

# 스트레인게이지법을 이용한 동적응력확대계수 평가

이현철\*·김덕희\*·김재훈\*\*·문순일\*\*\*

## Evaluation on dynamic stress intensity factor using strain gage method

H. C. Lee, D. H. Kim, J. H. Kim and S. I. Moon

Key Words: Dynamic stress intensity factor (동적응력확대계수), Strain gage method (스트레인게이지법), Instrumented charpy impact test (계장화살피충격시험)

### Abstract

Strain gage method is used to evaluate the mode I dynamic stress intensity factor of maring steel(18Ni) and titanium alloy(Ti-6Al-4V). To decide the best strain gage position on specimen, static fracture toughness test was performed. Then instrumented charpy impact test and dynamic tensile test was performed by using strain gage method for evlauating dynamic stress intensity factor. Strain gage signals on the crack tip region are used to calculate the stress intensity factors. It is found that strain gage method is more useful than method by using load which is obtained from impact tup to assess dynamic characteristics such as dynamic stress intensity factor

#### 기호설명

- $\mu$  : shear modulus
- $\nu$  : Poisson's ratio
- $E$  : Young's modulus
- $A_m, B_m$  : unknown coefficients
- $r$  : distance from crack tip to attached strain gage(mm)
- $\theta$  : angle between x-axis of crack tip and attached strain gage( $^\circ$ )
- $\alpha$  : angle between x-axis and attached strain gage
- $x', y'$  : rotated coordinate system
- $\epsilon_x, \epsilon_y$  : strains relative to a rotated coordinate system
- $P_Q$  : crack initiation load
- $W$  : width of specimen (mm)

#### 1. 서론

재료에 따라 기계적 특성들은 하중속도에 의존하는 경우가 많다. 이런 기계적 특성들 중 파괴인성은 기계구조물을 파괴 역학적으로 안전하게 설계하는 경우뿐만 아니라, 운전되고 있는 기계 건전성의 측면에서 매우 중요한 파라미터이다. 특히 동적파괴인성의 경우 신뢰성있는 결과를 얻기 위한 시험평가 방법에 관한 연구<sup>(1)-(2)</sup>가 계속되고 있다. 그러나 기존의 시험법들은 load cell이나 충격자에서 얻어지는 하중신호를 이용하지만, 이는 균열선단에서의 동적거동을 직접적으로 나타낼 수 없는 제약성을 가지고 있다.

본 연구에서는 동적응력확대계수를 평가하기 위해 스트레인게이지법을 이용하였다. 스트레인게이지법은 Dally 와 Sanford<sup>(3)</sup>가 제시한 균열선단의 변형률식을 이용하여, 시험에 의한 변형률값으로부터 응력확대계수를 평가하는 방법이다. 스트레인게이지법의 적용성 및 스트레인게이지의 부착 위치를 선정<sup>(4)-(5)</sup> 하기 위하여, 정적시험을

\* 충남대학교 대학원

\*\* 충남대학교 기계설계공학과

\*\*\* 국방과학 연구소

통해 기존의 ASTM E399<sup>(6)</sup> 방법과 스트레인게이지법에 의한 결과를 비교하였고 동적시험의 자료로서 이용되었다. 시험평가에 사용된 재료는 항공기나 로켓의 추진기용 구조재료 사용되는 마래이징강과 티타늄 합금을 이용하였다. 시험편은 피로균열이 삽입된 3점굽힘시험편과 CT 시험편을 사용하였으며 정적시험과 샷피충격시험 및 동적인장시험을 수행하였다.

## 2. 이론적 배경 및 실험방법

### 2.1 다중변수법에 의한 균열선단의 변형률장

균열선단의 변형률을 이용하여 응력확대계수  $K_I$ 를 결정하는 방법은 Westergaard의 응력 함수를 사용하여 Dally 와 Sanford에 의해 연구되었다. 균열선단주위의 응력장을 Airy의 응력 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\Phi = Re \bar{Z} + yIm \bar{Z} + yIm \bar{Y} \quad (1)$$

$$\sigma_{xx} = ReZ - yImZ' - yImY' + 2ReY$$

$$\sigma_{yy} = ReZ + yImZ' + yImY' \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = -yReZ' - yReY' - ImY$$

Fig. 1에서 지정한 좌표계의 경우, single-ended 균열의 응력 함수  $Z$  와  $Y$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} Z(z) &= \sum_{n=0}^N A_n z^{n-1/2} \\ Y(z) &= \sum_{m=0}^M B_m z^m \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 복소 변수  $z = x + iy$  이다.

또한 식(2)의 응력장으로부터 변형률장을 구할 수 있다. 여기서 계수  $A_m, B_m$ 들의 값이 무한하기 때문에, 이 값들을 결정하기 위해서는 미지수 만큼의 스트레인게이지가 필요하므로 실제적으로 적용하기가 어렵다. 따라서 급수의 일정부분을 절단오차로서 무시하고,  $n$ 과  $m$ 을 0, 1로 전개하여 정리하였다. 또한 Fig. 1에서 지정된 것처럼 임의의 위치  $P(r, \theta)$ 의 좌표중심점을 갖는  $(x', y')$  좌표변환을 하면 다음 식으로 표현된다.

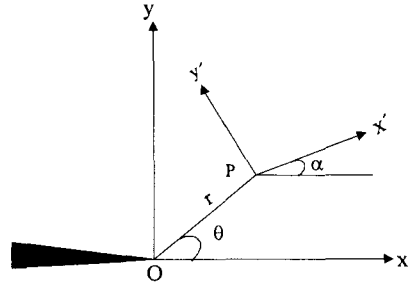


Fig 1. Definition of coordinate systems  $O_{xy}$  and  $P_{x'y'}$

$$\begin{aligned} 2\mu\epsilon_{xx} &= A_0 r^{-1/2} [k \cos(\theta/2) - (1/2) \sin \theta \\ &\sin(3\theta/2) \cos 2\alpha + (1/2) \sin \theta \cos(3\theta/2) \\ &\sin 2\alpha] + B_0 (k + \cos 2\alpha) + A_1 r^{1/2} \cos(\theta/2) \\ &[k + \sin^2(\theta/2) \cos 2\alpha - (1/2) \sin \theta \sin 2\alpha] \\ &+ B_1 r [(k + \cos 2\alpha) \cos \theta - 2 \sin \theta \sin 2\alpha] \end{aligned} \quad (4)$$

$$k = (1 - \nu)/(1 + \nu) \quad (5)$$

### 2.2 변형률장과 응력확대계수의 관계

식(4)의 변형률장에 대한 식들은 임의의 위치  $r, \theta$ 에서의  $x$  축 및  $y$  축 방향으로 부착된 스트레인게이지로부터의 데이터 값을 이용하면,  $K_I$ 은 식(6)과 같은 관계를 갖는다. 즉  $A_0$ 값이 결정되면  $K_I$ 값을 구할 수 있다.

$$K_I = A_0 \sqrt{2\pi} \quad (6)$$

식(6)은  $P(x', y')$  좌표계에서  $\alpha$  방향으로 위치한 스트레인게이지에서 측정된  $\epsilon_{xx}$ 와  $K_I$ 의 관계를 알 수 있는 식이다.  $r$ 은 균열선단에서 스트레인게이지 중심까지의 거리이고,  $\alpha$ 는 스트레인게이지의 회전각을 나타낸다. 식(6)에서 절단오차로  $B_1$ 항을 무시한다면,  $B_0$ 항은 다음과 같은 조건하에서 제거된다.

$$\cos 2\alpha = -k = -(1 - \nu)/(1 + \nu) \quad (7)$$

또한,  $A_1$  항은 다음의 조건하에서 제거된다.

$$\tan(\theta/2) = -\cot 2\alpha \quad (8)$$

따라서 식(5)에서 세 개의 변수를 이용하고, 식(7)과 (8)을 만족시키는 위치와 방향에 한 개의 스트레인 게이지를 부착하여  $K_I$  값을 얻을 수 있다. 실험에 사용된 두 재료 모두 실험에 의하여 구한 프와송비가 0.31이었고, 이를 이용하면 스트레인게이지의 부착 방향은  $\theta = 63.57^\circ$ ,  $\alpha = 60.89^\circ$  이다. 이 값에 의하여 식(4)와 (6)을 정리하면 식(9)를 얻을 수 있다.

$$K_I = 2.95731 E \sqrt{r} \epsilon_{xx} \quad (9)$$

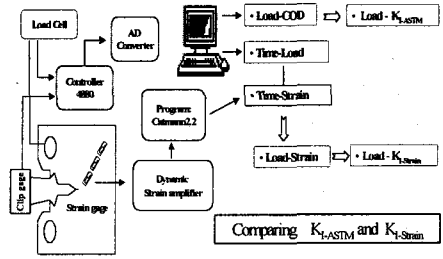
### 3 시험방법

본 시험에 사용된 재료는 로켓의 추진기용 구조재 및 항공기에 사용되는 마레이징강(18Ni)과 티타늄합금(Ti-6Al-4V)을 이용하였다. Table 1은 두 재료의 기계적 특성이다.

스트레인게이지법의 적용성 및 최적위치를 얻기 위하여 기존의 ASTM E399<sup>(6)</sup>의 정적과괴인성 실험을 병행하였고 두 결과를 비교 검토하였다. 정적응력확대계수의 평가 방법의 경우 전반적인 시험방법은 Fig.2 와 같다.

**Table 1** Mechanical properties of maraging steel and titanium alloy

Properties	Maraging steel	Titanium alloy	unit
Young's Modulus	17,221	11,502	kgf/mm <sup>2</sup>
Yield strength	155.6	104.04	kgf/mm <sup>2</sup>
Tensile strength	163.2	105.72	kgf/mm <sup>2</sup>
Poisson's ratio	0.31	0.31	.
Elongation	7.7	.	%
Hardness	50.96	44.31	H <sub>RC</sub>



**Fig. 2** Schematic setup of static test

동적시험은 피로균열을 삽입된 3점 굽힘시험편에 정적시험으로부터 얻은 최적의 위치에 스트레인게이지를 부착하고 360J의 계장화살피충격시험기를 이용하여 5m/s의 속도로 시험하였고, CT 시험편은 동적인장시험기를 이용하여 5m/s의 균일 속도로 시험하였다.

### 4. 시험결과 및 고찰

#### 4.1 $K_{I-Strain}$ 과 $K_{I-ASTM}$

정적과괴인성실험에서 구한 시간-변형을 곡선을 이용하여, 스트레인게이지법에 의한 응력확대계수  $K_{I-Strain}$  을 구하였다. 또한 ASTM E399 규정에 의해 하중-COD 변화에 따른 응력확대계수  $K_{I-ASTM}$  을 구하였다. 균열개시하중은 하중-COD 곡선으로부터 구하고, 균열개시하중에 도달하는 시간에 해당되는 변형률 값을 평가에 적용하였다. 두 결과의 응력확대계수비  $K_{I-Strain}/K_{I-ASTM}$  의 주요 결과를 Table 3과 4에 나타내었다. 정적 실험의 결과 응력확대계수를 구하기 위한 스트레인게이지법의 유용성을 판단하였고 동적실험을 위한 데이터로 활용하였다.

**Table 3** Result of static stress intensity factor using strain gage method of 3PB specimen

Material	r/W	$K_{I-ASTM}$ kgf/mm <sup>3/2</sup>	$K_{I-strain}$ kgf/mm <sup>3/2</sup>	$\frac{K_{I-strain}}{K_{I-ASTM}}$
Maraging steel	0.209	331.59	322.53	0.94
Titanium alloy	0.103	103.81	95.51	0.92

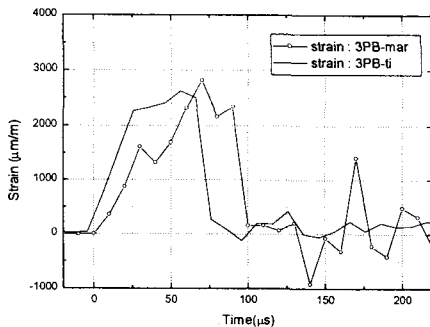
**Table 4** Result of static stress intensity factor using strain gage method of CT specimen

Material	r/W	$K_{I-ASTM}$ kgf/mm <sup>3/2</sup>	$K_{I-strain}$ kgf/mm <sup>3/2</sup>	$\frac{K_{I-strain}}{K_{I-ASTM}}$
Maraging steel	0.062	343.12	327.85	0.95
Titanium alloy	0.069	140.07	139.52	0.94

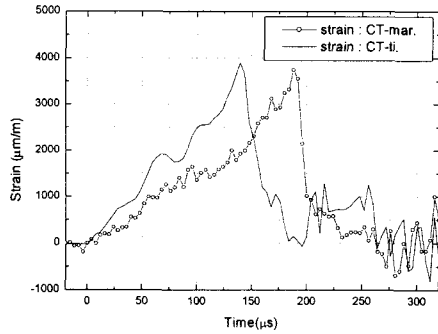
4.2 동적파괴인성 시험결과

Fig. 3과 4는 각각 3점 굽힘시험편의 샤피충격 시험과 CT 시험편의 동적인장시험으로부터 얻은 스트레인게이지의 시간-변형률곡선을 나타낸 것이다. 균열 개시점에 대한 정확한 평가가 어려워 최대 변형률값에서 동적응력확대계수를 평가하였다. 최대 변형률값에 도달하는 시간과 최대 하중에 도달하는 시점을 검토해 볼 때 두 시험방법은 다른 거동을 나타내었다. 샤피충격시험기는 충격자가 직접 하중신호를 획득하지만, 동적인장시험의 경우 actuator에 의해 하중이 시험편에 전달된 후 하중신호를 얻는 로드셀로 전달되기 때문이다.

Table 5는 샤피 충격시험기의 충격자에서 얻어진 하중값을 이용하여 계산한 응력확대계수값과 스트레인게이지법을 이용하여 계산된 응력확대계수값을 비교한 결과이다. 하중에 의해 평가된 값들은 매우 낮은 값은 나타내고 있다. 이는 정확한 영점조정이 이루어지지 않은 것으로 판단된다. 또한 일정한 값은 나타내지 않고 있다. 영점조정이 되었다 하더라도 시험편의 충격 위치 또는



**Fig. 3** Time-strain curves of maraging steel and titanium alloy in Charpy impact test



**Fig. 4** Time-strain curves of maraging steel and titanium alloy in dynamic test

시험기의 성능과 조건에 따라 이러한 편차가 크게 발생되며, 관성 및 응력파의 영향을 받아 균열선단에서의 충격 때의 직접적인 거동을 나타내지 않는 것으로 생각된다. 이로 인해 샤피 및 기존 낙하추 충격시험기에서 평가 될수 있는 하중값들은 균열길이를 고려하여 이러한 관성 및 응력파의 영향을 줄일수 있는 속도 범위에서 이루어져야 하는 제약이 있음을 알 수 있다.

Table 6은 마레이징강과 티타늄합금에서 CT 시험편의 동적인장실험을 수행하여 얻은 동적응력확대계수를 나타낸 결과이다. 하중에 의한 값은 매우 크게 평가되었고 이를 보정하는 방법을 동적장비에서 제시하고 있지만 편차가 심하여 하중에 의한 응력확대계수는 적용하지 않았다. 위의 결과를 이용하여, 정적시험과 충격 및 동적인장시험에 대한 결과들을 비교하였다. Fig. 5와 6은 각각 마레이징강과 티타늄합금에 대한 3점 굽힘시험편의 샤피충격시험과 CT 시험편의 정적

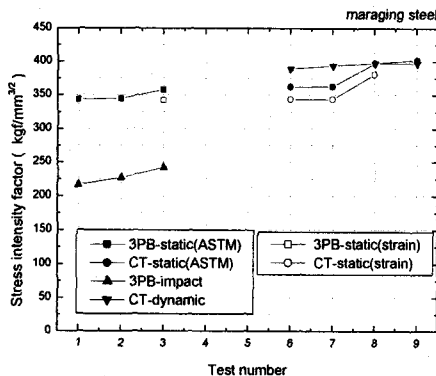
**Table 5.** Results of dynamic stress intensity factor for 3PB of Charpy impact

Material	r/W	Max.Load (kgf)	$K_{Iid-ASTM}$ ( kgf/mm <sup>3/2</sup> )	$K_{Iid-strain}$ ( kgf/mm <sup>3/2</sup> )
Maraging steel	0.107	59	33	215
	0.111	251	135	226
	0.224	26	15	241
Titanium alloy	0.092	104	60	96
	0.105	80	49	90
	0.115	86	62	92

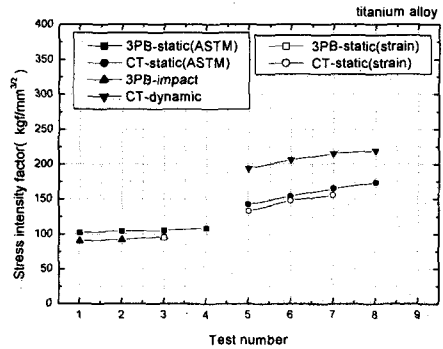
**Table 6.** Results of dynamic stress intensity factor for CT of dynamic test

Material	r/W	Max.Load (kgf)	$K_{I, ASTM}$ ( $kgf/mm^{3/2}$ )	$K_{I, strain}$ ( $kgf/mm^{3/2}$ )
Maraging steel	0.085	6545	670	397
	0.094	6286	632	396
	0.065	5768	594	402
Titanium alloy	0.044	3695	378	194
	0.046	3909	410	206
	0.054	3693	379	219

시험 및 동적시험의 결과를 비교하기 위하여 함께 나타낸 것이다. 응력확대계수값은 모두 균열개시시점에서의 값이 아닌 최대값에서의 상대적인 평가가 이루어졌다. 마레이징강의 경우 살피충격시험으로부터 구한 응력확대계수는 정적시험에서 구한 결과에 비해 40%정도 낮은 값을 나타내었고, 동적인장시험에 의한 값은 정적시험과 유사한 응력확대계수 값을 나타내었다. 티타늄합금의 경우 살피충격시험으로부터 구한 응력확대계수는 정적시험에 의한 값과 유사한 값을 보이고 있는 반면 동적시험에 의한 값은 정적시험 결과보다 18%가량 증가하고 있다. 또한 살피충격시험에 의한 응력확대계수 값은 동적시험에 비하여 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있다.



**Fig. 5** Comparison of stress intensity factor for maraging steel



**Fig. 6** Comparison of stress intensity factor for titanium alloy

이전의 연구<sup>(7)~(8)</sup>에 의하면 마레이징강은 변형률속도에 의한 영향을 크게 받지 않는다고 하였으며, 티타늄합금의 경우 큰 변형률속도에 대하여 동적응력확대계수는 정적결과에 비해 크다고 보고하고 있다. 이는 본 연구의 CT 시험편에 대한 동적실험의 결과와 유사한 경향이다. 3점 굽힘시험편과 CT 시험편의 결과가 큰 차이를 보이는 것은 시험편의 채취때의 균열방향에 따른 영향이 주요한 원인으로 판단된다. 또한 충격시험으로 동적응력확대계수를 구할 때 고려하지 못한 관성력 및 충격량이 재료 파괴특성에 미치는 영향들에 대한 연구가 필요하며, 충격시험에서 스트레인게이지법을 이용하여 구한 동적응력확대계수의 평가방법이 적용될 수 있는 타당성에 대한 데이터가 더 확보되어야 한다고 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 동적 응력확대계수를 평가하기 위하여 다중 변수법에 의한 스트레인게이지법을 이용하였다. 스트레인게이지법의 유용성 및 게이지의 최적위치는 정적 실험을 통하여 결정하고, 살피충격시험과 동적인장시험을 수행하여 스트레인게이지법에 의한 동적응력확대계수를 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 스트레인게이지법은 동적응력확대계수를 평가하기 위한 방법으로 이용될 수 있다. 이 방법은 비교적 간단히 기존 시험장비와 평가법을 적

용할 수 있다.

(2) 최적응답을 얻기 위한 스트레인게이지의 위치는 균열선단의 항복영역을 벗어난 가장 근접한 위치를 선정하여야 한다. 또한 시험편이 작은 경우 상대적으로 작은 스트레인게이지의 선정이 필요하다.

(3) 마레이징강의 경우 변형을 속도에 따른 재료의 파괴인성에 미치는 큰 영향은 없으나, 티타늄합금의 응력확대계수는 변형률 속도가 커지면 증가한다.

(4) 두 재료 모두 충격실험으로부터 구한 응력확대계수 값은 동적실험에 비해 작다. 티타늄합금은 충격에 큰 영향을 받지 않지만 고장력강인 마레이징강은 충격에 취약한 특성을 보이고 있다.

Dynamic Fracture-initiation Toughness,"Experimental Mechanics, pp.188~194, June 1989.

- (8) T. J. Koppelaar, "Dynamic Fracture Toughness Measurements of High-Strength Steels Using Precracked Charpy Specimens,"Instrumented Impact Testing, ASTM STP 563, pp.92~117, 1974.

### 참고문헌

- (1) T. Kobayashi and J. W. Dally, 1980, "Dynamic Photoelastic Determination of the C-K Relation for 4340 Alloy Steel,"Crack Arrest Methodology and Applications, ASTM STP 711, pp. 189~210.
- (2) B. S. Kang and A.S.Kobayashi,1988, "J-Resistance Curves in Al SEN Specimens Using Moire Interferometry,"Experimental Mechanics, Vol. 28, No. 2, pp. 154~158.
- (3) J. W. Dally and R. J. Sanford, 1988, "Strain Gage Methods for Measuring the Opening - Mode Stress Intensity Factor  $K_I$ ", Experimental Mechanics, Vol. 27, pp.381~388.
- (4) 이억섭, 나경찬, 1995, "스트레인 측정에 의한 응력확대계수 결정,"한국정밀공학회지, 제12권, 제8호, pp. 147~155.
- (5) L. Parnas and O. G. Bilir, 1996, "Strain Gage Method for Measurement of Opening Mode Stress Intensity Factor,"Engineering Fracture Mechanics, Vol. 55, No. 3, pp. 485~492.
- (6) ASTM Standard E399-90, 1990, "Standard Test Methods for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials,"1990 Annual Book of ASTM Standards. pp. 407~437.
- (7) T. Yokoyama and K. Kishida, "A Novel Impact Three-point Bend Test Method for Determining