

샤피충격시험기를 이용한 고무보강 폴리머재료의 파괴인자 결정에 관한연구

최영식* · 박명균** · 박세만**

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

Young Sic Choi, Myung Kyun Park, S.M. Bahk

Key Words: Energy Release Rates(에너지 해방율), Stress Intensity Factor(응력세기계수), Breaking Energy(파단에너지), Breaking Strength(파단강도)

Abstract

The notched 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 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 properties in addition to total fracture properties and maximum critical loads. The stress intensity factor K_{Ic} was computed for varying amounts of rubber contents from the obtained maximum critical loads and also toughening effects were investigated as well.

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 내용

최근 국내에서도 새로운 소재가 활발하게 개발되고 있다. 이러한 신소재를 이용하여 구조의 부품설계시 재료의 기계적 성질을 정확하게 해석하여 안전하면서도 경제적인 설계의 필요성이 요구되고 있다. 이러한 신소재 중에서도 기존의 금속 재료를 대신하여 폴리머재료가 다양한 목적으로 널리 사용되어지고 있다. 이러한 폴리머 재료의

파괴특성을 파악하고 분석하기 위해서는 ASTM-D-256 에 언급된 대로 Izod나 샤피충격기를 사용한다. Izod 나 샤피충격 시험은 폴리머 시편을 홀더 위에 올려놓고 펜들룸을 움직여서 고속으로 충격을 가해 파괴된 시편과 펜들룸에 의한 운동에너지를 측정하고 시편을 파괴시키는데 소요되는 순수한 에너지(Breaking Energy)를 환산하여 재료의 충격특성치를 비교 판단하는데 매우 유용한 방법으로 널리 사용 사용되어져 왔다. 하지만 최근에 파괴역학의 발달과 더불어 이러한 에너지와 파괴역학 설계인자인 응력세기계수(K_{Ic})와 에너지해방율(G_{IC})과의 관계를 규명하는 것이 필요하게 되었다. 국내에서는 샤피 충격 시험기를 이용 동적파괴에너지와 파괴역학 설계인자와의 관계를 규명하는 연구가 활발하지 못한 실정이다.

* 회원, 명지대학교 기계공학과 대학원

** 회원, 명지대학교 기계공학과

본 연구에서는 일반 취성재료인 PVC재료에 연성의 rubber를 다양한 비율로 첨가한 폴리머 복합 재료를 사용하여 각 함유량에 따른 동적 파괴 특성을 규명하였다. 이를 위해 충격날에 스트레인 게이지 회로를 구성한 계장화 샤피 충격 실험 장치를 구성 사용하였다. 고무 함유량이 동적파괴 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해서 상온에서 계장화 샤피충격 실험을 통해 동적 파괴 인성치와 동적 임계 에너지 해방율의 변화를 검토하였다.

2. 기본이론

2.1 파단에너지로부터 에너지 해방율(G_c) 계산

에너지 관점에서 기본 파괴역학 관계식을 선형 파괴역학관점에서 유도하면 다음과 같은 관계식들을 유도할 수 있다.

하중과 변위의 관계는 다음과 같다.

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

여기서 a 는 균열길이, 변위는 탄성 영역이고 흡수된 에너지는 하중변위곡선에서의 면적이 될 것이다.

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

일정한 두께(B)의 시편에서 에너지해방률(strain energy release rate, G)는 다음과 같이 주어진다.

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

G 가 임계값 G_c 와 같을 때 파괴가 일어난다고 선형파괴역학에서는 가정한다. 따라서 임계에너지 해방율 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 σ 는 최대 응력, Y^2 은 시편두께(D)에 대한 균열길이 차원, (a/D)의 비율 그리고 유한 폭과 자유곡면효과를 포함한 임의의 계수이다. 선형파괴역학에서 K_C^2 과 G_c 의 관계는 다음과 같다.

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

평면응력 상태에서의 탄성계수 E 는 평면변형율 상태에서 $E/(1-\nu^2)$ 으로 대치된다.

식 (4),(5),(6)으로 부터 우리는 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dc}{d(a/D)} = \frac{2a^2}{EB} \cdot Y^2(a/D) \quad (7)$$

$dc/d(a/D)$ 는 실험적으로나 이론적으로 추론 할 수 있고 계수 Y^2 은 추론되거나 파괴시 측정된 최대하중 P 를 이용하여 K_C 값을 얻은후 식 (5)에서 구할 수 있다. 만약 하중대신 에너지 값을 측정 하였을 경우 식 (2),(4)를 이용하여 다음식을 얻을 수 있다.

$$w = G_c \cdot B \cdot D \cdot \phi \quad (8)$$

여기서

$$\phi = \frac{C}{dc/d(a/D)} \quad (9)$$

식 (8)에서 ϕ 를 결정할 수 있으면 에너지와 $BD\phi$ 와의 관계로부터 G_c 를 구할 수 있다. y 축을 에너지로 하고 x 축을 $BD\phi$ 로 하면 두 식사이의 기울기가 G_c 을 알 수 있다. ϕ 를 구하기 위해서는 실험적으로 또는 이론적으로 구할 수 있다. 실험적으로는 9)식을 이용 compliance를 측정함으로써 구할 수 있으나 본 연구에서는 Williams(2)가 구한 결과를 사용하였다. 그 결과는 샤피충격시험의 경우 Table 1에 나타나 있다.

Table. 1 Charpy Calibration Factor

a/D	ϕ				
	2L/D = -4	2L/D = -6	2L/D = -8	2L/D = -10	2L/D = -12
0.04	1.681	2.456	3.197	3.904	4.580
0.06	1.183	1.715	2.220	2.700	3.155
0.08	0.933	1.340	1.725	2.089	2.432
0.10	0.781	1.112	1.423	1.716	1.990
0.12	0.680	0.957	1.217	1.461	1.688
0.14	0.605	0.844	1.067	1.274	1.467
0.16	0.550	0.757	0.950	1.130	1.297
0.18	0.505	0.688	0.858	1.015	1.161
0.20	0.468	0.631	0.781	0.921	1.050
0.22	0.438	0.584	0.718	0.842	0.956
0.24	0.413	0.543	0.664	0.775	0.877
0.26	0.391	0.508	0.616	0.716	0.808
0.28	0.371	0.477	0.575	0.665	0.748
0.30	0.354	0.450	0.538	0.619	0.694
0.32	0.339	0.425	0.505	0.578	0.647
0.34	0.324	0.403	0.475	0.542	0.603
0.36	0.311	0.328	0.447	0.508	0.564
0.38	0.299	0.363	0.422	0.477	0.527
0.40	0.287	0.345	0.398	0.448	0.494
0.42	0.276	0.328	0.376	0.421	0.462
0.44	0.265	0.311	0.355	0.395	0.433
0.46	0.254	0.296	0.335	0.371	0.405
0.48	0.244	0.281	0.316	0.349	0.379
0.50	0.233	0.267	0.298	0.327	0.355

2.2 동적파괴인성치(K_{Id})의 계산

일반적으로 취성파괴현상을 보이는 재료에 대해서는 동적파괴인성치(K_{Id})를 구해내고, 연성파괴현상을 보이는 재료에 대해서는 동적탄소성파괴인성치(J_{Id})를 구해낸다. 본 연구에서는 샤피충격기를 계장화 시켜 시간과 하중곡선으로부터 최대하중을 구하고 아래 식으로부터 동적파괴인성치를 계산하였다.

$$K_{Id} = \frac{6P\sqrt{a}}{BW} f(a/W) \text{ 여기서}$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 1.93 - 3.07 \left(\frac{a}{W}\right) + 14.53 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 25.11 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 25.8 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (10)$$

여기서, P는 하중, B는 시편의 두께, W는 시편의 폭, a는 균열길이이다.

3. 실험방법 및 절차

3.1 실험장치

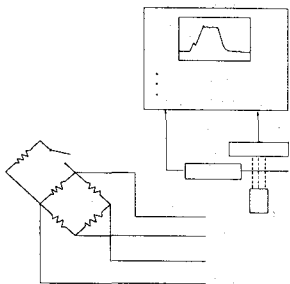


Fig. 1 Block diagram of the instrumented impact test system

충격시험기로는 Izod와 Charpy 테스트 모두가 가능한 용량 5.65J의 Tinius Olsen사의 92T Impact tester를 사용하였다. 동적파괴 인성치를 구하기 위해 샤피 시험기의 충격날에 반도체용 게이지를 계장화 하였으며 그 구성도는 Fig 1과 같다. 게이지에서 나온 신호는 데이터 획득장치(GRC 830)를 이용하여 분석하도록 하였다.

3.2 실험방법

본 실험을 위해 샤피 충격시험기인 Tinius Olsen사의 92T모델을 사용하였다

시편가공은 193℃에서 3분동안 Roll Milling하였으며 185℃에서 7분동안 예열하여 3분동안 Pressing하였다. 시편의 규격은 Fig. 2에서 보는 것과 같이 KS Charpy충격강도 시편 규격에 따랐다. 그리고 계장화된 충격날에 테이더 획득장치(GRC 830)를 연결하여서 흡수에너지와 최대하중을 구하였다. 시편 재료는 충격보강재 MBS rubber 함량을 5phr, 7phr, 9phr로 변화시켜 제작하였다. 제작된 PVC/MBS 시편들은 함유량과 시편의 두께 2t, 3t, 5t에 따라 시험을 행하였다. 각각 1mm, 2mm, 3mm의 예비균열을 내어 동적인성치(K_{Id})를 구하였다. 예비균열은 액체 질소와 칼날을 이용 텀핑을 하여 예비크랙을 내었다. 에너지 해방율은 샤피 충격기의 파단에너지를 사용 Gc 값을 구하였다.

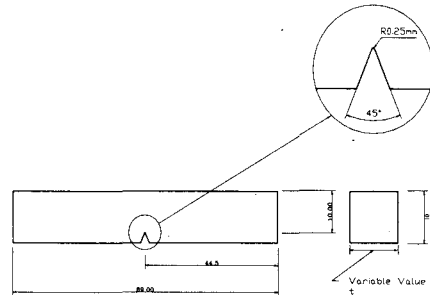


Fig. 2 Charpy specimen geometry

동적파괴인성치(K_{Id})는 예비균열된 시편을 사용하여 측정된 최대하중값을 이용 계산하였다.

4. 실험결과 및 고찰

계장화 샤피충격시험의 실험결과와 위의 기술된 이론을 사용 얻어진 결과를 살펴보면 Fig.3은 rubber를 7phr 첨가했을 경우 하중-시간-에너지의 곡선이다. Fig.4는 동일한 시편의 하중 변위 곡선을 나타낸다. 예비균열이 없는 시편의 샤피 실험을 한 결과 시편 두께 및 MBS함유량에 따른 파단에너지(breaking energy)와 파단강도(breaking strength)값은 Table 2와 같다. 즉 보강재인 MBS 함유량이 증가될수록 재료를 파괴시키는데 소용되는 에너지는 점점 증가함을 알 수 있다.

Table 2 Breaking energy results from the Charpy impact test

함유량	두께(t)	B · E(J)	B · S(J/m)
5phr	2mm	0.1316	13.16
	3mm	0.2124	21.54
	5mm	0.3409	34.09
7phr	2mm	0.1874	18.74
	3mm	0.2711	27.11
	5mm	0.4966	49.66
9phr	2mm	0.2343	23.43
	3mm	0.3219	32.19
	5mm	0.6108	61.08

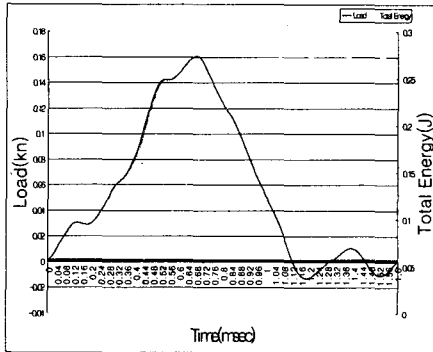


Fig. 3 Load-Time-Energy Curve for PVC with 7phr rubber

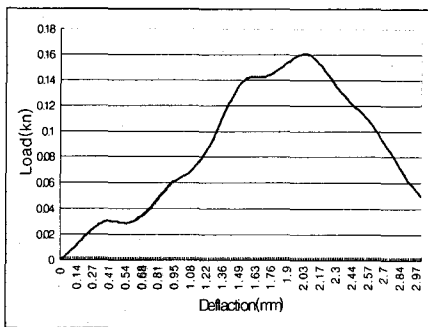


Fig. 4 Load-Deflection curve for PVC with 7 phr rubber

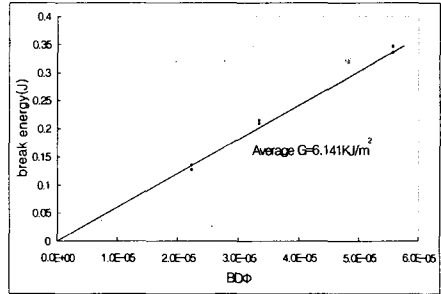


Fig. 5 Energy release rate for PVC with 5 phr rubber

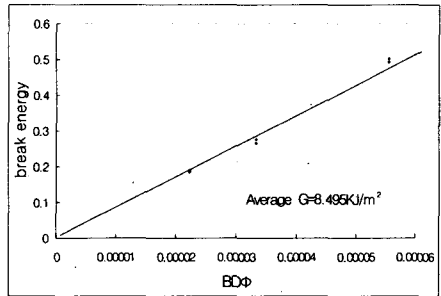


Fig. 6 Energy release rate for PVC with 7phr rubber

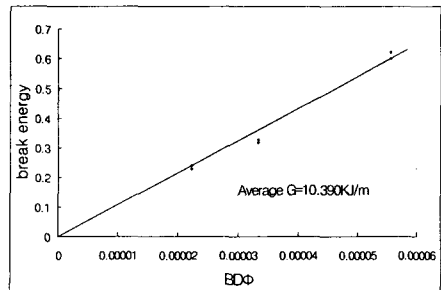


Fig. 7 Energy release rate for PVC with phr rubber

시편에서 측정된 형상인자인 $BD\phi$ 와 샤피충격시험기의 파단에너지로부터 계산된 에너지 해방율 (G_{IC})의 그래프는 Fig.5, Fig.6, Fig.7에 나타나 있다. 이들 직선들의 기울기는 연성이 좋은 MBS 함유량이 증가할수록 증가되는 것을 볼 수가 있다.

최대하중을 측정하여 식10을 사용 계산한 동적 인성치(K_{ID})값의 결과는 Fig.8 Fig.9 Fig.10에 나타나 있다. K_{ID} 는 $1/\sqrt{a}$ 와 $\frac{6 Y P_m L}{4 t B^2}$ 의 기울기에 해당하므로 830데이터 획득 장치에서 얻은 최

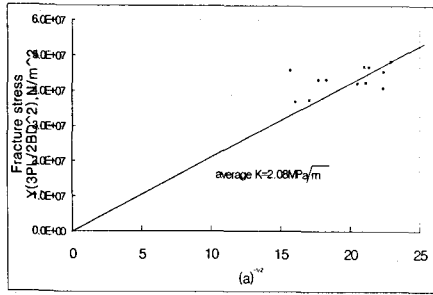


Fig. 8 Dynamic fracture toughness for PVC with 5 phr rubber

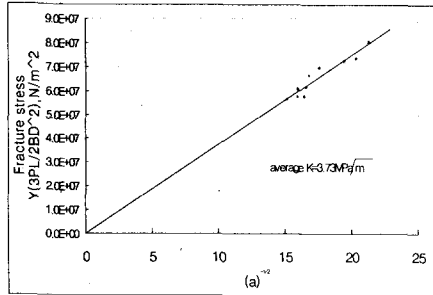


Fig. 9 Dynamic fracture toughness for PVC with 7 phr rubber

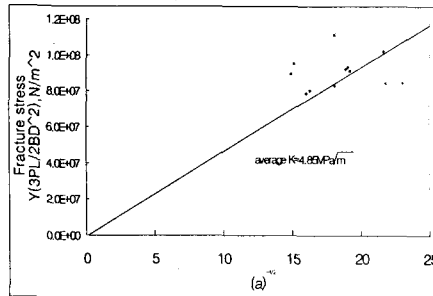


Fig. 10 Dynamic fracture toughness for PVC with 9 phr rubber

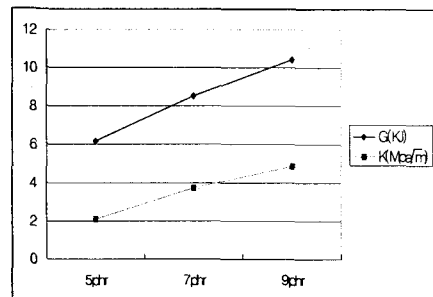


Fig. 11 Dynamic fracture toughness and Energy release rate

대하중 Pm을 공식에 적용하여 구하였는데 최하중 역시 MBS함유량이 증가될수록 증가됨을 알 수 있다. 일반적으로 취성이 높은 재료는 높은 충격하중을 요하는 반면 연신율이 낮아 전체적인 파괴 에너지는 적다고 할수있는데 PVC/MBS 재료는 강도상승효과 뿐만 파괴시키는데 에너지 또한 많이 소요됨을 알 수 있다. 이는 취성의 PVC재료에 연성의 MBS보강으로 매우 바람직한 충격강도상승 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 11에서 보여주는 바와 같이 MBS충격보강재의 함유량이 높아질수록 rubber가 보강되지 않은 취성인 재료인 PVC보다파괴 인성치와 에너지해방율이 높아짐을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 계장화된 사피 충격시험기를 이용하여 PVC에 MBS충격 보강재를 5phr, 7phr, 9phr로 혼합했을 경우 시편의 동적파괴인성치 (K_{Id})를 계산하였다. 또한 사피시험기 실험에서 얻어진 파단에너지로부터 PVC 재료의 rubber의 함유량에 따른 에너지 해방율(G_{IC})을 추정하였다.

PVC/MBS재료에 있어 충격보강재 함유량이 5phr, 7phr, 9phr첨가된 범위에서 고무의 첨가량이 증가할수록 충격 파단에너지와 동적파괴인성치 및 에너지 해방율이 증가됨을 알 수 있어 고무의 toughening효과를 입증할 수 있었다.

참고문헌

- (1) 이억섭·박원구·황성근·홍성경·윤경수, 1995, "계장화 사피충격시험을 이용한 WC-Co 초경합금의 동적 균열개시인성치 결정" 대한기계학회논문집 제 19권 제 3호 pp688~696
- (2) E. PLATI and J. G. WILLAMS, 1975, "The Determination of the Fracture Parameters for Polymers in Impact" Polymer Engineering and Science, Vol, 15, No6 pp470~477
- (3) Kilwon Cho, JaeHo Yang and Chan Eon Park, 1998, "The effect of rubber particle size on

toughening behaviour of rubber-modified poly(methylmethacrylate) with different test methods", Polymer, Vol. 39 Number 14, pp3073~3081

- (4) 박세만, 김길수, 박명균, 1997, "하중을 받는 금속재료의 온도에 따른 동적거동에 관한 연구" 명지대학교 산업기술연구소 논문집 Vol 16. , pp113-120.