論文 6－3－3

피로성장거동의 응력비 영향에 관한 연구
A Study on tho Effcct of Strcss Ratio on Fatigue Crack Growth Bchavior

최 용 식* 한 지 원** 김 규 성***
Y.S.Choy J.W.Han K.S.Kim

ABSTRACT

In this study, a crack closurc behavior of Al-alloy 5052-H38 was invcsti-gated. The fatigue test was performed by the four-point bending test under the contast amplitude load. Stress ratio R was changed from-1.0 to 0.5.

To mcasure the fatigue crack opening point, the graph of load vs. subtracted displacemcnt by computer program was obtained from the X-Y plotter. In order to gain the displaccmcnt data, a strain gage was attached at the back surface against the notched side.

Using the conception of crack closure and influence of on crack growth rate a model for crack growth rate is developed for Al-alloy 5052-H38.

1. 서론

Irwin에 의한 균열선단의 응력확대계수(S.I.F.;Stress Intensity Factor) 개념의 발표이후 급속도로 선형탄성파괴역학(L.E.F.M.:Linear Elastic Fracture Mechanics)이 체계화 되었고, 재료 강도 평가에 광범위하게 사용되고 있다.

1963년 Paria[1]는 균열성장속도 da/dN을 다음과 같은 균열성장법칙으로 정리하였다.

$$\frac{da}{dN}=C\,(\triangle K)^m \qquad (1.1)$$

여기에서, C, m은 재료상수이며 △K는 응력확대계수 변동폭(Stress Intensity Factor Range)이다.

이 법칙들은 여러재료들에 광범위하게 적용되고 있으며, 균열은 하중이 작용하자마자 열리기 시작하여 하중이 완전히 제거되었을 때 닫힌다는 가정에 기초를 두고 있다.

*正會員 : 성균관대학교 기계공학과
**正會員 : 호서대학교 산업안전공학과
***正會員 : 성균관대학교 대학원 기계공학과

피로균열성장에 영향을 주는 균열닫힘 〈Crack Closure〉현상은 1970년 대초 Elber[3]에 의해 처음 제안되었다. 그는 균열장주위에는 압축잔류응력〈Compressive Residual Stress〉이 작용하게되어 하중이 최소응력레밸에 이르기전에 균열표면은 접촉하게 되므로, 균열닫힘현상이 발생한다고 보고하였다.

이러한 원리에 기초를 두고 Elber는, 피로균열성장속도는 위의 (1.1)식 보다 균열닫힘현상을 고려한 유효응력확대계수 변동폭 $\triangle K_{eff}$를 사용하여 (1.2)식과 같이 표현하는 것이 보다 잘 해석된다고 하였다.

$$\frac{da}{dN}=C(\triangle K_{eff})^m=C(U\triangle K)^m \quad \text{(1.2)}$$

이러한 Elber의 재안 이후 균열닫힘현상은 많은 연구자들에 의하여 활발한 연구가 진행되었다[3~10]. 현재까지 보고된 결과들은 다음과 같이 여러경향으로 나타났다. 몇몇 연구자들에 다르면 U값은 오직 R만의 암수이며 다른변수들에 대해 독립적이다[3~6]라고 하였고, 다른 연구자들은 U값이 Kmax과 R의 함수라 하였다. 모든 경우에 대하여, U값은 R값이 증가함에 따라 증가한다. 그러나, U에 대한 Kmax의 효과는 논쟁의 대상이 되고 있다.

즉, Kmax이 증가함에 따라, U가 증가한다[8~10]는 보고와, U가 감소한다[7]는 보고가 있다.

현재까기 진행되된, Al합금재의 균열닫힘 현사에 관한 연구들은 아직 초기단계라 할 수 있으며, 여러 Al-Alloy에 대한 실험결과들이 요구된다 할 수 있다.

따라서, 본 연구는, 내식성이 우수하여 해양구조물이나, 항공기의 연료탱크 제작에 많이 이용되는 Al-Alloy 5052-H38에 대한 정확한 균열성장식 제시를 그 목적으로 하며, Al-Alloy 구조물의 피로수명 예측과 건전성 평가에 관한 기초자료를 제공하고 균열닫힘현상이 피로균열 성장거동에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

2. 실험

2.1 시편재료, 시험편 및 4점굽힘 Gr-ip의 제작

본 연구의 시험편재료로는, 두께 10mm의 비열처리 가공경화 합금인 Al-Alloy 5052-H38을 사용하였다.

재료의 기계적 성질(Mechanical Properties)과 화학적 성분(Chemical Compositions)은 Table 2.1, Table 2.2와 같다.

본 실험에서는, 4점굽힘시험편 및 Grip제작에 있어 순수굽힘상태가 민족되도록 Fig.2.1과 같이 제작하였다[11]. 또한, 인장-압축하중 상태에서 시편과 Grip사이에 발생할 수 있는 충격하중을 방지하기 위해, 보울트를 죄어 베어링과 시편사이가 잘 접촉되도록 하였다.

Table 2.1 Mechanical properties of specimens

tensile strength Kg/mm^2	yield strength (Kg/mm^2)	Young's modulus (Kg/mm^2)	elongation (%)
33.16	26.32	6851.66	14

Table 2.2 Chemical composition of 5052-H38 alluminum alloy

composition	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
wt. %	0.02	0.11	0.32	0.15	2.40	0.02	0.32	0.017	remainder

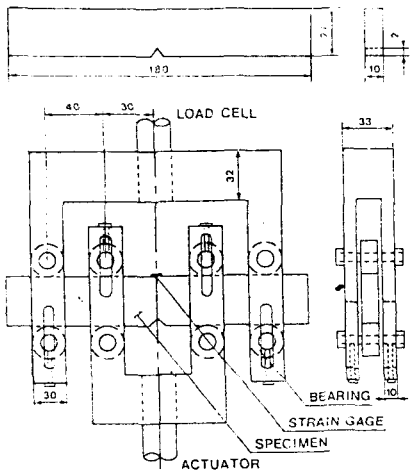

Fig.2.1 Geometry of specimens and grips

2.2 피로시험기 및 측정장치

본 연구에 사용한 시험기는 25ton 용량의 Instron Dynamic Test System Model 1332이며, 피로균열 측정장치로는 배율이 50배인 이동식 현미경을 이용하였다.

균열닫힘점의 측정을 위하여, Notch 반대편에 Gage Length 5mm 의 Strain Gage를 부착하였으며, A/D Cenverter 를 통하여 하중과 변위값을 얻은후 하중-감산변위의 선도는 X-Y Plotter를 통해 출력되도록 하였다. Fig.2.2는 본 실험의 실험장치를 나타낸다.

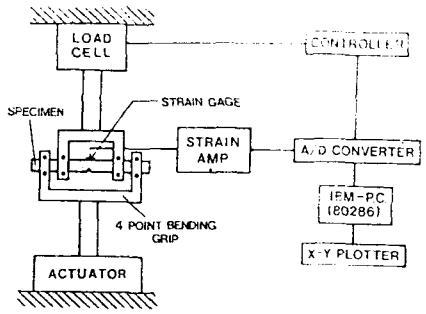

Fig.2.2 Schematic diagram of testing system

2.3 피로시험 조건, 방법

피로시험은, 실온(19℃)에서 일정진폭 정형파형의 하중제어 방식으로 하였으며, 최대하중(Pmax)을 0.25σ_y이하인 390kg으로 하였다. 또한 응력비(R)의 변화는, Pmax을 고정하고 Pmin을 변화시키는 방법을 택하였다.

피로시험시 Pre-cracking은 실험시의 최대하중보다도 20% 큰 하중에서 5%씩 감소시키면서, 기계가공 Notch로 부터 약 2mm의 길이로 넣었으며, 전체초기균열길이를 4mm로 한 다음 본실험에 들어갔다. 피로시험 조건은 Table.2.3과 같다.

각 시편에 대하여, R값을 -0.1, -0.5, 0.05, 0.3, 0.5로 변화시켜가며, 균열길이가 약 2mm진전할때 마다 하중-변위선도를 X-Y Plotter에 Plotting하였다.

2.4 닫힘하중의 측정

닫힘하중은 하중-감산변위로부터 얻었다. A/D Converter를 통해 컴퓨터로 입력된 하중, 변위 data들은 작성된 Program에 의해 하중-감산변위의 그래프를 플로터에 출력한다.

본 연구에 사용된 Program은 하중, 변위 data를 받는 부분은 assembly language로, 감산변위의 계산 및 Plotter지원부는 Basic언어로 구성하였다. 균열열림점의 결정에는 하중-감산변위 Graph의 천이점을 열림하중으로 결정하였다. Fig.2.3은 R=-0.05일 경우에 Plotter를 통해 그려진 하중-감산변위의 Graph이며, 최대, 최소, 열림하중을 얻어낸 후식 (2.2)에 의해 유효응력확대계수 변동폭비 U값을 계산하였다.

$$U = \frac{P_{max}-P_{op}}{P_{max}-P_{min}} \qquad (2.2)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로시험 결과

일정하중폭(△P=Const.)하에서의 피로시험결

과를 반복 Cycle 수 (N)에 대한 균열성장길이(a)로 나타내면, Fig.3.1과 같다. 시편이 최종파단에 이르기까지의 반복 cycle수는 R=0.5인 시편이 가장 많고, 다음이 R=0.3, -1.0, -0.5, 0.05 순으로 나타났다. R=-1.0, -0.5인 경우가 R=0.05인 경우보다 균열성장속도가 느리게 나타난 것은 압축하중이 작용하는 동안에는 균열성장이 일어나지 않으며, 압축응력에 의한 균열닫힘점의 상승효과에 기인한다고 할 수 있다.

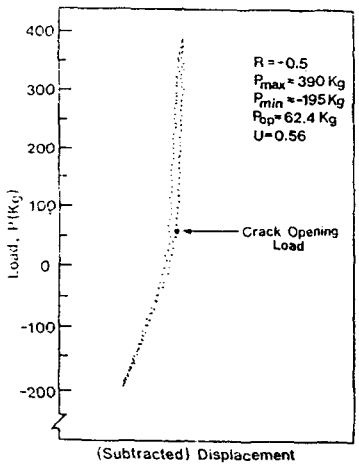

Fig.2.3 The graph of load-subtracted displacement

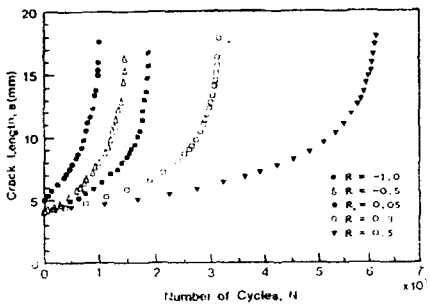

Fig.3.1 a-N relations

3.2 da/dN-△K 관계 고찰

Fig.3.2는 실험을 통해 얻어진 a-N 관계로 부터 피로 균열성장 Fig.3.2 속도(da/dN)를 응력확대계

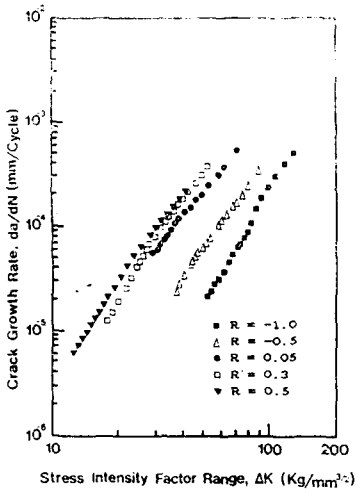

Fig.3.2 da/dN-△K relations

수 변동쪽(△K)에 대하여 Log-Log좌표로 나타낸 것이다.

동일한 △K영역에서 응력비 R이 증가할수록, 피로균열성장속도 da/dN도 증가함을 알 수 있다. 이와같이 응력비 감소에 따른 피로 균열성장속도의 저하는, 소성영역과 파면거칠기에 의한 균열닫힘현상에 기인한다고 볼 수 있다.

또한, 하중형태가 인장-인장(R>0)인 경우에는 응력비(R)의 영향이 거의 없으나, 인장-압축(R<0)인 경우에는 응력비(R)의 영향이 현저함을 알 수 있다. 이러한 사실은 인장-인장인 경우에 비해 인장-압축인 경우, 압축하중이 작용하는 동안에는 균열이 닫혀있으므로, 균열닫힘현상이 보다 잘 일어남에 기인한다.

3.3 U-R 관계고찰

Fig.3.3은 각각의 R값에 대한 열림점을 측정하여, 응력확대계수변동폭비 U와 응력비 R과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 U는 R의 증가와 더불어 증가함을 알 수 있으며, R=0.5일 때는 U=1 즉, 균열닫힘현상은 존재하지 않음을 알 수 있다.

5개의 실험 data로부터 분수식 Curve Fitting방

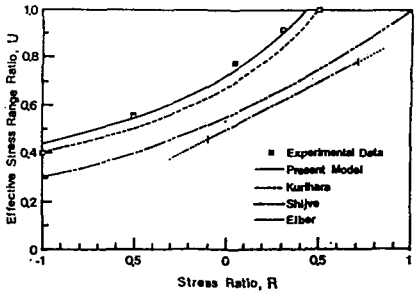

Fig.3.3 Comparison of U-R relationshiops

법을 이용하여 식(3.1)과 같은 실험식을 얻었다.

$$U=\frac{1.1}{1.53-R}: -1<R<0.5$$

$$1: R>0.5 \quad \text{——————} \quad (3.1)$$

이상의 연구결과들은 Kurihara등의 연구결과와 비슷한 경향을 나타낸다.

3.4 da/dN-△K_{eff} 관계 고찰

균열닫힘현상을 고려한 유효응력확대계수변동쪽 △K_{eff}(=Kmax-Kop) 를 도입하여, 피로균열성장속도 da/dN과 유효응력확대계수변동쪽 △K_{eff}와의 관계를 Fig.3.4에 나타냈다. 균열성장속도를 △K_{eff}로 정리하면, 안정성장영역의 data들이 da/dN-△Keff곡선의 좌측으로 평행이동 함을 알 수 있으며, 이동후의 data들은 균열이 항상 열려 있는 것으로 나타난 R=0.5의 data들과 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig.3.4와 같이 피로균열성장속도 da/dN은 전 △Keff영역에서 응력 비에 관계없이 거의 동일한 값을 나타냄을 알 수 있다.

식 (3.1)의 U식을 △Keff로 정리하면 다음과 같다.

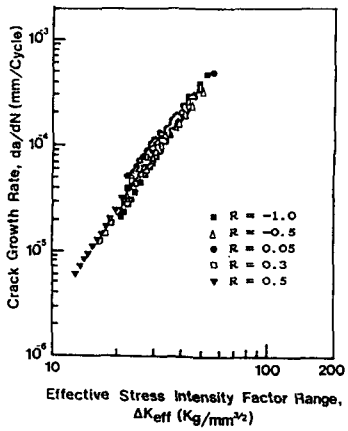

Fig.3.4 da/dN-△Keff relations

$$\frac{da}{dN}=C\,(\triangle Keff)^m=C\left(\frac{1.1}{1.53-R}\triangle K\right)^m: -1<R<0.5$$

$$\frac{da}{dN}=C\,(\triangle Keff)^m=C(\triangle K)^m: R>0.5$$

$$\text{——————————} \quad (3.2)$$

Table 3.1은 da/dN-△K, da/dN-△Keff 관계로부터 구한 C, m값을 도시하였다. Table.3.1 Table과 같이 △Keff로 평가하여도 m값에는 변화가 없음을 알 수 있다.

Table 3.1 Data of C, m in $\frac{da}{dN}$-△K and $\frac{da}{dN}$-△ Keff relations

Stress Ratio	△K		△Keff	
	C	m	C	m
-1	4.23×10^{-11}	3.311	8.94×10^{-10}	3.311
-0.5	7.26×10^{-10}	2.900	3.90×10^{-09}	2.900
0.05	2.26×10^{-09}	2.978	4.76×10^{-09}	2.978
0.3	1.51×10^{-09}	3.155	1.96×10^{-09}	3.155
0.5	2.94×10^{-09}	3.033	2.94×10^{-09}	3.033

4. 결론

Al-학급재의 피로균열성장거동에 미치는 균열닫힘현상의 영향에 대하여, 응력비를 변수로 한 피로시험을 통하여 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 피로균열성장속도 da/dN은 동일한 △K에서 응력비 증가에 따라 상승하며, 균열닫힘을 고려한 △Keff와의 관계에서는 전 △Keff 영역에서 응력비에 관계없이 거의 동일한 값을 나타낸다.

2) Al-Alloy 5052-H38에 대한 유효응력확대계수 변동폭비 U는 다음과 같이 R만의 함수로 표현할 수 있다.

$U=1.1/(1.53-R)$: $-1<R<0.5$

1 : $R>0.5$

3) Al-Alloy 5052-H38의 균열성장속도 da/dN을 균열닫힘현상을 고려한 △Keff로 정리하면, 다음과 같은 피로균열성장식을 얻을 수 있다.

$$\frac{da}{dN}=C\,(\triangle Keff)^m=C\left(\frac{1.1}{1.53-R}\triangle K\right)^m : -1<R<0.5$$

$$\frac{da}{dN}=C\,(\triangle Keff)^m : \ R>0.5$$

참고문헌

(1) P. C. Paris and F. Erdogen, "A Critical Analysis of Crack Propagation Law", J.of Basic Engineering, Trans. of ASME, Vol.85, pp. 528~534, 1963

(2) W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", John Willy & Some, Inc., pp. 537~543, 1989

(3) W. Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, pp.230~242, 1971

(4) M. Katcher and M. Kaplan, "Effect of R-Factor and Crack Closure on Fatigue Crowth for Aluminum and Titanium Alloys", ASTM STP 599, pp. 264~282, 1974

(5) J. Schijve, "Some Formulas for the Opening Stress Level", Eng. Fract. Mech., Vol. 14, pp. 461~465, 1981

(6) M. Kurihara, A. Katoh and M. Kawahara, "Effect of Stress Ratio and Step Loading on Fatigue Crack Propagation Rate", Current Japanese Material Research, Vol. I, pp. 247~265, 1987

(7) K. D. Unangst, T. T. Sghih and R. P. Wei, "Crack Closure in 2219-T851 Aluminum Alloy", Eng. Fract. Mech., Vol. 9, pp. 725~734, 1977

(8) J. A. Vazquez, A. Morrone and J. C. Gasco, "A Comparative Experimental Study on the Fatigue Crack Closure Behavior under Cyclic Loading for Steels and Aluminm Alloys", ASTM STP 677, pp. 187~197, 1979

(9) H. U. Staal and J. d. Elen, "Crack Closure and Influence of Cycle Ratio R on Fatigue Crack Growth in Type 304 STainless Steel at Room Temperature", Eng. Fract. Mech., Vol. 11, pp. 275~183, 1979

(10) Y. P. Srivastava and S. B. L. Garg, "Influence of R on Effective Stress Range Ratio and Crack Growth", Eng. Fract. Mech, Vol. 22, /no. 6, pp. 915~926, 1985.

(11) 최용식, 한지원, 김규성, "Al-합금재의 균열닫힘현상에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 48~51, 1990.

(12) H. Tada, P. C. Paris and G. R. Irwin, "The Stress Analysis of Cracks Handbook", Del Research Corporation, 1973