관통은 115,000사이클 근처에서 발생하고 있다. *AE*의 발생은 균열이 관통하기 이전에 급격한 증가를 보이다가 관통직전에 감소한 후, 균열의 성장과 함께 약간 증가하는 양상을 보이고 있다. 이러한 경향은 *S*-3시험편에서도 유사한 결과가 얻어졌다.

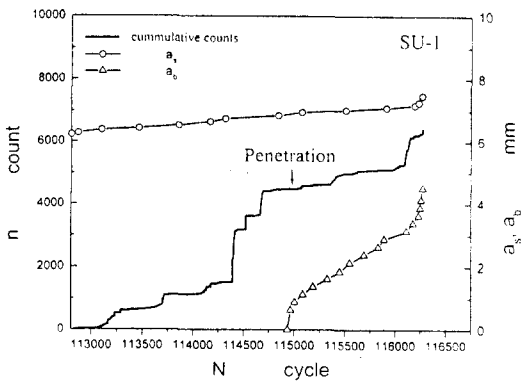


Fig.9 Relationship of load cycle, crack length and cummulative counts

*Fig.*9의 $n-N$곡선에서 관통 직전 *AE*량이 감소하는 부분을 경계로 양 곡선을 회귀하여 1사이클마다의 *AE*계수율 dn/dN를 구하여, 앞면과 뒷면에서의 균열 길이 a_s, a_b와의 관계를 *Fig.*10에 나타낸다. 이 그림에서도 알 수 있듯이 균열 관통 직전에 *AE*계수율이 급격하게 증가하고 관통 후 감소하고 있다. 균열의 관통은 앞면의 균열길이 $a_s=6.73mm$ 일 때, 발생하였다. 이때의 뒷면에서 계측된 균열 길이는 $a_b=0.5mm$이었다.

*Fig.*11에는 *Fig.*9의 그림과 같이 *AE*계측을 실시한 때 부터의 *AE*에너지값을 하중변동폭과의 관계를 나타낸 것이다. 균열이 진전함에 따라서 균열

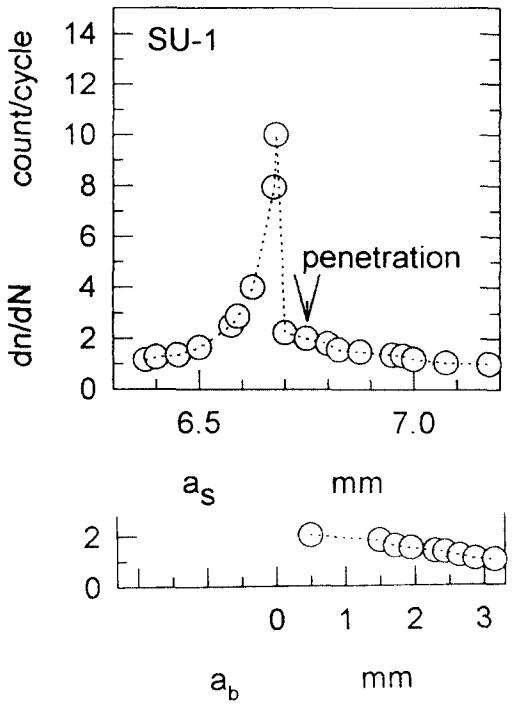


Fig.10 Relationship of front and back surface crack length a_s, a_b and AE count rate per cycle

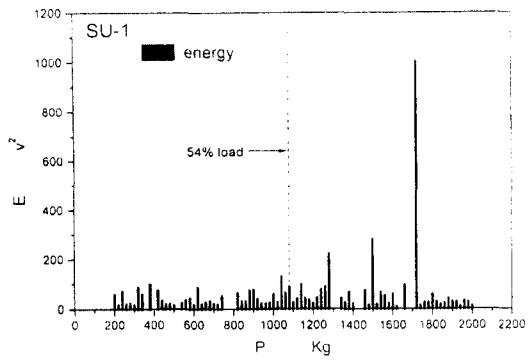
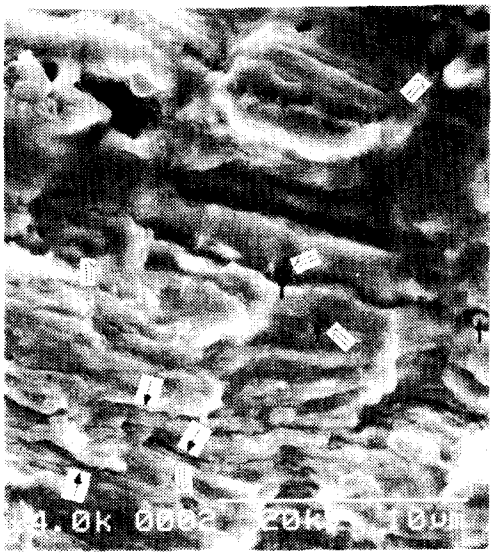


Fig.11 Relationship of load range and AE energy

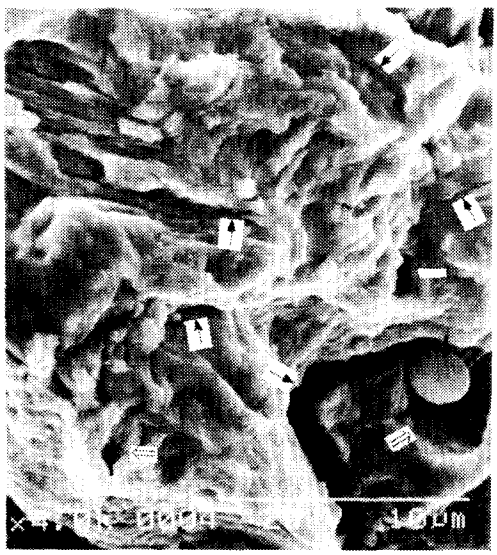
선단의 개폐가 나타나고, *AE*는 균열이 열리게 되는 상태에서 많이 발생하리라고 생각한다. 또한 균열이 닫히게 되는 상태에서도 파면의 접촉에 의해서 *AE*가 발생하리라 생각한다. 여기서 균열이 열리게 되는 상태에서 발생하는 *AE*를 균열 열림 *AE*라 하고, 닫히면서 발생하는 *AE*를 균열 닫힘 *AE*라 하자. 이 그림에서 54% 하중은 *Elber*[13]가 균열 닫힘을 실측하여 제안한 균열열림비 $U=0.5+0.4R$ $(-0.1<R<0.7)$에서 계산한 하중값이다. 이 그림에서 균열 열림 *AE*는 균열이 열리게 되는 54%하중 근처에서부터 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 균열 열림 *AE*에서 높게 나타나고 있는 것은 *Fig.*9에서 균열 관통 이전에 급격한 증가를 보이고 있는 부분의 *AE*와 일치하고 있다. 한편 균열 닫힘 *AE*는 균열이 닫힘으로서 파면이 부딪쳐서 나타나는 *AE*라 생각된다. 따라서 균열 열림 *AE*는 균열이 진전함에 따라서 균열선단의 변형 및 파괴에 관여하는 것으로, 피로에 있어서 균열선단의 파괴를 의미한다고 생각한다. 균열 닫힘 *AE*는 주로 균열의 개폐에 따르는 것이라고 알려져 있으며, 일반적으로 활동도가 높고, 응용면에서 구조물중의 균열검출에 유효한 신호이지만, 피로 과정중에 변화가 적고, 균열선단의 파괴와 일치하지 않는다고 한다[10].

상기와 같이 균열이 진전함에 따라서 발생하는 *AE*와 관통 전후의 파면관찰에서 *AE*의 미시적발생기구에 대하여 검토하고자, *SU*−1시험편에서 얻어진 파면관찰 결과를 *Fig.*12에 나타낸다. *A*는 파면의 거의 전 부분이 피로 파면특유의 스트라이에이션을 나타내고 있으며, 파면은 평탄한 형상으로 평면변형을 파괴를 나타내고 있다. 이것에 대하여 *B*는 관통 직전의 부분을 나타낸다. 파면의 조직은 스트라이에이션을 나타내고 있으나, *A*보다 큰 스트라이에이션을 나타내고 있다. 이곳에서는 연성파괴의 대표적이 특징인 딤플이 나타나고 있으며, 딤플의 저면에 게재물이 관찰되고 있다. 또한 파면의 분리 (*separation*)양상이 나타나고 있으며, 이러한 분리양상은 균열선단부가 평면변형율 상태에서 평면응력상태로 바뀌면서 나타나는 현상이다[14]. *C* 및 *D*는 관통 후 앞면과 뒷면에 가까운 부분의 파면을 나타낸다. 이 곳에서도 스트라이에이션을 나타내고 있으며, 연성파면을 나타내는 딤플의 수 및 크기가 증가하고 있다. 또한 큰 게재물이 관찰되고, 분리현상도 많이 관찰되고 있다. 이

(A) $K_{a_c}=28MPa\sqrt{m}$ $K_b=24MPa\sqrt{m}$



(B) $K_{a_c}=39MPa\sqrt{m}$ $K_b=32MPa\sqrt{m}$



(C) $K_{a_c}=37MPa\sqrt{m}$ $K_{a_b}=55MPa\sqrt{m}$

(D) $K_{a_c}=38MPa\sqrt{m}$ $K_{a_b}=53MPa\sqrt{m}$

Fig.12 SEM photograph of fatigue fracture surface (SU-1 specimen)
⬆ : Inclusion, ↑ : Separation, ⇑ : Dimple

러한 파면과 *AE*발생량과의 관계를 살펴보면, 피로균열 진전에 있어서 *AE*의 주요한 발생원으로서 평면변형영역이 높은 3축응력하에서 현저하게 발생하는 취약한 제2상 게재물의 박리 또는 파괴, 혹은 입계 또는 벽개파괴라고 한다[10]. 실제로 *AE*의 발생에 기여하고 있는 것은 평면변형 소성역 중에서도 보다 구속이 높은 영역에 한정된다고 생각된다. 따라서 *AE*의 발생은 소성 구속이 강한 평면변형 상태에서 많이 발생하고, 평면응력상태로 천이함에 따라서 급격하게 감소한다.

5. 결 론

일반구조용압연강판 (*SS*41)을 사용하여 피로균열진전에 따르는 균열 관통거동과 균열관통 전후의 AE를 계측한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 균열진전형상은 면외 변형을 자유롭게 받는 *SU*형의 경우가 *S*형보다 실험과 계산이 매우 좋은 일치를 보여 주었다.
2. 앞면에서의 균열전파 거동은 균열이 뒷면에 관통한 후에도 큰 변화는 없고, 연속적인 거동을 나타내고 있는데, 뒷면에서는 매우 빠른 균열 성장 거동을 나타내었다.
3. *AE*의 발생은 피로균열이 진전함에 따라서 균열 관통 직전에 급격한 발생을 보인 후, 감소하며 균열이 관통하였다. 파면의 관찰에서 *AE*가 많이 발생하는 부분은 소성구속이 강한 평면변형상태로서 피로파괴 특유의 스트라이에이션이 많고, *AE*가 감소하는 부분은 평면응력상태로 천이함을 알 수 있었다.
4. 이와 같이 평면변형율 상태에서 평면응력상태로 바뀌면서 파면에는 분리 (*separation*)양상이 나타나고 있었다.
5. 따라서 구조물의 안전성 및 경제성 확보를 위하여, 3차원 균열의 관통 거동에 대한 *AE*의 주요한 발생원 및 경향을 파악하기 위하여 다양한 재료를 사용하여 검토할 필요가 있다고 생각한다.

"이 논문은 1996년도 기계공학분야 학술연구비에 의하여 연구되었음"

참고문헌

1) Kawahara, M. and Kurihara, M., "A Preliminary Study on Surface Crack Growth in a Combined Tensile and Bending Fatigue Process", Japan Soc. Naval Archit., Vol.137, pp.297-306, 1975 (in Japanese)
2) Gilchrist, M.D., Chipalo, M.I. and Smith, R.A., "Shape Development of Surface Defects in Tension Fatigued Finite Thickness Plates", Int. J. Press. Piping, Vol.49, pp.121-137, 1992
3) Kaufman, J.G., Bucci, R.J. and Kelsey, R.A., "Fracture Mechanics Aspects of the Structural Integrity Technology of Spherical Aluminum Containment Vessels for LNG Tankers", ASME J. Eng. Mater. & Technology, Vol.102, p.303, 1980
4) Ando, A., Fujibayashi, S., Nam, K.W., Takahashi, M. and Ogura, N., "The Fatigue Life and Crack Through Thickness Behavior of a Surface Cracked Plate (for the Case of Tensile Load)", JSME Int. J., Vol.30, pp.1898-1905, 1987
5) Nam, K.W., Fujibayashi, S., Ando, K. and Ogura, N., "The Fatigue Life and Crack Through Thickness Behavior of a Surface Cracked Plate (Effect of Stress Concentration)", JSME Int. J., Vol.31, pp.272-279, 1988
6) Nam, K.W., "The Fatigue Life and Crack Penetration Behavior of High Strength Steel", KSME, Vol.15, pp.1990-2001, 1991
7) Nam, K.W., Ando, K., Ogura, N. and Matui, K., "Fatigue Life and Penetration Behaviour of a Surface Cracked Plate under Combined Tension and Bending", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol.17, pp.873-882, 1994
8) Nam, K.W., Ando, K. and Ogura, N., "The

Effect of Specimen Size on the Behaviour of Penetrating Fatigue Cracks", Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., Vol.16, pp.767-779, 1993

9) Nam, K.W., Ando, K. and Ogura, N., "Surface Fatigue Crack Life and Penetration Behavior of Stress Concentration Specimen", Engng. Fract. Mech., Vol.51, pp.161-166, 1995

10) Ohira, T., Kishi, T. and Horiuchi, R., "Acoustic Emission during Fatigue Crack Propagation in 7049 Ai-Zn-Mg Alloy", JNDI, Vol.29, pp.189-197, 1988 (in Japanese)

11) Ohira, T. and Kishi, T., "Effects of Mechanical Condition and Materials Characteristics on Acoustic Emission during Fatigue Crack propagation", JNDI, Vol. 30, pp.922-928, 1989 (in Japanese)

12) Newman, J.C. Jr. and Raju, I.S., "An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack", Engng. Fract. Mech., Vol.15, pp.185-192, 1981

13) Elber, "Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension", Engng. Fract. Mech., Vol.2, pp.37-45, 1970

14) Ando, K., Matsushita, H., Fujibayashi, S. and Ogura, N., "Separation anf Fracture Toughness of Controlled Rolled Steel", J. Society of Materials Science, Vol.34, pp.388-393, 1985 (in Japanese)