

# 피로파괴에 반사형 광탄성 실험법 응용

남병균\* · 황재석\*\* · 이효재\* · 백운철\*  
(1999년 8월 23일 접수)

## Application of the Reflective Photoelastic Experimental Method to Fatigue Fracture

Byeung-Gun Nam, Jai-Sug Hawong, Hyo-Jae Lee and Un-Cheol Baek

**Key Words:** Reflective Photoelastic Experiment(반사형 광탄성 실험), Reflective Photoelastic Experimental Hybrid Method(반사형 광탄성 실험의 하이브리드법), Non-Linear Least Square Method(비선형 최소자승법), Fracture Toughness(파괴인성치)

### Abstract

The reflective photoelastic experiment can be used more effectively than the transparent type in industrial fields. Therefore the reflective photoelastic experimental hybrid method applied to the fatigue fracture problems is introduced in this research. It is verified that the reflective photoelastic experimental hybrid method is very useful on the determination of crack propagation velocity and stress intensity factor of the fatigue crack and on the separation of stress components in the vicinity of fatigue crack tip etc.

### 1. 서론

산업이 발전함에 따라 장치의 내구수명이 길어지고 또한 더욱 가혹한 환경에서 사용될 수밖에 없으므로 새로운 소재의 개발도 중요하지만 현재 사용중인 장치와 재료의 안전성과 경제적인 면을 고려하여 손상방지, 잔존수명 예측 및 건전성 평가에 대해 연구의 관심을 집중시킬 필요가 있다. 그러므로 사용 환경에 따른 피로균열의 진전 특성에 관한 연구가 필수적이다. 지금까지는 피로균열 진전길이를 측정함에 있어서 현미경을 사용하여 직접 측정하는 광학적 방법과 표면레프리카법, 컴플라이언스법,<sup>(1)</sup>전위차법,<sup>(2,3)</sup>초음파법<sup>(4)</sup> 등이 널리 사용되어 왔다. 이러한 기존의 방법들은 많은 시간이 요구되는 실험이며 특히 균열주변의 응력분포와 응력성분의 크기를 가시화하고 해석하는데 상당히 무력한 방법들이다. 균열진전 특성 연구에 중요한 상수인 응력확대계수를 구하기 위

해서는 균열진전 길이 뿐만 아니라 실제 작용응력을 알아야 한다. 하지만 다양한 형태의 응력을 받고 있는 현장의 실제 구조물에서 기존의 방법들로부터 정확한 작용 응력을 구한다는 것은 매우 어렵다. 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법은 작용 응력을 구하지 않고 단지 등색선 무늬만으로 응력확대계수를 구할 수 있고, 균열주변의 응력분포와 응력성분 크기를 해석하고 가시화할 수 있다는 이점이 있다. 따라서 본 연구의 주목적은 진전하는 피로균열의 응력확대계수와 응력성분을 각각 구할 수 있는 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법을 체계화하는 것이다. 이 방법을 이용하여 균열진전에 대한 Paris의 재료상수(C, m)<sup>(5)</sup>를 구하고, 광학현미경을 이용한 피로시험에 의한 값과 본 연구에서 제외된 방법에서 얻은 값을 비교, 검토하여 그 유효성을 확인하고자 한다.

피로파괴에 적용된 반사형 광탄성 실험법이 체계화되면 실제 구조물에 작용되는 응력을 모르더라도 단지 등색선 무늬만으로 응력확대계수와 균열진전에 관한 재료상수를 결정할 수 있게 된다. 따라서 재료의 파괴인성치를 구하게 되면, 한계 균열길이와 파단수명을 추정할 수 있게 되어 반사형 광탄성 실험법에 의한 재료의 건전성 평가

\* 영남대학교 대학원

\*\* 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : jshawong@yeungnam.ac.kr

TEL : (053)810-2445 FAX : (053)813-3703

법이 완성될 수 있다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법

Muskhelishvili의 복소함수<sup>(6)</sup>와 Airy 응력함수를 사용하여 원통형 좌표축으로 표현한 응력성분은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \operatorname{Re}\{2\phi'(z) - e^{2\theta}[\bar{z}\phi''(z) + \psi'(z)]\} \\ \sigma_\theta &= \operatorname{Re}\{2\phi'(z) + e^{2\theta}[\bar{z}\phi''(z) + \psi'(z)]\} \quad (1) \\ \tau_{r\theta} &= \operatorname{Im}\{e^{2\theta}[\bar{z}\phi''(z) + \psi'(z)]\} \end{aligned}$$

등방성체 균열문제에서 두 개의 응력함수  $\phi(z)$ 와  $\psi(z)$ 는 해석적 함수이므로 식 (2)처럼 멱급수 형태로 나타낼 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$\phi(z) = \sum_{n=0}^N C_n z^{\frac{n}{2}}, \quad \psi(z) = \sum_{n=0}^N D_n z^{\frac{n}{2}} \quad (2)$$

$z$  평면의 음의 실수축 상에서

$\sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0$  (Traction free condition)이므로,

$$D_n = -\left\{ \frac{n}{2} C_n + (-1)^n \bar{C}_n \right\} \quad (3)$$

여기서,  $C_n = a_n + ib_n$

그러므로, 주어진 하중과 경계조건을 만족하는 계수  $C_n$ 을 구하고 식 (2)를 이용하면 응력함수  $\phi(z)$ 와  $\psi(z)$ 를 구할 수 있다. 이러한 응력함수들을 식 (1)에 대입하여 각각의 응력성분들을 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_x(z) &= \sum_{n=1}^N \operatorname{Re}\{C_n[2f(n, z) - g(n, z)] + (-1)^n \bar{C}_n f(n, z)\} \\ \sigma_y(z) &= \sum_{n=1}^N \operatorname{Re}\{C_n[2f(n, z) + g(n, z)] - (-1)^n \bar{C}_n f(n, z)\} \\ \tau_{xy}(z) &= \sum_{n=1}^N \operatorname{Im}\{C_n g(n, z) - (-1)^n \bar{C}_n f(n, z)\} \quad (4) \end{aligned}$$

그리고, 이러한 응력성분들을 반사형 광응력 법칙에 대입하면 식 (5)를 얻을 수 있다. 식 (5)의 복소계수  $a_n$ 과  $b_n$ 은 광탄성 실험의 비선형 최소사승법(non-linear least Squares method : NLSM)<sup>(8)</sup>을 이용하여 구할 수 있으며, 이렇게 구한 계수들을

식 (2)에 대입하여 균열선단의 응력함수  $\phi(z)$ 와  $\psi(z)$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left( \frac{E_s}{1+\nu_s} \frac{f_\theta \cdot N_f}{2h_c} \right)^2 &= (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (2\tau_{xy})^2 \\ &= \{\operatorname{Re}[-2\sigma_B]\}^2 + \{\operatorname{Im}[2\sigma_B]\}^2 = |2\sigma_B|^2 \\ &= \left\{ 2 \sum_{n=1}^N a_n \operatorname{Re}[f_c(n, z) - g_c(n, z)] \right. \\ &\quad \left. + 2 \sum_{n=1}^N b_n \operatorname{Im}[f_c(n, z) + g_c(n, z)] \right\}^2 \\ &\quad + \left\{ 2 \sum_{n=1}^N a_n \operatorname{Im}[g_c(n, z) - f_c(n, z)] \right. \\ &\quad \left. + 2 \sum_{n=1}^N b_n \operatorname{Re}[f_c(n, z) + g_c(n, z)] \right\}^2 \quad (5) \end{aligned}$$

여기서,  $f_c(n, z) \equiv (-1)^n \frac{n}{2} z^{\frac{n}{2}-1}$

$$g_c(n, z) \equiv \frac{n}{2} \left\{ z \left( \frac{n}{2} - 1 \right) - \frac{n}{2} z \right\} z^{\frac{n}{2}-2}$$

또한, 이러한 응력함수들을 식 (1)에 대입하면 각각의 응력성분들을 구할 수 있다. 해석적 방법, 수치적 방법, 실험적 방법의 장점을 조합한 이러한 일련의 방법을 등방성체 균열에 대한 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법이라 칭한다.

### 2.2 반사형 광탄성 실험법에 의한 피로 균열 진전 속도

Paris에 의하면 시험편의 형상과 하중조건에 따른 피로 균열진전 속도(da/dN)는 응력확대 계수 범위( $\Delta K$ )로써 결정되며 피로균열 진전 속도 법칙은 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (6)$$

여기서 C, m은 균열진전 법칙의 상수 및 지수로서  $m \geq 2$ 이며, 재료, 환경, 주파수, 온도, 응력비의 함수이다.

피로균열 진전속도의 계산은 ASTM에서 제안한 방법들 중 균열길이(a)와 하중반복 횟수(N)에 대한 데이터로부터 식 (7)과 같은 Secant법<sup>(9)</sup>을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\frac{da}{dN} \Big|_{a_i} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (7)$$

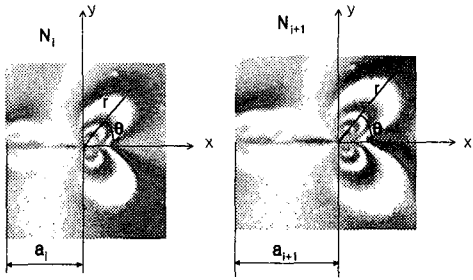


Fig. 1 Measurement of crack propagation length of fatigue test from the reflective photoelastic hybrid method

$$\text{여기서 } a_i^* = \frac{a_{i+1} + a_i}{2}$$

그리고 일반적으로 중앙균열을 가진 유한폭의 판이 균일한 인장응력을 받을 때 응력 확대계수는 H. Tada<sup>(5)</sup>에 의해 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} f(\alpha) \quad (8)$$

여기서

$$f(\alpha) = (1 - 0.025\alpha^2 + 0.06\alpha^4) \sqrt{\sec(\alpha\pi/2)}$$

$$\alpha = 2a/W$$

이러한 유한판의 피로균열진전 문제에 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법을 적용하기 위해서 에폭시 코팅을 한 후, 다음과 같은 방법으로 피로균열 진전 속도와 응력확대 계수를 결정한다.

피로실험 도중 CCD 카메라로 촬영한 Fig. 1과 같은 등색선 무늬와 화상처리 프로그램을 이용하여 균열진전 길이를 구하고 식 (7)의 시컨트법(Secant method)을 이용하여 균열진전 속도를 구한다. 응력확대계수는 Fig. 1과 같은 등색선 무늬에서 임의의 무늬차수(N)와 그 무늬차수의 위치좌표, 그리고 식 (5)의 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법에 적용하여 그 경우의 응력확대계수를 구할 수 있으며, 식 (5)의 복소계수와 응력확대계수와의 관계는 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} K_I &= \sqrt{2\pi} \cdot a_1 \\ K_{II} &= \sqrt{2\pi} \cdot b_1 \end{aligned} \quad (9)$$

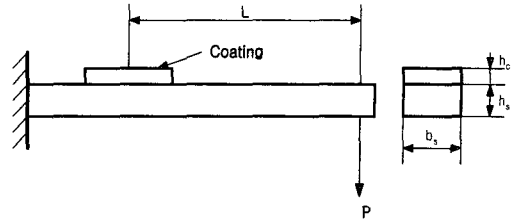


Fig. 2 Standard calibration beam for measuring strain fringe values

### 3. 실험내용 및 방법

반사형 광탄성 실험의 변형률 프린지치는 Fig. 2와 같은 표준 보정보(calibration bar)<sup>(10)</sup>에서 구할 수 있다. L(191mm)은 하중점과 프린지치 측정점과의 거리,  $b_s$ (25mm)는 보의 폭,  $h_s$ (6mm)는 보의 높이를, 그리고  $h_c$ 는 코팅두께를 나타낸다.

알루미늄보에 에폭시를 코팅한 후 보정기(null balance compensator)를 부착한 반사형 광탄성 실험장치를 설치한다. 하중(P)을 증가시키에 따라 하중과 무늬차수의 비(P/N)의 평균치를 계산하고 식 (10)으로부터 변형률 프린지치 ( $f_\epsilon$ )를 계산한다.

$$f_\epsilon = 12(1 + \nu_s) \frac{PLCh_c}{Nbh_s^2 E_s} \quad (10)$$

여기서  $E_s$ 와  $\nu_s$ 는 각각 알루미늄보의 탄성계수와 푸아송의 비를 나타내고, N은 무늬차수를, C는 보정계수를 의미한다.

반사형 광탄성 실험에 의한 균열진전 특성을 연구하기 위해서 CCT(center crack tension)시험편을 이용하여 피로시험을 수행하였으며 여기에 사용된 재료는 1Cr-0.5Mo강이다. 시험편은 ASTM E647-95<sup>(11)</sup> 규격에 따라 Fig. 3과 같이 가공하였으며 중앙 노치는 방전가공(electro discharge machining : EDM)하였다. 피로균열의 정확한 측정을 위하여 시험편의 표면을 #200~#2000의 에머리 페이퍼(emery paper)로 연마 후, 최종적으로 산화 알루미늄 연마제로 마무리 연마를 하여 사용하였다. 본 실험에 사용된 피로시험기는 인스트롱(Instron)사의 유압서보 피로시험기(Instron 8516 series)이며, 최대용량은 10 ton이고, 응력비

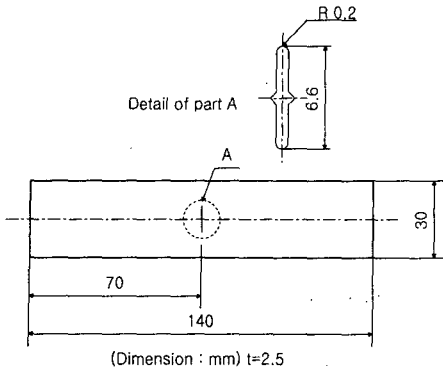


Fig. 3 Geometry of center crack tension specimen

R=0.05의 싸인파형(sine wave)이다. 그리고 인장-인장 하중 형태이며, 주파수는 10Hz이다. 초기 응력확대계수 범위  $\Delta K=13.95 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이고, 실험은도는 상온이고 습도는  $50\pm 5\%$ 이다.

코팅재료는 두께가 2.0mm인 에폭시(Araldite B41, HT903, CIBA)판이고, 코팅재료를 시편에 접착할 때 사용되는 접착제는 PC-1(Measurements Group)이다. 접착 후 0.1mm 실톱으로 에폭시의 균열을 가공하고 날카로운 칼날로 균열선단을 마무리 가공하였다. PC-1 접착제는 빛을 반사시킬 수 있도록 은색을 띠며 접착 전에 약 32℃로 예열한 후, PCH-1 경화제로 10:1의 비율로 혼합하면 상온에서 약 12시간 후에 완전 경화된다. 이와 같은 방법으로 제작한 시험편을 이용하여 Fig. 4와 같이 피로 시험을 수행하였다.

모재인 1Cr-0.5Mo강의 균열 진전 속도와 에폭시 코팅재의 균열 진전 속도를 일치 시키기 위해서는 접착제의 접착강도가 매우 우수해야 한다. 또한 에폭시 코팅재는 감도가 우수해야 하며 최소 2차 이상의 등색선 무늬를 발생시키면서 모재에 강화효과를 주지 않아야 한다. 본 실험에 사용된 PC-1 접착제는 약 5MPa 정도의 접착강도를 가지고 있어서, 1Cr-0.5Mo강의 균열이 진전할 때, 에폭시 코팅재와의 분리 현상(debonding)을 최소화하여 균열진전 속도를 거의 일치시킬 수 있는 우수한 재료임이 확인되었다. 또한 본 실험에 사용된 에폭시 코팅재는 응력프린치지(stress fringe value)가  $f_\sigma=0.11\text{N/m}$ 로 감도가 우수하며, 코팅 두께를 2mm로 했을 때 모재에 강화효과를 주지 않는 범위내에서 비교적 작은 응력상태하에서도 충분한 차수의 등색선 무늬를 발생시킨다.

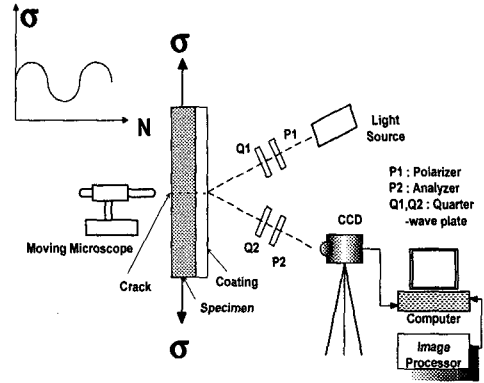


Fig. 4 Schematic diagram of reflective photoelastic experiment applied to the fatigue test

기존의 피로 시험에서는 이동식 광학현미경을 사용하여 진전된 균열길이를 측정하여 응력확대계수의 범위( $\Delta K$ )를 구하지만 본 연구에서는 균열길이를 측정하기 직전에 최대하중( $P_{max}$ ) 및 최소하중( $P_{min}$ )에서 등색선 무늬 사진을 촬영하여 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법으로 응력확대 계수의 범위( $\Delta K$ )를 구하였다. 광학 현미경을 이용한 기존의 방법과 본 연구의 반사형 광탄성 하이브리드법을 이용하여 구한 응력확대 계수 범위들을 비교함으로써 본 연구의 유효성을 판단할 수 있다. 또한 등색선 무늬를 이용하여 구한 응력확대계수 범위를 이용하여 균열진전에 대한 재료 상수인 C, m값을 구하여 기존의 광학 현미경을 이용하여 구한 것과 비교한다.

실제로 반복하중을 받고 있는 피로시험 중에 등색선 무늬를 촬영하는 것은 쉬운 일이 아니다.

피로시험의 주파수(10Hz)에 맞추어 1초에 10번 광원을 터뜨리는 스트로보스코프(stroboscope : Model 236)를 사용하여 사진을 촬영하였으나 사진이 찍히는 순간의 정확한 하중을 측정하기가 어렵고 사진의 선명도도 매우 낮았다. 따라서 본 연구에서는 반복하중을 멈추고 균열길이를 측정하기 직전에 초기에 설정한 최대하중( $P_{max}$ ) 및 최소하중( $P_{min}$ )을 가하여 등색선 무늬를 촬영했다. 최소하중은 최대하중에 비해서 미소한 하중이며, 또한 등색선 무늬도 거의 나타나지 않는다. 따라서 최대하중에서만 등색선 무늬를 촬영하고 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법을 적용하여 응력확대계수의 범위( $\Delta K$ )를 결정하였다.

화상처리 프로그램(Image processing program)을 이용하여 등색선 무늬의 전영역에서 70~100개 정도의 데이터를 취하였으며, 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법으로 등색선 무늬를 다시 그래픽하고 응력확대계수를 구하였다. 에폭시 코팅재의 균열진전길어도 역시 화상처리 프로그램을 이용하여 등색선 사진을 수배 정도 확대하여 1/100mm 오차까지 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Araldite B41 고온 에폭시를 표준 보정보에 PC-1으로 접착하여 측정된 변형률 프린지치는  $f_e = 4.597 \times 10^{-6} m/fringe$  이다.

피로시험에서 균열진전길이를 측정하기 직전에 최대하중 ( $P_{max} = 10820.4N$ )에서 촬영한 27장의 실제 등색선 무늬 중에 7장을 Fig. 5에 나타내었다. 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법으로 등색선 무늬를 그래픽하여 실제 등색선 무늬와 비교하였으며, 또한 균열길이와 응력확대계수를 등색선 무늬에 의한 방법(isochromatic method)과 이 동식 광학 현미경에 의한 방법(microscopic method)으로 각각 구하여 비교하였다. Fig. 5에서  $a_i$ 와  $a_m$ 은 각각 등색선 무늬에서 측정된 균열길이와 현미경에 의한 방법으로 측정된 균열길이를 나타낸다. 마찬가지로  $K_i$ 와  $K_m$ 은 등색선 무늬와 현미경에 의한 방법에서 구한 응력확대계수( $K_I$ )를 의미한다.

각각의 경우에서 거의 유사한 형태의 등색선 무늬를 보이고 있다. 1Cr-0.5Mo강의 균열진전 길이와 코팅된 에폭시의 균열진전 길이가 일치하는 것이 가장 이상적이지만, 실제의 실험에서는 균열진전 길이가 완벽하게 일치하지는 않았다. 실험의 초기(P1~P3,  $N_i/N_f = 0.39 \sim 0.50$ )에는 1Cr-0.5Mo 강 of 균열이 진전하는 동안에도 에폭시 코팅재의 균열은 전혀 진전하지 않았지만 P4 ( $N_i/N_f = 0.56$ )부터 조금씩 진전하기 시작하여 마지막으로 갈수록 균열길이가 비슷해져 가는 현상을 보였다. 여기서  $N_i$ 는 하중 반복수를,  $N_f$ 는 파단시의 하중 반복수를 의미한다. 응력확대계수 범위도 초기(P1)에는 약  $1.6 MPa\sqrt{m}$  정도의 차이를 보이지만 균열이 진전할수록 더욱더 근사한

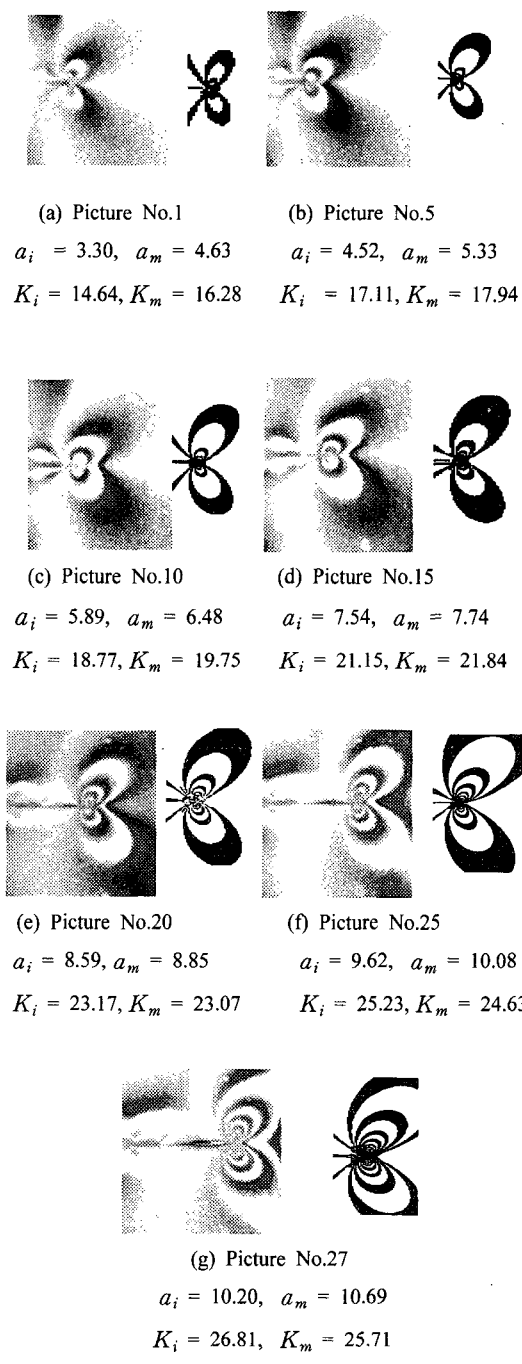


Fig. 5 Crack length and stress intensity factor from actual isochromatics and microscopic method

값을 나타내고 있다. 판단되기 직전(P26~P27,  $N_i/N_f = \text{약 } 0.94$ )에는 오히려 등색선 무늬에서 구한 응력확대계수 범위가 현미경에 의한 방법으로 구한 응력확대계수 범위보다 더 크다. 이러한 응력확대계수 범위의 차이는 에폭시 코팅재의 균열진전 속도가 1Cr-0.5Mo강의 균열진전 속도보다 늦는 것이 주원인이고, 또한 균열길이가 증가함에 따라 최소하중에 의한 응력확대계수( $K_{min}$ )도 비교적 큰 값을 가지지만 이를 고려하지 않았기 때문이다. 따라서 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법을 이용하면 작용 응력을 모르더라도 단지 등색선 무늬만으로 피로하중을 받고 있는 재료의 응력확대계수를 비교적 정확히 구할 수 있다.

Fig. 6은 균열길이와 반복횟수의 관계인 a-N 선도를 나타낸다. Fig. 7은 균열진전 속도와 응력확대계수 범위의 관계를 Fig. 5의 데이터와 식(7)의 시컨트(Secant)법을 사용해서 양대수 그래프로 나타낸 것이다. Paris의 피로균열 안전성장 영역에서 최소자승법(Least squares method)을 적용하고 직선의 관계를 구하여 균열진전 상수(C)와 균열진전 지수(m)를 구하였다. 이 동식 광학 현미경에 의한 방법(Microscopic method)과 등색선 무늬에 의한 방법(Isochromatic method)을 동일 선상에 표시하였다.

이때 코팅재의 균열이 진전하지 않거나 모재의 균열길이와 차이가 많은 구간(P1~P5,  $N_i/N_f = 0.39 \sim 0.59$ )의 데이터는 사용하지 않았기 때문에 각각의 방법을 사용한 실험 데이터와 그 결과는 거의 일치함을 알 수 있고, C, m 값도 신뢰성이 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에서 현미경에 의한 방법과 등색선 무늬에 의한 방법으로 구한 균열진전 상수(C)와 지수(m)는 비교적 근사한 값을 나타내고 있다. 현미경에 의한 방법을 이용한 기존의 피로시험이 갖는 오차를 감안할 때 이는 비교적 정확한 값이라 할 수 있다. 따라서 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법을 이용하면 피로실험의 균열진전에 관한 재료상수인 C, m 값을 구할 수 있다. 즉, 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법은 피로균열 진전 특성을 연구할 수 있는 유용한 방법중의 하나이다.

Fig. 8은 Fig. 5(e) ( $N_i/N_f = 0.90$ )에 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법을 적용하여 구한 각각의

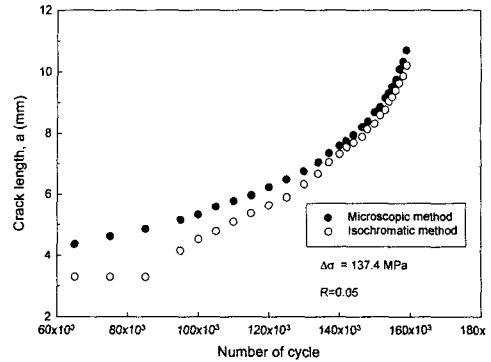


Fig. 6 Relationship between crack length and loading cycle

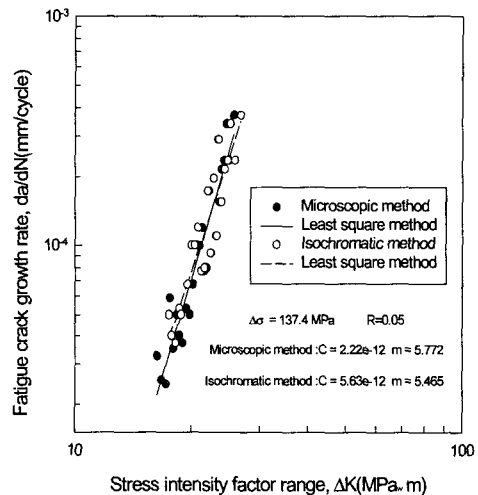
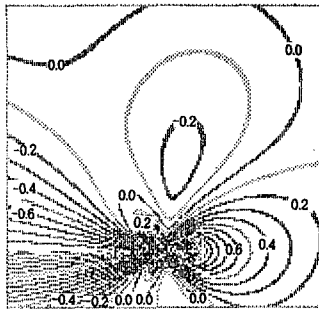


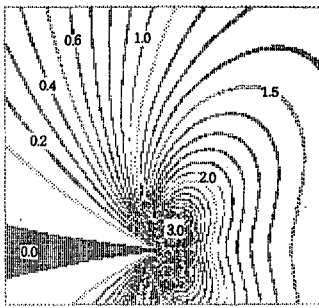
Fig. 7 Relationship between  $\Delta K$  and  $da/dN$

응력성분의 분포도이다. 각각의 응력성분들을 균일 분포 응력( $\sigma_0$ )으로 무차원하여 0.1차 단위로 나타내었다. 균열선상에서  $\sigma_y$ 와  $\tau_{xy}$ 가 0으로 균열의 자유 표면력 조건을 정확히 만족하고 있으며, 또한 수평 균열이므로 응력성분  $\sigma_y$ 는 균열 진행축(x축)에 대하여 대칭성을 띤다. 그러므로 본 연구에서 사용된 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법은 유효하다는 것을 알 수 있다. 또 피로 균열진전 문제에 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법을 이용하면 균열 주변의 응력성분의 크기를 정확히 구할 수 있다. 그리고 본 연구에서 제안한 반사형 광탄성 실험을 이용한 피로실험법은 반복하중을 받는 구조물의 피로파괴 거동을 기존의 피로파괴와 다른 관점으로도 연구하는데

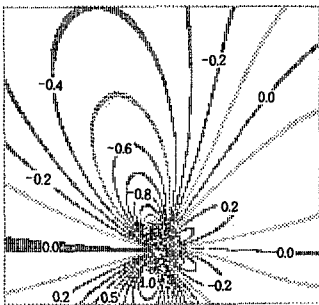
이용될 수 있다. 그리고 반사형 광탄성 실험의 하이브리드법은 피로균열 진전 특성을 연구하고 균열주변의 응력상태를 가시화 할 수 있는 유용한 방법이다.



(a)  $\sigma_x/\sigma_0$



(b)  $\sigma_y/\sigma_0$



(c)  $\tau_{xy}/\sigma_0$

**Fig. 8** Contour plot of  $\sigma_x/\sigma_0$ ,  $\sigma_y/\sigma_0$  and  $\tau_{xy}/\sigma_0$  obtained from the reflective photoelastic hybrid method ( $\beta=0^\circ$ ,  $2a/w=0.57$ ,  $h_c=2.0\text{mm}$ ,  $\sigma_0=144.3\text{MPa}$ )

## 5. 결 론

본 연구에서 제안한 피로파괴에 적용될 수 있는 반사형 광탄성 실험법을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 모재와 코팅재의 균열진전 속도의 차이를 최소화하기 위해서 접착력이 우수한 PC-1 접착제를 사용하여 분리현상(debonding)을 방지하였으며, 감도가 우수한 에폭시 코팅재를 2mm 두께로 사용함으로써 모재에 강화효과를 주지 않는 범위내에서 충분한 차수의 등색선 무늬를 얻을 수 있었다.

(2) 피로균열 진전 속도, 피로하중하의 응력확대 계수 그리고 피로균열 주변의 응력분포와 응력성분의 크기 등을 정확히 얻을 수 있는 반사형 광탄성 실험법이 체계화 되었다.

(3) 피로시험에 적용된 반사형 광탄성 반사형 광탄성 실험법으로 얻은 a-N선도에서 피로시험초기( $N_i/N_f=0.39\sim 0.59$ )의 데이터를 제외한 영역의 데이터를 이용하면, 정확한 응력확대계수와 균열진전 상수(C), 지수(m) 등을 구할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 교육부 학술연구조성비(ME97-C-26)에 의하여 연구되었습.

## 참고문헌

- (1) ASTM Standard, 1981, E813-81, ASTM.
- (2) Johnson, H. H., 1965, Mats. Research and Standard, 5, 442.
- (3) Watt, K. R., 1980, The Measurement of Crack Length and Space during Fracture and Fatigue, p. 202, Engineering Materials Advisory Services LTD.
- (4) 日本機械學會基準, 1981, 日本機械學會, E 813-81
- (5) "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," 1991, ASTM E647-88a.
- (6) Muskhelishvili, N. I., 1963, Some Basic

- Problems of the Mathematical Theory of Elasticity, 4th Edition, P. Noordhoff Ltd., Groningen, Netherlands.
- (7) Sih, G. C. and Liebowitz, H., 1968, *Mathematical Theories of Brittle Fracture, Fracture an Advanced Treatise*, Academic Press, New York, Vol. II, pp. 67~190.
- (8) 신동철, 황재석, 이효재, 남정환, 권오성, 1998, “등방성 체 파괴역학에 투과형 광탄성 실험의 하이브리드법 적용,” 대한기계학회 논문집 A권, 제22권, 제5호, pp. 834~842.
- (9) Murakami, Y., 1987, "Stress Intensity Factors Handbook," Vol. I, pp. 373~375.
- (10) Zandman, F., Dally, J. W., 1977, *Photoelastic Coatings*, The Iowa State University Press, Society for Experimental Stress Analysis.
- (11) "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," 1995, ASTM E647-95.