

크기가 다른 원형공시체의 할렬인장 실험을 통한 모르타르와 콘크리트의 파괴인성 연구

Fracture Toughnesses of Mortar and Concrete through the Splitting Tensile Tests with Various Sizes of Specimens

김진근* 구헌상** 임선태***
Kim, Jin-Keun, Koo, Heon-Sang, Lim, Seon-Taek

요약

모르타르와 콘크리트의 파괴특성 연구에 있어 할렬인장실험 방법의 가능성을 알아보았다. 이를 위하여 할렬인장 실험을 통해 초기 노치가 주어져 있는 원형 공시체의 크기가 커질 때 모르타르와 콘크리트의 파괴하중의 변화를 구하였다.

이로부터 SEL(size effect law)방법에 의해 파괴에너지 및 파괴인성을 구하고 Rooke와 Cartwright 방법, F.E.M.방법 등에 의한 값들과 비교하였다. SEL방법에 의한 값들의 수렴정도가 가장 빠른 것으로 나타났으며 SEL방법이 모르타르와 콘크리트의 파괴에너지 및 파괴인성을 구하는 데 매우 효과적인 방법이 될 수 있음을 보였다.

ABSTRACT

Possibility for the evaluation of fracture properties of mortar and concrete by splitting tensile test was studied. Splitting tensile tests were conducted to obtain the fracture loads for several sizes of cylindrical specimens of mortar and concrete with initial notch. From the results, fracture energy and fracture toughness by SEL were obtained and compared with the values by Rooke and Cartwright, and F.E.M.. The values by SEL method converged effectively. SEL method was shown to be a good method to obtain fracture properties of mortar and concrete.

1. 서론

1961년 Kaplan^(1, 4) 이후 콘크리트에 파괴역학을 적용하려는 많은 시도가 있어 왔다. 콘크리트가 균열의 진전에 의해 파괴에 이른다는

점을 고려하면 콘크리트에 파괴역학을 적용하는 것이 가능함을 알 수 있다.^(1, 2, 4) 그러나 상이한 골재크기 및 성질 등에 의한 재료의 비균질성 때문에 파괴거동이 비선형성을 보이며 구조물이 어느 정도 크기에 이르기까지는

* 한국과학기술원 부교수

** 한국전력기술(주)

*** (주)대우건설기술연구소 연구원

● 1990. 3. 2 접수 본 논문에 대한 토론을 1990. 6. 30일까지 본 학회에 보내주시면 1990. 9월호에 그 결과를 게재해 드리겠습니다.

선형파괴역학의 직접 적용이 어렵다.

현재 콘크리트의 가장 중요한 재료상수로 압축강도 f'_c , 탄성계수 E_c 등이 있으나 이러한 것만으로 콘크리트 재료의 특성을 규정하기는 매우 어렵다.

따라서 최근들어 재료의 특성을 보다 정확하게 규정하기 위하여 파괴에너지 G_r , 파괴인성 K_{Ic} 등에 관한 연구가 진행되고 있다.

그러나 여러 실험을 통해 구한 G_r , K_{Ic} 값들이 많은 차이를 보이고 있고 노치나 공시체의 크기에 따라 변하는 것으로 나타나고 있다. 이는 실험 방법등의 차이에 의한 것으로 이에 관한 계속적인 연구가 필요하다.

콘크리트는 파괴상태에 이르기 전에 어느 정도 균열이 진전되므로 G_r , K_{Ic} 값 등의 정확한 계산을 위하여 파괴될 때의 균열길이를 아는 것이 중요하다. 이러한 균열진전을 무시하고 파괴특성을 구할 경우 실제와는 많은 차이가 나기 때문이다. 그러나 실험을 통해서 파괴될 때의 진전된 균열의 길이를 알아내는 것은 매우 어려운 과제로 남아 있다. SEL(size effect law) 방법⁽¹⁾은 파괴가 일어나기 위한 등가 선균열을 가정하여 균열이 진전되기 위하여 필요한 에너지(fracture resistance)가 구조물의 에너지 방출률(energy release rate)과 같아질 때 파괴 균열상태에 이른다고 하고 크기효과식에 의한 응력값에 의해 파괴에너지를 구하는 방법이다.

본 논문에서는 상호 크기가 다르나 노치비 (a_0/d)를 일정하게 유지한 원형공시체의 인장강도의 변화에 관한 실험을 행하여, 이 결과로부터 SEL방법으로 파괴에너지 G_r , 파괴인성 K_{Ic} 값을 구하여 Rooke와 Cartwright방법과 F.E.M.방법 등에 의한 값들과 비교하여, 그 적용가능성을 보여 주고자 한다.

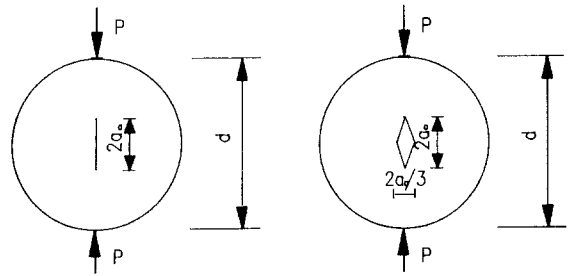
2. 실험 내용 및 결과

할렬인장강도 실험이 실시하기가 용이하고 직접인장 실험이나 힘인장 실험보다 균일한

결과를 얻을 수 있기 때문에 원형공시체를 사용한 할렬인장 실험이 사용되었다.⁽³⁾

공시체 폭을 20cm로 일정하게 유지하고 지름은 10, 20, 40, 80, 160cm로 변화시키며 노치 크기와 공시체 크기의 비 즉 $2a_0/d=0.3$ 인 모르타르와 콘크리트 공시체에 대하여 실험을 행하였다.

실험공시체의 형상은 [그림 1]에 도시되어 있으며, 사용 재료의 배합비는 [표 1]에 기술되어 있다.



[그림 1] 공시체와 노치의 모양

[표 1] 모르타르와 콘크리트의 배합표

	water	cement	sand	gravel
mortar	0.6	1	4	0
concrete 1	0.55	1	2	2
concrete 2	0.5	1	2	3

콘크리트 1은 굵은 골재로 13mm 쇄석을 물로 씻어서 사용하였고 콘크리트 2는 굵은골재로 25mm 강자갈을 자연상태 그대로 사용하였다.

모르타르와 콘크리트 1은 노치를 철판으로 제작하여 콘크리트와의 마찰을 줄이기 위해 윤활유를 바른 다음 비닐 랩으로 감싸서 사용하였고 공시체 크기를 80cm까지 만들었다. 콘크리트 2의 노치는 스티로폴을 마름모 꼴로 만들어 길에 테이프를 감아서 만들었고 공시체의 크기는 160cm까지 만들었다. 노치의 모양 등으로 인한 응력분포의 차이는 무시되었다

([그림 1] 참조).

공시체를 제작한 2일 후에 거푸집을 탈형하고 공시체 속의 노치를 제거하여 초기균열이 생기게 했다.

7일 동안 습윤 양생한 다음 공기중에서 21일간 기건 양생시켰으며, 공시체를 제작하고 28일이 지난 후 실험을 하였다. 모르타르와 콘크리트 1의 실험을 위하여 작은 공시체(10, 20cm)는 100ton 용량의 만능시험기를 사용하였고 큰 공시체(40, 80cm)는 유압식 잭을 사용하여 실험하였다. 콘크리트 2는 모든 공시체에 대하여 100ton 용량의 만능시험기를 사용하였다. 이때 실험 방법으로 인한 오차는 크게 발생하지 않았다.

압축강도 f'_c 를 직경이 10cm, 높이가 20cm인 공시체를 사용하여 KS F 2405규정에 따라 구하고 탄성계수 E_c 는 ACI code⁽⁷⁾에서 주어진 $E_c = 57000\sqrt{f'_c}$ (psi)에 의해 구하였다([표 2] 참조). 다음 식 (1)에 의하여 순단면응력을 구할

수 있으며, 그 결과는 [표 2] 및 [표 3]에 나타나 있다.

$$\sigma_N = \frac{2P}{\pi b d_N} \quad (1)$$

여기서

P : 최대하중

d_N : $d - 2a_0$

d : 공시체 지름

b : 공시체 폭

$2a_0$: 초기 노치길이

[표 2] 모르타르와 콘크리트의 평균 압축강도와 탄성계수

	f'_c (kg/cm ²)	E_c (kg/cm ²)
mortar	314	2.675×10^5
concrete 1	321	2.706×10^5
concrete 2	247	2.360×10^5

[표 3] 모르타르와 콘크리트의 크기별 파괴하중과 순단면 응력

size cm	mortar		concrete 1		concrete 2	
	maximum load kg	net strength (kg/cm ²)	maximum load (kg)	net strength (kg/cm ²)	maximum load (kg)	net strength (kg/cm ²)
10	4640	21.1	4838	22.0	5040	22.9
			4750	21.6	5130	23.3
			5211	23.7	5220	23.7
20	9280 6421	21.1 14.6	9808	22.3	8150	18.5
			10468	23.8	9070	20.6
			9896	22.5	9710	22.1
40	11083 10819	12.6 12.3	19967	22.7	15270	17.4
			16009	18.2	15720	17.9
80	21815 23222	12.4 13.2	32723	18.6	25100	14.3
			31139	17.7	27650	15.7
160			28148	16.0		
					45600	12.9
					49300	14.0

3. SEL방법에 의한 파괴에너지 G_f , 파괴인성 K_{IC}

SEL방법은 Z.P. Bazant의 크기효과식에서 유도된다. 참고문헌 1로부터 크기효과식은 다

음과 같이 주어진다.

$$\sigma_N = \frac{Bf'_c}{\sqrt{1+d/d_0}} \quad (2)$$

여기서 Bf'_c 와 d_0 는 실험상수이고 d는 공시

체 크기를 나타낸다.

콘크리트에서 균열이 진전되기 위해 필요한 에너지 즉 파괴저항(fracture resistance) R은 선형 파괴역학에서처럼 일정한 상수가 아니라 노치로부터 진행되는 균열길이 c의 함수 즉, $R = R(c)$ 이다. 초기 노치의 길이를 a_0 , 균열 전체길이를 a로 놓으면 $c = a - a_0$ 이다. 구조물에 균열을 발생시키는 데 필요한 에너지는 다음과 같다.

$$U = b \int R(c) da - W(a) \quad (3)$$

여기서,

$W(a)$ = 총 변형에너지 제공량

$\delta U = (\partial U / \partial a) \delta a = 0$ 이면 파괴평형상태가 된다. $\partial W / \partial a = bG$ 로 나타내면 $\partial U / \partial a = b(R - G) = 0$ 이므로 $G(a) = R(c)$ 일 때 파괴 균형상태가 되어 균열은 그때의 길이에서 멈추게 된다. 또한 $\delta^2 U = 0$ 이 파괴가 계속 일어나는 임계조건이므로 $G'(a) = R'(c)$ 일 때 파괴가 일어난다. 여기서 $G(a)$ 는 에너지 제공률이고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(a) = \frac{W'(a)}{b} = \frac{P^2 g(\alpha)}{E_c b^2 d} \quad (4)$$

여기서 $\alpha = a/d$ 이고 $g(\alpha)$ 는 공시체 모양과 노치길이에 대한 특성함수로서 원형공시체의 경우 $g(\alpha) = \alpha f^2(\alpha) / \pi$ 이다(식 (6) 참조).

윗 식에서 $\sigma_N^2 = (P/bd)^2$ 라고 놓고 σ_N 에 크기 효과식에서 주어진 $\sigma_N = \sigma_N(d)$ 이 주어진 $G = G(a, d)$ 로 나타낼 수 있다. $h(c, a, d) = R(c) - G(a, d)$ 라고 놓으면 계속적인 파괴 조건은 $h = 0$ 과 $\delta h = 0$ 으로 나타낼 수 있고 주어진 공시체에서 d가 일정할 때 파괴조건을 만족시키는 c값은 유일하고 이에 따라 취하게 되는 G(a)값을 R(c)값이라 한다. 결국 공시체 모양이 일정할 때 파괴저항 R은 공시체 크기에 따라 결정할 수 있다.

매우 큰 공시체에 대하여 $a_0 = a$ 로 볼 수 있으므로 $g(a_0/d)$ 는 상수이고, $\sigma_N^2 d = (Bf_1')^2$ 이므로 R은 일정한 값을 갖는다. 이를 파괴에너지 G_f 라 하고 이와같이 무한히 큰 공시체의 경우 선형파괴역학을 적용할 수 있으므로 파괴인성 K_{Ic} 는 $G_f = K_{Ic}^2 / E_c$ 의 관계에서 구한다.

다음장에서 SEL방법으로 파괴저항 및 파괴인성을 구하여 Rook과 Cartwright방법⁽³⁾, F. E.M.방법⁽⁸⁾ 등과 비교해 보았다.

Rooke와 Cartwright는 선형파괴역학에서 유도된 파괴인성에 관한 기본식에 파괴에 이르기 전까지의 균열진전을 무시하고 초기노치 길이만을 대입하여 콘크리트의 파괴인성을 구하였다. 원형 공시체의 파괴인성을 구하는 식은 다음과 같다.

$$K_{Ic} = \frac{2P}{bd} \left(\frac{a_0}{\pi} \right)^{1/2} f \left(\frac{2a_0}{d} \right) \quad (5)$$

여기서 R은 공시체 반지름이고 $f(2a_0/d)$ 는 공시체 모양과 노치길이에 대한 교정계수로서 아래식 (6)과 같이 나타내어진다.

$$f(2a_0/d) = 0.9566 + 0.6779 \left[\frac{2d_0}{d} \right] - 0.9932 \left[\frac{2d_0}{d} \right]^2 + 2.6773 \left[\frac{2d_0}{d} \right]^3 \quad (6)$$

4. 해석결과 및 비교검토

앞에 주어진 실험결과를 크기효과식 즉 식 (2)에 따라 비선형 회기분석을 하였으며, [표 4]에 해석결과가 나타나 있다.

[表 4] 식 (2)에 따른 실험결과와 회기분석 결과

	Bf_1'	d_0
mortar	21.10	26.30
concrete 1	22.40	136.49
concrete 2	24.73	50.98

회기분석으로 결정된 크기효과식을 식 (4)에 대입하고 각각의 d에 대하여 G와 c의 관계를 그래프에 나타내어 그 포락선을 찾아 R-Curve를 구하였다([그림 2] 참조). 공시체의 크기가 매우 클 때의 파괴저항 즉 파괴에너지는 각각 모르타르가 0.0223kg/cm (21.86N/m), 콘크리트 1이 0.0573kg/cm (39.40N/m)이었다. 이 값들은 일반적으로 알려져 있는 콘크리트의 파괴에너지 값인 50N/m~80N/m(0.051kg/cm~0.082kg/cm)에 매우 근접한다.

각 공시체에 대한 파괴인성 K_c 를 $R=K_c^2/E_c$ 의 관계에서 구해 보면 아래 [표 5]와 같다.

[표 5] SEL방법에 의한 파괴인성

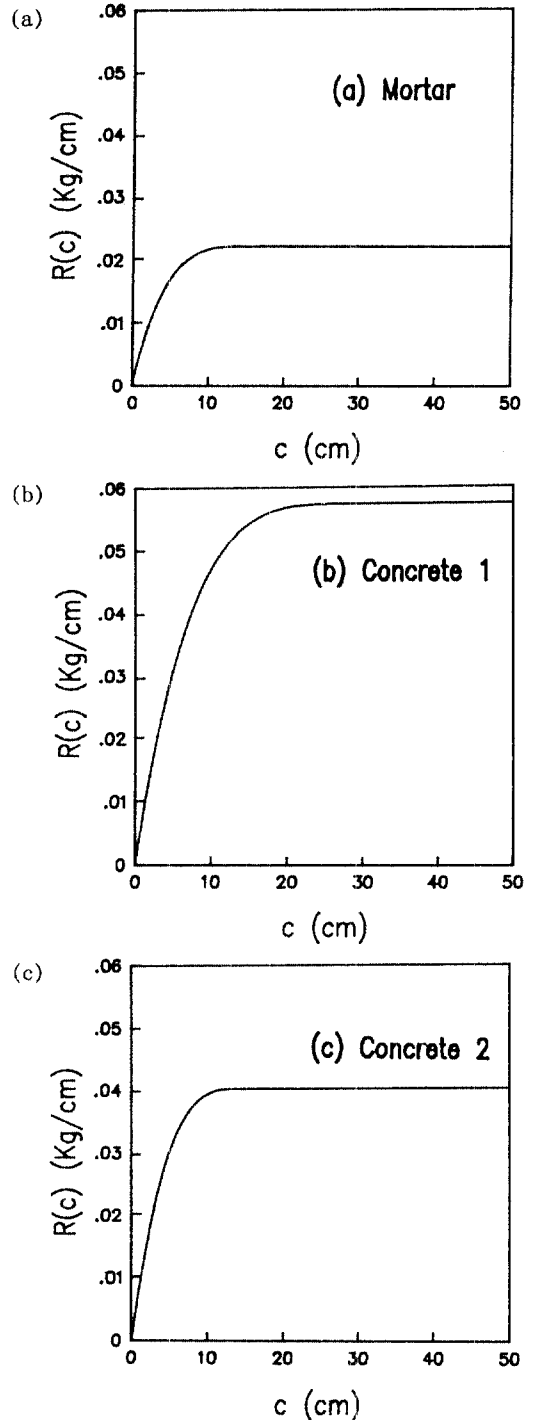
Size (cm)	Mortar		Concrete 1		concrete 2	
	R (kg/cm)	K_c (kg/cm ^{3/2})	R (kg/cm)	K_c (kg/cm ^{3/2})	R (kg/cm)	K_c (kg/cm ^{3/2})
10	0.0089	48.66	0.0146	62.77	0.0147	58.84
20	0.0151	63.56	0.0262	84.23	0.0230	73.67
40	0.0187	70.76	0.0351	97.43	0.0303	84.56
80	0.0207	74.36	0.0448	110.05	0.0357	91.75
160					0.0387	95.53

Rooke와 Cartwright 방법에 의한 각 공시체의 파괴인성은 [표 6]과 같다.

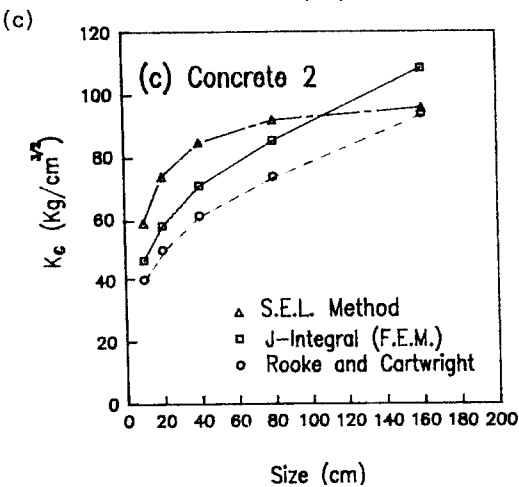
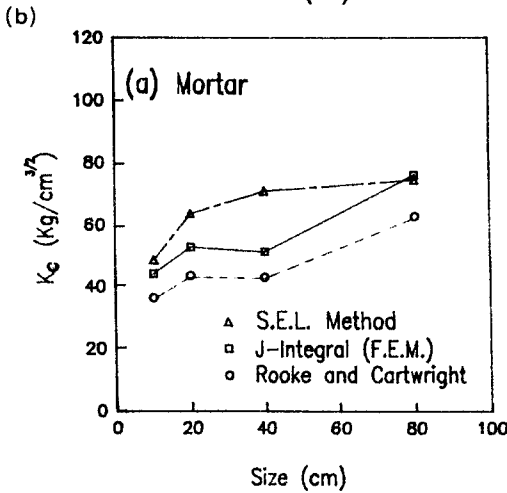
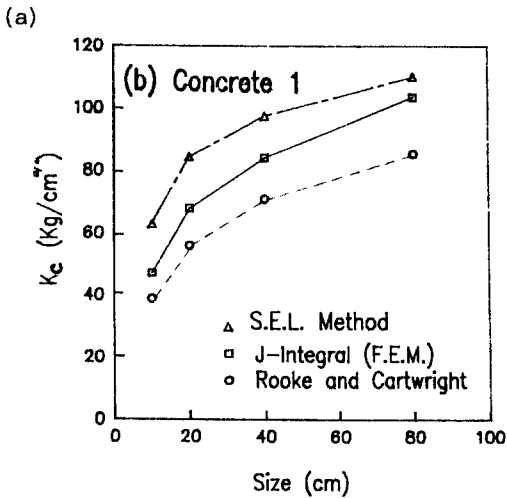
[표 6] Rooke와 Cartwright 방법에 의한 파괴인성

Size (cm)	Mortar		Concrete 1		concrete 2	
	R_{max} (kg/cm)	K_c (kg/cm ^{3/2})	R_{max} (kg/cm)	K_c (kg/cm ^{3/2})	R_{max} (kg/cm)	K_c (kg/cm ^{3/2})
10	4640	36.55	4933	38.80	5130	40.51
20	7850	43.73	10057	55.85	8977	50.13
40	10951	43.13	17988	70.85	15495	61.18
80	22519	62.71	30670	85.40	26375	73.64
160					47450	93.68

F.E.M.방법에 의해 파괴인성을 구하는 방법에는 Displacement Extrapolation, Strain Energy Release Rate, Virtual Crack Extension, J-Integral 등 여러가지가 있다. 본 연구에서는 J-Integral 방법을 사용하였으며, 그 결과는



[그림 2] 각 재료에 따른 R-curve



[그림 3] 각 재료의 파괴인성의 비교

[표 7] J-Integral(F.E.M.) 방법에 의한 파괴인성

Size (cm)	Mortar		Concrete 1		concrete 2	
	R_{max} (kg/cm)	K_c (kg/cm ^{3/2})	R_{max} (kg/cm)	K_c (kg/cm ^{3/2})	R_{max} (kg/cm)	K_c (kg/cm ^{3/2})
10	4640	44.23	4933	47.04	5130	46.84
20	7850	52.86	10057	67.77	8977	57.95
40	10951	51.33	17988	84.05	15495	70.74
80	22519	76.00	30670	103.60	26375	85.14
160					47450	108.31

[표 7]에 나타나 있다.

각 방법으로 구한 파괴인성값들이 [그림 3]에 나타나 있으며 이 그림에 의하면 전체적으로 모르타르와 콘크리트 모두 공시체 크기가 커짐에 따라 파괴인성이 증가하는 것으로 나타났다. 공시체가 작을 때는 공시체 크기가 커짐에 따라 K_c 값도 빠른 증가를 보이다가 점차로 증가되는 비율이 작아지는 추세를 보였다.

SEL방법은 실제 파괴하중을 대입한 것이 아니고 크기효과식에 의해 회기분석한 값을 사용한 값이므로 다른 방법들과 직접비교는 어려우나 빠른 수렴을 보였으며, Rooke와 Cartwright방법과 F.E.M.방법으로 구한 값들은 약간의 차이가 있긴 하지만 비슷한 경향을 보였다.

5. 결론

이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 해석 방법에 관계없이 공시체의 크기가 커짐에 따라 모르타르와 콘크리트의 파괴인성이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 SEL방법에 의한 값들이 다른 방법들에 의한 값들보다 빠른 수렴을 보였으며, 균열전진에 관한 지속적인 연구가 이루어진다면 모르타르와 콘크리트의 파괴인성 결정에 SEL방법이 매우 효과적인 한 방법이 될 것으로 판단되었다.

둘째, 할렬인장 실험의 결과가 비교적 균일한 분포를 나타내는 것으로 보아 모르타르와

콘크리트의 파괴특성을 연구하는데 3점 휨 실험방법과 더불어 좋은 방법이 될 것으로 보인다.

셋째, 모르타르와 콘크리트의 강도에 따른 파괴에너지의 변화는 실험치의 부족으로 일반화시킬 수는 없었으나 같은 압축강도인 경우 콘크리트의 파괴에너지가 모르타르보다 훨씬 컸으며, 콘크리트 강도가 증가함에 따라 파괴에너지도 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 1987~1990년 목 적기초 연구비로 수행되었으며, 이에 한국과학 재단에 깊은 감사를 포함합니다.

참고문헌

1. Bazant, Z.P., Kim, J.K. and Pfeiffer, P. "Nonlinear Fracture Properties from Size Effect Tests", J. of Structural Engrg., ASCE, Vol.112, No.2, pp.289~307(1986).
2. Bazant, Z.P. and Oh, B.H., "Crack Band Theory for Fracture of Concrete" Materials and Structures, (RILEM, Paris), Vol.16, pp.155~177, (1983).
3. Ojdovic, R.P. and Petroski, H.J., "Fracture Behavior of Notched Concrete Cylinder", J. of Engrg. Mech, ASCE, Vol.113, No.10, pp.1551~1564, (1984).
4. Walsh, P.F., "Fracture of Plane Concrete", The Indian Concrete J., Vol.46, No.11, pp.469~470, and 476, (1979).
5. Tada, H., Paris, P.C. and Irwin, G.R., The Stress Analysis of Crack Handbook, Del Research Corp., Hellertown, PA, 1973.
6. ASTM, "Standard Testing Method for Splitting Tensile Strength of Concrete", Annual Book of ASTM Standards, Designation C496-71.
7. Neville, Properties of Concrete, Third Ed., Great Britain, 1981.
8. D.R.J. Owen and A.J. Fawkes, Engineering Fracture Mechanics, Great Britain, 1983.
9. 임선택(1989), "콘크리트 할렬 인장강도의 크기효과", 석사학위논문, 한국과학기술원, 49pp.
10. 구현상(1990), "모르타르와 콘크리트 공시체의 크기효과에 관한 실험적 연구", 석사학위논문, 한국과학기술원, 39pp.