

# 레이저 스페클을 이용한 CT 시험편의 변형장 측정

전문창\* · 강기주\*\*

## Measurement of Deformation field in CT specimen using Laser speckle

Moon-Chang Jeon and Ki-Ju Kang

**Key Words :** Laser speckle(레이저 스페클), CT specimen(CT 시험편), Deformation field(변형장), J-A<sub>2</sub> theory(J-A<sub>2</sub> 이론), J-R Curve(J-R 곡선)

### Abstract

To obtain A<sub>2</sub> experimentally in the J-A<sub>2</sub> theory, deformation field on the lateral surface of a CT specimen was to be determined using Laser speckle method. The crack growth was measured using direct current potential drop method and most procedure of experimental and data reduction was performed according to ASTM Standard E1737-96. Laser speckle images during crack propagation were monitored by two CCD cameras to cancel the effect of rotation and translation of the specimen. An algorithm to pursue displacement of a point from each image was developed and successfully used to measure A<sub>2</sub> continuously as the crack tip was propagated. The effects of specimen thickness on J-R curve and A<sub>2</sub> were explored.

### 1. 서론

90 년대에 들어 비소규모항복조건에 의한 균열 선단 구속정도를 파괴거동해석에 포함시키기 위해 2 매개변수법(Two Parameters Approach)이 제안되었다. 즉, 기존의 소규모항복상태에서 균열선단 응력분포를 결정하는 J-적분 이외에 T-응력<sup>(1,2,3)</sup>, Q<sup>(4,5,6)</sup> 및 A<sub>2</sub><sup>(7,8)</sup> 등의 제 2 매개변수를 사용하여 비소규모항복에 의한 구속 효과를 보정한다. 이 중 J-A<sub>2</sub> 이론은 역학적 근거가 명확하고 실험적인 측정이 용이하다는 장점이 있다. 최근 Chao & Lam<sup>(9)</sup> 은 δ<sub>5</sub> 측정법을 이용하여 균열 선단의 두 점간의 변위를 측정함으로써 A<sub>2</sub> 를 측정할 수 있음을 보고하였다. δ<sub>5</sub> 측정법은 시편 표면에 비커스 경도계를 이용하여 압흔을 내고 고정 틀을 부착하는 등의 번거로움과 고정된 한 점의 변위만 측정할 수 있다는 단점이 있다. 즉, 균열개시 후 진전하는 균열선단을 추적하면서 A<sub>2</sub> 의 변화를 관찰하는 것이 불가능하다. 본 연구실에서는 동적인 하중 하

에서의 균열진전 거동을 연구해 왔는데<sup>(10,11)</sup>, 2 매개변수이론을 적용하고자 할 경우 고정된 한 점이 아닌 여러 점의 변위를 동시에 측정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 레이저 광의 특성을 이용하여 이를 비접촉식으로 측정하고자 한다. 레이저광은 공간 가간섭성이 뛰어나서 물체의 거친 표면에서 반사할 때 반점모양의 무늬를 나타내는데 이를 레이저 스페클이라고 한다.

Fig. 1 은 거친 표면에 레이저광을 입사 시키고 CCD 카메라를 이용하여 관찰한 스페클무늬이다.

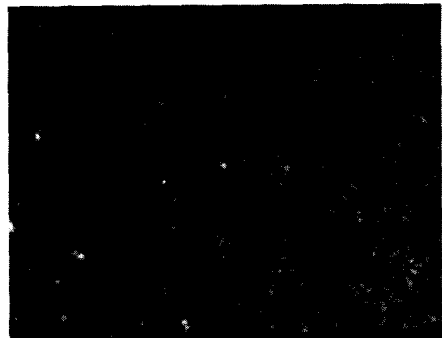


Fig. 1 Speckle pattern

\* 전남대학교 대학원

\*\* 전남대학교 기계공학과

이는 충분히 거친 물체면에서 난반사된 빔들이 공간상에서 무수한 간섭을 일으킨 결과이다. 레이저를 이용하여 물체의 변위, 표면형상, 진동 등을 측정하는 방법으로는 ISDG(Interferometric Strain/Displacement Gauge)<sup>(12)</sup>, Electronic Speckle Photography<sup>(13,14,15)</sup>, HI(Holography Interferometry)<sup>(16,17)</sup> 그리고 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)<sup>(18,19)</sup> 등이 있다. 그러나 위의 방법은 복잡한 광학계로 인한 설치의 어려움과 측정대상의 이동이나 회전 등의 강제운동과 변형 등이 발생시 간섭무늬를 얻는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 시편의 강제이동과 회전이동이 존재하는 경우에도 이용될 수 있고, 진동 등에 상대적으로 둔감하도록 두 CCD 카메라를 사용한 레이저 스페클 방법을 이용하여 CT 시험편에서 균열이 진전할 때의 균열선단 근처의 변형장을 측정하고자 하였다.

## 2. 기본이론

### 2.1 J- A<sub>2</sub> 이론

J- A<sub>2</sub> 이론에 의하면 균열선단의 응력은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{\sigma_{ij}(r, \theta)}{\sigma_0} = \frac{1}{A_1} \left[ \left( \frac{r}{L} \right)^{s_1} \tilde{\sigma}_{ij}^{(1)}(\theta) + A_2 \left( \frac{r}{L} \right)^{s_2} \tilde{\sigma}_{ij}^{(2)}(\theta) + A_2^2 \left( \frac{r}{L} \right)^{s_3} \tilde{\sigma}_{ij}^{(3)}(\theta) \right] \quad (1)$$

여기서

$$A_2 = \frac{\bar{A}_2}{A_1} \quad (2)$$

$$s_1 = \frac{-1}{n+1} \quad (3)$$

$$\bar{A}_1 = \left( \frac{J}{\alpha \epsilon_0 \sigma_0 I_n L} \right)^{1/(n+1)} \quad (4)$$

$$s_3 = 2s_2 - s_1 \text{ for } n \geq 3 \quad (5)$$

위의 식에서  $\sigma_0$  는 항복응력을 의미하며  $\epsilon_0 = \sigma_0/E$  이다.  $E$  는 탄성 계수이다.  $n, \alpha$  는 각각 변형경화지수와 변형 경화 상수이다.  $s_1, s_2, s_3$  는 응력지수(stress exponent)이며  $I_n$  는 무차원화된 적분값(dimensionless integral)이다.  $L$  은 특성길이(characteristic length)이며  $\tilde{\sigma}_{ij}^{(1)}, \tilde{\sigma}_{ij}^{(2)}, \tilde{\sigma}_{ij}^{(3)}$  는 무차원화된 각응력분포(dimensionless angular distribution of

the stress)를 나타낸다. 첫 번째 항은 J-적분의 지배를 받는 소규모 항복하의 HRR 응력장을 나타내며 두 번째, 세 번째 항의 크기는 A<sub>2</sub> 에 의하여 결정된다. 실제 대변형이 일어나는 경우 큰 영역에 걸쳐 소성변형이 일어난다. 이와 같은 대규모 항복응력 상태의 경우 소규모 항복상태에서 유도된 HRR 응력장 계산 시 무시되어진 고차항의 영향을 무시할 수 없게 된다. 이와 같은 고차항의 영향을 A<sub>2</sub> 로 표현할 수 있다. A<sub>2</sub> 에 의해서 실제 파괴인성치 측정 시에 시험편의 균열선단에서의 구속정도를 나타낼 수 있다. 실제로 A<sub>2</sub> 를 측정하기 위한 변형율은 다음식과 같다.

$$\frac{\epsilon_{ij}(r, \theta)}{\alpha \epsilon_0} = \frac{1}{A_1} \left[ \left( \frac{r}{L} \right)^{ns_1} \tilde{\epsilon}_{ij}^{(1)}(\theta) + A_2 \left( \frac{r}{L} \right)^{s_1(n-1)+s_2} \tilde{\epsilon}_{ij}^{(2)}(\theta) + A_2^2 \left( \frac{r}{L} \right)^{s_1(n-1)+s_3} \tilde{\epsilon}_{ij}^{(3)}(\theta) \right] \quad (6)$$

위의 식은 J- A<sub>2</sub> 이론에 의한 균열 선단의 변형장을 표현한 식이다.  $\tilde{\epsilon}_{ij}^{(1)}, \tilde{\epsilon}_{ij}^{(2)}$  는 각 변형을 분포이며  $\tilde{\epsilon}_{ij}^{*(3)}$  는  $\tilde{\epsilon}_{ij}^{(1)}, \tilde{\epsilon}_{ij}^{(2)}$  의 영향까지 포함한 각 변형을 분포이다.  $\theta$  의 함수인  $\tilde{\epsilon}_{ij}^{(1)}, \tilde{\epsilon}_{ij}^{(2)}, \tilde{\epsilon}_{ij}^{*(3)}$  는 Chao and Zhang<sup>(20)</sup>에 자세히 기술되어 있다.

### 2.2 레이저 스페클법

A<sub>2</sub> 측정을 위하여 필요한, 변형장을 얻기 위하여 레이저 스페클 법<sup>(21,22,23,24)</sup>을 이용하였다. 본 실험에서 사용되는 시스템 계는 Fig. 2 와 같다. 시험편의 변형장을 측정하기 위해서 스페클의 이동을 추적해야 한다. 카메라에서 관찰되는 스페클의 이동량은 시편의 변형 뿐 아니라 강제이동의 영향도 반영한다. 따라서 스페클을 이용하여 변형장을 측정하기 위해서는 강제운동으로 인한 스페클의 움직임을 상쇄시켜야 한다. 이를 위해 그림과 같이

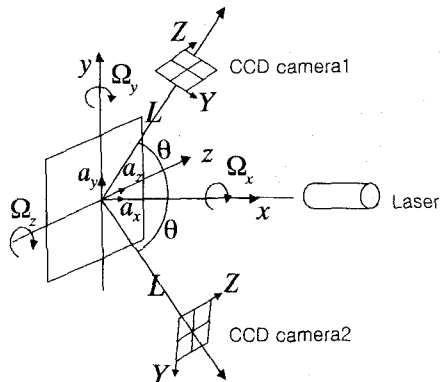


Fig. 2 Coordinate System of Laser Speckle Method

2 개의 카메라를 이용하였다. 위와 같은 시스템 계에서  $x, y, z$  는 시편표면의 좌표계이며,  $X, Y, Z$  는 CCD 카메라의 좌표계이다.  $a_x, a_y, a_z$  는 시편의 강체이동이며,  $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$  는 강체회전을 의미한다.  $L$  은 시편과 카메라간의 거리이다.

시편의 표면에서 변형이 발생하면 스페클은 움직이게 된다. 이러한 움직임은 Bragg's equation 을 이용하여 해석할 수 있다.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (7)$$

위에서  $d$  는 스페클의 두 점간의 거리이며,  $\theta$  는 레이저의 입사와 반사광이 이루는 각도이다.  $\lambda$  는 레이저의 파장이며,  $n$  은 임의의 정수이다. 변형율은 위의 식을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d} = \frac{-\Delta \theta}{\tan \theta} \quad (8)$$

그러므로 스페클의 움직임을 해석하여 회절각의 증가분 즉,  $\Delta \theta$  를 위와 같이 구할 수 있다. 이를 이용하면 시편의 변형으로 인한 CCD 카메라에서 스페클의 움직임은  $L \varepsilon \tan \theta$  임을 알 수 있다.

시편의 변형 뿐 아니라 스페클 무늬의 이동에 영향을 미치는 시편의 강체이동과 회전이동까지 함께 고려하여 CCD 카메라에서의 스페클의 움직임을 표현해 보면 다음 식과 같다.

$$A_y(\theta) = -a_y \cos \theta + a_x \sin \theta + L\Omega_z + \varepsilon_y L \tan \theta \quad (9)$$

여기서  $a_x$  가 매우 작다면, 식(9)는 식(10)과 같이 간단해 지며, 같은 방법으로 아래쪽 카메라에서의 스페클의 이동은 식(11)과 같다.

$$A_y(\theta) = -a_y \cos \theta + L\Omega_z + \varepsilon_y L \tan \theta \quad (10)$$

$$A_y(-\theta) = -a_y \cos \theta + L\Omega_z - \varepsilon_y L \tan \theta \quad (11)$$

식(10)에서 식(11)을 빼면 강체이동 항과 회전이동 항이 소거되고 다음 식과 같이 시험편의 변형을 구할 수 있다.

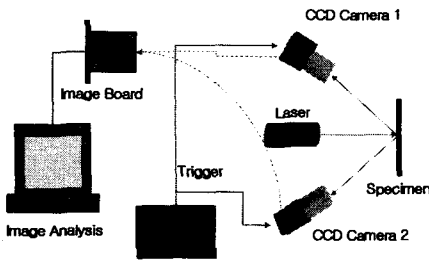


Fig. 3 Schematic Diagram of Laser Speckle Method

$$A_y(\theta) - A_y(-\theta) = 2\varepsilon_y L \tan \theta \quad (12)$$

따라서 시험편에서 두 CCD 카메라간의 거리와 카메라와 레이저 빔이 이루는 각도를 알면 식 (12) 에 의해서 두 개의 CCD 카메라에 찍힌 레이저 스페클의 Y 방향으로의 움직임의 차이를 이용하여 시험편의 변형을 구할 수 있다.

만약  $a_x$  가 무시할 수 없을만큼 충분히 크다면 식(12)는 식(13)과 같이 수정된다.

$$A_y(\theta) - A_y(-\theta) = 2a_x \sin \theta + 2\varepsilon_y L \tan \theta \quad (13)$$

그러므로 이러한 경우  $a_x$  를 추가로 측정하여 대입하면 변형율을 구할 수 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 J-R 곡선

실험재료는 원자력 발전소 주증기 배관재료 사용되는 저 합금 페라이트 강인 SA106Gr.C 강을 사용하였다. 시험편은 ASTM 표준 CT 시험편으로 가공하였다. 파괴인성시험을 위하여 250kN 용량의 유압식 재료시험기(INSTRON)를 사용하였다. 파괴시험시 균열시작과 성장의 측정은 정적인 하중속도 하에서 직류전위차법을 적용하였다. 이 방법에 대한 자세한 묘사는 김시형의 논문<sup>(10)</sup>에 기술되어 있다. 전체적인 실험과정 및 J-R 곡선의 도출은 ASTM E1737-96 규정을 의거하였다.

#### 3.2 $A_2$ 결정

스페클법으로 변형장을 구하기 위하여 레이저와 두 개의 CCD 카메라를 설치하였다. 시스템을 구성하는 장비의 개략도는 Fig. 3 과 같다. 레이저와 CCD 카메라, 영상 처리 보드 그리고 자체 프로그래밍한 스페클 추적 프로그램을 장착한 개인용 컴퓨터로 구성되어 있다. 레이저는 He-Ne 레이저(632.8nm)를 사용하였으며 CCD 카메라는 Pulnix TM-72EX 이다. 스페클 영상 취득 및 저장을 위해서 Data Translation 사의 DT3133 보드를 사용하였다. 두 개의 CCD 카메라로 촬영한 각각의 이미지를 동시에 초당 30 프레임씩 저장할 수 있었다. 스페클의 움직임을 해석하여 각 점의 변위를 구하기 위하여 Visual C++ 이용하여 작성한 프로그램을 이용하였다. 프로그램의 알고리즘을 나타내는 순서도는 Fig. 4 와 같다.

Fig. 4 의 순서도를 자세히 설명하면 다음과 같다. 먼저, 시험편을 인장하면서 얻어진 일련의 스페클 영상 중 최초의 영상에서 한 점을 선택하여 그 주위의 픽셀 400 개 정도의 밝기값과 위치를 저장

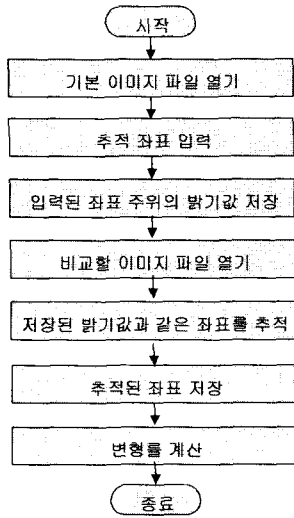


Fig. 4 Flowchart of speckle trace program

한다. 뒤 이은 스페클 영상에서 각 픽셀에 대한 그 주위 400 개 픽셀의 밝기 원 이미지 픽셀의 밝기값들과 비교하여 가장 차이가 적은 점을 찾아내면 이 점이 최초 영상에서 선택한 점의 이동한 좌표이다. 실제 길이와의 보정(Calibration)을 위하여 1 펄스에 1 m 를 움직이는 스텝 모터를 부착한 이송장치를 이용하여 CCD 카메라의 1 픽셀에 해당되는 길이를 환산할 수 있었다. 스페클을 추적하여 특정위치의 스페클의 이동경로를 알아내면보정값을 이용하여  $A_y$  를 계산 후 식(12)에 대입하여 변형율을 구할 수 있다. 또한 시편의 변형으로 인하여 스페클 무늬의 변형이 발생하면 한 개의 기준이미지로는 큰 변형을 측정할 수 없다. 이럴 경우 바로 전 이미지를 기준으로 스페클을 추적하여 각 단계의 변위를 중첩하면 원하는 시간까지의 총 변위(또는 변형)를 측정할 수 있다.

이와 같이 구한 변형율 데이터를 가지고 식(6)과 같은  $J-A_2$  변형율장을 이용하여  $A_2$  를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 균열선단 상하 ( $\pm 90^\circ$ ) 2.5mm 지점의 스페클의 변위로부터 식(12)를 이용하여  $A_2$  를 구하였다. 균열선단시에도  $A_2$  를 측정하기 위하여 빔확대기(beam expander)를 이용하여 한 변이 약 10mm 인 스페클 영상을 저장하였다.  $A_2$  계산을 위해 변형율을 측정하는 점은 균열선단 소성영역 안에 있어야 한다. 3 차원 소성영역의 형태는 시험편의 중심부에서 평면 변형율 상태에 가까우며 시험편의 표면에서는 평면 응력 상태에 가깝다. 또한 평면 변형율 상태의 소성영역의 크기는 평면응력 상태보다 더 작으므로 평면 변형율

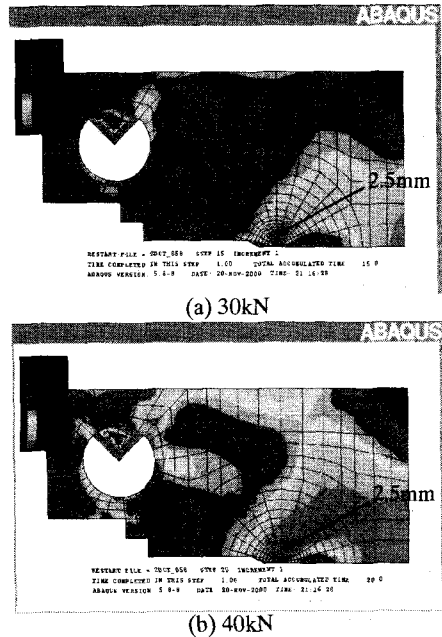


Fig. 5 Plastic zone using FEA

상태의 소성 영역내부에 해당되는 지점은 실제의 소성영역 내부에 존재한다. Fig. 5(a)은 평면 변형율인 경우에 균열시작하중(대략 30kN)에서의 소성역 크기를 보여주는 것으로서 측정하고자하는 위치 ( $r=2.5\text{mm}$ ,  $\theta=\pm 90^\circ$ )가 소성역 안에 있음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 5(b)에서도 하중 40kN 에 대해서 변위 측정점이 소성역 안에 있음을 알 수 있었다. 따라서 측정되어진 변위값을 충분히  $A_2$  계산식에 적용할 수 있다. 균열이 진전하기 시작하면 단계별로 균열선단의 변화에 따른 측정점에 대한 새로운 위치를 결정하여 변형율을 구한 다음, 식(6)을 이용하여  $A_2$  를 계산하였다.

### 3.3 실험절차

CT 시험편을 두께에 따라 1T(25.4mm), 1/2T(12.7mm), 1/4T(6.35mm)로 가공하였다. 예비 피로균열을 생성한 후 측면 홈을 가공하여 균열진전시 터널링 현상을 방지하였다. 전압강하를 측정하기 위해 시험에 가공된 나사 탭에 전류 공급선과 전압신호를 받기위한 선을 체결하였다. COD 측정장치로의 전류흐름을 막기 위해 절연체로 만든 나이프에지를 시험편의 COD 게이지를 장착할 부분에 체결후 COD 측정기를 균열입구에 설치한다. 또한 시험기로의 전류 누수를 막기 위해 특별히 제작된 절연판을 상하에 설치한다. 전압강하와 COD 측정값은 증폭기를 거쳐 Data Translations 사의 DT322

보드를 이용하여 디지털 신호로 저장하였다. 시험기의 컨트롤러의 데이터 소자를 이용하여 하중과 변위값을 같은 방법으로 저장하였다. 인장시험기 앞에 방진테이블을 설치하고 그 위에 레이저와 CCD 카메라를 설치하였다. 스펙클 영상을 저장하기 위해 DT3133 보드를 이용하여 BMP 파일로 저장하였다. 시험의 인장속도는 0.01mm/sec 이다.

#### 4. 결과 및 분석

##### 4.1 J-R 곡선

직류전위차법을 적용하여 구한 COD 와 균열길이의 관계는 Fig. 6 과 같다. 1T 와 1/2T 는 COD 값이 비슷할데 1/4T 의 경우 매우 다른 값을 나타내고 있다. 이러한 경향은 뒤에서 설명할 J-R 곡선에서도 그대로 나타난다.

Fig. 7 은 측정된 J-R 곡선이다. 1T 와 1/2T 의 경우 균열 시작점의 값, 즉  $J_c$  값이 거의 차이가 없으나 1/4T 의 경우  $J_c$  값이 감소함을 보인다. 이로써 일정 두께 이상일 때는 균열 진전에 두께의 영향이 미비하지만 그 이하가 되면 파괴인성의 감소가 확인함을 알 수 있다.

##### 4.2 $A_2$ - $\Delta a$ 관계

위에서 구한 J 값과 균열선단에서  $90^\circ$  각도로 2.5mm 거리에 있는 점의 변형율을 구하고 그 때의 J 값을 이용하여 식(6)에서  $A_2$  를 구하였다.

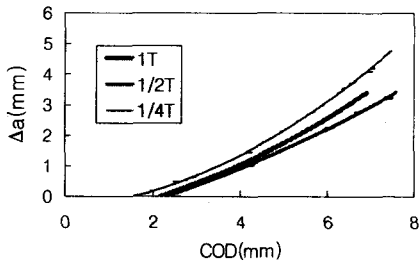


Fig. 6 COD -  $\Delta a$  Curve

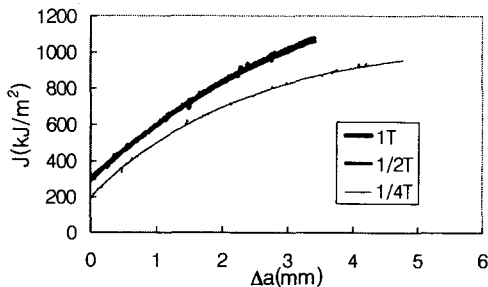


Fig. 7 J-R Curve

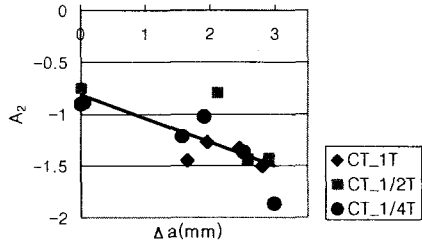


Fig. 8 Relationship between  $\Delta a$  and  $A_2$

Fig. 8 은  $A_2$  와  $\Delta a$  와 관계를 나타내며  $A_2$  가 두께에 따라 크게 변하지 않은 것을 알 수 있었다. 또한 균열이 진전함에 따라  $A_2$  가 감소함을 알 수 있다. 이는 균열이 진전함에 따라서 면내구속이 감소함으로  $A_2$  가 감소한 것으로 생각된다. 다양한 시험편에 대한 실험을 통하여 다양한  $A_2$  에 대한 파괴인성치를 측정함으로써 J-  $A_2$  이론을 실제 구조물에 적용할 수 있을 것이다.

#### 5. 결론

탄소성 파괴에 J-  $A_2$  이론을 적용하기 위하여  $A_2$  를 실험적으로 측정하고자 하였다. 레이저 스펙클법을 이용하여 CT 시험의 변형장을 측정하였다. 스펙클을 추적하여 변형율을 구하기 위해서 스펙클의 움직임에 포함된 강체이동의 영향을 CCD 카메라 2 개를 이용하여 상쇄하였다. 레이저 스펙클에 의하여 구한 변형율과 실험으로 결정된 J 값을 이용하여  $A_2$  를 실험적으로 결정해보였으며 두께에 따른  $A_2$  를 고찰하였다.

#### 후기

본 연구는 1999 년도 과학기술부의 원자력 기초 연구 사업의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Al-Ani, A. M. and Hancock, J. W., 1991, "J-Dominance of Short Cracks in Tension and Bending", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.39, pp. 23-43
- (2) Du, Z.-Z. and Hancock, J. W., 1991, "The Effect of Non-Singular Stresses on Crack-Tip Constraint", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.39, pp. 555-567
- (3) Betegon, C. and Hancock, J. W., 1991, "Two-Parameter Characterization of Elastic-Plastic Crack-

- Tip fields”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.58, pp. 104-110
- (4) O’Dowd, N. P. and Shih, C. F., 1991, “Family of Crack-Tip Fields Characterized by a Triaxiality Parameter-I. Structure of Fields”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.39, No.8, pp. 989-1015
- (5) O’Dowd, N. P. and Shih, C. F., “Family of Crack-Tip Fields Characterized by a Triaxiality Parameter-II. Fracture Applications”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 40, No.5, pp. 939-963
- (6) O’Dowd, N. P. and Shih, C. F., 1992, “Two Parameter Fracture Mechanics : Theory and applications”, in *Constraint Effects in Fracture, ASTM STP 1207*, American Society for Testing and Materials, Tennessee, pp. 21-47
- (7) Yang, S., Chao, Y. J., Sutton, M. A., 1993, “Higher order Asymptotic Crack Tip Fields in a Power-Law Hardening Material”, *Eng. Fracture Mech.*, Vol.45, No.1, pp. 1-20
- (8) Chao, Y. J., Yang, S., and Sutton, M. A., 1994, “On the Fracture of Solids Characterized by One or Two Parameters: Theory and Practice”, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol.42, No.4, pp. 629 – 647
- (9) Chao, Y. J. and Lam, P. S., 1998, “On the Use of Constraints Parameter  $A_2$  Determined from Displacement in Predicting Fracture Event”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.61, pp. 487-502
- (10) 김시영, 강기주, 정대율, 1999, “연성재료의 동적 파괴시험시 직류전위차법에 의한 균열개시점의 결정”, *대한기계학회 추계학술대회 논문집(A)*, pp. 147-152
- (11) 김현중, 김시영, 강기주, 정대율, 2000, “대규모 항복조건하에서 페라이트강의 파괴거동에 대한 하중속도의 영향” *대한용접학회 특별강연 및 추계학술발표대회 개요집*, Vol.36, pp. 155-158
- (12) William, N., Sharpe, Jr., 1982, “Applications of the Interferometric Strain/Displacement Gauge”, *Optical Engineering*, Vol.21, No.3, pp. 483-488
- (13) Johnson, P., 1998, “Strain field measurements with dual-beam digital speckle photography”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.30, pp. 315-326
- (14) Sjö Dahl, M., 1994, “Electronic speckle photography: increased accuracy by nonintegral pixel shifting”, *Applied Optics*, Vol.33, No.28, pp. 6667-6673
- (15) Sjö Dahl, M., 1995, “Electronic speckle photography: measurement of in-plane strain fields through the used of defocused laser speckle”, *Applied Optics*, Vol.34, No.25, pp. 5799-5808
- (16) Tyrer, J. R., 1986, “Critical Review of Resent Development in Electronic Speckle Pattern Interferometry”, *Holographic Nondestructive Testing Proc. SPIE*, Vol.604, pp. 55-111
- (17) Vest, C. M., 1979, *Holographic Interferometry*, John Willey & Sons Press, pp. 146-245
- (18) Jia, Z. and Shah, S. P., 1995, “Crack Detection in Concrete Using Real-Time ESPI Technology”, *SPIE*, Vol.2455, pp. 385-391
- (19) Jia, Z. and Shah, S. P., 1994, “Two-dimensional Electronic-Speckle-Pattern Interferometry and Concrete-Fracture Processes”, *Experimental Mechanics*, Vol.34, No.3, pp. 262-270
- (20) Chao, Y. J. and Zhang L., 1996, “Table of plane strain crack tip fields: HRR and higher order terms”, *ME-report 97-1*, University of South Carolina
- (21) Yamaguchi, I., 1981, “A Laser-Speckle Strain Gauge”, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol.14, pp. 1270-1273
- (22) Noh, S. and Yamaguchi, I., 1992, “Two-Dimensional Measurement of Strain Distribution by Speckle Correlation”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.31, pp. L1299-L1301
- (23) Ogura, K. and Nishikawa, I., 1996, “Laser Speckle Strain/Displacement Gauge and its application to Fracture problems of ceramics and ceramic coating”, *Pro. of APCFS’96, Korea*, pp. 749-754
- (24) Yamaguchi, I., Takemori, T., Kobayashi, K., 1993, “Stabilized and accelerated speckle strain gauge”, *Optical Engineering*, Vol.32, No.3, pp. 618-625