

계장화 샤르피충격시험기를 이용한 고무보강 폴리머재료의 파괴인자 결정에 관한연구

박명균[†] · 최영식^{*} · 박세만^{**} · 양진승^{**}
(2001년 10월 27일 접수, 2002년 4월 24일 심사완료)

A Study on the Determination of Fracture Parameters for Rubber Toughened Polymeric Materials Using on Instrumented Charpy Impact Test

Myung Kyun Park, Young Sik Choi, Saemahn Bahk and Jinseung Yang

Key Words: PVC/MBS Composite(PVC/MBS 복합재료), Instrumented Charpy Impact Test(계장화 샤르피충격시험기), Breaking Energy(파단에너지), Breaking Strength(파단강도), Energy Release Rate(에너지 해방률), Stress Intensity Factor(응력세기계수)

Abstract

The Charpy and Izod impact tests are the most prevalent techniques used to characterize the effects of high impulse loads on polymeric materials. An analysis method for rubber toughened PVC is suggested to evaluate critical dynamic strain energy release rates(G_c) from the Charpy impact energy measurements. An instrumented Charpy impact tester was used to extract ancillary information concerning fracture parameters in addition to total fracture energies and maximum critical loads. The dynamic stress intensity factor $K_{I,d}$ was computed for varying amounts of rubber contents from the obtained maximum critical loads and also toughening effects were investigated as well.

1. 서론

최근 국내에서도 새로운 소재가 활발하게 개발되고 있다. 이러한 신소재를 이용하여 구조물의 부품설계시 재료의 기계적 성질을 정확하게 해석하여 안전하면서도 경제적인 설계의 필요성이 요구되고 있다. 이러한 신소재 중에서도 기존의 금속재료를 대신하여 폴리머 재료가 다양한 목적으

로 널리 사용되어지고 있다. 폴리머 재료의 파괴 특성을 파악하고 분석하기 위해서는 ASTM-D-256 에 언급된 대로 아이조드나 샤르피 충격 시험기를 사용한다. 아이조드나 샤르피 충격시험은 폴리머 시편을 홀더 위에 올려놓고 진자(pendulum)을 움직여서 고속으로 충격을 가해 파괴된 시편과 진자에 의한 운동에너지를 측정하고 시편을 파괴시키는데 소요되는 순수한 파괴 에너지(breaking energy)를 환산하여 재료의 충격 특성을 비교 판단하는데 매우 유용한 방법으로 널리 사용되어져 왔다. 최근에 파괴역학의 발달과 더불어 이러한 파단에너지와 파괴역학적 설계인자인 응력세기계수($K_{I,d}$) 및 에너지해방률(G_c)과의 관계를 규명하는 것이 필요하게 되었다. 국내에서는 샤르피 충격시험기를 이용 동적파괴에너지와 파괴역학 설계인자와의 관계를 규명하는 연구

[†] 책임저자, 회원, 명지대학교 기계공학과

E-mail : pmk@mju.ac.kr

TEL : (031)330-6425 FAX : (031)321-4959

^{*} 명지대학교 대학원 기계공학과

^{**} 명지대학교 기계공학과

가 활발하지 못한 실정이다.

본 연구에서는 일반 취성재료인 PVC재료에 연성의 고무를 다양한 비율로 첨가한 폴리머 복합재료를 사용하여 고무 함유량이 동적파괴특성에 미치는 영향을 알아보고자 상온에서 계장화 샤르피충격 시험기를 사용하여 동적 파괴인성치와 동적 에너지 해방률의 변화를 검토하였다.

2. 기본이론

2.1 파단에너지로부터 동적 에너지 해방률(Gc) 계산

에너지 관점에서 기본 파괴역학 관계식을 선형 파괴역학 식으로 유도하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

하중(p)과 변위(x)의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{x}{p} = C(a) \quad (1)$$

여기서 a는 균열길이이고 C는 컴플라이언스이다. 흡수된 에너지는 하중 변위곡선에서의 면적이고 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$w = \frac{1}{2} px = \frac{1}{2} p^2 C \quad (2)$$

일정한 두께(B)의 시편에서 에너지 해방률(strain energy release rate, G)은 다음과 같이 주어진다.

$$G = \frac{1}{B} \cdot \frac{dw}{da} \quad (3)$$

G가 임계값 G_c와 같을 때 파괴가 일어난다고 가정하면 임계 에너지 해방률 값은 다음과 같다.

$$G_c = \frac{p^2}{2B} \cdot \frac{dc}{da} \quad (4)$$

응력과 파괴인성치와의 관계는 일반적으로 다음과 같이 주어진다.

$$K_c^2 = Y^2 \cdot \sigma^2 \cdot a \quad (5)$$

여기서 σ는 최대 응력, Y²은 시편두께(D)에 대한 균열길이 차원, (a/D)의 비율 그리고 유한 폭과 자유곡면효과를 포함한 임의의 계수이다. 선형파괴역학에서 K_c²과 G_c의 관계는 다음과 같다.

$$K_c^2 = E \cdot G_c \quad (6)$$

평면응력 상태에서의 탄성계수 E는 평면변형률 상태에서는 E/(1-ν²)로 대체된다.

식 (4),(5),(6)을 다음과 같이 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dc}{da} = 2B \cdot \left(\frac{\sigma}{p}\right)^2 \cdot Y^2 \cdot a \quad (7)$$

위의 식에서 (σ/p)를 (α/BD)로 대체하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dc}{d(a/D)} = \frac{2 \alpha^2}{EB} \cdot Y^2 (a/D) \quad (8)$$

여기서, α는 시편의 형상에 대한 임의의 계수이다. 그리고, 하중대신 에너지 값을 측정하였을 경우 식 (2),(4)를 이용하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$w = G_c \cdot B \cdot D \cdot \phi \quad (9)$$

여기서, φ = $\frac{C}{dc/d(a/D)}$ 는 보정계수이고 B는 시편의 두께 D는 시편의 폭이다. φ는 이론적으로 또는 실험적으로 구할 수가 있는데 본 연구에서는 Williams⁽¹⁾가 제안한 실험적 방법을 사용하였다. 샤르피 시편규격에서 구한 보정계수값은 대략 1.1 정도였다.

2.2 동적파괴인성치(K_{Id})의 계산

본 연구에서는 샤르피충격시험기를 계장화시켜 시간과 하중곡선으로부터 최대하중을 구하고, 이에 따른 샤르피 시편의 동적 파괴인성치는 다음 식부터 계산하였다.⁽²⁾

$$K_{Id} = \frac{3P_m L \sqrt{a}}{2BD^2} Y \quad (10)$$

여기서,

$$Y = 1.93 - 3.07 \left(\frac{a}{D}\right) + 14.53 \left(\frac{a}{D}\right)^2 - 25.11 \left(\frac{a}{D}\right)^3 + 25.8 \left(\frac{a}{D}\right)^4$$

여기서, P_m는 최대하중, B는 시편의 두께, D는 시편의 폭, a는 균열길이, L은 하중작용점 사이의 길이이다.

3. 실험방법 및 절차

3.1 실험장치

충격시험기로는 아이쥘트와 샤르피시험 모두가 가능한 용량 5.65J의 Tinius Olsen 사의 92T 샤르피 충격시험기를 사용하였다. 동적 파괴인성치를 구하기 위해 샤르피 시험기의 충격날(tup)에 최대 용량 4.5kN인 반도체용 스트레인게이지를 계장화

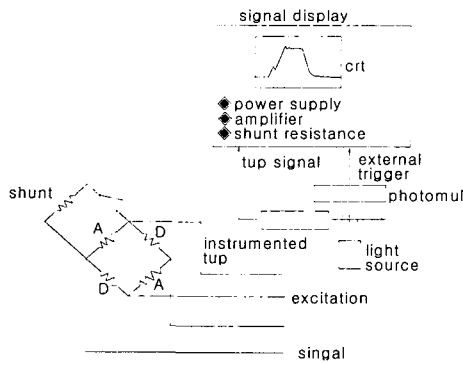


Fig. 1 Block diagram of the instrumented impact test system

하였으며 그 구성도는 Fig. 1과 같다. 이때 충격 날에 부착된 게이지의 위치는 충격시 시편 중앙부와 접촉되는 충격날의 가운데 위치에 부착시켰다. 게이지에서 나온 신호는 데이터 획득장치(GRC 830)를 이용하여 분석하였다.

3.2 실험방법

시편제작은 193℃에서 3분동안 롤 밀링 하였으며 185℃에서 7분동안 예열하고, 3분동안 프레싱하였다. 시편의 규격은 Fig. 2에서 보는 바와 같다. 계장화된 충격날과 데이터 획득 장치(GRC 830)를 이용하여 각 시편의 파단에너지와 최대하중을 구하였다. 시편 재료는 충격보강재 MBS 고무 함량을 0phr (part/hundred resin), 5phr, 7phr 및 9phr로 변화시켜 제작하였고 각각의 PVC/MBS 함유량에 따라 시편의 두께를 2t, 3t 및 5t로 각 10개씩 제작하여 실험을 행하였다. 그리고 동적 파괴인성치(K_{1d})를 구하기 위하여 각 고무 함유량과 두께에 따른 시편을 액화질소 안에 약 8시간 넣어 재료를 취성화 시킨후 칼날과 고무해머를 사용하여 시편노치부에 칼날을 대고 고무해머를 이용 부드럽게 탭핑하여 각 두께에 대하여 대략 1mm, 2mm 및 3mm의 예비균열을 생성시켰으며 측정은 특수자와 현미경을 이용하여 1/10mm범위까지 측정하였다. 에너지 해방률은 식 (9)에 표시된 BD ϕ 를 계산한 값과 측정 되어진 파단 에너지 값과의 기울기를 계산하여 구하였다.

파단된 시험편은 현미경을 이용하여 소성영역

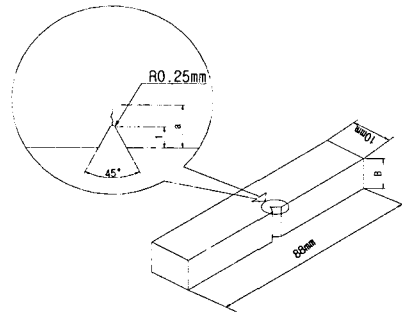


Fig. 2 Charpy specimen geometry

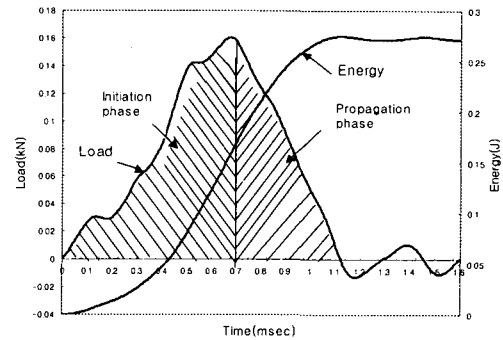


Fig. 3 Load-time-energy curve for PVC with 7phr rubber

을 관찰한 후 그 형태와 크기를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

계장화 샤피충격시험의 실험결과 곡선은 Fig. 3과 같다. 이 그림은 고무를 7phr 첨가했을 경우 하중-시간-에너지를 나타내는 전형적인 곡선이다. 하중이 증가하여 최대하중에 도달 시까지 소요되는 에너지를 균열개시에너지라 하고 최대 하중이후 완전 파단시 까지 소요되는 에너지를 균열진전 에너지라고 한다.

총 에너지는 균열개시에너지와 균열진전에너지의 합인데 이를 두 에너지로 나누어 구별할 수 있다. 균열진전 에너지(E_p)와 균열개시에너지(E_i)의 비를 다음과 같이 연성지수(DI; Ductility Index)로 정의하면 DI는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

Table 1 Calculated fracture parameters

Rubber content	K_{Ia} (MN/m ^{3/2})	Gc (kJ/m ²)	r_p (mm)	DI
0phr	0.82	5.79	0.8	-
5phr	2.08	6.14	1.2	0.36
7phr	3.73	8.49	1.8	0.80
9phr	4.85	10.91	2.5	2.49

Table 2 Breaking energy results from the Charpy impact test

Rubber content(phr)	Thickness (mm)	Breaking energy(J)	Impact strength(J/m)
0	2	0.12	10.94
	3	0.19	17.32
	5	0.30	27.23
5	2	0.13	11.84
	3	0.21	19.12
	5	0.34	30.68
7	2	0.18	16.87
	3	0.27	24.40
	5	0.49	44.69
9	2	0.23	21.09
	3	0.32	28.97
	5	0.61	54.97

$$DI = \frac{E_P}{E_i} \quad (11)$$

충격시험을 통하여 얻은 DI값을 Table 1에 나타내었다. 그 결과에 의하면 MBS 충격 보강제의 함유량이 증가될수록 균열진전에 필요한 에너지가 증가됨을 알 수 있다. 즉 미세구조학적으로 보강재인 MBS 고무가 균열진전에 방해 또는 둔화시키는 역할을 함으로써 더 많은 균열진전에너지를 소모시킴을 알 수 있다.

예비균열이 없는 시편을 사용하여 샤르피충격 시험을 한 결과 시편 두께 및 고무 함유량에 따른 파단에너지와 파단강도 값은 Table 2와 같다. 여기서 파단강도는 파단 에너지로부터 시편의 노치부분을 제외한 시편의 폭으로 나눈 값을 의미한다. 이 결과에 의하면 보강 재료인 MBS첨가량의 범위가 0에서 5phr사이(두께가 21의 경우)에서

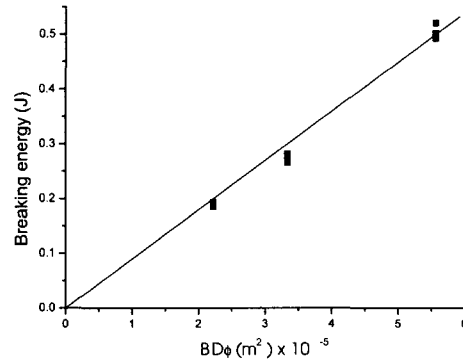


Fig. 4 Energy release rate for PVC with 7phr rubber

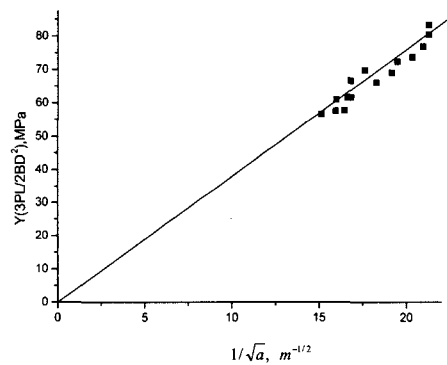


Fig. 5 Dynamic fracture toughness for PVC with 7phr rubber

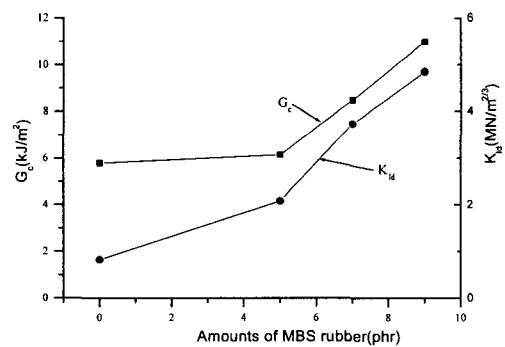


Fig. 6 Dynamic fracture toughness and energy release rate

는 파단강도가 10.94(J/m)에서 11.84(J/m)로 완만하게 증가되는 반면 5phr에서 9phr까지 첨가량을

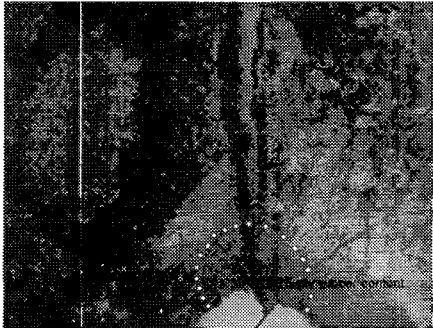


Fig. 7 The deformed region of the impact test specimen perpendicular to the fracture surface:rubber containing 0phr, 5phr, 7phr, 9phr

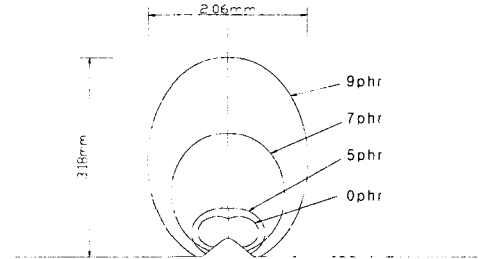


Fig. 8 The whole picture of deformed region of the impact test specimen for 0, 5, 7, 9 phr

증가시켰을 경우 파단강도가 11.84(J/m)에서 21.09(J/m)로 급격하게 증가함을 알 수 있다. 따라서 이 영역에서 첨가량의 보강효과가 적절하게 나타남을 알 수 있다.

에너지 해방률(G_c)은 식 (9)를 이용하여 구하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 7phr 고무의 함유량에 따른 에너지해방률을 구하기 위한 직선인데 $BD\phi$ 값과 측정된 파단 에너지값을 이용하여 얻은 각 데이터 점들을 곡선적합하여 구하였다. 동일한 방법으로 0phr, 5phr 및 9phr에서 구한 에너지 해방률값의 결과는 Table 1에 나타내었다.

동적파괴인성치는 식 (10)을 이용하여 구하였고, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5는 7phr의 고무함유량에 따른 응력세기계수를 나타낸 것이고 동일한 방법으로 구한 0phr, 5phr 및 9phr에 대한 결과는 Table 1에 나타내었다.

실험결과에 따르면 동일한 두께, 동일한 노치 및 균열길이에 대한 최대 충격 하중 값은 MBS 고무 함유량의 증가(0~9phr 범위내)에 따라 증가함을 알 수 있다. 이는 충격하중이 작용할 경우 MBS 고무함유량이 적은 시편의 경우에는 균열선단 부근에서 큰 변형을 일으키지 않은 상태 하에서 균열이 진전되지만, 함유량이 많은 경우 균열선단에 상당한 변형이 발생하여 에너지가 소요되며 이후 균열을 진전시키는데 역시 많은 에너지가 소요됨을 알 수 있다. 이는 균열선단의 소성역 변형을 관측한 결과로 유추할 수가 있다. 주목할 점은 0~9phr범위에서는 적절히 분포된 MBS 고무와 이 재료 내에 입혀진 코팅 효과로 인해 충격 저항 상승 효과를 낸다고 사료된다.

이는 충격 하중 상승과 연관되었음을 짐작할 수 있다. 반면에 MBS 보강재의 첨가에 따른 탄성계수값은 실험결과⁽³⁾ 0phr에서는 3.7GPa, 5phr에서는 3.4GPa, 7phr에서는 3.2GPa, 9phr에서는 2.8GPa로 감소됨을 알 수 있다. 이는 비교적 높은 강성계수를 갖는 PVC에 상대적으로 낮은 강성계수의 고무를 첨가함으로써, 혼합법칙에 의해서도 예측되듯이, 복합재료인 PVC/MBS의 탄성계수 값은 고무첨가량의 증가에 따라 감소됨을 알 수 있다. 따라서 PVC/MBS 재료 제조시 충격강도와 강성계수의 양 측면을 동시에 고려한 적절한 충격보강재의 첨가량이 결정되어야 한다고 판단된다. Fig. 6은 고무함유량에 따른 동적파괴인성치와 에너지 해방율과의 상관관계를 나타낸 것으로서 그림에서 보는 바와 같이 순수한 PVC에 충격보강재인 MBS함유량이 5phr까지 증가될 때까지는 동적파괴 인성치와 에너지 해방율의 상승효과는 둔하게 나타나는 반면 5phr에서 9phr까지는 현저하게 증가됨을 알 수 있다. 이로 미루어 볼 때 이 범위 내의 보강재 MBS의 첨가량이 적절한 양이라 사료된다.

일반 취성 재료는 충격 하중시 소성변형이 거의 일어나지 않지만 연성재료는 소성변형이 발생하여 더 많은 에너지를 흡수한 후 파단이 일어난다. 그러므로 소성영역의 크기와 에너지의 흡수 정도와는 상관관계가 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 200배의 전자 현미경으로 두께가 5mm인 시편의 파단면을 관찰한 결과를 충격 보강재의 함유량에 따라 Fig. 7에 나타내었고 종합한 평균값의 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 고무가 첨가되지 않은 경우에는 소성영역의 모양이 그림에서 보는 것과 같이 아주 작지만 그 형태는 옆으로 퍼지는 형태임을 알 수 있다. 함유량이 5phr의 경우에는 원형의 형태에 더 가까운 모양임을 확인했으며 7phr의 경우에는 파단 방향으로 타원의 형태를 가지는 것을 알 수 있었다. 9phr의 경우 완전한 세로 방향의 긴 타원을 형성하는 것을 확인할 수가 있었다. 따라서 소성영역 길이를 환산하기 위하여 장축과 단축의 거리를 측정하여 타원의 면적을 구한 다음, 상당 원의 반경으로 환산하여 상당 반경 길이 r_p 의 값을 구하였다. 고무 첨가량에 따른 r_p 의 값은 Table 1에 나타내었다.

Table 3 Calculated dynamic yield stress

Ruber content	0phr	5phr	7phr	9phr
r_p (mm)	0.81	1.23	1.8	2.56
Yield stress (MPa)	101.9	81.6	77.0	68.4

그 결과에 의하면 소성영역 상당 길이 반경의 크기는 MBS 함유량이 증가할수록 증가됨을 알 수 있다. 이는 소성영역이 커질수록 그만큼 에너지 흡수량이 많아져 시편을 파단시키는데 더 많은 에너지가 소요됨을 알 수 있다.

다음식은 동적항복응력(dynamic yield stress)과 에너지 해방률 및 탄성계수와 소성영역 길이와의 관계를 나타내는 식이다.^(1,3)

$$r_p = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{EG_c}{\sigma^2} \quad (12)$$

Table 3에서 보는 것과 같이 식(12)를 사용 유추된 동적 항복응력 값은 MBS 첨가량의 증가에 따라 완만하게 감소됨을 알 수 있다.

일반적으로 PVC/MBS 복합재료의 경우 고변형율에 대한 동적 항복응력 값은 잘 알려져 있지 않다. W. Doll⁽⁶⁾에 따르면 일반적인 폴리머 재료의 경우 정적인 하중하에서의 항복응력값보다 고변형률하에서의 동적항복응력값이 큼을 알 수 있다. PVC/MBS 복합재료에 대한 고변형률하에서의 인장항복응력과 소성영역과의 상관관계에 대한 연구는 현재 진행중에 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 계장화된 샤르피 충격시험기를 이용하여 PVC에 MBS 충격 보강재의 첨가량을 0에서 9phr까지 변화시킨 경우 시편의 동적파괴인성치(K_{Id})를 계산하였다. 또한 샤르피시험으로 부터 얻어진 파단에너지로부터 에너지 해방률(G_c)을 추정하였고 소성영역의 크기를 상당반경길이(r_p)로 나타내었다.

이상으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) PVC/MBS재료에 있어 충격 보강재인 MBS 함유량이 증가될수록 충격파단에너지와 동적파괴

인성치 및 에너지 해방률이 증가됨을 알 수 있다. 특히 5phr에서부터 9phr 범위에서의 보강효과가 두드러짐을 알 수 있다.

(2) 충격하중시 MBS 재료가 시편의 균열선단 부근에서 집중 응력을 완화시키며 소성변형을 일으켜 충격하중과 에너지를 증가시키는 효과를 가져온다고 사료된다.

(3) MBS 고무함유량의 증가에 따라 충격하중시 소성영역 즉 상당소성반경(r_p)값이 증가되는 현상을 실험적으로 관찰할 수 있었다. 또한 연성지수값(DI) 역시 증가함을 실험적으로 확인할 수 있었는데 이는 고무보강재가 파단시 균열진전을 방해하여 더 많은 균열진전 에너지를 소요케 함이라 판단된다.

참고문헌

- (1) Platti, E. and Willams, J. G., 1975, "The Determination of the Fracture Parameters for Polymers in Impact," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 15, pp. 470~477.
- (2) Williams, J. G., 1984, *Fracture Mechanics of Polymers*, John Wiley & Son, Toronto, pp. 64~71.
- (3) Broek, D., 1974, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Nordhoff International Pub., Leyden, The Netherlands, p. 96.
- (4) Lee, D.H., Bahk, S. M. and Park, M. K., 2001, "An Evaluation of Elastic Aspects of PVC/MBS by an Acoustic Resonance Method," *Proc. KSME Fall Annual Meeting A*, pp. 603~608.
- (5) Doll, W., Seidelman, U., and Konczol, L., 1980, "On the Validity of the Dugdale Model for Craze Zones at Crack Tips in PMMA," *Journal of Material Science*, Vol. 15, p. 2389.
- (6) Bahk, S. M., Kim, K. S. and Park, M. K., 1997, "Dynamic Behavior of Metallic Materials at Different Temperatures under Impact Loading," *Journal of the Research Institute of Industrial Technology*, Myongji Univ., Vol. 16, pp. 113~120.
- (7) Lee, O. S., Park, W. K., Hwang, H. S., Hong, H. S. and Yoon, K. S., 1995, "Determination of Dynamic Crack Initiation Toughness Using Instrumented Charpy Impact Test in WC-Co Alloy," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 19, No. 3, pp. 688~696.
- (8) Cho Kilwon, Yang Jae Ho and Park Chan Eon, 1998, "The Effect of Rubber Particle Size on Toughening Behaviour of Rubber-Modified Poly (methylmethacrylate) with Different Test Methods," *Polymer*, Vol. 39, Number 14, pp. 3073~3081.
- (9) Scussel, H. J. and Valenite, G. T., 1990, "Friction and Wear of Cemented Carbides," *Materials for Friction and Wear Applications*, pp. 795~800.
- (10) Mari, D., Marti, U. and Silva, P. C., 1992, "A New Photolitho Graphic Technic to Detect the Local Deformation of Materials: Application to WC-Co Composite," *Materials Science and Engineering*, A158, pp. 203~206.