

복합응력장 하의 균열부재에 대한 잔류피로수명 평가방법

조창희* · 김상태** · 권재도**

(1996년 11월 9일 접수)

Residual Fatigue Life Evaluation Method for the Cracked Components under Complex Stress Fields

Chang-Hee Cho, Sang-Tae Kim and Jae-Do Kwon

Key Words : Influence Function(영향함수), Stress Intensity Factor(응력 확대계수), Residual Stress(잔류응력), Crack Growth Rate(균열성장률), Residual Fatigue Life(잔류 피로수명)

Abstract

This study reviews the influence function method(IFM) for calculating stress intensity factors (SIFs, K) and modifies it to apply for the estimating the residual fatigue life for the cracked components under complex stress fields. An IFM has been developed to analyze SIFs for surface cracks which are subjected to nonuniformly distributed stresses. Through elastic superposition, the influence function method properly accounts for redistribution of stress as the crack grows through the component. This influence function is unique to the given geometry and independent of the loading. Some examples have been provided to show the effectiveness of the IFM including the distributions of K in a residual stress field. The significant effect of residual stress upon fatigue crack growth in a welded component has been demonstrated with the IFM.

기 호 설 명

a : 균열길이의 반
 b : 시편 폭의 반
 C, m, n : 재료상수
 N : 하중 사이클수
 da/dN : 피로균열성장속도
 K : 응력확대계수
 K_{Ic} : 임계 응력확대계수
 K_{max} : 최대 응력확대계수
 K_{min} : 최소 응력확대계수
 K_{Ies} : 잔류 응력확대계수
 ΔK : 작용 응력확대계수 범위
 ΔK_{eff} : 유효 응력확대계수 범위

R : $(\sigma_{min}/\sigma_{max})$ 응력비
 R_{eff} : 유효 응력비
 σ : 작용응력
 σ_r : 잔류응력
 $\Delta\sigma$: 응력 범위
 h : 영향함수
 E : 탄성률
 H : 재료성질
 U : 용접하지 않은 모재
 P : 버트 수직용접 시편
 L : 비트 평행용접 시편

1. 서 론

*영남대학교 대학원

**회원, 영남대학교 기계공학과

기계장치 개발, 구조물의 고성능화 및 대형화 등 많은 과학기술의 발전이 이루어지고 있다. 한편 근래에 와서 최적설계의 개념이 도입되고 고속화에 따른 경량화 추세가 진행됨에 따라 상대적으로 기계구조물의 안전율이 낮아지게 되어 기계구조물의 수명에 영향을 미치는 초기결함이 내재하고 있는 경우, 그 결함이 반복하중에 의해 성장하여 치명적인 손상·파괴에 이르는 경우가 허다하다. 또한 대형 기계구조물의 경우에는 새로운 건설보다 기존의 구조물에 대한 건전성을 평가하고 수명을 연장하는 방법이 더 바람직한 경우가 많게 되었다. 예를 들면 원자력발전소의 경우가 그 대표적인 경우일 것이다. 현재 국내 발전량의 거의 반이상을 원자력이 담당하며, 수력 기타 자연에너지원과 석유에너지가 없는 우리나라로서는 앞으로 원자력발전이 더욱 의존해야만 할 형편이다. 하지만 새로운 원자력발전소 1기를 건설하는데 드는 엄청난 예산뿐만 아니라 입지선정 등에 따르는 지역주민과의 마찰, 환경보호론자의 극심한 반대 등으로 새로운 원자력발전소의 건설은 점점 더 힘들어지고 있다. 국내 원자력 발전소 1호인 고리 1호는 설계수명 20년이 몇년 앞으로 다가오고 있고 기타 발전소는 설계수명이 30년이지만 곧 십여년 이내에 모두 설계수명에 도달될 형편이다. 이와같은 사정은 국내뿐만 아니라 우리나라보다 원전의 역사가 긴 미국, 일본, 유럽 모든 나라에서 안고 있는 고민이다. 이와같은 원전설비의 수명연장을 위해서는

- (1) 비파괴적인 방법에 의한 결함 및 균열 검출 방법 개발
- (2) 검출된 결함 및 균열에 대한 건전성 평가
- (3) 결함 및 균열이 존재할 경우의 수명예측
- (4) 수명예측을 토대로 한 수명연장방법 개발 등이 수행되어야 할 과제들이다.

이상에서 열거한 과제들 중 (1), (2) 항에 대한 연구는 상당히 진전되어 이미 현장에서 이용단계에 접어들었다고 볼 수 있으며, (3), (4) 항에 대한 연구는 미국, 일본 등지에서 주력하고 있지만 국내에서는 아직 정착되지 못한 상태이다.

실제 기계구조물의 응력상태는 여러 가지 응력이 중첩되어 복잡한 응력상태 하에 놓이게 되는 경우가 대부분이다.

따라서 본 연구는 이러한 복합응력상태 하에서 균열을 가진 구조물에 대한 정확한 응력확대계수 및 수명평가방법을 확립하기 위하여 영향함수법

(Influence Function Method : IFM)을 사용하여 보다 효율적으로 응력확대계수를 구하고, 이를 실제 복합응력장 하의 균열부재에 대한 잔류피로수명평가에 쉽게 응용할 수 있는 방법을 개발함에 주목적 이 있다.

또한, 응력확대계수를 구하기 위한 영향함수법의 유용성을 검증하기 위하여 다른 방법들에 의해 구한 응력확대계수들과 비교하고 실제 단순인장 반복하중 하의 피로수명 실험결과와 본 방법에 의한 결과를 비교하였으며, 기존의 참고문헌에 수록된 자료 및 방법에 의하여 구한 결과와 본 방법에 의해 구한 결과를 비교, 검토하였다.

2. 수명평가방법의 확립

피로수명을 분석하는데에는 기본함수로 균열선단에서의 응력확대계수(ΔK)와 재료의 균열성장률(da/dN)의 관계식을 이용하는 것이 보편적이다. 이때 응력확대계수는 응력장, 균열치수, 국부적인 구조형상 등의 함수로 주어지며, 이 계수를 구하기 위해 해석적, 수치적 방법이 많이 동원되고 있다.

정확한 수명평가를 위해서는 정확한 응력확대계수의 계산이 필수적이다. 지금까지 비교적 단순한 형태의 균열에 대해서는 해가 구해져서 핸드북 형태^(1,2)로 데이터가 주어지지 않지만, 2차원 또는 3차원의 균열이 복잡한 응력장에 존재할 경우에는 많은 오차와 수치해석에 드는 비용이 엄청나다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 연속 응력확대계수 함수 $K(s)$ 를 생각하고, 이때 $K(s)$ 는 불연속 응력확대계수 K_i 의 집합으로 근사시킬 수 있을 것이다. 그러면 균열성장속도에 대한 방정식은

$$\frac{da_i}{dN} = f(K_i, \text{재료}, \text{환경}, \text{이력})$$

로 표시될 수 있고, 각 항은 다음을 의미한다.

- N : 실제 잔존수명
- K_i : 균열 a_i 에 대응하는 응력확대계수
- f : 실험적으로 구해진 함수

위의 식을 풀어서 실제 잔존수명 예측을 위해서는 다음 4단계의 과정을 거쳐야 될 것이다.

- (1) 단순시험편에 대한 함수 f 를 얻는다. 이 함수 f 는 종종 주어진 K_{mean} , 재료상수, 환경, 구조물의 사용이력 등의 변수의 조합으로서 ΔK 의 역

급수로 표시된다.

$$[예 : da/dN = C \cdot \Delta K^m]$$

(2) 비균열 진전제에 대한 기하학적 형상, 하중 조건 등을 결정한다.

(3) 성장하는 균열을 모델화 한다. 이를 위해 적당한 자유도(2차원 혹은 3차원), 초기 균열길이와 최종 파단시의 균열길이, 성장해가는 균열길이 a_i 와 응력, 기하학 적형상의 함수로서의 응력확대계수 K_i 의 결정이 이 단계에서의 모델화 과정이다.

(4) 위의 식에 K_i 를 대입하여 수명 N 을 결정한다.

위의 과정을 실제 복합응력장 하의 균열에 적용하여 오차를 최소화하고 계산노력을 줄이면서 광역의 균열비에 걸쳐 효율적으로 K_i 를 산출하기 위하여 영향함수법⁽³⁾을 도입하여 사용하였다.

실제 구조물에 있어서의 응력상태는 복잡하며 균열의 형태도 다양하여 수명평가식이 복잡해지기 쉽지만 지나치게 복잡해지면 실제 현장에서 사용이 곤란하므로 간편한 식으로 표현되어야 평가가 쉬울 것이다. 또한 영향함수법에 의한 수명평가방법의 검증과 실구조물에 적용을 위해서는 먼저 응력확대계수 K 값을 계산하기 위해서 사용한 영향함수의 유용성을 검증하여야 할 것이다.

다음 단계로 영향함수법에 의한 수명평가 방법의 검증을 위해서 단순인장 반복하중을 받는 경우의 결과와 본 연구방법에 의해서 평가된 값을 비교하여 잘 일치한다면 복합응력장 상태하에 있는 균열을 가진 실구조물에 대한 잔류피로수명을 평가하고, 이 결과를 실제 현장에서 이용이 가능하도록 한다.

3. 영향함수법

3.1 영향함수법의 개요

영향함수법은 균열면 위치에서의 공칭응력과 영향함수를 곱하여 단순히 적분함으로써 응력확대계수를 간단하게 계산하는 방법이다.

영향함수는 작용하중에 독립적이기 때문에 선형탄성범위 내에서 잦은 천이하중을 받거나 여러 가지 하중이 동시에 작용할 때, 유한요소법이나 경계요소법 등의 수치해석에 의한 방법보다 응력확대계수를 더욱 효율적으로 계산할 수 있으며, 또한 이를 잔류피로수명평가에 쉽게 이용할 수 있다.

종래에는 응력확대계수 K 값을 구하기 위해서

문헌상의 이론해들을 사용하거나, 또는 실제 균열을 가진 구조물의 유한요소 모델이나 경계적분 방정식 모델을 사용하여 응력확대계수 K 의 수치해를 얻어왔다. 그러나 이러한 접근방식들은 큰 규모의 문제들에 대해서는 부적당한 점들이 있으며, 일반성도 결여되어 있다. 또한, 균열을 가진 이상화 모델들의 2차원, 3차원 수치 응력해석이 반복됨에 따라 비용과 시간이 많이 소요되고, 미숙한 프로그램 운용이나 사용자의 경험부족에 기인한 오차의 영향을 받는다. 이러한 오차를 줄이고 비용을 최소화하면서 수 많은 기하학적 형상에 대하여 응력확대계수 K 값을 계산하기 위해서 여러가지 방법을 문헌을 통해 조사한 후, 본 연구에서는 영향계수(influence coefficient) 또는 영향함수(influence function)의 사용을 도입하였다.

영향함수법은 가중함수법(weight function method) 또는 Green's Function Method 라고도 하며, Bueckner⁽⁴⁾와 Rice⁽⁵⁾가 처음 제시한 이래로 응력확대계수를 계산하는 효율적인 방법으로 지금도 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

영향함수법의 주요특징은 아래와 같다.

(1) 응력해석의 양을 현저히 줄인다.

(2) 복합력장, 특히 3차원 문제에 대한 정확도가 높다.

(3) 일단 하나의 기하학적 형상에 대하여 영향함수가 결정되면, 비균열 응력장으로부터 어떠한 균열치수와 형상에 대하여도 응력확대계수 K 가 계산될 수 있다.

(4) 탄성중첩의 사용에 의하여 영향함수법은 구조물에서의 균열진전에 기인한 균열치수의 증가로써 응력재분포를 적절히 설명한다. 따라서, 각 균열치수에 대한 응력해석에 있어서 균열을 포함할 필요가 없다. 또한, 기하학적 형상에만 의존하는 영향함수는 비교적 단순한 하중조건과 가해진 복합응력장으로부터 정확하게 얻어질 수 있다.

균열면상에서 임의의 분포응력을 받는 균열문제를 풀기 위하여 먼저 미분하중 $\sigma(x) dx$ 를 고려하면, 아래와 같이 주어진 응력확대계수 K 의 미분증가를 야기시킨다.

$$dK_I(x) = h_I(x, geometry) \sigma(x) dx \quad (1)$$

이때 응력확대계수 K 는 아래와 같이 주어진다.

$$K_I = \int_{L,a} dK_I(x)$$

$$= \int_{L_a} h_1(x, geometry) \sigma(x) dx \quad (2)$$

여기에서, L_a 는 x 축에 평행한 일직선의 균열면 경계이다.

간단히 말해서 영향함수 h 는 어떤 위치, 일반적으로 균열면상에서의 단위 점하중으로부터 발생하는 응력확대계수 K 값이다.

Rice⁽⁶⁾는 균열면변위 w_y (COD)와 기준 응력확대계수인 K_{IR} 에 기초한 다음 형태의 영향함수식을 유도하였다.

$$h_1(x, geometry) = \frac{H}{K_{IR}} \frac{\partial w_y}{\partial A} \quad (3)$$

여기에서 A 는 균열면적,

$$H = \begin{cases} \frac{E}{1-\nu^2} & (\text{평면변형}) \\ E & (\text{평면응력}) \end{cases} \quad (4)$$

이며, ν 는 푸아송비(Poisson's ratio)이다.

식 (2)의 유용성을 예증하기 위하여, 대칭응력 하의 중앙균열을 가진 평판을 고려하였다.

어떤 대칭응력장, $\sigma(x) = \sigma(-x)$ 에 대하여, 무한평판에 대한 영향함수는 Paris⁽⁶⁾에 의해서 아래와 같이 구해졌다.

$$h = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{a}{a^2 - x^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad 0 \leq x \leq a \quad (5)$$

식 (2)와 식 (5)은 일정한 $\sigma(x) (= \sigma)$ 의 경우에 대하여 아래의 식으로 간단히 된다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

여기에서,

a : 균열길이의 반

σ : 균열면상에 가해진 균일 분포응력

이와 같이 영향함수법은 탄성응력장의 균열에 의한 재분포를 정확하게 표시할 수 있다.

복합응력장 취급에 대한 영향함수법의 유용성은 영향함수 h 가 변동하는 치수 매개변수들과 함께 하나의 특별한 균열을 가진 기하학적 형상에 대하여 얻어진다면 명확해진다.

3.2 연구에 적용된 영향함수

대칭하중 하의 중앙균열 $2a$ 를 가진 폭 $2b$ 의 평판과 같은 2차원 문제에 있어서, 3가지 하중모드 즉, 모드 I (인장), 모드 II (전단), 모드 III (혼합)

각각에 대한 영향함수는 아래와 같이 나타난다.⁽⁷⁾

$$h_{III} = \left[\frac{2 \tan \frac{\pi a}{2b}}{b \left\{ 1 - \left(\frac{\cos \frac{\pi a}{2b}}{\cos \frac{\pi x}{2b}} \right)^2 \right\}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$h_I = h_{II} = \left\{ 1 + 0.2967 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2} \left(1 - \cos \frac{\pi a}{2b} \right) \right\} h_{III} \quad (\pm 1\% \text{ 오차}) \quad (8)$$

무한평판($a/2b \rightarrow 0$)의 경우, 3가지 하중모드에 대한 위의 영향함수들은 모두 식 (5)로 축소된다.

3.3 영향함수의 유용성 검증

본 연구에서 응력확대계수 K 값을 계산하기 위해서 사용한 영향함수 h 의 유용성을 검증하기 위해서, 먼저 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS 5.0A⁽⁸⁾를 사용하여 중앙균열 $2a$ 를 가진 폭 $2b$ 의 평판을 모델링한 후, 여기에 임의의 균일 분포하중을 가하여 응력확대계수 K 값을 구하였다.

다음 단계로, 위의 방법에 의해서 구해진 응력확대계수 K 값과의 비교·분석을 위해서 주어진 균열의 기하학적 형상에 대한 영향함수 h 를 이용하여 식 (2)의 수치적분을 행하여 응력확대계수 K 값을 구하는 프로그램을 작성하였다.

또한, 핸드북 형태의 참고문헌⁽⁷⁾에 수록된 식 (9)와 같은 계산공식을 사용하여 응력확대계수 K 값을 구하였다.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F(a/b) \\ F(a/b) = [1 - 0.025(a/b)^2 + 0.06(a/b)^4] \cdot \sqrt{\sec \frac{\pi a}{2b}} \quad (9)$$

(정확도: 모든 a/b 에 대해 0.1%의 오차)

위에 나열한 세가지 방법에 의해서 각각 구해진 응력확대계수 K 의 값들을 비교·분석함으로써, 본 연구에서 응력확대계수 K 값을 계산하기 위해서 사용한 영향함수 h 의 유용성을 검증하였다.

균열비(a/b)에 따라 위의 세가지 방법에 의해서 각각 구해진 응력확대계수 K 의 값들을 비교하여 Table 1에 나타내었으며, 또한 이 결과를 Fig. 1에 도식화하였다.

Table 1 Comparison of near-exact, IFM and FEM-calculated stress intensity factors for center-cracked plate under uniform stresses.

a/b	Near exact F (a/b)	IFM		FEM	
		F (a/b)	Error (%)	F (a/b)	Error (%)
0.1	1.0060	1.0089	0.288	1.0346	2.843
0.2	1.0245	1.0287	0.410	1.0410	1.610
0.3	1.0575	1.0637	0.586	1.0556	0.180
0.4	1.1091	1.1172	0.730	1.1185	0.848
0.5	1.1862	1.1954	0.776	1.1968	0.894
0.6	1.3027	1.3101	0.568	1.2987	0.307
0.7	1.4873	1.4872	0.007	1.4747	0.847
0.8	1.8143	1.7948	1.075	1.8098	0.248
0.9	2.5767	2.5062	2.736	2.5713	0.210

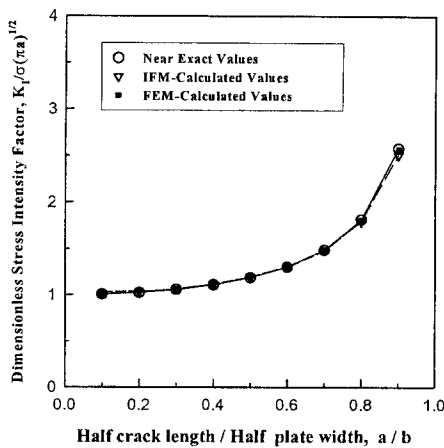
**Fig. 1** Comparison of near-exact, IFM and FEM-calculated stress intensity factors for center-cracked plate under uniform stress.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 위의 세가지 방법에 의해서 각각 구해진 응력확대계수의 값이 거의 일치하였다.

4. 피로균열성장 관계식 및 복합응력장

피로균열성장거동은 반복하중 사이클당의 균열성장길이 da/dN , 즉 피로균열성장률을 응력확대계수범위 ΔK 의 함수로서 나타낼 때, 이 거동은 3 단계의 균열성장 형태로 분류될 수 있음이 잘 알려져 있다.

제 1단계는 균열성장의 하한계값 ΔK_{th} 부근의 균열성장 거동이며, 응력비, 환경 등의 영향을 크게 받는다.

제 2단계는 연속체역학을 적용할 수 있는 선형구간으로 Paris의 식, $da/dN = C \cdot (\Delta K)^m$ 으로 정리될 수 있다.⁽¹⁰⁾

제 3단계는 K_{max} 이 파괴인성치 K_{Ic} 값에 근접함에 따라 정적인 파괴형태가 피로특성과 함께 나타나는 영역으로, 응력비 등의 영향이 크며, Paris의 식은 균열성장수명이 과대평가됨을 알 수 있다.

본 연구에서의 균열성장해석은 이와 같은 약점을 보완하면서 2단계와 3단계에서의 응력비의 영향을 나타내는 아래와 같은 Forman의 식⁽¹¹⁾을 사용하였다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)K_{Ic} - \Delta K} \quad (10)$$

여기에서, R 은 응력비 ($R = K_{min}/K_{max} = \sigma_{min}/\sigma_{max}$), K_{Ic} 는 파괴인성치이다.

본 연구에서는 외부작용응력과 용접잔류응력이 중첩되는 형태의 복합응력장을 도입하여 균열부재에 대한 잔류피로수명의 예측을 시도하였다.

외부작용응력과 용접잔류응력의 중첩으로 예상되는 응력확대계수 범위에 대한 피로균열전파속도를 알아보기 위하여 위의 식 (10)을 다음과 같이 이용하였다.⁽¹²⁾

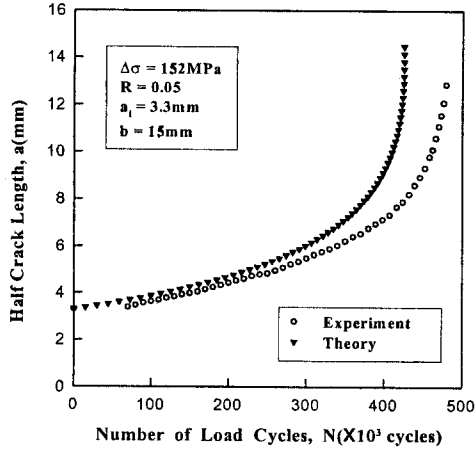


Fig. 2 Fatigue crack growth behavior in a 30 mm width specimen without residual stresses.

$$\frac{da}{dN} = \frac{C(\Delta K_{eff})^n}{(1 - R_{eff})K_{IC} - \Delta K_{eff}} \quad (11)$$

위의 식 (11)에서,

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} \quad (12)$$

로 구할 수 있고, 유효 응력확대계수 범위 ΔK_{eff} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta K_{eff} &= (K_{max} + K_{res}) - (K_{min} + K_{res}) \\ &= K_{max} - K_{min} = \Delta K \end{aligned} \quad (13)$$

위의 식 (12), (13)에 의해서 구한 값들을 식 (11)에 대입함으로써 외부작용응력과 용접잔류응력이 중첩되는 형태의 복합응력장 하에서의 균열부재에 대한 균열전파속도를 알 수 있으며, 또한 식 (11)을 아래의 식 (14)와 같이 적분함으로써 잔류피로수명을 예측할 수 있다.

$$N(a) = \int_0^a \frac{da}{(da/dN)} \quad (14)$$

5. 단순인장 반복하중하의 피로수명 실험결과와의 비교

앞서 기술한 영향함수법에 의한 수명평가 결과의 검증을 위해서 단순인장 반복하중을 받는 경우의 피로수명 실험결과를 구한 후, 이를 본 연구방법에 의해서 평가된 결과와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다.

실험에 사용된 시편의 재료는 Ni-Cr-Mo-V 합금강이다. 시험조건은 인장-인장의 정현파형(sine wave)으로 응력비(stress ratio, R)를 0.05로 하였고, 주파수는 10 Hz로 하여 하중제어방식으로 실험을 행하였다. 균열길이 측정은 1/100 mm까지 측정이 가능한 이동식 광학현미경을 사용하였다.

시편의 형상은 CCT(Center-Cracked Tension Specimen) 시험편이며, 초기 균열길이의 반(a_i) = 3.3mm, 판폭의 반(b) = 15 mm, 두께(t) = 3 mm이다. 또한, 식 (10)에서의 재료상수 C , n 의 값은 각각 $C = 9.8E-11$, $n = 3.20$ 이며, 재료의 파괴인성치 K_{IC} 는 164.6 $MPa\sqrt{m}$ 이다.

위의 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 실제 시험편의 피로수명 실험결과와 본 연구방법에 의해서 평가된 결과와는 전체 피로수명에서 약 13%의 오차가 있었다.

6. 예제해석 결과 및 검토

실제 복합응력장 하에서의 잔류피로수명평가를 위해서 참고문헌⁽¹³⁾에 수록된 시편들의 형상과 각 시편들에 대한 초기 용접잔류응력 분포를 이용하여 영향함수법에 의한 잔류피로수명 예측을 시도하였다.

시편의 재료는 열간압연 및 불림처리된 저합금 중강도강인 18G2AV강이며, 시편의 형상은 CCT 시험편이며, 초기균열길이의 반(a_i) = 7 mm, 판폭의 반(b) = 75 mm, 두께(t) = 4 mm이다. 또한, 식 (10)에서의 재료상수 C , n 의 값은 각각 $C = 8.45E-10$, $n = 2.54$ 이며, 재료의 파괴인성치 K_{IC} 는 108.5 $MPa\sqrt{m}$ 이다.

Glinka⁽¹³⁾는 이론적 해석에서 외부작용응력에 의한 응력확대계수 $K = f(\sigma)$ 와 잔류응력에 의한 응력확대계수 $K_{res} = f(\sigma_r)$ 를 아래의 (15) 및 (16)식과 같은 각각 다른 계산식들을 사용하여 구한 후, 식 (17)과 같이 중첩함으로써 유효 응력확대계수 K_{eff} 를 구하였다.

또한, Glinka는 잔류응력에 의한 응력확대계수 K_{res} 를 구하는 과정에서 계산을 간단히하기 위해서, 측정된 실제 잔류응력 분포를 직사각형의 단순화된 응력분포로 대체하여 해석하였다.

$$\begin{aligned}
 K &= \sigma \sqrt{a} \cdot Y \\
 &= \sigma \sqrt{a} \cdot \left[1.77 + 0.227 \left(\frac{2a}{W} \right) \right. \\
 &\quad \left. - 0.51 \left(\frac{2a}{W} \right)^2 + 2.7 \left(\frac{2a}{W} \right)^3 \right] \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$K_{res} = \int_0^a \sigma_r(x) \left[\frac{2 \sin \frac{\pi(a+x)}{W}}{W \cdot \sin \frac{2\pi a}{W} \cdot \sin \frac{\pi(a-x)}{W}} \right]^{\frac{1}{2}} dx \quad (16)$$

$$K_{eff} = K + K_{res} \quad (17)$$

여기에서,

a : 균열길이의 반

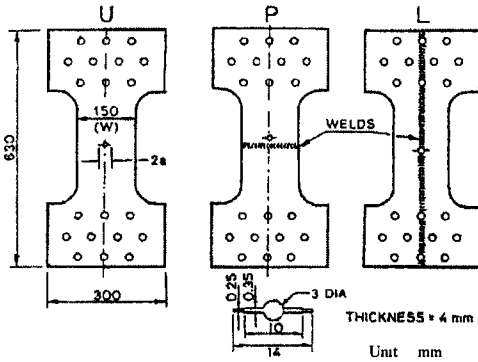


Fig. 3 Specimens shape and dimension in Glinka's tests. (U : Unwelded, P : butt perpendicular weld, L : Longitudinal weld).

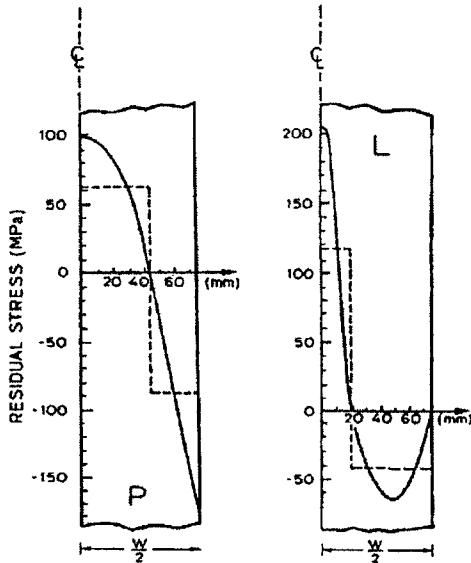


Fig. 4 Residual stresses distributions in the plane of fatigue crack growth in Glinka's test.

W : 판 폭

x : 판 중심선으로부터의 거리

$\sigma_r(x)$: 잔류응력

본 연구에서는 외부작용응력에 의한 응력확대계수와 잔류응력에 의한 응력확대계수를 각각 다른 계산식들을 사용하여 구하는 번거로움과 계산노력 및 시간을 줄이기 위하여 영향함수법을 사용하여 모든 응력확대계수를 계산하였다. 또한, 피로균열 전파 과정에서 잔류응력의 영향을 Glinka의 이론적 해석방법에서보다 더 실질적으로 알아보기 위해서 실제 잔류응력 분포곡선을 입력하였다.

Fig. 3과 Fig. 4에 나타낸 Glinka의 실험과 이론적 해석에 사용된 시편들의 형상과 각 시편에 대한 초기 용접잔류응력 분포를 이용하여 본 연구방법에 의해 해석된 결과들을 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 및 Fig. 8에 각각 나타내었다.

Fig. 5과 Fig. 6에 나타낸 해석결과들은 U, P 및 L 시편에서의 피로균열성장속도의 차이를 명확히 보여주고 있다. 또한, P 및 L 시편에서의 잔류응력의 영향을 명확히 나타내고 있다.

먼저 L 시편의 경우를 살펴보면, 피로균열길이가 $a < 20$ mm일 때에는 균열이 인장 잔류응력 영역내에서만 전파되므로 이 인장 잔류응력의 영향에 의해 급속한 균열성장속도를 보이다가, $a > 20$ mm

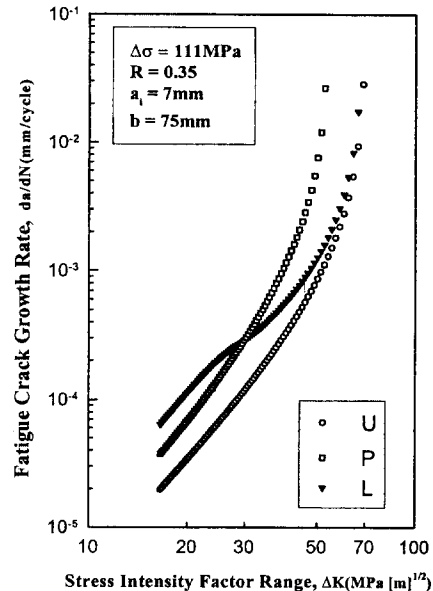


Fig. 5 Constant amplitude fatigue crack growth rates in 18G2AV steel specimens with applied stress ratio $R=0.35$.

에서는 압축 잔류응력의 영향으로 인해 비교적 낮은 피로균열성장속도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

반면, P 시편의 경우에는 전체 피로균열 전파가 인장 잔류응력내에서만 일어나므로 L 시편의 경우와 같이 균열성장속도가 급격히 변화하는 점이 나타나지 않으며, U 시편에서의 균열성장속도와 거의 평행한 양상을 보이고 있다.

또한, 응력환대계수 범위가 $\Delta K > 30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 인 영역에서는 L 시편에서의 피로균열성장속도가 P 시편에서의 피로균열성장속도보다 훨씬 낮아지며, 피로균열성장 후반부에 가서는 U 시편에서의 피로균열성장속도와 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에 나타난 해석결과들은 피로수명에 대한 잔류응력의 영향을 잘 보여주고 있다. 위의 그림들에서 나타난 바와 같이 용접부 중앙으로부터 피로균열이 진전될 때, 중앙부에 분포하는 인장 잔류응력은 초기의 피로균열성장속도를 급격히 증가시키며, 전체적인 피로수명을 크게 감소시킬 수 있다. 또한 L 시편, 즉 균열진전방향에 대하여 수직으로 용접된 시편에서의 피로수명이 가장 짧음을 알 수 있다.

위의 해석결과들에서 나타난 한가지 흥미로운 사실은 L 시편의 경우, 피로균열길이가 $a > 20 \text{ mm}$ 에

서는 피로균열성장속도가 P 시편의 경우에서보다 훨씬 낮아지지만, 전체 피로수명은 P 시편보다 L 시편이 더 짧다는 사실이다. 그 이유는 피로균열길이 $a < 20 \text{ mm}$ 에서 L 시편에서의 피로균열이 P 시편에서의 피로균열보다 더 빠르게 성장했기 때문이다. 이러한 사실에서 피로균열성장 초기의 균열성장속도가 전체 피로수명에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서, 피로균열성장 초기의 균열성장속도를 감소시키므로써 전체적인 피로수명을 향상시킬 수 있을 것이다.

본 연구방법에 의해 해석된 결과들과 Fig. 9 및

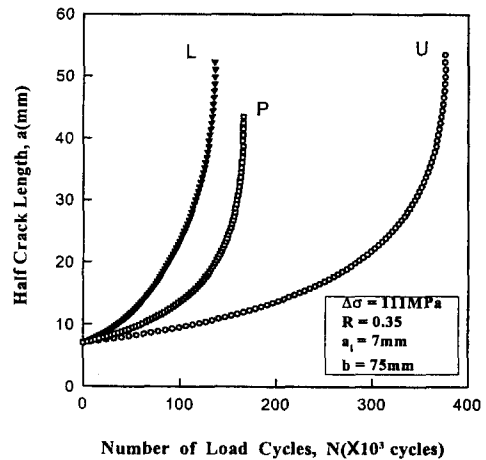


Fig. 7 Fatigue crack growth behavior of 18G2AV steel specimens with applied stress ratio $R = 0.35$.

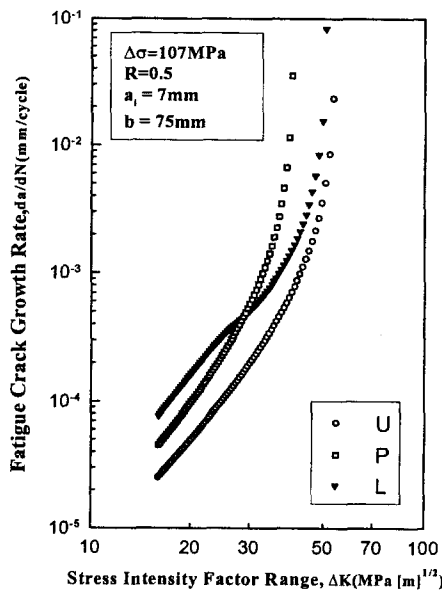


Fig. 6 Constant amplitude fatigue crack growth rates in 18G2AV steel specimens with applied stress ratio $R = 0.5$.

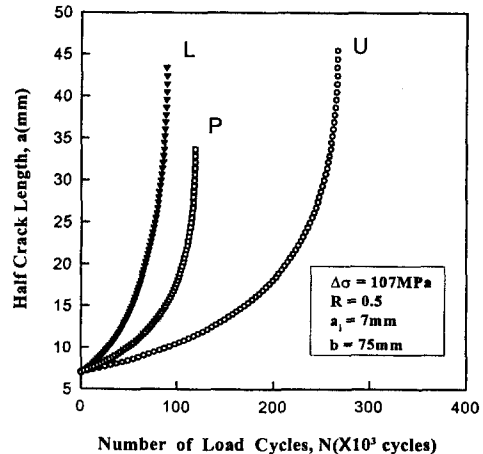


Fig. 8 Fatigue crack growth behavior of 18G2AV steel specimens with applied stress ratio $R = 0.5$.

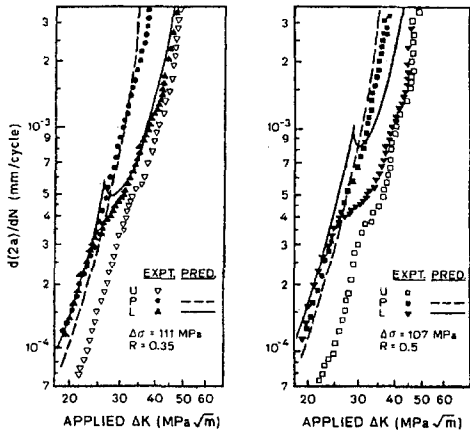


Fig. 9 Constant amplitude fatigue crack growth rates in 18G2AV steel specimens. (Glinka's data)

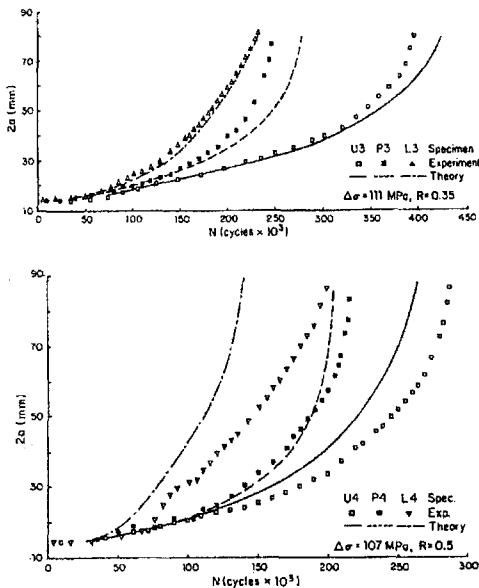


Fig. 10 Fatigue crack growth behavior of 18G2AV steel specimens U, P and L with applied stress ratio R=0.35, 0.5. (Glinka's data)

Fig. 10에 나타낸 Glinka의 시험 및 이론적 해석결과를 비교해 보면, 용접되지 않은 건전재(U 시편)의 경우에는 전체 피로수명이 거의 일치하고 있으나, 용접된 시편들(P 및 L 시편)의 경우에는 본 연구방법에 의해서 해석된 전체 피로수명이 훨씬 짧게 나타났다. 이는 잔류응력에 의한 응력확대계수를 계산하는 과정에서 잔류응력 분포를 입력하는 방법이 다르기 때문이며, 직사각형으로 단순화된

잔류응력 분포보다 실제 잔류응력 분포에서 중앙부에 분포하는 인장 잔류응력이 훨씬 더 크기 때문에 이 인장 잔류응력이 피로균열성장 초기의 균열성장속도를 더 급격히 증가시켜 Glinka의 이론적 해석결과보다 전체 피로수명이 더 짧게 나타난 것으로 해석할 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 파괴의 기준으로 사용되는 응력확대계수를 구하기 위한 영향함수법의 유용성을 다른 방법들에 의해서 구한 응력확대계수들과 비교하여 검증하고 실제 단순인장 반복하중하의 피로수명 실험결과와 영향함수법에 의해 평가된 결과를 비교하였으며, 참고문헌에 수록된 시편들의 형상과 각 시편들에 대한 초기 용접잔류응력 분포를 이용하여 영향함수법에 의한 잔류피로수명을 평가하였다.

본 논문에서의 몇가지 영향함수법에 의한 잔류피로수명 평가 에세해석을 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 영향함수법에 의한 잔류피로수명평가를 통하여 실제로 실험을 수행하지 않고도 피로균열성장속도 및 피로수명에 대한 잔류응력의 영향을 알 수 있다.
- (2) 본 논문에서와 같은 해석방식은 잔류응력 뿐만 아니라 열응력 등의 다른 형태의 응력에 대해서도 마찬가지로 적용될 수 있다.
- (3) 본 논문에서의 연구결과는 복합응력장 하에서의 피로균열전파거동 및 피로수명에 대한 1차적인 해답을 제공하는 수단으로 활용할 수 있다.
- (4) 실제 구조설계에 있어서 신뢰성 및 건전성 확보를 위한 방법론으로 이용이 가능하며, 새로운 재료개발 및 강도설계에의 기초자료로 이용이 가능하다.

후 기

본 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME95-C-11)에 의하여 연구되었다.

참고문헌

- (1) Sih, G.C., 1975, "Handbook of Stress Intensity Factor," Lehigh Univ, PA.

- (2) Rooke, D. P. and Cartwright, D. J., 1974, *Compendium of Stress Intensity Factor*, Her Majesty's Stationary Office, London.
- (3) Besuner, P. M., 1975, "The Influence Function Method for Fracture Mechanics and Residual Fatigue Life Analysis of Cracked Components under Complex Stress Fields," FAA-EPRI-75-4-10.
- (4) Bueckner, H. F., 1970, "A Novel Principle for the Computation of Stress Intensity Factors," *Z. Angew. Math. Mech.*, Vol. 50 (9), pp. 125~146.
- (5) Rice, J. R., 1972, "Some Remarks on Elastic Crack-tip Stress Fields," *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 8, pp. 751~758.
- (6) Paris, P. C., Gomez, M. P. and Anderson, W. E., 1961, "A Rational Analytic Theory of Fatigue," *The Trend in Engineering, U. W.*, Vol. 13, No. 1.
- (7) Tada, H., Paris, P. and Irwin, G., 1973, *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, Del Research Corporation.
- (8) *ANSYS Verification Manual for Revision 5.0*, 1992, Swanson Analysis Systems, Inc.
- (9) 황돈영, 1995, "항공기구조의 손상허용설계와 피로수명 예측," 대한기계학회지, 제35권, 제6호, p. 477.
- (10) Paris, P. and Erdogan, F., 1963, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," *Trans. ASME. J. Basic Eng.*, Vol. 85, No. 4, pp. 528~534.
- (11) Forman, R. G., Kearney, V. E. and Eagle, R. M., 1967, "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures," *Trans. ASME. J. Basic Eng.*, Vol. 89, No. 3, pp. 459~464.
- (12) 김상철, 이용복, 1987, "용접잔류응력 영역에서의 피로균열전파에 대한 Forman식의 적용," 대한용접학회지, 제5권, 제1호, pp. 45~46.
- (13) Glinka, Grzegorz, 1979, "Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments under Constant and Variable Amplitude Loads," *Fracture Mechanics, ASTM STP 677*, pp. 198~214.