

열충격하에 있는 균열체의 파괴시간

Fracture Time of Cracked Body under Thermal Shock

이 강 용*, 박 정 수**
K. Y. Lee, J. S. Park

ABSTRACT

In the research on the fracture time of soda lime silicate glass under thermal shock, it is shown that the theoretical and experimental fracture times are in good agreement, the suggested method to measure critical stress intensity factor for small three-point bending specimen is useful and the edge temperature before thermal shock on cracked side vs. crack length and fracture time are inversely proportional.

1. 서 론

선진 여러 국가에서는 세라믹 엔진의 개발에 관한 많은 연구를 진행하고 있고 또 자동차는 점차 전자화 되어가는 추세에 있다. 이와 같이 엔진 재료로서 또 반도체 재료로서 세라믹 재료가 사용될 때 열충격으로 인한 균열 발생으로 최종적으로 파괴에 이르는 경우가 있다. 이러한 열충격 파괴를 해결하기 위해서는 열충격 균열과 관련한 이론을 개발하고 그 이론의 타당성을 실험에 의해 입증하는 연구가 필요하다. 열충격 파괴역학에 관한 이론 연구에서는 수치해석으로 계산한 1차원 온도분포로부터 균열전단의 열응력세기 계수(thermal stress intensity factor)^{1,2)}를 계산하거나 2차원 온도분포로부터 균열전단 주위에서 J 적분을 계산하였다.^{3,6)} 그러나 1차원 온도분포에 의한 응력세기계수 값

은 그 정확도가 떨어지고 J 적분에 의한 방법은 2차원 온도 분포를 사용하므로 정확도가 높지만 완전한 선적분 형태가 아니고 면적분 항을 포함하고 있으므로 계산과정이 복잡하다. 이러한 결점을 보완하기 위해 최근 저자는 선적분 형태의 J 적분식을 제시한 바 있다.⁶⁾ 세라믹 재료와 관련한 열충격 파괴 연구로서 Hasselman⁷⁾은 열충격을 받는 세라믹 재료의 탄성에너지를 계산하고 재료상수의 영향을 검토하였으나 열충격을 받는 균열의 안정조건식을 유도할 때 파괴역학을 이용하지 않았다. 또 그는 미소 균열이 존재하는 재료가 열충격을 받을 때 이 균열이 재료상수와 파괴강도에 미치는 영향을 검토하였다.⁸⁾ Davis 등⁹⁾은 열충격을 받는 이중 외팔보 시편의 1차원 온도분포를 이용하여 에너지 해방률을 계산하여 균열 진전과 멈춤을 해석하였으며 실험결과와 비교하였다. 세라믹 재료의 파괴인성 측정은

* 정회원, 연세대학교 기계공학과
** 삼성전자주식회사 종합연구소 기초기술연구실

주로 압인법을 적용하고 있고 그의 방법은 찾아보기 어렵다. 그러나 이 방법에는 아직 연구의 여지가 남아있어 최근에도 개선 발전된 연구가 진행되고 있다.¹⁰⁾ 세라믹 재료의 파괴시간 측정에 관한 연구는 희귀한 것 같다.

본 연구에서는 저자가 유도한 선적분 형태의 J 적분식⁶⁾과 참고문헌 6에서 언급한 수치해석 방법을 이용하여 열충격을 받는 시편의 모드 I J 적분 값을 시간의 변화에 따라 계산하고 압인법으로 인한 파괴인성의 오차를 줄이기 위해 소형 3점 굽힘 시험법을 개발하여 소다회유리의 임계응력세기계수를 측정한다.

측정값으로부터 임계 J_c 값을 구하고 참고문헌 6의 J 식으로부터 임계 J_c 적분값에 도달하는 이론 파괴시간을 구한다. 이 이론치는 열전대로 측정한 실험 파괴시간과 비교된다.

2. 임계응력세기계수 측정

소형 3점 굽힘 시편의 재료는 KS L 2012 (JIS R 3202)인 소다회 유리(soda lime silicate glass)이며, 시편의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에서

Table 1 Chemical compositions of soda lime silicate glass

Constituent	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O
Composition (wt %)	72	0.9	0.1	10	3	14

Table 2 Mechanical properties of soda lime silicate glass

Specific heat per unit mass	$C = 840 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$
Thermal conductivity	$k = 0.785 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$
Thermal expansion coefficient	$\alpha = 8.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Young's modulus	$E = 73.5 \text{ GPa}$
Density	$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
Poisson's ratio	$\nu = 0.25$

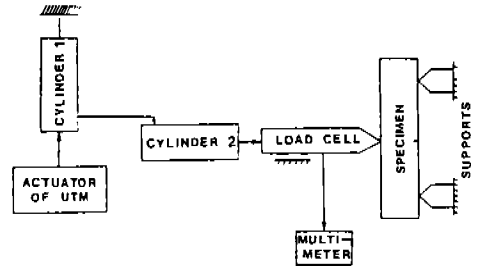


Fig.1 Block diagram of apparatus for K_c testing



Fig. 2 Photograph of apparatus for K_c testing

1	Cylinder 1
2	Cylinder 2
3	Actuator of UTM
4	Load cell
5	Multimeter
6	Specimen
7	Supports

보는 바와 같다. 시편은 판유리에서 다이아몬드 커터로 잘라 내었으며 시편이 정확한 크기로 절단되므로 가장자리는 연마하지 않았다. 균열은 시편의 긴 가장자리의 중앙부분에 두께가 0.25mm이고 지름이 120mm인 다이아몬드 휠커터로 가공하였으며, 휠의 속도는 1800 rpm이며 물로 냉각하였다. 휠커터의 단면은 반원형이다.

균열길이 a_0 는 1mm에서부터 각각 1mm씩 증가시킨 4가지 종류로 하였다. 시편의 폭 W 는 75mm이며 두께 B 는 5mm이고 지지점간 거리 L 는 150mm이다.

시편은 두께가 얇기 때문에, 수직으로 세워 놓고 시험하기가 어려우므로, 수평으로 설치하여 시험하기 위하여 Fig.1과 Fig.2에서 보는 바와 같이 유압식 동적 만능재료 시험기 (Instron Model 1350)에 유압장치를 부착하여 수평하중이 작용하도록 하였다. 수직 방향으로 설치된 실린더 1은 만능재료시험기의 액츄에이터에 연결되었고, 수평 방향으로 놓인 실린더 2는 제작한 로드셀(load cell)에 설치하였으며 두 실린더는 유압호스로 연결하였다. 로드셀은 휘스톤브리지 형태이며 최대용량이 200 kgf 이고 로드셀의 한쪽 끝에

빼기 모양의 가중장치를 부착하여 3점 굽힘 시편의 하중작용점에 선하중이 작용하도록 하였다. 상온에서 시편에 하중을 증가시켜 파괴되는 순간에 로드셀에서 출력되는 전압을 읽어 하중으로 환산하였다. 단위 전압당 하중은 0.2 kgf/mV이다. 측정된 하중을 다음 식에 대입하여 임계응력세기계수(K_c)를 계산하였다.¹¹⁾

$$K_c = \frac{3}{2} \frac{P_c L \sqrt{a_0}}{B W^2} Y \quad (1)$$

여기에서 P_c 는 임계 하중이고 Y 는 형상 계수로서 경계 요소법에 의해 계산 되었으며 (부록참조) 그 결과는 Table 3에서 보여주고 있다.

평면 응력 상태에서 다음식이 성립한다.

$$J_c = \frac{K_c^2}{E} \quad (2)$$

여기서 J_c 는 임계 J 값이고 E 는 탄성계수이다. 실험에서 구한 K_c 값과 식(2)에 의한 J_c 값을 Table 4에서 보여주고 있다.

Table 3 Shape factor Y calculated by boundary element method

Crack length a_0 (mm)	Shape factor Y
1	1.87
2	1.84
3	1.80
4	1.78

3. 열충격으로 인한 파괴시간 측정

시편을 가열하기 위해 용량이 2kw인 온도조절식 가열로를 제작해서 사용하였다. 시편의 온도 측정을 위해 사용된 열전대는 K형 열전대이며 크로멜(chromel)과 알루미늄(alumel)로 구성되어 있다. 측정 온도의 범위는 20°C ~ 300°C이다.

Table 4 Summary of K_c testing results

Crack length a_0 (mm)	Critical load P_c (N)	Critical stress intensity factor K_c (MN/m ^{3/2})	Critical J-integral J_c (N/m)
1	2396.1	1.133	17.4
2	1668.5	1.098	16.4
3	1367.1	1.078	15.8
4	1151.5	1.037	14.6

열충격을 받는 물체의 온도 분포는 시간 경과에 따라 급격히 변화하므로, 이 온도 변화를 정확하게 측정하기 위해 열전대에서 발생하는 기전력을 A/D 변환기를 사용하여 디지털 신호로 바꾸어 샘플링 시간(sampling time)을 0.1 sec 간격으로 마이크로 컴퓨터의 기억장치(RAM)에 기억시킨 후 보조기억장치인 디스크에 저장하였다. 이 장치의 배치는 Fig.3과 같다.

시편은 수직으로 가열로내에 고정되어 가열되며 균열을 중심으로 대칭된 온도 분포를 갖는지 검토하기 위해 Fig.4에서 보는 바와 같

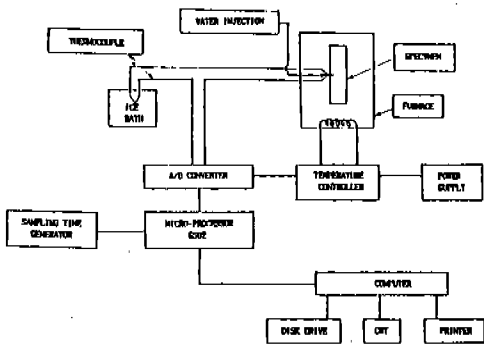


Fig. 3 Block diagram of temperature measuring system

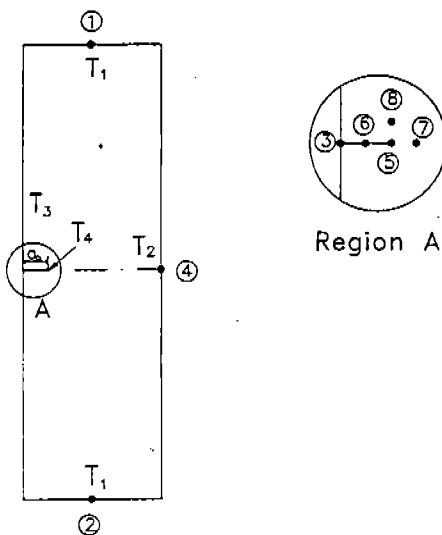


Fig. 4 Edge cracked-plate under thermal shock loading

이 열전대번호 ①,②를 시편 상하단에 설치하였고, 그 외의 열전대는 균열의 연장선 윗부분에만 배치하였으며 열전대의 간격은 균열선에 위치한 열전대번호 ⑤를 중심으로 열전대번호 ⑥,⑦,⑧까지의 거리가 균열길이 a_0 의 절반이 되도록 배치하였다. 가장자리 온도는 $T_1 = T_3 + 10^\circ\text{C}$, $T_2 = T_3 + 50^\circ\text{C}$, $T_4 = T_3 + 5^\circ\text{C}$ 가 되도록 조절하였다. 열충격을 가

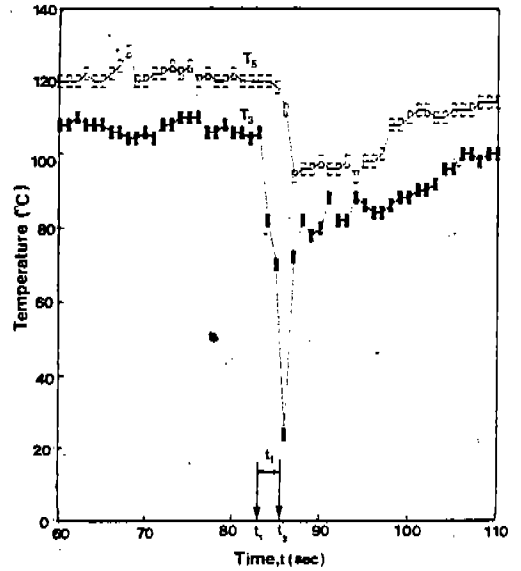


Fig. 5 Sample output of boundary temperature T_3 and crack tip temperature T_5 ($T_3 = 110^\circ\text{C}$, $a_0 = 2\text{ mm}$)

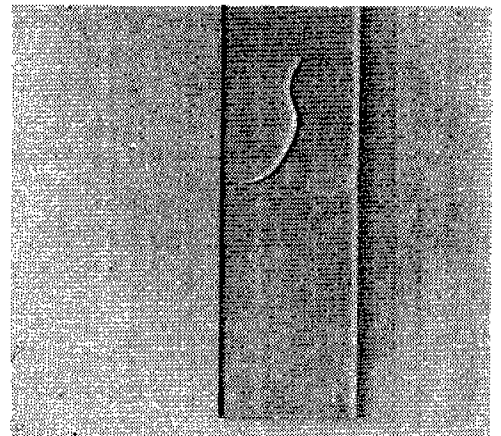


Fig. 6 A specimen fractured by thermal shock

할 때는 가열로의 전면에 있는 구멍을 통해 주사기를 이용하여 0°C의 물을 시편의 균열 입구에 분사하여 시편이 파괴되게 하였다.

열충격을 받는 시편의 파괴시간은 물이 분사될 때 균열측 가장자리의 온도 T_3 가 급강하하는 시간 t_1 과 균열이 진전하는 순간에 균열 선단의 온도 T_5 가 급강하하는 시간 t_2 를 측정하여 이 시간의 차를 파괴시간 t_f 로 정의하였으며 그 보기를 Fig.5에서 보여주고 있다. Fig.6는 파괴된 시편을 보여주고 있다.

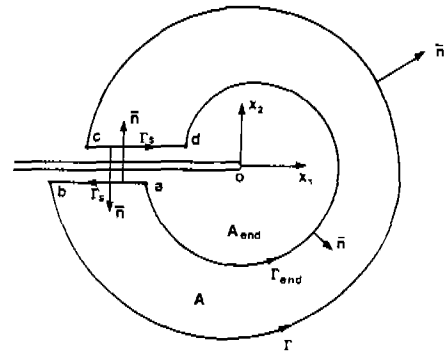


Fig. 7 Fracture process region, A_{end}

4. 열충격으로 인한 파괴시간 계산

사용된 J 적분식은 다음과 같다.⁶⁾

$$\begin{aligned}
 J = & \int_{\Gamma+G_s} \left(\frac{1}{2} \lambda \epsilon^* \epsilon + \mu \epsilon_{ij}^* \epsilon_{ij} \right. \\
 & + \frac{1}{2} \frac{C}{T} \theta^* \theta + \frac{1}{2} \frac{k}{T} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} * 1 * \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \\
 & + \frac{1}{2} \rho \ddot{u}_i * u_i \Big) n_1 d\Gamma \\
 & - \int_{\Gamma+G_s} \left\{ \frac{k}{T} \theta^* \frac{\partial}{\partial x_1} \left(1 * \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right) n_i \right. \\
 & \left. + t_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right\} d\Gamma \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기에서 Γ 는 Fig.7에서 보는 바와 같이 균열 크기에 비해 충분히 큰 경로 $b-c$ 이며, G_s 는 균열면에 따른 경로 $a-b$ 와 $c-d$, λ 와 μ 는 Lamé 상수, $\epsilon = \epsilon_{ii}$, ϵ_{ij} 는 변형률 텐서, C 는 단위체적당 비열, T 는 기준온도, θ 는 상대온도, k 는 열전달 계수, ρ 는 밀도, n_i 는 단위 외향 법선 벡터, t_i 는 트랙션, u_i 는 변위이고 $(*)$ 는 합성적분을 의미한다. 대상 시편(Fig.4)의 기하학적 형상과 온도 분포의 균열 평면에 대한 대칭성을 고려하여 Fig.8과 같이 균열의 연장선을 중심으로 평판의 절반 윗부분만을 요소 분할하였

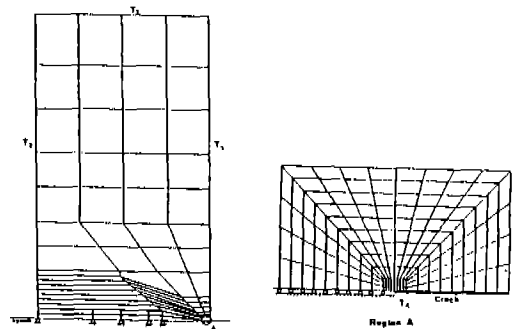


Fig. 8 Finite element mesh of a half of edge cracked-plate ($T_1 = T_3 = 10^\circ\text{C}$, $T_2 = T_3 + 50^\circ\text{C}$, $T_4 = T_3 + 5^\circ\text{C}$)

다. 사용된 요소의 갯수는 284개이고, 절점의 수는 921개이다. 사용된 요소는 2차원 등매개요소이다.

식(3)의 수치결과가 측정 한 J_c 값과 같을 때 파괴가 일어난다고 가정하여 그때의 시간을 파괴시간으로 정의하였다.

5. 결과 및 검토

파괴시간의 실험치와 이론치를 Table 5와 Fig.9과 10에서 보여주고 있다. Table 5에 의하면 예측한 파괴시간과 측정 한 파괴시간과는 최대오차 -4.6% 이내에서 잘 일치한다. Fig.9과 Fig.10로부터 열충격전의 가장자리 온도 T_3 및 균열길이 a_0 와 파괴시간 t_f 와는 반비례 관계에 있다는 것과 낮은 온도 일수

Table 5 Comparison between predicted and measured fracture times

Edge temperature T_3 (°C)	Crack length a_0 (mm)	Fracture time t_f (sec)		Error* (%)
		Predicted time (A)	Measured time (B)	
140	1	0.099	0.1	-1.00
	2	0.096	0.1	-4.00
	3	0.088	0.0	-
	4	0.081	0.0	-
130	1	0.485	0.5	-3.00
	2	0.389	0.4	-2.75
	3	0.293	0.3	-2.33
	4	0.196	0.5	-2.00
120	1	0.864	0.9	-4.00
	2	0.579	0.6	-3.50
	3	0.387	0.4	-3.25
	4	0.292	0.3	-2.66
110	1	2.860	3.0	-4.66
	2	2.200	2.3	-4.34
	3	1.440	1.5	-4.00
	4	1.158	1.2	-3.50

* Error (%) = $\{(A-B)/B\} \times 100$

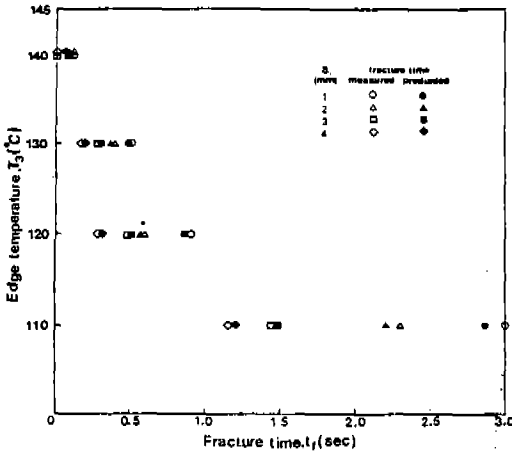


Fig. 9 Measured fracture time t_f for edge temperature T_3

록 파괴시간에 미치는 균열길이의 영향이 클 수 있다. 실험과 이론의 파괴시간이 서로 잘 일치하는 것으로 미루어 우리의 경우 본 연구에서 사용한 온도범위에서는 온도변

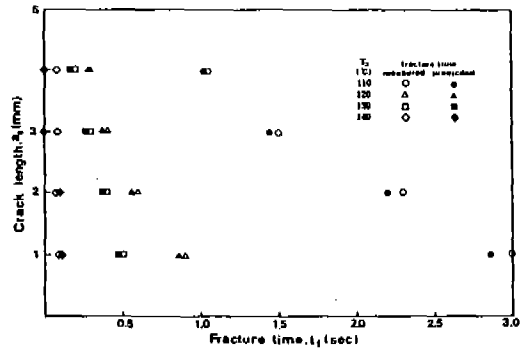


Fig. 10 Effect of crack length a_0 on fracture time t_f

화에 따라 임계응력세기계수값이 상온에서 측정한 값과 크게 차이가 없다는 Blauel 등¹²⁾의 보고에 근거하여 이론 파괴시간 예측에 상온의 임계응력세기 계수값을 사용한 것에 크게 무리가 없다는 것과 본 연구에서 새롭게 제시한 소형 3점 굽힘시험법에 크게 문제가

없다는 것과 참고문헌 6의 J 적분식의 타당성을 주장할 수 있다.

6. 결 론

소다회유리로 제작된 소형 3점 굽힘 시험편에 열충격을 가할 때 파괴에 도달하는 시간을 이론 및 실험적으로 구한 연구에서 (1) 소형 3점 굽힘 시험법을 개발하였고, (2) 열충격전의 균열측면 가장자리온도와 균열길이 및 파괴시간과는 반비례 관계에 있음을 보였고, (3) 사용한 J 적분식의 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

1. H.F. Nied, "Thermal shock fracture in an edge-cracked plate," J. Thermal Stress, 6, pp. 217-229, 1983.
2. H.F. Nied, "Thermal shock in an edge-cracked plate subjected to uniform surface heating," Eng. Fracture Mech., 26, pp.239-246, 1987.
3. K.Y. Lee and K.B. Sim, "Thermal shock stress intensity factor by Bueckner's weight function method," Eng. Fracture Mech., 37, pp.799-804, 1990.
4. J. Jung and M.F. Kanninen, "On analysis of dynamic crack propagation and arrest in a nuclear pressure vessel under thermal shock condition," Trans. ASME, J. Pres. Ves. Tech., 105, pp.111-116, 1983.
5. T.R. Hsu, G.C. Chen, Z.L. Gong and N.S. Sun, "On thermofracture behavior of leaking thin-wall pipes," Int. J. Pres. Ves. Piping, 24, pp.269-281, 1986.
6. 이강용, 박정수, "천이 온도 상태에서의 J 적분," 대한 기계 학회 논문집, 15, pp.1781-1791, 1991.
7. D.P.H. Hasselman, "Elastic energy at fracture and surface energy as design criteria for thermal shock," J. Am. Ceram. Soc., 46, pp.535-540, 1963.

8. D.P.H. Hasselman and P.S. Jitendra, "Analysis of thermal stress resistance of micro-cracked brittle ceramics," Ceramic Bull., 58, pp.856-860, 1979.
9. M.W. Davis, C.H. Popelar and S.H. Advani, "Thermally induced fast fracture in a glass double-cantilever beam specimen," J. Am. Ceram. Soc., 71, pp.64-69, 1988.
10. K. M. Liang, G. Orange and G. Fantozzi, "Evaluation by indentation of fracture toughness of ceramic materials," J. Mat. Sci., 25, pp.207-214, 1990.
11. Y. Murakami, stress intensity factors handbook, Pergamon, 1986.
12. J.G. Blauel, J.F. Khaltoff and D. Sthan, "Model experiments for thermal shock behavior," Trans. ASME, J. Eng. Mat. Tech., 96, pp.299-308, 1974.

부록 : 경계요소법에 의한 형상계수 γ 의 결정

시험편은 Fig.4에서 보는 바와 같이 x 축에 대해 하중 상태와 기하학적 형상이 대칭을 이루고 있으므로, 수치해석을 위한 모델은 x 축을 중심으로 하여 좌측 절반만 요소분할하였다. 경계면의 요소분할에는 총 52 개의 상수 경계요소(constant boundary element)가 사용되었으며, 적용된 경계 조건은 Fig. A1에 제시된 바와 같다.

균열 선단의 트랙션 특이 현상을 고려하여, 균열 표면에 7개의 경계요소를, 균열 선단 앞 균열 평면 $1.6 a_0$ 의 길이에 7개의 경계요소를 사용하였다. 균열 선단 경계요소 길이 1은 전체 균열길이의 5% ($1/a_0 = 0.05$) 이내가 되도록 하였으며, 균열 선단에서 멀어질수록 점차 경계요소의 길이를 증가시키면서 전체 경계면의 요소분할을 실시하였다.

경계요소법을 사용하여 균열 선단의 응력세기계수 K 를 구하는 식은 다음과 같다.¹¹⁾

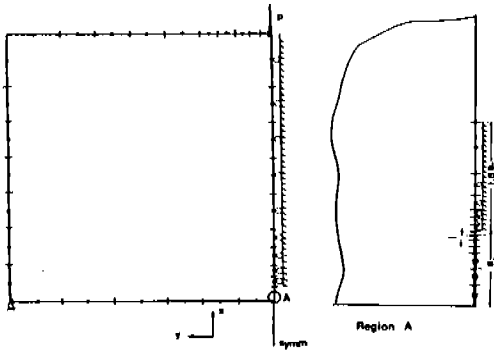


Fig.A1 Boundary element of K_c test specimen

$$K = \frac{4G}{k+1} \sqrt{\frac{\pi}{2r_B}} u_y^B \quad (A1)$$

여기에서 k 는 평면응력 상태에서 $(3-\nu)/(1+\nu)$, G 는 전단계수, u_y 는 Fig.A2에서 보는 바와 같이 균열 선단 요소내 중앙 절점 B에서의 y 방향 변위, ν 는 Poisson 비, r_B 는 Fig.A2에서 정의된 바와 같다.

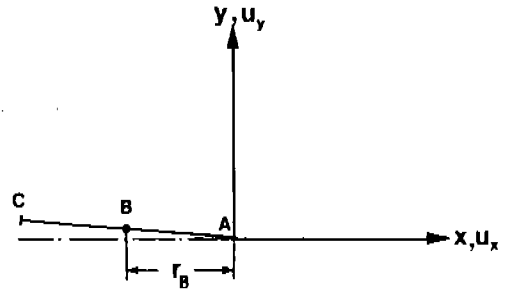


Fig.A2 Crack tip element

식(1)과 식(A1)에 의해 구한 K 값을 비교함으로써 형상계수 Y 를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

1. M.L.Williams, "Base of a stationary crack", J. Appl. Mech., 24, pp.109-114, 1957.