대한기계학회논문집(A) 제 21 권 제 3 호, pp. 393~404, 1997

〈논 문〉

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME94-C-09)에 의하여 연구되었다.

SPATE에 의한 등방성체의 응력확대계수 측정

황재석* · 서재국** · 이효재*** · 남정환*** · R.E. Rowlands**** · 최영철*****

(1996년 1월 27일 접수)

Measurement of Stress Intensity Factor of Isotropic Material Using SPATE

J.S. Hawong, J.G. Suh, H.J. Lee, J.H. Nam, R.E. Rowlands and Y.C. Choi

Key Words : SPATE(Stress Pattern Analysis by Thermal Emission, 스페이트) Stress Intensity Factor(응력확대계수), Thermal Effect(열탄성효과)

Abstract

SPATE(Stress Pattern Analysis by Thermal Emission) can be effectively used to analyze the stress distributions of isotropic structure under the repeated load by non-contact. In this research, the measuring method and the measuring concept of stress intensity factor of isotropic material by SPATE are suggested. The validity of the method and the concept was certified through SPATE experiment.

1. 서 론

구조물을 응력해석할 수 있는 방법은 이론적인 방법과 실험적인 방법 등이 있다. 실험적인 방법에는 광탄성법, 스트레인 게이지(strian gage)법, 모아레간섭법(Moire interferometry), 홀로그래피(Holography) 그리고 SPATE(Stress Pattern Analysis by Thermal Emission) 등이 있다. 모아레간섭법과 홀로그래피 등은 여러 사람들에 의하여 연구되고 있으나 SPATE는 실험적으로 응력을 해석하는 새로운 방법이다. SPATE에 사용된 기본 이론인 열탄성효과(thermal-effect : 하중을 받는 물체의 변형과 온도와의 관계)는 1853년 Lord Kelvine[1]에 의하여 방정식이 유도된 이래 약 1세기 동안 실용화되지 않다가 약 10년전에 영국의 해군성(SIRA LTD)에 의하여 개발된 장치가 상품화되어 시판되기 시작했다. SPATE에 부착된 높은 감도를 가진 적외선 센서(infra-red sensor)는 구조물의 반복하중에 기인한 표면응력에 의하여 발생되는 미소 온도변화, 즉 0.001℃의 미소 온도변화를 감지할 수 있는 성능을 갖고 있고, 또 시편이 알루미늄(Aluminum)인 경우에는 이 장치가 58 psi(0.040816 kg_f/mm^2=400 kPa)의 응력변화를 감지할 수 있으므로 매우 정확하다고 볼 수 있다. 이 장치를 이용한 등방성체에 대한 연구결과는 등방성체의 일반적인 응력해석과[2~4] 응력확대계수에[5~10] 대한 많은 연구결과가 발표되었다. 그리고 SPATE 장치에 이용된 기본 열탄성효과(thermal-effect)에 대한 이론적인 연구도[11~13] 많이 진행되어 왔다. 이와 더불어 열탄성상수(thermoelastic constant=Km)[13~16] 캘리브레이션법(Calibration method),[17] 표면코팅(surface coating) 상태가 열탄성 반응에 미치는 영향,[18] 평균응력(mean stress)이 열탄성계수(thermoelastic constant)에 미치는 영향[19, 20] 등에 대한 연구도 진행되고 있으

*회원, 영남대학교 기계공학부
**회원, 경동전문대학 산업공학과
***회원, 영남대학교 대학원 기계공학과
****Dept. of Mech. Engr. and Astronaitics Univ. of Wisconsin-Madison
*****협진정밀(주)

며, SPATE 데이터(data)와 하이브리드(hybrid) 법을 이용한 응력성분분리법에 관한 연구도 이루어지고 있다.[21, 23~26]

SPATE는 자동차부품,[27, 28] 항공산업,[29] 원자력 발전소의 부품과 전력발전소의 구조물[30, 31]과 용접부[32] 그리고 복합구조물(complex structure)[33, 34] 등의 응력해석에도 이용되고 있다. 위와 같이 SPATE는 반복하중을 받는 구조물의 응력해석을 비접촉으로 해석할 수 있는 유효한 실험법인 동시에 실험실이나 현장에서도 쉽게 이용될 수 있는 장치이다. 응력해석 영역은 어느 실험장치보다도 넓고 실하중을 받는 순간의 응력상태를 분석할 수 있으며, 미소 응력변화를 감지할 수 있는 이점을 지니고 있다. 그러나 다방면의 산업현장에서 이용되고 있지만 SPATE를 이용한 모든 부분의 연구는 아직 초보단계에 있다. 또한 SPATE를 사용한 응력확대계수 측정에 대한 연구도 매우 초보단계에 있다. 그러므로 본 연구에서는 크랙근방의 응력성분이나 변위성분의 크기를 지배하는 상수인 응력확대계수를 SPATE로서 측정하는 방법을 제시하고 이 방법의 유효성을 검증하고자 한다.

2. 기본이론

2.1 크랙근방의 SPATE 시그널과 주응력합과의 관계

1853년 Lord Kelvine에 의하여 유도된 열탄성효과(thermal-effect)의 방정식은 아래와 같다.[1]

$$\Delta T = -\frac{\alpha_T}{\rho C_\sigma}\Delta\sigma = -K_m T\Delta\sigma \tag{1}$$

단, T는 시편 표면의 절대온도, ΔT는 하중의 변화에 의하여 발생되는 시편의 온도변화, $\Delta\sigma$는 주응력 합의 변화, K_m은 열탄성상수(thermoelastic constant), ρ는 열선팽창계수(coefficient of linear expantion), ρ는 시편재료의 밀도, C_σ는 정압비열(specific heat at constant stress) 등이다. 그리고 크랙을 가진 등방성체가 어떤 힘을 받을때 크랙근방에 발생되는 응력성분 σ_x와 σ_y의 합은 방정식 (2)처럼 주어진다.

$$\sigma_x+\sigma_y=\frac{2K_{\mathrm{I}}}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}-\frac{2K_{\mathrm{II}}}{\sqrt{2\pi r}}\sin\frac{\theta}{2}+\sigma_{0x} \tag{2}$$

그리고 SPATE값인 S_d는 방정식 (3)처럼 시편의 표면 온도변화 ΔT에 비례한다.

$$S_d=4eBRT^3\cdot\Delta T \tag{3}$$

여기서, e는 표면 복사능(surface emissivity), B는 Stefan-Boltzman상수, R은 측정기의 반응도(detector response) 등이다. 방정식 (3)에 방정식 (1)을 대입하면 방정식 (4)가 얻어진다.

$$S_d=4eBRT^3\left(-\frac{\alpha T}{\rho C_\sigma}\Delta\sigma\right)=-\frac{4e\alpha BRT^4}{\rho C_\sigma}\Delta\sigma$$
$$=f\Delta\sigma=f\Delta(\sigma_{11}+\sigma_{22})=f\Delta(\sigma_x+\sigma_y)$$

$f=-\frac{4e\alpha BRT^4}{\rho C_\sigma}$으로서 열기계적 캘리브레이션계수(thermomechanical calibration coefficient)이며, $\Delta\sigma=\Delta(\sigma_1+\sigma_2)$이다. 방정식 (4)에서 알 수 있듯이 SPATE값은 주응력의 합의 변화에 비례한다. 만약 하중이 탄성한도 내에서 작용한다면 SPATE값은 주응력의 합의 변화, 즉 주응력의 합에 비례한다고 생각할 수 있다. 방정식 (4)에서 방정식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\Delta(\sigma_x+\sigma_y)=\frac{1}{f}S_d \tag{5}$$

방정식 (5)에 방정식 (2)를 대입하면 방정식 (6)이 얻어진다.

$$\frac{S_d}{f}=\Delta\left(\frac{2K_{\mathrm{I}}}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}-\frac{2K_{\mathrm{II}}}{\sqrt{2\pi r}}\sin\frac{\theta}{2}+\sigma_{0x}\right) \tag{6}$$

탄성한도 내에서 SPATE값 (S_d)은 주응력 합의 변화(주응력의 합)에 비례함으로 방정식 (6)은 방정식 (7)로 표현될 수 있다.

$$\frac{S_d}{f}=\frac{2K_{\mathrm{I}}}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}-\frac{2K_{\mathrm{II}}}{\sqrt{2\pi r}}\sin\frac{\theta}{2}+\sigma_{0x} \tag{7}$$

2.2 SPATE 최대값과 크랙첨단에서 최대 SPATE 값이 발생되는 지점까지 거리와의 관계

스캐닝(scanning)된 SPATE값은 시편의 직각좌표계(x', y' 좌표계)로써 컴퓨터나 디스켓에 저장된다. Fig. 1과 같은 시편 크랙의 기준축(x와 y축)과 시편의 기준축의 좌표계(x', y'좌표계)를 규명하는 것이 SPATE의 실험데이터를 처리하는데 편리하다. 왜냐하면 SPATE 데이터는 y'가 일정한 경우마다 x'가 변하는 좌표상의 SPATE의 값이 채취되어 기록되기 때문이다.

AB선상의 임의의 점에서 x'좌표는 일정하고 y'좌표만 변화하고, CD선상의 임의의 점에서는 y'좌표는 일정하고 x'좌표만 변화한다. 그러므로 Fig. 1

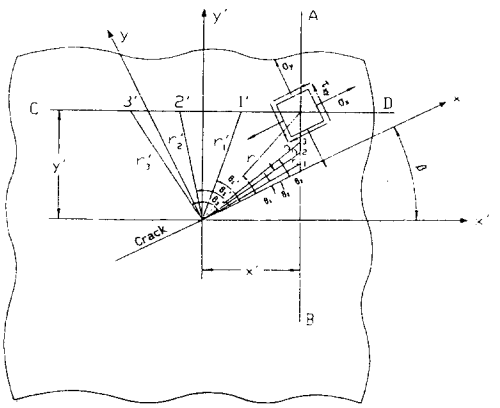

Fig. 1 Relationships between crack reference axes (x−y coordinates) and specimen reference axes (x'−y' coordinate)

의 임의의 점 x'점의 좌표와 y'점의 좌표를 지나는 임의의 직선 AB와 CD선상의 점에서는 방정식 (8)과 (9)가 성립한다.

$$x' = r\cos(\theta+\beta) = \text{일정} \tag{8}$$

$$y' = r\sin(\theta+\beta) = \text{일정} \tag{9}$$

방정식 (7)은 r과 θ의 함수이며, 방정식 (8) 혹은 (9)를 방정식 (7)에 대입하면 방정식 (7)은 단지 θ만의 함수가 된다. 그러므로 방정식 (7)과 $\frac{\partial S_d}{\partial\theta}=0$의 조건에서 S_d의 최대값을 얻을 수 있다.

2.2.1 x'가 일정한 경우

$r=x'/\cos(\theta+\beta)$가 대입된 방정식 (7)에 $\frac{\partial S_d}{\partial\theta}=0$의 관계식을 적용하여 정리하면 방정식 (10)과 (11)을 얻을 수 있다.

$$2(a+1)\left[\cos^2\theta-\frac{a-1}{2(a-1)}\cos\theta-\frac{1}{2}\right]\tan\beta = [a-1-2(a+1)\cos\theta]\sin\theta \tag{10}$$

$$2(b+1)\left[\cos^2\theta-\frac{b-1}{2(b-1)}\cos\theta-\frac{1}{2}\right]\tan\beta = [1-b-2(b+1)\cos\theta]\sin\theta \tag{11}$$

단, $a=\frac{K_I}{K_{II}}$, $b=\frac{K_{II}}{K_I}$이다.

이 경우도 시편의 실험조건과 기하학적 조건이 결정되면 방정식 (10)과 (11)은 방정식 (12)와 (13)으로 변경된다.

$$\cos^4\theta+d\cos^3\theta+e\cos^2\theta+g\cos\theta+h=0 \tag{12}$$

$$\cos^4\theta+d'\cos^3\theta+e'\cos^2\theta+g'\cos\theta+h'=0 \tag{13}$$

방정식 (12)와 (13)에서 S_{dmax}이 발생하는 θ_m이 얻어진다. r, θ_m, f, β를 방정식 (7)에 대입하면 방정식 (14)가 얻어진다.

$$S_{dmax}=\frac{1}{\sqrt{x'}}(a_1K_I+b_1K_{II})+c_1 \tag{14}$$

단, $a_1=\dfrac{2\cos\frac{\theta_m}{2}\sqrt{\cos(\theta_m+\beta)}}{\sqrt{2\pi}}\cdot f$

$$b_1=\frac{2\cos\frac{\theta_m}{2}\sqrt{\cos(\theta_m+\beta)}}{\sqrt{2\pi}}\cdot f$$

$c_1=\sigma_{0x}\cdot f$ 등이다.

2.2.2 y'가 일정한 경우

방정식 (9)에서 구한 $r=\frac{y'}{\sin(\theta+\beta)}$의 관계가 대입된 방정식 (7)에 $\partial S_d/\partial\theta=0$의 관계식을 적용하면 방정식 (15)와 (16)을 얻을 수 있다.

$$\cos^2\theta-\frac{a-1}{2(a+1)}\cos\theta-\frac{1}{2} = \frac{2(a+1)\cos\theta+1-a}{2(a+1)}\tan\beta\sin\theta \tag{15}$$

$$\cos^2\theta+\frac{b-1}{2(b+1)}\cos\theta-\frac{1}{2} = \frac{2(b+1)\cos\theta+b-1}{2(b+1)}\tan\beta\sin\theta \tag{16}$$

단, $a=\frac{K_{II}}{K_I}$, $b=\frac{K_I}{K_{II}}$이다.

실험조건과 시편의 기하학적 조건이 결정되면 방정식 (15)와 (16)은 각각 방정식 (17)과 (18)로 변경될 수 있다.

$$\cos^4\theta+d_1\cos^3\theta+e_1\cos^2\theta+g_1\cos\theta+h_1=0 \tag{17}$$

$$\cos^4\theta+d'_1\cos^3\theta+e'_1\cos^2\theta+g'_1\cos\theta+h'_1=0 \tag{18}$$

방정식 (17)과 (18)에서 S_{dmax}이 발생되는 각도 θ'_m을 구할 수 있다. r, θ'_m, f, β 등을 방정식 (7)에 대입하여 정리하면 방정식 (19)를 얻을 수 있다.

$$S_{dmax}=\frac{1}{\sqrt{y'}}(a_2K_I+b_2K_{II})c_2 \tag{19}$$

여기서, $a_2=2\cos\theta'_m\dfrac{\sqrt{\sin(\theta'_m+\beta)}}{\sqrt{2\pi}}$

$$b_2=2\sin\theta'_m\frac{\sqrt{\sin(\theta'_m+\beta)}}{\sqrt{2\pi}}$$

$c_2=\sigma_{0x}f$이다.

방정식 (14)와 (19)에서 알 수 있듯이 S_{dmax}은 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$축과 $\frac{1}{\sqrt{y'}}$ 등과는 직선적인 관계가 유지되며, 기울기는 응력확대계수의 함수이고, 절편은 σ_{0x}의 함수이다. SPATE로서 스캐닝(scanning)한 시편의 영역에서 x'가 일정한 경우와 y'가 일정한 경우에서 S_{dmax}이 발생되는 θ_m과 θ'_m을 측정하고 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$과 S_{dmax} 그리고 $\frac{1}{\sqrt{y'}}$와 S_{dmax} 등의 관계 그래프로 기울기와 절편을 구하고, 이렇게 구한 기울기와 절편을 θ_m, θ'_m, β, f 등을 각각 대입한 방정식 (14)와 (19)의 기울기와의 연립방정식에서 응력확대계수 K_I과 K_{II} 등을 실험적으로 구하고, 이들의 절편에서 σ_{0x}도 구한다.

2.2.3 β가 0°인 경우

크랙의 경사도인 β가 0°인 경우에서 x'가 일정한 경우의 방정식 (10)과 (11)은 각각 방정식 (20)과 (21)로 되고, y'가 일정한 경우의 방정식 (15)와 (16)은 각각 방정식 (22)와 (23)으로 변환된다.

$$[a-1-2(a+1)\cos\theta]\sin\theta=0 \tag{20}$$

$$[1-b-2(b+1)\cos\theta]\sin\theta=0 \tag{21}$$

$$\cos^2\theta-\frac{a-1}{2(a+1)}\cos\theta-\frac{1}{2}=0 \tag{22}$$

$$\cos^2\theta+\frac{b-1}{2(b+1)}\cos\theta-\frac{1}{2}=0 \tag{23}$$

x가 일정한 경우의 $r=x/\sqrt{\cos\theta}$, θ_m, f 등을 방정식 (20)과 (21)에, 그리고 y가 일정한 경우의 $r=y/\sqrt{\sin\theta}$, θ_m, f 등을 방정식 (22)와 (23)에 각각 대입하고 위와 같은 방법으로 정리하면 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$ 그리고 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{y'}}$ 등의 관계식은 각각 직선이다.

방정식 (20)과 (21) 그리고 방정식 (22)와 (23) 등은 각각 계면에 크랙을 갖고 외력이 모드 I인 경우의 이종재료의 응력확대계수를 SPATE로 구하는데 사용될 수 있고, 시편의 기준축과 크랙의 기준축이 일치하고 외력이 혼합모드인 경우의 응력확대계수를 SPATE로서 구하는 데도 이 경우가 사용될 수 있다.

2.2.4 하중이 모드 I 상태 혹은 모드 II인 경우

하중이 모드 I 상태($K_{II}/K_I=a=0$)이고, x축과 y축이 각각 일정한 경우의 조건에서 방정식(20)과 (22)는 각각 방정식 (24)와 (25)로 변경된다.

$$(1+2\cos\theta)\cdot\sin\theta=0 \tag{24}$$

$$\cos^2\theta+\frac{1}{2}\cos\theta-\frac{1}{2}=0 \tag{25}$$

방정식 (24)가 0인 경우, 즉 하중이 모드 I이고 x가 일정한 경우에 S_{dmax}이 발생되는 방향인 $\theta_m=120°$와 0°에서 $\theta_m=120°$인 경우는 S_{dmax}이 발생하지 않으므로 적당하지 않다. 그러나 $\theta_m=0°$인 경우는 문제의 조건에 적당하다. 이때 S_{dmax}와 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$와의 관계는 방정식 (26)과 같다.

$$S_{dmax}=\frac{\sqrt{2}K_I}{\sqrt{\pi}}\cdot f\cdot\frac{1}{\sqrt{x}}+\sigma_{0x}\cdot f \tag{26}$$

하중이 모드 I이고, y가 일정한 경우에서 S_{dmax}가 발생되는 방향인 $\theta'_m=\pm60°$와 180°이다. $\theta'_m=180°$인 경우, $S_{dmax}=f\cdot\sigma_{ox}$이고 K_I은 무수히 많을 수 있기 때문에 문제의 조건상 적당하지 않고, $\theta'_m=\pm60°$인 경우는 이 문제의 조건에서 적합하다. 이 때의 S_{dmax}와 $\frac{1}{\sqrt{y'}}$의 관계식은 방정식 (27)과 같다.

$$S_{dmax}=\frac{(\sqrt{3})^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{\pi}}K_I\cdot f\cdot\frac{1}{\sqrt{y}}+\sigma_{ox}\cdot f \tag{27}$$

x가 일정한 경우와 y가 일정한 경우에서 S_{dmax}이 발생하는 방향의 θ_m과 θ'_m이 각각 0°와 60°인 경우는 Stanley[5, 6]가 연구한 결과와 완전히 일치하고, 이것은 본 연구에서 유도된 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x}}$ 혹은 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$ 그리고 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{y}}$ 혹은 $\frac{1}{\sqrt{y'}}$의 관계식이 유효하다는 것을 간접적으로 증명한다. 하중이 순수 모드 II인 경우(즉, $b=0$인 경우), x가 일정한 경우와 y가 일정한 경우에 대응되는 방정식 (21)과 방정식 (23)은 각각 방정식 (28)과 (29)로 변경된다.

$$(1-2\cos\theta)\cdot\sin\theta=0 \tag{28}$$

$$\cos^2\theta-\frac{1}{2}\cos\theta-\frac{1}{2}=0 \tag{29}$$

하중이 모드 II 상태이고, x가 일정한 경우에서 S_{dmax}이 발생되는 방향의 각도는 방정식 (28)에서 구해지고, 이때 $\theta_m=0°$와 $\theta_m=\pm60°$이다. $\theta_m=0°$인 경우에서 $S_{dmax}=0$이므로 문제의 조건에서는 적당하지 않다. 그리고 $\theta_m=\pm60°$인 경우에 S_{dmax}가 발생한다. 이 경우의 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x}}$과의 관계식은 방정식 (30)과 같다.

$$S_{dmax}=\frac{K_{II}}{2\sqrt{\pi}}\cdot f\cdot\frac{1}{\sqrt{x}}+\sigma_{ox}\cdot f \tag{30}$$

하중이 모드 II 상태이고, y가 일정한 경우에서

S_{dmax}이 발생되는 방향의 각도는 방정식 (29)에서 구해지고 이때 $\theta_m=0°$와 $\theta_m=\pm120°$이다. $\theta_m=0°$인 경우에서 $S_{dmax}=0$이므로 문제의 조건에서는 적당하지 않고, $\theta_m=\pm120°$인 경우에 S_{dmax}이 발생한다. 이 때 대응되는 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{y}}$과의 관계식은 방정식 (31)과 같다.

$$S_{dmax}=\frac{(\sqrt{3})^{\frac{3}{2}}}{2\sqrt{\pi}}\cdot\frac{f}{\sqrt{y}}+\sigma_{ox}\cdot f \tag{31}$$

3. 실험 및 실험방법

3.1 실험장치 및 실험방법

방정식 (1)에서 알 수 있듯이 고체가 인장응력($\Delta\sigma$)을 받으면 온도(ΔT)가 내려가고, 고체가 압축응력을 받으면 온도가 증가한다는 열탄성효과의 기본식은 Load Kelvine에 의해서 방정식 (1)처럼 유도되었다. 이 온도변화는 주응력의 합에 역비례한다. 이 관계를 이용하여 발생되는 온도의 변화 ΔT를 응력변화로 측정할 수 있도록 변화시킬 수 있는 장치가 Fig. 2와 같은 SPATE장치이다. 시편이 Fig. 2처럼 반복하중을 받으면 표면의 주응력합에 비례하여 미소 온도변화가 발생된다. 이 미소온도 변화는 높은 감도를 가진 적외선 센서가 장착된 스캔-유니트(Scan-Unit)와 스캔 유니트의 부속장치 등을 통하여 SPATE값으로 컴퓨터에 저장된다. 컴퓨터에 저장된 SPATE값은 응력변화를 측정하는데 사용되는 기초 데이터가 된다. 핸드셋(hand set)으로서 스캔의 영역이 결정되고 스캔의 속도는 컴퓨터에 내장된 프로그램에 의하여 결정된다. 그리고 많은 데이터처리와 처리방법도 컴퓨터에 내장된 프로그램에 의하여 조절될 수 있다.

Fig. 2와 같은 SPATE 장치를 사용하여 실험을 수행하기 위해서는 아래와 같은 과정을 따르는 것이 좋다.

(1) 시편제작 및 시편준비

(가) 시편가공

(나) 스캐닝(scanning)하려는 영역을 아세톤으로 깨끗이 닦는다.

(다) 아세톤으로 깨끗이 닦혀진 영역에 검은색 페인트(ultra-flat paint)를 칠한다.

(2) SPATE장치에 액화 질소를 주입한다.

(3) 시편을 피로 시험기에 장착한다.

(4) 카메라 거리와 스캔 유니트의 링번호를 결정한다.

(5) 하중장치(피로시험기)의 컨트롤 유니트 조정한다.

(가) 각 재료에 적당한 피로시험기의 하중주기(Loading frequency :재료에 따라 대체로 다르지만 Glass Fiber Epoxy Composite에는 20 Hz를, Al에는 13 Hz를 사용하는 것이 좋다.)결정한다.

(나) 하중의 파형결정(일반적으로 load control을 사용)한다.

(다) 하중범위(load range)를 결정한다. (일반적으로 10%로 한다. 사인파형(sine curve) 하중의 최대하중과 최소하중을 결정한다.)

(6) SPATE장치의 스캐닝(scanning) 조건 결정

시편을 스캐닝할 때는 아래와 같은 사항들이 결정되어야 한다.

아래사항 : phase(기준 시그널 조정장치), sensitivity(온도감지능력), time constant(스캐닝 시간의 1/10), sampling time(전체 샘플링 시

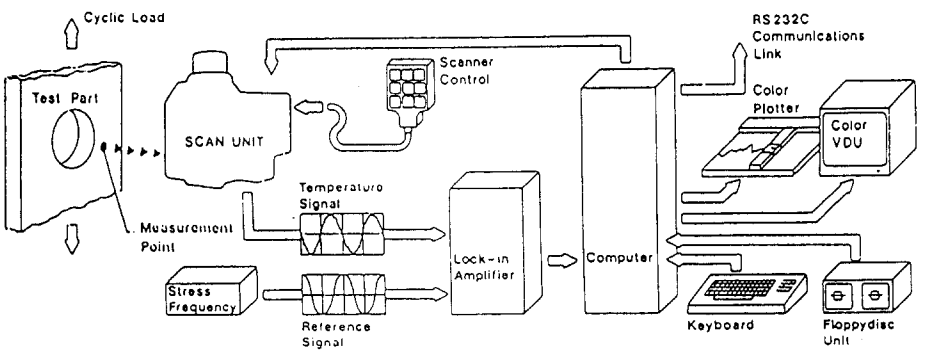

Fig. 2 Schematic of typical SPATE layout

간), calibration factor(주로 1을 사용 함), scan mode(점, 선, 면적 등 세 종류가 있음), scan type(스캐닝 모드에서 선정됨, 이 연구에서는 선 스캐닝이 선정됨), DAC. steps/sample point(한 샘플링지점에서의 스캐닝 회수), X-sample point(x축상의 샘플링 갯수), Y-sample point(y축상의 샘플링 갯수), measurement spot의 diameter(측정지점의 스캐닝 영역의 직경), measurement spot의 spacing(스캐닝영역의 직경중심에서 다음 스캐닝영역의 중심까지의 거리) 등.

(7) 컴퓨터를 사용하여 스캐닝(scanning) 영역을 결정하고, 스캐닝(scanning) 한다.

(8) SPATE 값을 컴퓨터의 CPU나 디스켓에 저장한다.

(9) 사용된 시편에 사용된 하중조건을 사용하여 시편의 열기계적 캘리브레이션계수(thermomechanical calibration coefficient)인 f를 결정한다.

(10) SPATE 시그널의 해석

3.2 SPATE 데이터로서 응력확대계수를 구하는 방법

시험편이 등방성체인 경우, SPATE 데이터로서 응력확대계수를 구하는 과정은 아래와 같다.

(1) SPATE 값이 저장된 디스켓에서 필요한 SPATE 값을 취한다(본 연구에서는 SPATE의 최대값을 취한다).

(2) SPATE값에서 x'(혹은 x)와 y'(혹은 y)가 각각 일정한 경우, SPATE의 최대값이 발생되는 방향을 곡선접합(curve fitting)하여 θ_m과 θ_m'를 구한다.

(3) SPATE 값에서 x'(혹은 x)와 y'(혹은 y)가 각각 일정한 경우의 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$(혹은 $\frac{1}{\sqrt{x}}$)와 S_{dmax}(SPATE의 최대값) 그리고 $-\frac{1}{\sqrt{x'}}$(혹은 $\frac{1}{\sqrt{x}}$)과 S_{dmax} 등과의 관계를 곡선접합(curve fitting)하여 직선의 기울기를 실험적으로 구한다.

(4) 실험적으로 측정되는 θ_m, θ_m', $r=\frac{y'}{\sin(\theta_m+\beta)}$, $r=\frac{x'}{\cos(\theta_m+\beta)}$, $r=\frac{y'}{\cos(\theta_m+\beta)}$, $r=\frac{y'}{\sin(\theta_m+\beta)}$, 그리고 β 등에서 각 조건에 대응되는 값들을 방정식 (7)의 각 조건에 대응되는 식에 대입하여 얻은 S_{dmax}과 $-\frac{1}{\sqrt{x'}}$, S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{y'}}$의 그래프에서 기울기와 절편을 구한다.

(5) 제 3항처럼 실험적으로 구한 기울기와 절편을 제 4항처럼 각 실험데이터가 대입되어 구하여지는 기울기와 절편을 같게 놓는다. 그리고 각 조건의 종류(x'가 일정한 경우, y'가 일정한 경우($y'>0$), y'가 일정한 경우($y'<0$)의 기울기에서 2종류 조건을 선택하고, 선택된 2종류의 조건의 연립방정식을 풀므로서 응력확대계수 K_{I}과 K_{II}를 구한다. 그리고 σ_{ox}도 3종류의 절편을 평균하여 구한다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3과 Fig. 4는 본 연구에서 고안한 S_{dmax}과 $1/(x)^{\frac{1}{2}}$(혹은 $1/(x')^{\frac{1}{2}}$)의 관계 그리고 S_{dmax}과 $1/(y)^{\frac{1}{2}}$(혹은 $1/(y')^{\frac{1}{2}}$)의 관계, x'(혹은 x)가 일정한 경우에서 S_{dmax}이 발생되는 방향인 θ_m과 y'(혹은 y)가 일정한 경우의 S_{dmax}이 발생되는 방향인 θ_m' 등의

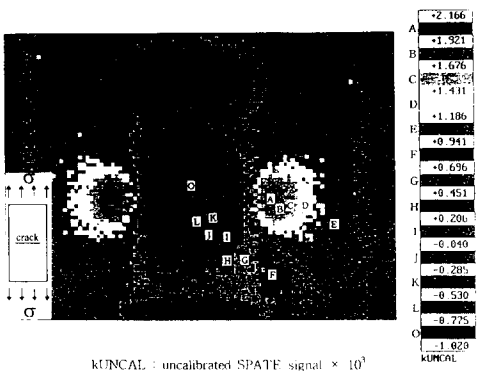

Fig. 3 SPATE stress pattern($\beta=0°$ mode I load)

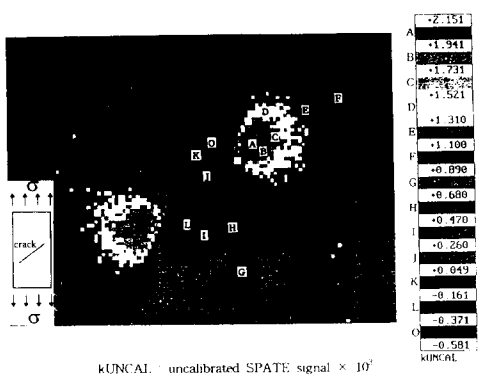

Fig. 4 SPATE stress pattern($\beta=45°$ mixed mode load)

개념의 유효성을 확인하기 위하여 실험한 모드 I과 혼합모드상태의 SPATE값(Stress Pattern, SPATE Stress Map, SPATE Stress Plot 혹은 SPATE Stress Pattern)을 각각 나타낸다. Fig. 3과 Fig. 4의 SPATE값에 표시된 알파벳(A, B, C, ……)은 각 그림의 우측에 표시된 SPATE값의 크기를 나타낸다.

Fig. 3과 Fig. 4의 SPATE값을 얻기위하여 사용된 시편재료는 알루미늄(Al2024-T3)이다. 본 실험에 사용된 알루미늄의 열기계적 캘리브레이션계수인 f는 86.368A/D/MPa이다. 그리고 Fig. 3의 경우에 시편의 높이, 폭(W) 등은 각각 283.37 mm, 88 mm이고, 크랙의 길이($2a$)는 15.672 mm이며 ($2a/W=0.4136$), 크랙의 경사각도(β)가 0°인 내부크랙이다. 이때 사용된 하중 주기는 13 Hz이고, 작용하는 외력에 대한 주응력의 변화 $\Delta\sigma(=\sigma_{max}-\sigma_{min}$, $\sigma_{max}=10.935$ MPa, $\sigma_{min}=2.098$ MPa) 8.837MPa이다. 그리고 스캐닝할 때의 X-샘플점의(X-sample point)수와 Y-샘플점의(Y-sample point)수는 각각 77과 107이고, 스캐닝원(scanning Spot)의 직경은 0.85 mm이고, 스캐닝원의 중심과 중심사이의 거리는 0.44 mm이다.

Fig. 4의 경우의 시편의 높이, 폭 등은 각각 286.38 mm, 38.1 mm이고, 크랙의 길이와 경사각도는 20.574 mm와 46°이다. 사용된 하중주기는 13 Hz이고 작용하는 외력에 대한 응력의 변화는 $\Delta\sigma(=\sigma_{max}-\sigma_{min}$, $\sigma_{max}=8.180$ Mpa, $\sigma_{min}=1.918$ Mpa) 6.262 MPa이다. 이 경우의 스캐닝할 때의 x와 y방향의 샘플의 수는 각각 109와 107이다. 그리고 스캐닝원의 직경은 0.85 mm이고, 스캐닝원의 중심과 중심사이의 거리는 0.44 mm이다.

Fig. 5와 Fig. 6은 Fig. 3의 SPATE값 중에서 x가 일정한 경우와 y가 일정한 경우의 제일 큰 값(□□□□□), 2번째 큰 값(△△△△△) 그리고 3번째 큰값(◇◇◇◇◇) 등을 각각 나타낸 것이다.

Fig. 5과 Fig. 6은 Fig. 3의 θ_m(x가 일정한 경우에

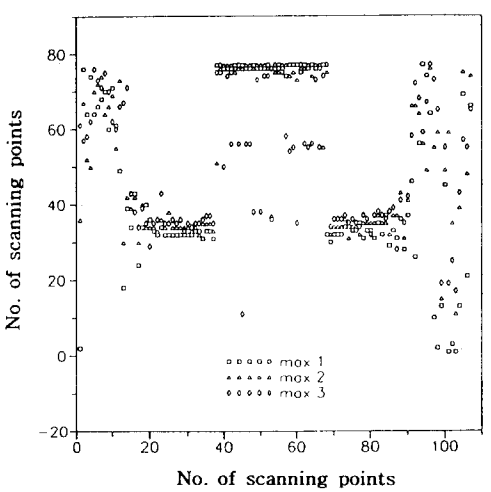

Fig. 5 Position of the first, the second and the third large SPATE value($\beta=0°$, load : mode I, x= constant)

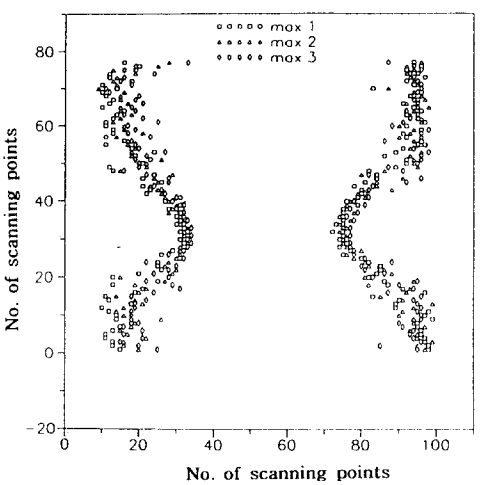

Fig. 6 Position of the first, the second and the third large SPATE value($\beta=0°$, load : mode I, y= constant)

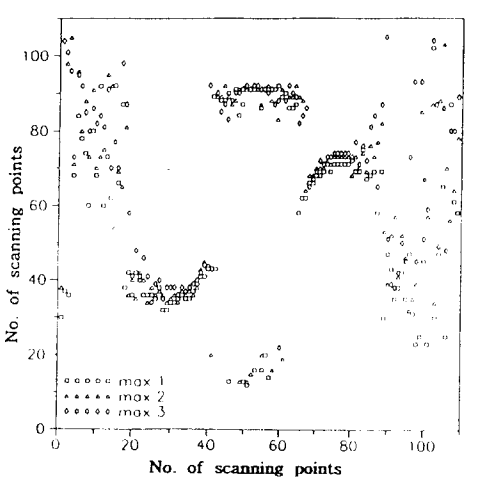

Fig. 7 Position of the first, the second and the third large SPATE value($\beta=45°$, x=constant)

서 S_{dmax}이 발생되는 영향)과 θ_m'(y가 일정한 경우에서 S_{dmax}이 발생되는 영향) 등을 실험적으로 측정하는 데 사용된다. Fig. 5과 Fig. 6에서 알 수 있듯이 θ_m과 θ_m'은 각각 0°와 ±60°이다. 이 값은(0°와 ±60°) 본 연구에서 제안된 개념으로 유도된 방정식 (24)와 (25)에서 구한 값과 거의 일치함을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 제안된 개념이 유효하다는 것이 실험적으로 확인되었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 Fig. 4의 SPATE값중에서 x가 일정한 경우와 y가 일정한 경우의 제일 큰 값(□□□□□), 두번째 큰 값(△△△△△) 그리고 세번째 큰 값(◇◇◇◇◇) 등을 각각 나타낸 것 이다.

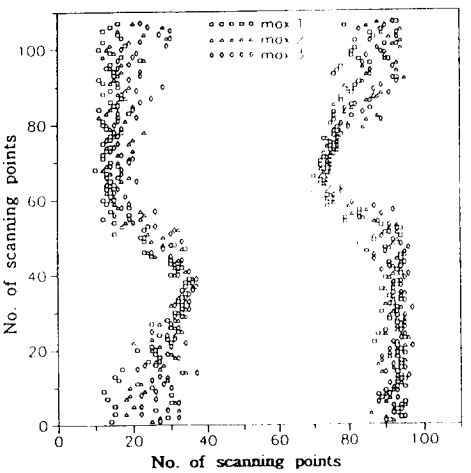

Fig. 8 Position of the first, the second and the third large SPATE value(β=45°, y=constant)

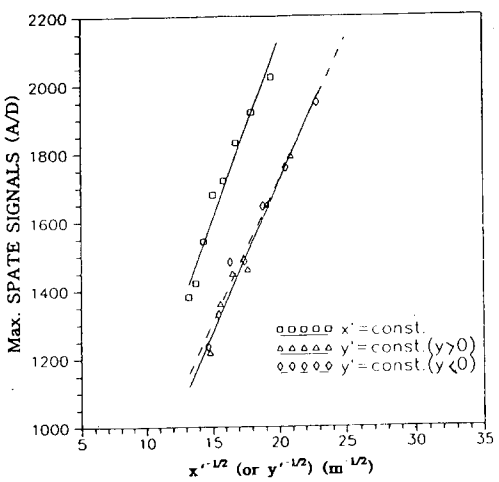

Fig. 9 Relationship between S_{dmax} and $\frac{1}{\sqrt{x'}}$ or $\frac{1}{\sqrt{y'}}$ (β=0°, $\frac{2a}{W}$=0.414)

Fig. 7과 Fig. 8은 Fig. 4의 θ_m과 θ_m' 등을 실험적으로 측정하는데 사용된다. 여기서 실험으로 측정된 θ_m=−46°이고, θ_m'=14.5°−108.5°이다.

Fig. 9는 β=0이고, $\frac{2a}{W}$=0.414인 경우의 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$, 그리고 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{y'}}$관계의 실험데이터를 곡선접합(curve fitting)하여 얻은 직선이다. 곡선접합은 최소자승법에 의하여 데이터의 대표 방정식을 구하고, 이 방정식을 사용하여 곡선접합을 행하였다.

실험치의 표시가 □□□□□, △△△△△ 그리고 ◇◇◇◇◇ 등은 각각 x'가 일정하고, y'가 일정하고 0보다 큰 경우, y'가 일정하고 0보다 작은 경우 등의 기울기를 각각 나타낸다. Fig. 9의 각 직선에서 실험적으로 구한 기울기를 각 직선의 조건에 대응되는 방정식 (14)나 (19)의 기울기와 같게 놓는다. 그리고 방정식 (14)와 (19)의 K_{I}과 K_{II} 등의 계수인 a_1, b_1, a_2, b_2 등에 Fig. 5와 Fig. 6에서 각각 실험적으로 구한 θ_m과 θ_m', β와 f 등을 대입하여 계수를 결정한다. Fig. 9의 3개의 직선중에서 2개의 직선을 선택하여 실험적으로 결정되어지는 2개의 직선의 기울기와 실험적으로 구한 θ_m과 θ_m', β와 f 등이 대입된 방정식 (14)와 (19)의 기울기를 같게 놓고 실험적으로 결정되어지는 2개의 직선의 연립방정식으로서 응력확대계수 K_{I}과 K_{II}를 구한다. 이렇게 구한 응력확대계수 $\frac{K_{\text{I}}}{K_o}$과 $\frac{K_{\text{II}}}{K_o}$는 Table 1에 나타내었다.

Fig. 10는 β=45°이고 $\frac{2a}{W}$=0.54인 경우의 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$, 그리고 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{y'}}$ 관계의 실험데이터를 곡선접합(curve fitting)하여 얻은 직선이다. 기울기가 제일 큰 것(□□□□□), 두번째 큰 것(△△△△△) 그리고 세번째 큰 것(◇◇◇◇◇) 등은 x'가 일정한 경우, y'가 일정한 경우에서 y'가 0보다 작은 경우 그리고 y'가 일정한 경우에서 y'가 0보다 큰 경우 등의 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x_j}}$과의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 10의 각 직선에서 실험적으로 구한 기울기를 각 직선의 조건에 대응되는 방정식 (14)와 (19)의 기울기와 같게 놓는다. 단, 방정식 (14)와 (19)의 K_{I}과 K_{II} 등의 계수인 a_1, b_1, a_2, b_2 등은 Fig. 7과 Fig. 8에서 실험적으로 구한 θ_m과 θ_m', β와 f 등을 대입하여 계수를 결정한다. Fig. 10의 3개의 방정식중에서 2개의 방정식을 선택하여 실험적으로 결정되어지는 2개의 방정식의

Table 1 Comparison of theoretical values with experimental values

Specimen and loading condition		K_I/K_0		K_{II}/K_0		σ_{0x}	Error of K_I/K_0(%)
		Theoretical value	Exp. value	Theoretical value	Exp. value		Error of K_{II}/K_0(%)
Mode I (Fig. 9)	x′=const. y′=const. y′>0 : case 1	1.12	1.102	0	−0.086	0.032	1.696
	x′=const. y′=const. y′<0 : case 2	1.12	1.102	0	−0.086	0.032	1.696
	x′=const. y′>0 y′<0 : case 3	1.12		0			
x′=const. y′=const. y′>0 Mixed mode (Fig. 10)	Case-1	0.633	0.635	0.557	0.595	0.434	0.5 6.72
	Case-2	0.633	0.662	0.557	0.529	0.255	4.581 5.03
	Case-3	0.633	0.628	0.557	0.553	0.448	0.8 0.7

기울기와 실험적으로 구한 θ_m과 θ_m', β와 f 등이 대입된 항정식 (14)와 (19)의 기울기를 같게 놓고 연립방정식으로서 응력확대계수 K_I과 K_{II}를 구한다. 이렇게 구한 응력확대계수 $\frac{K_I}{K_o}$과 $\frac{K_{II}}{K_o}$는 Table 1에 나타내었다.

Fig. 9와 Fig. 10에서 보듯이 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$의 관계의 선형성이 매우 좋다는 것을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 유도된 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$사이의 관계식이 직선식이고, Fig. 9와 Fig. 10의 선형성이 우수하다는 것 등으로 본 연구에서 고안한 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$의 관계에 대한 개념이 유효하다. Table 1과 같이 Fig. 9에서 x'=const., y'=const.인 경우에서 $y'>0$ 경우에 구한 응력확대계수 $\frac{K_I}{K_o}$은 이론치와 거의 같다. 그리고 x'=const.이고 y'=const.인 경우에서 $y'<0$ 경우에 구한 응력확대계수 $\frac{K_I}{K_o}$도 이론치와 매우 유사하다. y'=const.일때 $y'>0$ 경우와 $y'<0$ 경우에서 $\frac{K_I}{K_o}$를 구하는 것이 불가능하다. 왜냐하면 하중이 모드 I인 경우에는 SPATE값이 x'축에 대하여 거의 대칭이므로, $y'>0$ 경우의 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x_j'}}$의 관계나 $y'<0$경우의 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x_j'}}$의 관계가 거의 일치하기 때문이다. Fig. 10에서, Case-1(x', y'=const.이고 $y'>0$), Case-2(x', y'=const., $y'<0$), Case-3(y'=const., $y'>0$ $y'<0$) 등에서 구한 $\frac{K_I}{K_o}$과 $\frac{K_{II}}{K_o}$ 등의 실험치는 Table 1에서 보듯이 이론치와 매우 유사하다. 그러므로 하중이 모드 I인 경우의 SPATE 실험에서 Case-1과 Case-2 경우가 응력확대계수를 구할 때 유용하게 사용될 수 있고, 혼합 모우드인 경우에서 Case-1과 Case-2 그리고 Case-3 등의 어느 경우도 응력확대계수를 구할 때 유용하게 사용될 수 있다.

이 실험의 Data 처리과정에서 알 수 있듯이 크

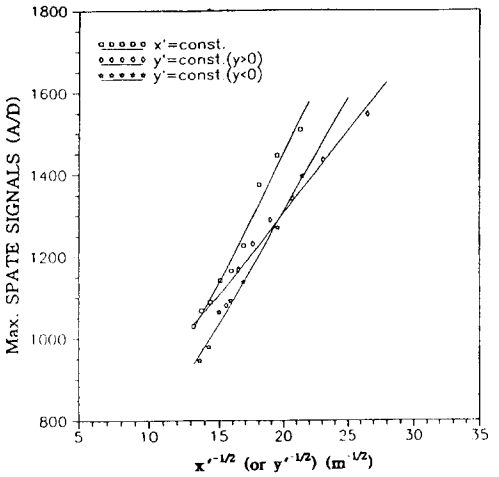

Fig. 10 Relationship between S_{dmax} and $\frac{1}{\sqrt{x'}}$ or $\frac{1}{\sqrt{y'}}$ ($\beta=45°$, $\frac{2a}{W}=0.54$)

랙선단의 정확한 위치는 SPATE값으로써 응력확대계수를 구하는데 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 그러므로 SPATE 응력상태도(stress pattern)에서 크랙 첨단의 위치를 정확하게 찾는 방법을 연구하는 것도 매우 중요하다. 이와같이 모드 I이나 혼합모드에서도 SPATE값을 사용하여 등방성체의 응력확대계수를 정확하게 구할 수 있다고 본다. 결국 모드 I이나 혼합모드 II에서도 등방성체의 응력확대계수를 실험적으로 구하는데 SPATE 장치가 유효하게 사용될 수 있다.

5. 결 론

위와 같은 기본이론과 실험을 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째, SPATE값에 의한 등방성체의 응력확대계수 측정법에 대한 개념이 유효하다는 것이 실험을 통하여 확인되었고, 그 측정법의 정도는 매우 높다.

둘째, 응력확대계수의 실험치의 측정에 대한 오차는 x(혹은 x')가 일정한 경우 S_{dmax}이 발생되는 방향인 θ_m과 y(혹은 y')가 일정한 경우 S_{dmax}이 발생되는 방향, 즉 θ_m' 등의 측정에 대한 오차와 S_{dmax}(SPATE값의 최대치)과 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$ 그리고 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{y'}}$의 관계식의 기울기 측정에 대한 오차 등에 의하여 발생된다. 이 중에서도 후자에 대한 오차는 응력확대계 수의 실험치 측정에 대한 오차에 가장 큰 영향을 미친며, 주로 크랙선단의 선정에 대한 오차에서 발생한다.

셋째, S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$ (혹은 $\frac{1}{\sqrt{x}}$), S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{y'}}$(혹은 $\frac{1}{\sqrt{y}}$) 등의 기울기의 연립방정식으로서 응력확대계수를 구할 수 있는 방법은 3가지 경우가 있다. 이들중에서 어느 것을 사용하여도 응력확대계수를 정확하게 구할 수 있다.

넷째, Fig. 9와 Fig. 10에서 알 수 있듯이 S_{dmax}과 $\frac{1}{\sqrt{x'}}$ 사이의 직선적인 관계식이 거의 완벽하게 성립하는 영역은 크랙선단에서 약 1.6 mm~10 mm 이다.

참고문헌

(1) Thomson W. (Lord Kelvin), 1853, "On Dynamic Theory of Heat," *Trans, Roy, Soc, Edinburgh*, Vol. 20, pp. 261~283.

(2) Baker, L. R. and Webber, J. M. B, 1982, "Thermoelastic Stress Analysis," *Optica Acta*, Vol. 29, No. 4, pp. 555~563.

(3) Waldman, W., Ryall, T. G. and Tones, R., *In 3-d from Thermoelastic Data, Report, Defence Science and Technology Organization Aircraft Structures Division*, Aeronautical Research Laboratory, P. O Box 4331, Melbourne, 3001, Australia.

(4) Richard F. Gutta, 1990, *Stress Analysis Comparison between Calculations*, Conventioal Strain Gage and Thermoelastic Technique, Report.

(5) Stanley, P., MA, MSc, Phd. C Eng, FiMeche and W. K. Chan. Bsc, 1986, "The Determination of Stress Intensity Factors and Crack-tip Velocities from Thermoelastic Infra-red Emissions," *International Conference on Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 1, pp. 105~114.

(6) Stanley, P. and Chan, W. K., 1986, "Mode II Crack Studies Using the "SPATE" Technique," *Proc. SEM Spring Conf. on Exp. Mechs*, New Orleans, pp. 916~923.

(7) Stephan R. Rukas, 1987, "Theoretical Considerations for Determining Strees Intensity Factors via Thermoelastic Stress Analysis," *Second*

International Conference of Stress Analsis by Thermoelastic Techniques, pp. 9-1SA~9-12SA.

(8) Leaity, G. P. and Smith, R. A., 1989, "The Use of SPATE to Measure Residual Stress and Fatigue Crack Growth," *Fatigue Fracture Engneering Material Structure*, Vol. 12, No. 4, pp. 271~282.

(9) Chan, S. W. K. and P. J. Tubby, 1989, "Stress Intensity Factors for Toe Cracks in Fillet Welded Joints", *Finite Element Modelling and Thermoelastic Determination Inter. Conf. of Stress and Vibration*, pp. 3~1 SAV~ 3~3 SAV.

(10) Stanley, P. and Dulieu-Smith, J. M., 1993, "Progress in the Thermoelastic Evaluation of Mixed-Mode Stress Intensity Factors," *Proceedings fo the* 1993 *SEM*, pp. 617~626.

(11) Oliver, D. E., Stanley, P. and Webber, J. M., 1983, "The Use of Sensitive Temperature Tranducers to Produce Stress Maps of Cyclically Loaded Structures," *Proceedings of* 1983 *SEM Conference.*

(12) Wong, A. K., Sparrow, J. G. and Dunn, S. A., 1988, "On the Revised Theory of the Thermoelastic Effect," *J. Phys. Chem. Solids*, Vol. 49, No. 4 pp. 395~400.

(13) Van Hemelrijck, D., Schillemans, L., Cardon, A. H., 1991, "The Effects of Motion on Thermoelastic Stress Analysis," *Composite Structures 18*, pp. 221~238.

(14) Oliver, D. E. and Webber, J. M. B., 1984, "Absolute Calibration of the SPATE Technique for Non-contacting Stress Measurement," *Proceedings of the V International Congress on Experimental Mechanics*, pp. 539~546.

(15) Harwood, BA N. and Commings, W. M., 1986, *Calibration and Qualitative Assessment of the SPATE Stress Measurement System,*" Depart of Trade and Industry National Engineering Laboratory.

(16) Machin., A. S., Sparrow, J. G. and Stimson, M -G., 1987, "The Thermoelastic Constant," *SPIE, Stress Analysis by Thermoelastic Techniques*, Vol. 731, pp. 26~31.

(17) Adam J. Gucfa, Mark S. Loehr and Melvin L. Sherwood, 1986, "Calibration Methods for an Infra-red Thermoelastic Stress Analyzer," *Proceedings of the* 1986 *SEM Spring Conference on Experimental Mechanics*, pp. 1009~1014.

(18) Alexander K. Mackenzie, 1989, "Effects of Surface Coatings on Infra-red Measurement of Thermoelastic Response," *SPIE, Stress and Vibration: Recent Developments in Industrial Measurement and Analysis*, Vol. 1084, pp. 59~71.

(19) Machin, H. S., Sparrow, J. G. and Stimson, M. G., 1987, *Mean Stress Dependence of the Thermoelastic Constant*, Strain, pp. 27~30.

(20) Dunn, S. A., Lombardo, D. and Sparrow, J. G., 1989, "The Mean Stress Effect in Metallic Alloup and Composites," *SPIE Stress and Vibration: Recent Developments in Industrial Measurement and Analysis*. Vol. 1084, pp. 129~142.

(21) Abdelmohsen, H. H., Huang, Y. M. and Rowlands, R. E., 1989, *Hybrid Elastoelastic and Thermoelastic Analysis from Measured Data*, Experimental Mechanics, pp. 474~480.

(22) Waldman, W., Ryall, T. G. and Jones, R., 1990, "On the Determination of Stress Components in 3-D From Thermoelastic Data," *Computers and Structues* Vol. 36, No. 3, pp. 553~557.

(23) Boyle, J. T. and Hamilton, R., 1991, "A Method of Thermographics Stress Separation," *4th Conference on Applied Solid Mech Mechanics*, Elsevier, Edited by A. R S. Poter. University of Leicester.

(24) Huang. Y. M., Abdelmohsen, H., Cohr, D., Feng. Z., Rowlands. R. E. and Stanley. P, 1988, "Determination of Individual Stress Components from SPATE Isopachics Only," *Proc. VI. Intl. Cong. Exp. Mech. Portlomd*, Oregon, pp. 578~584.

(25) Yoo-Min Huang, 1989, "Determination of Individual Stresses from Thermoelastically Measured Trace of Stress Tensor," Dissertation of Phd. Dept of Engr. Mech and Astronautics, Univ. of Wisconsin Madison, U. S. A.

(26) Huang, Y. M., Rowlands, R. E. and Lesnisk, J. R., 1990, "Simultaneous Stress Seperation, Smoothing of Measured Thermoelastic Isopa-

chic Information and Enhanced Boundary Data," *Experimental Mechanics* pp. 398~403.

(27) Vijay Sarihan, David Oliver and Samuel S. Russel, "Thermoelastic Stress Analysis of An Automobile Engine Connecting Rod," pp. 729~739

(28) Evereft, G. M. and Berry, D. J., "Non Contacting Dynamic Stress Measurement and its Application in Automative Industries," Ometron,

(29) Owens, R. H., "Application of the Thermoelastic Effeet to Typical Aerospsce Composite Materials," *Stress Analysis by Thermoelastic Techniques, Second International Conference*, London

(30) Brearm, R. G., Gasper, B. C., Lioyd, B. E. and Page, S. W. J., 1987, "The SPATE 8000 Thermoelastic Camera for Dynamic Stress Measurement on Nuclear Plant Components," *Stress Analysis by Thermoelastic Techniques, Second International Conference*, pp. 12-1SA~12-17SA.

(31) Bream, R. G., Gasper, B. C., Lioyd, B. E. and Page, S. W. J., 1987, "Investigation of Thermoelastic Stress Measurement to Both Modal Analysis and the Dynamic Behavior of Electrical Power Plant Struuctures," *SPIE, Optomechanical Systems Engineering*, Vol. 817, pp. 109~120.

(32) Burdekin, F. M. and Mamteghi, 1984, "Use of SPATE Technique on Welded Joints" *First Internation Conf. Stress Analysis Thermoelastic Tech*, pp. 11-1SA~11-2SA.

(33) Cox, L. J., Holbourn, P. E., Oliver, D. E. and Webber, J. M. B., 1982, *Application of the Thermoelastic Effect to Rapid Stress Mapping of Complex Structures*, Sira Institute Ltd.

(34) Cox, L. J., Holbourn, D. E., Oliver, D, E. and Webber, J. M. B., 1982, "Stress Analysis of Complex Strutures Using the Thermo-elastic Effect," *Proc SESA Conf.*, pp. 139~145.