

피로균열전파 동안 하중감소에 의한 균열지연

김현수*·남기우*·안석환*·도재윤**
(2002년 11월 29일 접수, 2003년 10월 16일 심사완료)

Crack Retardation by Load Reduction During Fatigue Crack Propagation

Hyun-Soo Kim, Ki-Woo Nam, Seok-Hwan Ahn and Jae-Yoon Do

Key Words: Crack Propagation(균열전파), Load Reduction(하중감소), Crack Retardation(균열지연), Retardation Life(지연수명), Fracture Life(파단수명), Wheeler Model(휠러모델), Weibull Distribution(웨이블분포), Statistical Nature(통계적성질)

Abstract

Fracture life and crack retardation behavior were examined experimentally using CT specimens of aluminum alloy 5083. Crack retardation life and fracture life were a wide difference. between 0.8 and 0.6 in proportion to ratio of load reduction. The wheeler model retardation parameter was used successfully to predict crack growth behavior. By using a crack propagation rule, prediction of fracture life can be evaluated quantitatively. A statistical approach based on Weibull distribution was applied to the test data to evaluate the dispersion in the retardation life and fracture life by the change of load reduction.

1. 서론

공업의 발전과 더불어 산업구조물의 대형화는 물론 새로운 최적 설계 개념의 도입 및 신소재의 개발과 기계 제품의 경량화에도 불구하고 원자력 구조물의 안전사고, 대형 교량 및 항공기의 파피 사고 등이 끊이지 않고 있다. 이들 사고 원인의 대부분은 피로파괴에 의한 사고로 판명되고 있으므로, 피로파괴에 대한 안전설계의 중요성이 더욱 요구되고 있다.

반복하중에 의한 재료의 피로파괴는 균열의 발생과정과 전파과정으로 구별되지만, 피로균열의 전파 과정 중에 하중을 감소시키면 균열의 전파율이 급격히 감소하는 지연현상이 발생하게 된다. 실제의 기계구조물들은 장기간에 걸쳐 복잡

하게 변동하는 하중의 영향을 받으므로 실험실에서 실시되는 일정응력진폭시험의 결과를 그대로 적용 할 수 없다. 그러므로 변동하중하에서의 피로균열전파거동은 부하응력조건에 따른 검토가 선행되어야 한다. 변동하중의 기본형태로서는 단일과대하중, 반복과대하중 또는 반복과소하중 등의 다양한 시험에 의한 피로균열전파거동의 연구가 시도되고 있으나,⁽¹⁻³⁾ 시험에 사용된 재료에 따라 피로균열전파거동이 다르게 나타나며 또한 실험방법도 일정하지 않아 이 분야에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

일반적으로 재료가 사용 중에 인장과대하중이나 변동하중 조건에서는 선형탄성 파괴역학 이론의 예상(손상누적, 짧은 수명, 피로균열 성장의 증가)과는 달리 피로균열 성장의 가속 혹은 감소가 일어난다는 것은 널리 알려져 있다. 이와 같은 피로균열 성장가속 혹은 감소현상을 설명하기 위하여 균열단합, 균열선단의 둔화, 균열분지, 균열선단의 가공경화 등의 여러 기구들이 제안되었으나, 어떤 기구도 피로균열 전파거동을 완전히

† 책임저자, 회원, 부경대학교 재료공학과

E-mail : namkw@pknu.ac.kr

TEL : (051)620-1640 FAX : (051)624-0746

* 부경대학교 공과대학

** 부산기능대학

설명하지는 못하였다.^(4,5) 이와 같은 원인 규명이 완전하지 못하다라고 고압용기등의 사용중에 발생하는 중대사고는 인명사고는 물론이고 막대한 경제적 손실을 초래하므로, 사용중의 하중을 감소시킴으로서 나타나는 다양한 재료의 균열지연 현상에 대하여 연구를 실시하는 것은 파단전누설 설계의 관점에서 대단히 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 파단전누설 설계의 관점에서 일정진폭 피로하중시험을 실시하면서 하중을 감소시켜 지연거동, 파단수명 및 균열성장 속도에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고, 지연수명과 파단수명의 확률분포를 검토하여 구조물의 안전성 및 신뢰성평가의 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 Al5083로서, 그 화학 성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 시험편의 형상은 ASTM E647-95의 규정에 의하여 시험편 폭 25 mm, 두께 12.5 mm인 0.5TCT 시험편을 사용하였다. Fig. 1에 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

2.2 피로시험

피로균열진전 특성을 평가하기 위한 피로시험은 최대용량 100 kN의 만능피로시험기를 사용하였다. 실험은 실온대기중에서 응력반복속도 10 Hz, 응력비(R) 0.1의 정현파로 하였다. 본 실험에 앞서 모든 시험편에 피로균열 발생수명 등의 영향을 제거하기 위하여 1.3mm의 예비균열을 삽입하였다. 본 실험에 적용한 최대반복하중은 3.5 kN이고, 하중 감소후 지연거동을 평가하기 위한 하중감소비 R_{lr} 는 0.6과 0.8로 하였다. 지연거동 평

가는 피로파괴과정의 모델에서 완전한 모드 I 이 성립하는 안정균열성장단계인 9 mm에서 하중을 감소시켜 지연실험을 실시하였다. 시험편은 총 30개를 사용하였으며, 초기 일정하중하에서 파단까지 시험편, 하중감소비 0.8 시험편, 하중감소비 0.6 시험편으로 각각 10개씩 사용하였다. 균열길이는 클립 게이지를 이용한 컴플라이언스 법을 사용해서 측정하였으며, 균열길이가 0.15 mm증가할 때마다 균열길이 a, 응력반복수 N, 응력확대계수 ΔK 등을 기록하였다.

2.3 균열 지연 및 응력확대계수평가

지연현상에 대한 개념도는 Fig. 2와 같다. 감소하중에 의한 피로균열전파 지연거동은 지연수명(하중을 감소시켜 지연현상이 발생한 후 감소하중에 의한 피로균열이 성장할 때까지의 수명; N_d)과 지연균열길이(지연현상이 나타나는 동안 성장한 균열길이; a_d)의 변수로 설명할 수 있다. 하중감소비 R_{lr} 는 식 (1)로 주어진다.

$$R_{lr} = \frac{P_{max}^r}{P_{max}^i} \quad (1)$$

여기서, P_{max}^i : 초기 일정진폭하중, P_{max}^r : 하중 감소후의 일정진폭하중을 나타낸다.

균열전파에 있어서의 지연거동은 Wheeler model⁽⁶⁾에 의하여 식 (2)로 계산된다.

$$da/dN = C_P \times C \times (\Delta K)^m \quad (2)$$

여기서, C와 m은 재료상수이며, C_P 는 지연변수로서 식 (3)으로 주어진다.

$$a + r_{pr} < a_{pi} \text{ 일 때, } C_P = \left[\frac{r_{pr}}{(a_{pi} - a)} \right]^n$$

$$a + r_{pr} \geq a_{pi} \text{ 일 때, } C_P = 1 \quad (3)$$

Table 1 Chemical compositions (wt. %)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Al
Al5083	0.132	0.181	0.014	0.489	4.13	0.104	Bal.

Table 2 Mechanical properties of Al5083

Material	Tensile Strength MPa	Yield Strength MPa	Elongation %	Hardness (HB)
Al5083	290	145	22	67

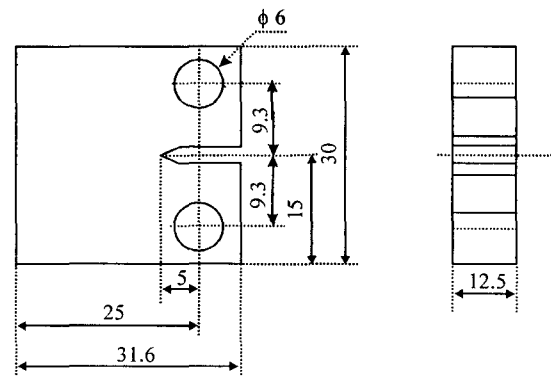


Fig. 1 Shape and dimensions of CT specimen (unit : mm)

여기서, r_{pr} 는 현재 작용하는 하중하의 소성영역 크기, a_{pi} - a 는 균열선단으로부터 소성역까지의 거리, n 은 자연지수를 각각 나타낸다.⁽⁶⁾ 응력확대계수 변동폭 ΔK 는 식 (4)를 이용하여 계산하였으며, 피로균열전파속도 da/dN 는 a - N 선도에서 증분다항식법으로 구하였다.

$$\Delta K = \left[\frac{\Delta P}{(B \cdot W)^{1/2}} \right] \cdot f(x), \quad (X = a/W) \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{(2+X)(0.886+4.64 \cdot X-13.32 \cdot X^2+14.72 \cdot X^3-5.6 \cdot X^4)}{(1-X)^{3/2}}$$

이 식은 $0.2 \leq a/W < 1$ 에서 적용 가능하다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열전파거동

Fig. 3은 Al5083 시험편의 피로시험 후 얻어진

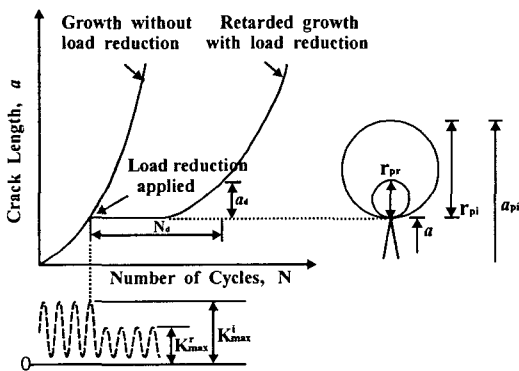
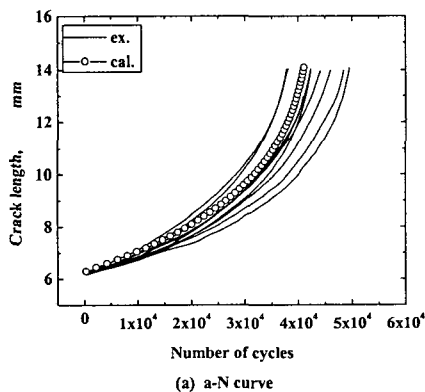


Fig. 2 Schematic illustration of the crack retardation phenomenon



a - N 곡선과 피로균열전파속도와 응력확대계수 변동폭과의 관계를 타나낸 것이다. Fig. 3(a)는 a - N 곡선을 나타내는 것으로서, 예비균열 1.3 mm삽입 후, 초기균열길이 $a = 6.3$ mm에서 14 mm까지의 하중반복수를 나타내며, 이것을 파단수명($N_{a=14mm}$)으로 나타낸다. 파단수명은 동일재료에서도 파단까지의 수명에 분산이 존재하므로 동일한 균열길이에서 수명을 비교하기 위한 것으로, 37,800~49,500cycle 사이의 값을 나타내었다. Fig. 3(b)는 일정 진폭하중하에서 파단수명까지 실시한 10개의 시험편에서 얻어진 응력확대계수변동폭과 피로균열전파속도와와의 관계를 나타낸다. 이 그림에서 얻어진 균열전파법칙은 다음과 같다.

$$da/dN = 9.23 \times 10^{-8} (\Delta K)^{3.19} \quad (5)$$

단, da/dN 는 mm/cycle이고, ΔK 는 $MPa\sqrt{m}$ 이다.

Fig. 3(a)중의 -o-은 식 (4)와 Fig. 3(b)에서 얻어진 식 (5)를 사용하여 계산에서 구한 파단수명을 나타낸다. 계산 파단수명 41,000cycle에 대하여 실험 파단수명의 분산이 약간 존재하지만, 전체적으로 비교적 유사하게 나타났다.

3.2 피로균열지연특성

Fig. 4(a), (b)는 각각 하중감소비 $R_{lr}=0.8$ 과 0.6인 경우에 피로균열지연 시험에서 얻어진 a - N 곡선을 나타낸 것이다. 하중감소가 커짐에 따라서 파단수명의 분산이 크게 나타나고 있다. 파단수명을 ($N_{a=14mm}$) 좀더 상세하게 살펴보면, $R_{lr}=0.8$ 의 경우에는 57,000~77,400cycle, $R_{lr}=0.6$ 의 경우에는 237,000~456,700cycle로 나타났다. 이와 같이 파

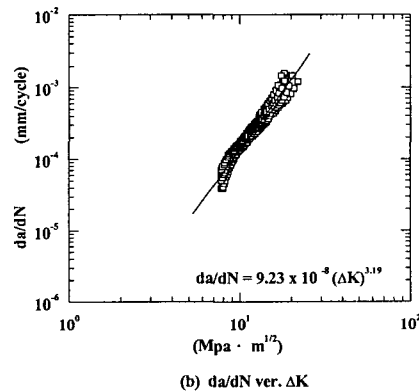


Fig. 3 a-N curve and crack growth rate versus stress intensity factor range of Al5083

단수명의 차이는 $R_r=0.6$ 의 경우가 $R_r=0.8$ 의 경우보다 지연현상이 길게 나타나고 있는 것이 원인이다. 그림에서 빗금친 부분은 식 (2)와 식 (4)를 사용하여 계산한 과단수명이다. Fig. 4(a), (b)에서 지연지수를 구하기 위하여 실험과 계산의 지연수명이 거의 일치하도록 하였기 때문에, 지연구간은 좋은 일치를 보이고 있으나 그 후의 균열성장구간은 약간의 차이를 보이고 있다. 그러나 전체적으로 균열성장거동은 좋은 일치를 보이고 있다고 판단된다. 그리고 지연수명(N_d)은 Fig. 2에 나타내듯이 고하중에서 저하중으로 하중을 감소시키면, 저 하중에 의한 균열이 고하중에 의해서 형성된 소성역을 벗어나는 곳까지이다.^(6,7) 이러한 지연수명은 Fig. 4(a), (b)에서 하중감소점인 균열길이 9 mm에서 균열이 재성장하기 시작하는 지점까지를 지연수명으로 하였다. 이렇게 얻어진 결과를 Table 3에 나타낸다.

Fig. 5는 지연피로시험결과 얻어진 균열길이(a)와 피로균열진전속도(da/dN)와의 관계를 나타낸다. Fig. 5의 (a), (b), (c)는 각각 하중감소비 R_r 1.0, 0.8 및 0.6에서 얻어진 것이다. Fig. 5(a)는 $R_r=1.0$ 인 일정하중하에서 과단까지 실시한 하중감소가 없는 시험편의 결과를 나타낸다. Fig. 5(b)와 (c)는 $R_r=0.8$ 과 0.6일 때의 결과를 나타낸다. Fig. 5(a)에서 당연한 것이지만 피로균열길이의 증가와 함께 균열진전속도는 빨라지고 있다. 그러나 Fig. 5(b)와 (c)에서는 하중을 감소시킨 점선부분에서 균열진전속도가 급격하게 늦어지고 있다. 이러한 경향은 하중감소비 R_r 에 크게 의존하고 있다. 이것은 높은 하중의 반복동안에 균열성장 경로를 따라서 형성된 균열선단 부근의 균열단합하중이 낮은 하중단계에서 감소되지 않고 낮은 하중시험

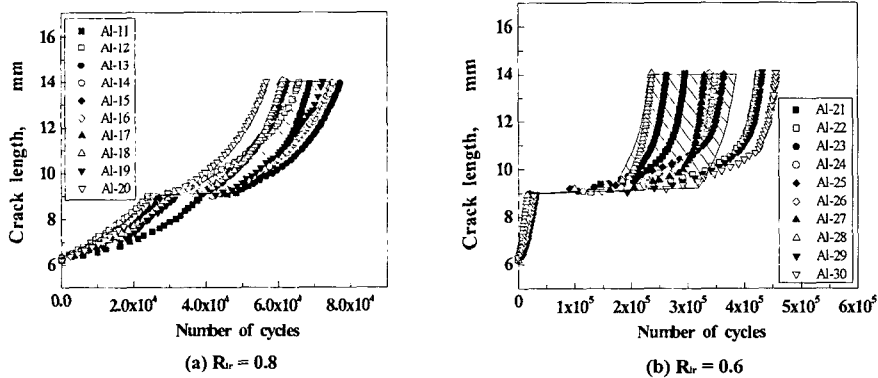


Fig. 4 Comparison of experimental with calculated retardation crack behavior

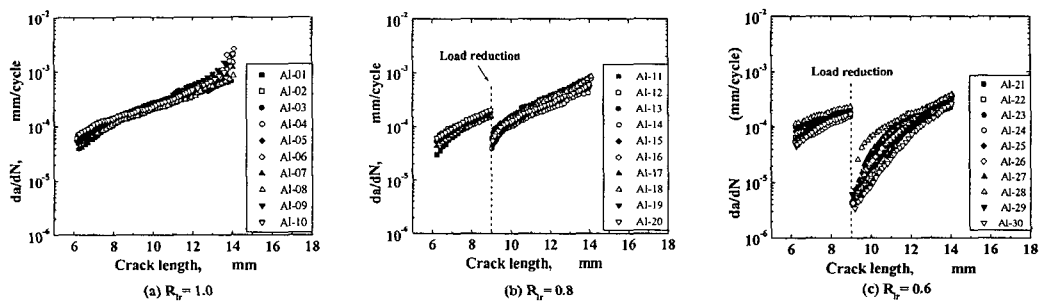


Fig. 5 Relationship between crack propagation rate and crack length at $R_r=1.0, 0.8$ and 0.6

Table 3 The experiment and calculated results of AI5083

Speci.	R _{Ir}	N _{a=14} (ex) (cycles)	N _{a=14} (cal) (cycles)	N _D (ex) (cycles)	N _D (cal) (cycles)	n(cal)
AI-01	1.0	37,800	41000			
AI-02		42,300				
AI-03		44,400				
AI-04		41,400				
AI-05		42,300				
AI-06		49,500				
AI-07		48,400				
AI-08		46,700				
AI-09		42,300				
AI-10		38,100				
AI-11	0.8	69,000	67,095	13,500	13,473	7.27
AI-12		66,000	65,029	11,400	11,403	6.73
AI-13		77,400	74,944	21,300	21,353	8.69
AI-14		75,300	73,377	19,700	19,753	8.46
AI-15		62,700	69,608	15,900	15,983	7.81
AI-16		61,800	64,756	11,100	11,133	6.65
AI-17		60,900	69,608	15,900	15,983	7.81
AI-18		61,500	66,011	12,300	12,383	7.00
AI-19		72,600	70,935	17,300	17,333	8.06
AI-20		57,000	62,623	9,000	9,003	5.93
AI-21	0.6	296,400	253,783	162,300	161,163	4.32
AI-22		426,300	338,002	245,700	245,483	4.82
AI-23		263,400	256,490	163,800	163,873	4.34
AI-24		349,800	266,347	174,000	173,723	4.41
AI-25		365,100	278,378	185,200	185,753	4.49
AI-26		339,600	316,757	222,600	223,553	4.71
AI-27		330000	318,074	225,600	225,453	4.72
AI-28		237,000	232,584	140,100	139,963	4.15
AI-29		432,900	353,043	259,200	260,423	4.86
AI-30		457,600	383,567	290,100	290,943	5.02

중 상당기간 유지되므로 하중감소 후 즉각적인 균열성장지연이 발생한다고 판단된다.⁽⁵⁾

실험에서 얻어진 파단수명(N_{a=14}), Fig. 2와 4에서 설명한 방법으로 얻어진 지연수명(N_D), 실험 지연수명과 거의 같도록 식 (2)와 식 (4)에서 얻어진 계산지연수명 및 이 때 얻어지는 지연지수(n)를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 실험에서 얻어진 값은 R_{Ir}=0.8의 경우, 지연수명은 9,000~21,300cycle, 파단수명은 57,000~77,400cycle, 지연지수는 5.93~8.69로 나타났다. 그러나, R_{Ir}=0.6의 경우는 지연수명은 140,100~290,100cycle, 파단수명은 237,000~456,700 cycle, 지연지수는 4.15~5.02로 나타났다. 하중감소비R_{Ir} 0.8과 0.6의 크기에 비하여 지연수명과 파단수명은 많은 차이를 보이고 있다. 이러한 것은 압력 용기에 있어서 균열이 관통하여 누설하는 비상상태가 발생하면, 사고수습을 위해서는 구조물의 안전성이 확보되는 범위내에서 작용하중을 가능한 많이 감소시켜 사고를 처리하는 것이 좋을 것이라고 판단된다. 즉, 하중감소비 0.6의 경우가 0.8보다 지연수명이 13.6~15.5배를 나타내므로, 누설이 발생하여 수리 등 비상조치를 취할시 작용하중을 많이 감소시키면 균열진전이 느리므로 충분한 시간을 확보할 수 있게 된다.

R_{Ir}=0.8 및 0.6의 경우, 실험과 계산한 파단수명(N_{a=14})을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a), (b)에서 알 수 있듯이 실험값과 계산값은 비교적 좋은 일치를 보이고 있다. 그러나 R_{Ir}=0.6의 경우는 계산값이 전체적으로 단수명으로 안전측으로 평가되고 있다.

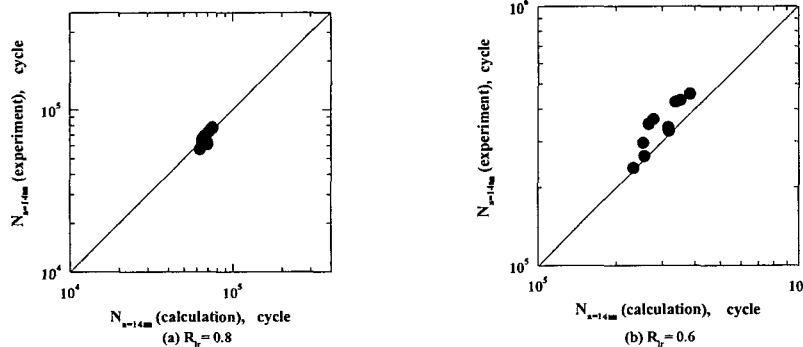


Fig. 6 Comparison of experimental with calculated values of fracture life(N_{a=14})

Fig. 7은 초기의 최대응력확대계수(K_{max}^i)와 다양한 하중비에서 얻어진 지연지수와와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 Δ , ∇ 는 본 실험에 의하여 얻어진 10개의 평균을 나타낸 것이고, \blacksquare 는 Nam 등⁽⁷⁾의 실험에서 얻어진 것을 비교하기 위하여 함께 나타내었다. 지연지수와 K_{max}^i 와의 사이에는 식 (6)의 관계가 성립하였다.

$$n = -0.19 K_{max}^i + 7.29 \quad (6)$$

본 실험에서 얻어진 지연지수의 경우, $R_{lr}=0.6$ (∇)은 좋은 일치를 보이지만, $R_{lr}=0.8(\Delta)$ 은 다소 크게 나타났다.

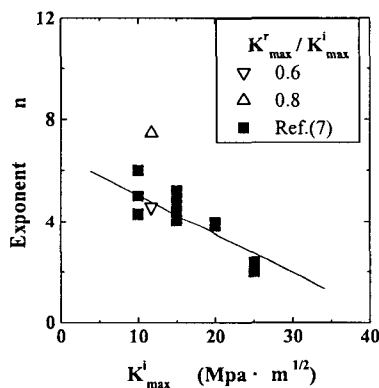


Fig. 7 Relationship between retardation exponent and K_{max}^i

3.3 피로균열전파 파라미터의 분포특성

피로균열 파라미터에 대한 산포는 2-parameter Weibull 분포⁽⁸⁾를 이용하여 해석하였다. 그 확률 밀도함수와 확률분포함수는 다음 식과 같다.

$$f(x) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{x}{\eta}\right)^{m-1} \exp \left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m\right] \quad (7)$$

$$F(x) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m\right] \quad (8)$$

여기서, m , η 는 각각 형상계수(shape parameter), 와 척도계수(scale parameter)를 의미한다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 전체 시험편에 대한 피로시험에서 얻어진 지연수명 및 파단수명의 신뢰성평가를 위하여 식 (8)의 2-parameter Weibull분포로 나타낸 것이다. Table 4는 지연수명, 지연지수 및 파단수명의 통계적 데이터와 분포의 파라미터를 나타낸 것이다. 분포의 누적확률은 평균순위법으로 구하였다. 이들의 분포는 2-parameter Weibull 분포를 따르고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 피로균열 9mm에서 하중감소 후에 지연수명의 분포를 나타낸 것이다. 지연수명의 계산값은 지연지수를 결정하기 위하여 실험값과 비슷하게 얻어지도록 하였다. 따라서 두 값은 각 하중감소비에서 비슷한 경향을 나타내고 있다.

Fig. 9는 실험과 계산에서 얻어진 파단수명 (N_{a-14})의 확률분포를 나타낸 것이다. 하중감소비 $R_{lr}=1.0$ 과 0.8의 m 은 비슷한 값을 나타내지만, 0.6은 4.59로 앞의 두 경우보다 적은 값을 나타낸다. 피로수명의 분산을 나타내는 척도인 변동계수는 하중감소비 0.6이 가장 큰 것을 알 수 있다.

Table 4 Statistical properties of retardation life, retardation exponent and fracture life

	$N_D(ex)$		$N_D(cal)$		n		$N_{a-14}(ex)$			$N_{a-14}(cal)$		
	0.8	0.6	0.8	0.6	0.8	0.6	1.0	0.8	0.6	0.8	0.6	
Ratio of Load Reduction												
Number of Sample	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
Sample Mean (Cycles)	14,700	206,000	14,800	207,000	7.39	4.55	43,900	65,900	348,000	67,900	298,000	
Standard Deviation (Cycles)	4,590	57,500	4,610	57,900	1.16	0.47	6,970	9,400	87,900	6,790	60,900	
Coefficient of Variation(%)	31.2	27.9	31.1	30.0	15.7	10.3	15.9	14.3	25.3	10.0	20.4	
Weibull Distribution Parameter	m	3.6	4.1	3.59	4.07	8.26	15.9	8.1	9.34	4.59	16.8	5.91
	η	16,400	228,000	16,400	228,000	7.85	4.72	46,700	69,700	382,000	70,300	322,000

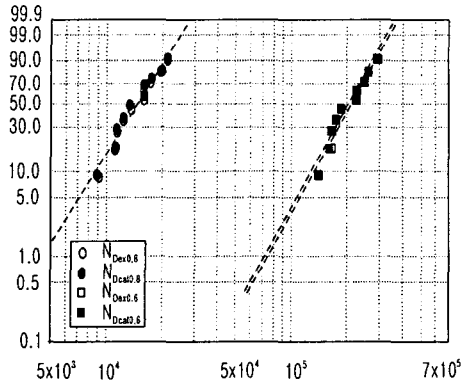


Fig. 8 Weibull plots of retardation life

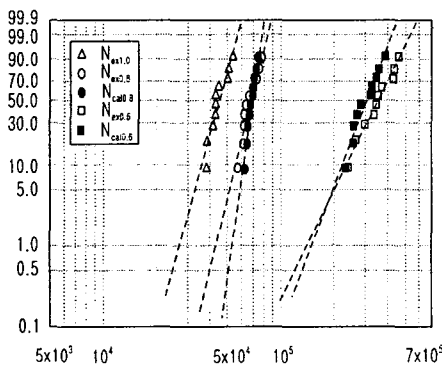


Fig. 9 Weibull plots of fracture life

4. 결론

본 연구에서는 파단전누설 설계의 관점에서 Al5083을 사용하여 최대반복하중 3.5 kN의 일정 진폭 피로하중시험을 실시하면서 하중을 감소시켜 균열지연거동 (균열길이 9 mm에서 균열이 재성장하기 시작하는 지점), 파단수명 (초기균열길이 6.3 mm에서 14 mm까지의 하중반복수) 및 균열 성장속도에 미치는 영향을 조사하였다.

- (1) 하중감소비율 0.6의 경우가 0.8보다 지연수명은 13.6~15.5배, 파단수명은 4.2~5.9의 장수명을 나타내었다.
- (2) 실험과 계산의 파단수명은 하중감소비율 0.86에서 비교적 좋은 일치를 보였으나, 0.6에서는 계산값이 안전측으로 평가되었다.
- (3) 지연수명과 파단수명은 2-parameter Weibull 분포로 설명할 수 있었다.

(4) 파단수명의 형상계수값은 하중감소비 0.8에서 9.34, 0.6에서 4.59로 나타났다. 분산을 나타내는 척도계수는 하중감소비 0.6이 0.8에 비하여 실험에서 5.5배, 계산에서 4.6배 크게 나타났다.

(5) 이상에서 압력용기에 균열이 관통하여 누설하는 비상상태가 발생하면, 사고 수습을 위해서는 구조물의 안전성이 확보되는 범위내에서 작용 하중을 가능한 많이 감소시키는 것이 좋을 것이라고 판단된다.

참고문헌

- (1) Song, S. H. and Lee, K. R., 1998, "A Study on the Growth Behavior of Short and Long Crack and the Effect of Single Overload," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, No. 6, pp. 990~1001.
- (2) Lee, B. H. and Lee S. B., 1997, "An Experimental Study on the Fretting fatigue Crack Behavior of AL2024-T4," *Transactions of the KSME, A*, Vol 21, No 3, pp. 511 ~518.
- (3) Kim, S. J. and Ahn, S. H., 2001, "An Experimental Study on the Factors that Affect Fatigue Crack Growth Retardation Behavior in S45C Steel," *Trans. of the KSME, A*, Vol. 25, No. 3, pp. 470~477
- (4) Sheu, B. C., Song, P. S. and Hwang, S., 1995, "Shaping Exponent in Wheeler Model Under a Single Overload," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 51, No. 1, pp. 135~143.
- (5) Choi, J. H., Song, S. H., Kim, K. S. and Choi, B. H., 1998, "Prediction Model for Crack Retardation Behavior Under Single Overload," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 22, No. 10, pp. 1806~1812.
- (6) Wheeler, O. E., 1972, "Spectrum Loading and Crack Growth," *J. of Basic Engineering*, Vol. 90, pp. 181~186
- (7) Nam, K. W., Iwase, K. and Ando, K., 1995, "Fatigue life and Surface Crack Penetration Behavior of an Aluminum Alloy," *Fatigue Frac. Engng Mater. Struct.*, Vol. 18, No. 2, pp. 179~187.
- (8) Weibull, W., 1951, "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability," *ASME J. Applied Mech.*, Vol. 18, pp. 293~297.