

애자의 Toughness

오경영 · 이준근 · 장성도
한국과학기술원 요일재료연구소
(1982년 1월 25일 접수)

Toughness of Electric Insulator

Kyung-Young Oh, June-Gunn Lee and Sung-Do Jang
KAIST Ceramic Materials Lab.
(Received Jan. 25, 1982)

ABSTRACT

This paper deals with the electric insulator in terms of its toughness. The toughness is determined by the notched-beam test and it is found that the toughness of electric insulator largely depends on the porosity as well as crystalline phases. This study also indicates that the Korean electric insulators have improved its toughness for last seven years and the recent products show comparable properties with imported insulator.

1. 서 론

애자는 전력의 송배전에 필수적인 재료로서 높은 전기적 절연성, 높은 기계적 강도등이 요구되는 요업제품이다. 우리나라는 1970년대만 해도 저압애자나 특고압애자의 일부만 생산해왔는데, 최근 애자 생산업체의 활발한 기술개발 및 도입으로 7 1/2인치 현수애자의 국산화가 이루어지고 10인치 현수애자의 개발에 매진하게 되었다. 기계적 특성면에서 볼 때, 실지 송배전에 설치된 각종 애자는 전선자체의 무게, 바람, 눈 등으로 인장응력, 압축응력, 비틀림등이 복합적으로 작용하게 된다. 이와 같은 요업제품의 역학적 응용에는 그 기계적 특성의 구멍에 있어서 꺾임강도, 압축강도등도 중요하지만 fracture toughness 를 규명하는 것이 더 의미가 있다.

요업제품은 금속과 달리 그 파괴양상이 주로 brittle fracture로 진행이 되어, 가해진 응력이 제조공정중이나 제품취급중에 생긴 갖가지 결함의 주위에 집중되게 된다. 따라서, fracture stress(δ_f)와 critical stress intensity factor (K_{IC})는 다음과 같이 crack의 크기와 관계지어진다.⁽¹⁾

$$\delta_f = \left(\frac{2E\gamma}{\pi a} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 E=Young's Modulus
 γ =surface energy
a=crack half length

$$K_{IC} = \delta_f a^{1/2} Y \dots\dots\dots(2)$$

여기서 Y=crack and specimen shape factor.

따라서, 재료의 toughness는 비로 K_{IC} 값에 비례하게 되는 것이다. 이와같은 K_{IC} 의 값을 구하는 방법에는 Fig. 1에서 보는바와 같이 indentation technique^(2,3), notched-beam technique (NBT)⁽⁴⁾, double-cantilever beam technique (DCBT)⁽⁴⁾, double-torsion technique (DTT)⁽⁵⁾ 등이있다. 이 방법들은 각각 장단점을 지니고 있으나, 시편제작이 용이하고 신뢰도가 비교적 높은 toughness의 결정방법은 notched-beam technique이다.

Notched-beam technique는 Fig. 1(b)에서 보는바와 같이 beam의 중심에 다이아몬드 톱이나 강선톱을 사용하여 미세한 notch를 만든후, 보통의 적임강도 시험과 같이 3-point loading이나 4-point loading으로 다음식에 의해 fracture toughness를 구한다(Fig. 2참조).

$$K_{IC}(3\text{-point}) = \frac{3PL}{2bd^2} a^{1/2} Y \dots\dots\dots(3)$$

$$K_{IC}(4\text{-point}) = \frac{3P(L-l)}{2bd^2} a^{1/2} Y \dots\dots\dots(4)$$

여기서, 4-point loading의 경우, L 은 바깥쪽 지지대간의 길이이고, l 은 안쪽 지지대간의 길이이다. Shape factor Y 는 elastic analysis⁽⁶⁾에 의해 다음식으로 주어지고, 이식에 나타나는 각 A 의 값은 Table 1에서 보는 바와 같다.

$$Y = A_0 + A_1\left(\frac{a}{d}\right) + A_2\left(\frac{a}{d}\right)^2 + A_3\left(\frac{a}{d}\right)^3 + A_4\left(\frac{a}{d}\right)^4 \dots\dots\dots (5)$$

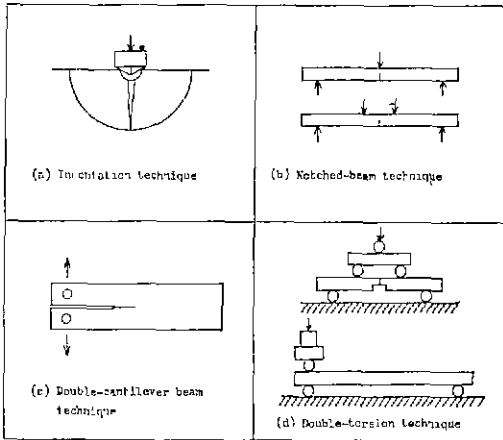


Fig. 1. Loading geometries of various fracture toughness tests

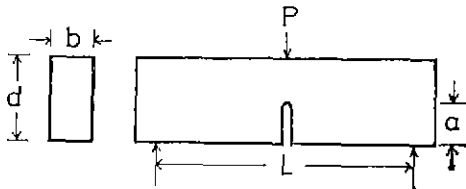


Fig. 2. Notched-beam configuration

지금까지의 연구결과들을 종합해보면, notched-beam을 이용하여 요업재료와 같이 brittle한 재료의 fracture toughness를 정확히 규명하기 위해서는 다음의 몇가지 조건이 만족되어야 한다. 첫째, 식 (3)과 (4)는 폭이 0인 notch (zero-volume notch)를 가정하고 구해진 식들이다. 따라서, notch의 폭은 가능한한 좁게 그려져야한다⁽⁷⁾는 점이다. 둘째는, beam의 단면적이나 notch의 깊이가 시편의 각종 미세구조 형성체의 크기보다 충분히 커서, 파괴양상이 반드시 notch에 의해 시작되고 전 시편의 단면으로 진행되어야 한다는⁽⁸⁾ 점이다.

본 연구는 위의 조건들을 최대한 만족시키는 범위에

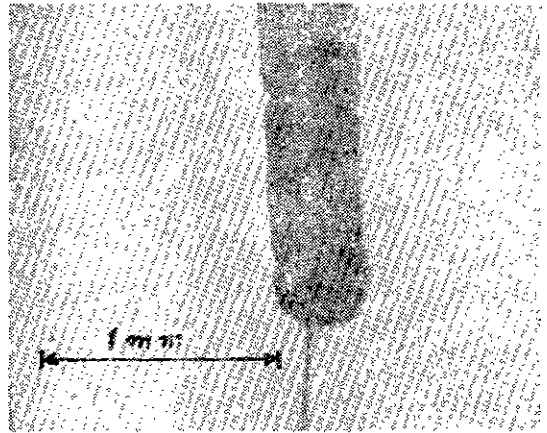


Fig. 3. Typical configuration of notch tip and crack developed after test (x40)

Table 1. Values of coefficients A.

Type of Loading	$\frac{L}{d}$	A0	A1	A2	A3	A4
4 point	—	1.99	-2.47	12.97	-23.17	24.80
3 point	8	1.96	-2.75	13.66	-23.98	25.22
3 point	4	1.93	-3.07	14.53	-25.11	25.80

서 지난 7년간 제조된 국산 특고압 핀에자를 대상으로 그 fracture toughness를 구하여 결정상, 기공율등이 미치는 영향을 조사, 평가하였다.

2. 실험방법

2-1. 시편준비

본 연구에 사용된 시편은 다음과 같이 준비를 하였다. 우선, 현재 배전선에 설치되어 있는 특고압 핀에자를 1976년도 제품부터 1981년도 제품까지 각 년도마다 2개씩 수거한후, 수거된 각 특고압 pin에자의 상단 날개부분에서 약 2.5x5.0x60mm되는 각주형 시편을 다이아몬드 톱으로 절단하였다. 그리고, 절단된 시편의 표면을 120 240 400 grit의 순서로 3단계 연마를 한 다음, 시편의 중심부에 Fig. 3과 같은 notch를 silicon carbide paste를 이용한 강선톱을 사용하여 형성하였다. (이때 notch의 폭은 0.4 mm, 깊이는 약 2 mm임).

2-2. Fracture Toughness 시험

준비된 시편의 fracture toughness 시험은 다음과 같이 실시하였다.

(1) Test 방법 : Instron Universal Test Machine을 이용하여 3-point loading.

(2) Loading 속도 : 0.5mm/min.

(3) Span 거리 · 50mm.

(4) Toughness의 계산: 식 (3)에 의해 각년도마다 2-4개 시편 평균으로 계산.

2-3. 특성조사

Fracture toughness 시험이 끝난 시편의 특성은 다음과 같이 조사하였다.

X-선 회절분석은 Norelco 분석기의 Cu-K α 선을 이용하여 전 시편을 동일한 조건(30KV, 15mA, Prop.=1.6KV, Att.B.L=1.0, TC=2)에서 분석하였다.

X-선 회절분석에서 나타난 peak는 그 높이를 서로 비교하여 각 상의 함량을 정성적으로 계산하였다. 그리고, 시편의 기공율, 최대기공 크기 및 평균기공 크기는 시편의 파면을 700배의 주사전자현미경 사진으로 측정하였다. 여기서, 기공율은 주사전자현미경 사진에서 전체 사진의 부채와 기공부분이 차지하는 부채의 비로써 결정하였다. 최대 기공크기는 각 시편의 주사전자현미경 사진상에 나타난 기공중 최대 기공을 찾아내어 그 최대기공의 정측지름 및 단측지름의 평균치로 결정하였다.

시편에서 각 상이 나타내는 미세구조는 시편을 5%의 HF 수용액에 8분간 etching 한후 10,000배의 배율로 주사전자현미경에서 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. Shape factor (Y)의 계산

Notched-beam을 준비할때 notch의 폭은 0.4mm로 전 시편이 동일하나 notch의 깊이, beam의 폭(b) 및 beam의 높이(d)는 시편마다 ± 0.3 mm의 차이가 있었다. 이에 따라 shape factor Y의 값도 달라지므로 computer를 사용하여 loading type, L/d 값, a/d 값의 변화에 따르는 Y 값을 Fig. 4와 같이 구하였다.

3-2. 특고압 핀 에지의 fracture toughness 변천

Fig. 4의 Y 값 및 실험에서 구해진 하중(P)값으로 식 (3)을 이용하여 구해진 각 시편의 fracture toughness는 Fig. 5에 각 년도별로 나타내었다. 이 결과로 볼 때, 우리나라의 특고압 핀 에지는 지난 7년간 그 fracture toughness가 계속적으로 향상되었음을 알 수 있다. Fig. 5에는 81년도에 제조된 일본 NGK사 7 1/2인치 현수에자의 fracture toughness도 비교되었는데, 81년도의 국산에자도 이와 대등한 수준임을 알 수 있다. 다만, 한가지 문제점은 fracture toughness의 상한치와 하한치의 변화폭이 너무 크다는 점인데, 이는 제조공정관리의 부족에 기인한다고 본다.

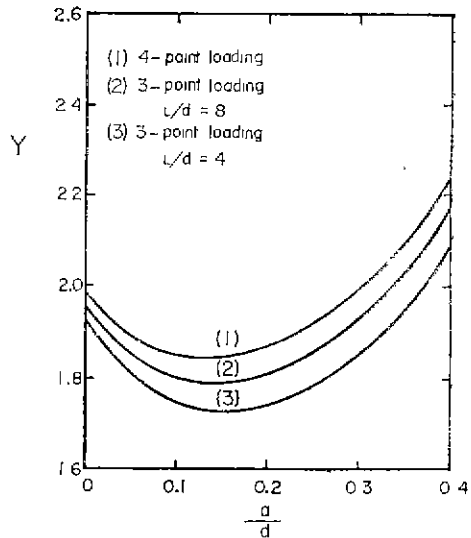


Fig. 4. Variation of shape factor Y with type of loading and sample dimensions

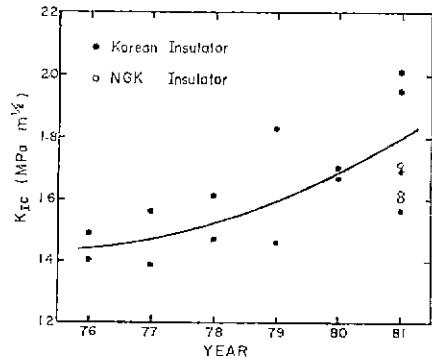


Fig. 5. Variation of fracture toughness of high-voltage pin-type insulator (ANSI 56-2)

3-3. 특성조사결과

각 시편이 나타내는 fracture toughness, 절경상 함량의 비교치, 기공율, 최대기공의 크기 및 평균기공의 크기는 Table 2와 같이 조사되었다. 절경상 함량의 비교치는 각 시편이 나타내는 X-선 회절분석 결과(Fig. 6.)의 peak intensity를 상호 비교하여 정성적으로 계산되었는데, 석영을 주결정상으로 하는 시편과 cristobalite를 주결정상으로 하는 시편으로 대별될 수 있었다. Fracture toughness 면에서 볼때, cristobalite의 함량이 많아질수록 fracture toughness가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 에지의 소지속에 포함된 석영결정료가 에지의 소지중 미세한 cristobalite 상으로 잠전이(phase

Table 2. Properties of sample

Year	Average K_{Ic} (MPa. $m^{1/2}$)	Crystalline Phase (relative value)				Porosity (%)	Max. Pore Size (μm)	Ave. Pore Size (μm)
		Quartz	Cristobalite	Mullite	Glass*			
1976	1.44	70	—	15	15	10.1	18.1	4.9
1977	1.48	25	55	11	9	6.7	12.9	6.2
1978	1.54	42	29	17	12	—	—	—
1979	1.64	41	28	18	13	11.2	17.5	7.2
1980	1.69	35	43	13	9	8.1	16.4	6.0
1981	1.82	19	57	19	5	4.9	5.7	3.6

*Glassy phase의 함량은 $2\theta=20^\circ$ 부근의 diffused peak intensity를 기준한것임.

transformation)된후, 냉각시에 발생되는 β 상에서 α 상으로의 cristobalite 상 전이에 의해 애자내에 압축응력을 부여하는데 기인한다고 본다. 즉, $265^\circ C$ 부근에서 β -cristobalite는 α -cristobalite로 상전이를 하게 되는데, 이때 수반되는 약 5.6%의 부피감소가 cristobalite 상 주위에 압축응력의 형태로 나타나게 되는 것이다. 이 효과는 강화유리에서 보는 강도증가 효과와 마찬가지로, 애자의 강도증가 및 fracture toughness의 증가

를 가져올 수 있는 것이다. 이와 같은 cristobalite 열애자의 고강도 특성은 FuKui⁽⁹⁾등에 의해 보고되었으며, solid-core station post 애자에 응용될바 있다.

각 시편을 5%의 HF로 8분간 etching 한후 주사전자현미경으로 관찰한 mullite 상의 미세구조는 Fig. 7에서 보는바와 같다. 전시편이 거의 비슷한 양의 mullite 상을 나타내었는데, 이 점은 Table 2의 X-선 회절분석결과와 일치한다. 그러나, 발달된 mullite 상의 형태는 시편마다 차이가 있었는데 1977년 및 1979년의 시편이 짧고 미세한 형태인 반면, 1976, 1980 및 1981년의 시편은 길고 잘 발달된 mullite 상을 나타내었다. 특히 1981년의 시편은 mullite 침상구조가 가장 잘 발달되어 있었으며 이 침상 mullite의 interlocking 효과⁽¹⁰⁾에 의해 애자의 fracture toughness가 더욱 향상된것으로 믿어진다.

각 시편이 나타내는 기공을 및 기공의 형태는 Fig. 8에서 보는바와 같다. 이 사진은 애자의 파괴표면을 주사전자현미경으로 700배에 관찰한 것인데 기공을, 기

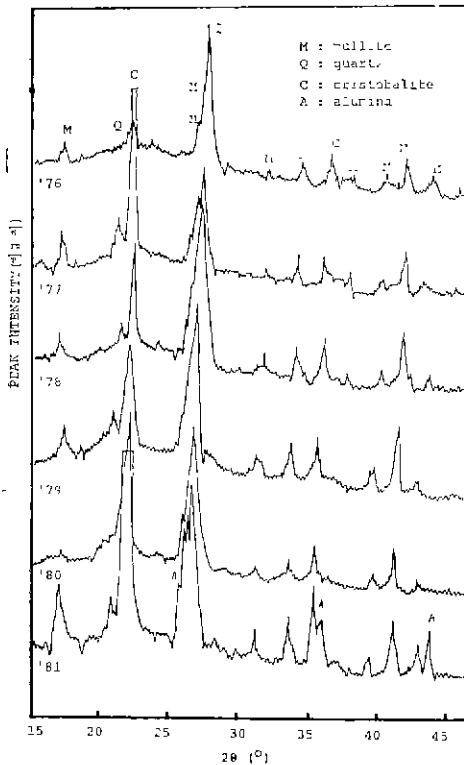
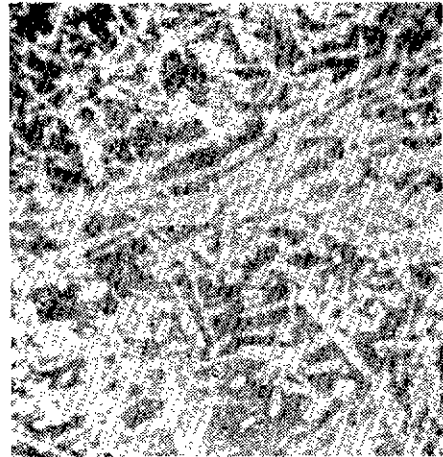
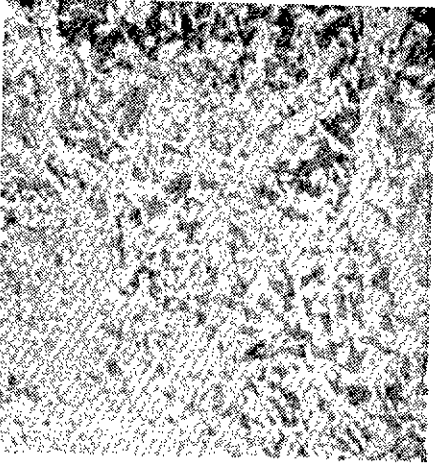


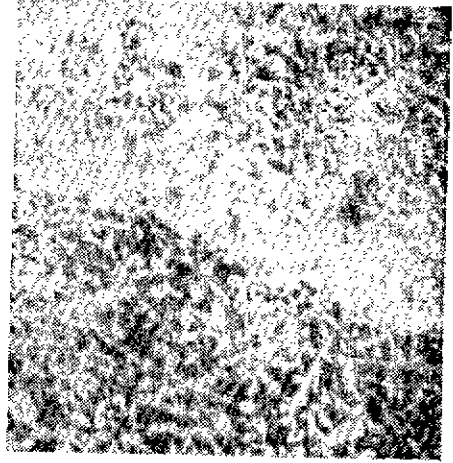
Fig. 6. XRD data for each sample



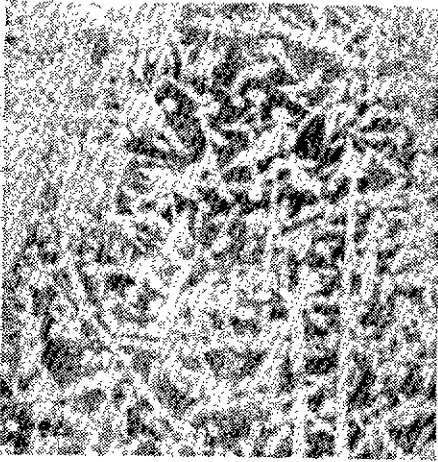
(a) 1976 insulator (x10,000)



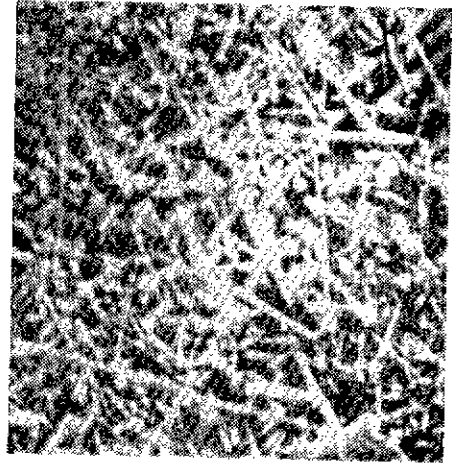
(b) 1977 insulator (x10,000)



(c) 1979 insulator (x10,000)

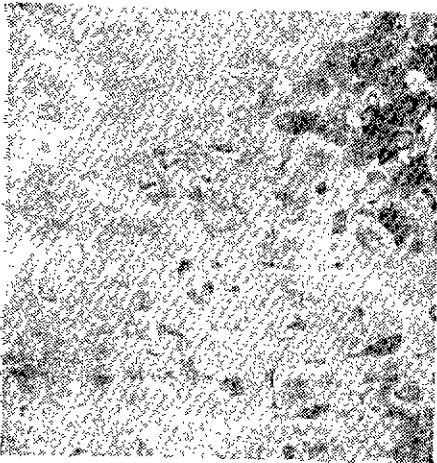


(d) 1980 insulator (x19,000)



(e) 1981 insulator (x10,000)

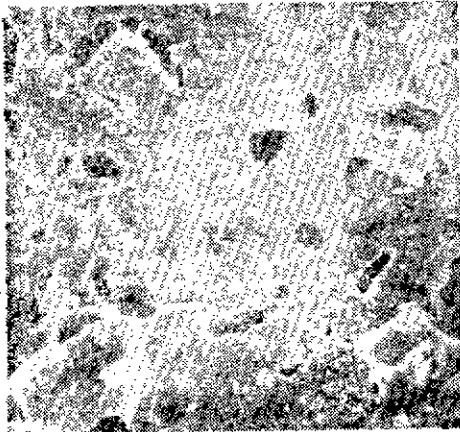
Fig. 7. Microstructures of mullite formed in porcelain bodies



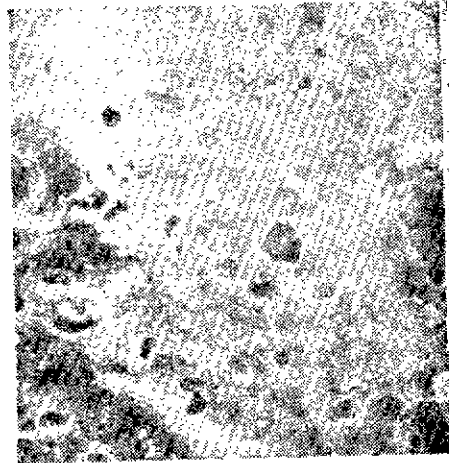
(a) 1976 insulator (x700)



(b) 1977 insulator (x700)



(c) 1979 insulator (x700)



(d) 1980 insulator (x700)



(e) 1981 insulator (x700)

Fig. 8. Microstructure of each sample

공의 크기 및 형태를 용이하게 관찰할 수 있었다. 1981년도 시편은 기공율도 현저하게 감소되었지만 최대기공의 크기도 현저하게 작아졌음을 알 수 있었다. 시편 내에 존재하는 기공들은 주어진 응력에 대해 작용하지 못할뿐만 아니라, 큰 기공들은 주어진 응력에 대해 균열의 출발점 역할을 하여 fracture toughness를 감소시키는 것은 당연한 사실이다.

4. 결 론

- (1) 국산 특고압 된 압자의 fracture toughness는 지난 7년간의 지속적인 제품특성향상으로 현재 수입품과 거의 대등한 수준이다.
- (2) 석영질 원료를 사용하는 애자에 있어서 그 기계적

특성은 이 석영질 원료가 소성중 미세한 cristobalite 상으로 많이 전환될수록 향상된다. 이것은 생성된 cristobalite 상이 애자의 냉각중 β 상에서 α 상으로 전이될때 발생하는 압축응력에 기인하는 것으로 간주된다.

- (3) 애자에 있어서 kaolinite질 원료에서 발달되는 mullite 상은 서로 침상으로 interlocking 되어 애자의 fracture toughness에 기여한다. 따라서, 이 mullite 상이 많이 발달될 수록, 그리고 길고 굵게 발달될수록 애자의 fracture toughness는 향상된다.
- (4) 애자의 fracture toughness를 더욱 향상시키기 위해서는 기공율의 감소뿐만이 아니라 균열발생의 출발점이 되는 큰 기공의 제거가 요망된다.

*Computer 계산을 한 박 창호연구원(철산 center)과 실험에 조력한 최 운호, 서 영호 연구조원에 감사한다.

참고문헌

- 1) R. L. Jones and D. J. Rowcliffe, "Use of Notched Bend Beams to Measure the Toughness of Ceramics," *J. Amer. Ceram. Soc.*, **58**(12) 1195 (1979).
- 2) B. R. Lawn and M. V. Swain, "Microfracture beneath the Point Indentations in Brittle Solids," *J. Mat. Sci.*, **10**, 113-122(1975).
- 3) A. G. Evans and E. A. Charles, "Fracture Toughness Determinations by Indentation," *A. Amer. Ceram. Soc.*, **59**(7-8), 371-372(1976).
- 4) S. M. Wiederhorn, "Fracture Surface Energy of Glass," *J. Amer. Ceram. Soc.*, **52**(2), 99-105(1969).

- 5) B. J. Pietka, et al., "An Evaluation of Double-Torsion Testing," *Fracture Mechanics Applied to Brittle Materials* (ed. by S. W. Freiman), 19-37, Amer. Soc. Testing and Mat., 1979.
- 6) W. F. Brown and J. E. Srawley, "Plane Strain Crack Toughness Testing of High-Strength Metallic Materials," *Amer. Soc. Test. Mat., Spec. Tech. Pub., No. 410*(1966).
- 7) L. A. Simpson, "Use of the Notched-Beam Test for Evaluation of Fracture Energies of Ceramics," *J. Amer. Ceram. Soc.*, **57**(4), 151-154(1974).
- 8) G. K. Bansal and W. H. Duckworth, "Fracture Surface Energy Measurements by the Notch-Beam Technique," *Fracture Mechanics Applied to Brittle Materials* (ed. by S. W. Freiman), 38-46, Amer. Soc. Testing and Mat., 1979.
- 9) H. Fukui, et al., "Extra High Strength Solid-Core Station Post Insulators," *Electric Insulator Review (Japanese)* **30**(11), 21-27(1970).
- 10) K. H. Schuller, "Reaction Between Mullite and Glassy Phase in Porcelains," *Trans. Brit. Ceram. Soc.*, **63**(2), 103-117(1964).