



## 유한요소법과 샤피충격시험기에 의한 노치각도에 따른 나일론 열가소성 플라스틱 재료의 파괴특성

이중원 · 김태옥\* · †박명균

명지대학교 기계공학과, \*명지대학교 화학공학과  
(2007년 9월 20일 접수, 2007년 12월 20일 채택)

## Dynamic Fracture Properties of Nylon Thermoplastic Material Depending on Notch Angle with Charpy Impact Machine and Finite Element Method

Jung-Won Lee · Tae-Ok Kim\* · †Myung-Kyun Park

Dept. of Mechanical Engineering, Myongji University, Yongin 449-728, Korea

\*Dept. of Chemical Engineering, Myongji University

(Received September 20, 2007, Accepted December 20, 2007)

### 요 약

샤피충격시험은 동적하중 하에 있는 고분자 재료의 거동을 이해하는데 가장 널리 사용되고 있는 방법이다. 본 연구에서는 샤피충격시험장치에서 얻어지는 파단에너지를 사용하여 나일론 소재 샤피 시편의 노치각도에 따른 에너지 해방율을 구하는 방법을 제시하였다. 또한 샤피충격시험장치를 계장화하여 최대 하중과 파단 시까지 소요되는 에너지 등의 파손인자들을 산출하였다. 그리고 노치각도에 따른 동적파괴 인성치와 유한요소법을 사용하여 중앙집중 하중 하에서 샤피 시편의 노치각도에 따른 응력분포를 산출하였다.

**Abstract** – The notched Charpy impact test is one of the most prevalent techniques used to characterize the effect of high impulse loads on polymeric materials. In this study, a method of analysis in nylon plastic materials is suggested to evaluate the critical strain energy release rate for variation of notch angles from the Charpy impact energy measurement. Instrumented Charpy impact tester was used to extract ancillary information concerning fracture parameters in addition to total fracture properties and maximum critical load. The dynamic stress intensity factor of nylon plastic material was calculated for the ASTM Charpy specimen from the obtained maximum critical load. Also, the finite element model was developed to figure out the stress distributions for Charpy specimen with different notch angles subject to 3 point bending load which is equivalent to the load applied in the experiment.

**Key words** : Charpy impact test, Strain energy release rate, Dynamic stress intensity factor, Maximum critical load, FEM model

### I. 서 론

최근 각종 구조용 재료로 기존의 금속재료를 대신하여 고분자 재료가 다양하게 적용되고 있는 추세이다. 고분자 재료를 구조용 재료로 사용하기 위해서는 이들 재료를 이용하여 구조의 부품설계 시 재료의 기계적 성질을 정확하게 해석하여 안전하면서도 경제적인 설계를 하는 것이 매우 중요하다.

고분자 재료의 파괴특성을 파악하고, 분석하기 위해서는 일반적으로 ASTM-D-256에 언급된 대로 Izod나 샤피충격시험기를 사용한다. Izod나 샤피충격시험은 고분자 시편을 홀더 위에 올려놓고, 펜듈럼(pendulum)을 움직여서 고속으로 충격을 가해 파괴된 시편과 펜듈럼에 의한 운동에너지를 측정하고, 시편을 파괴시키는데 소요되는 순수한 파단에너지(breaking energy)로 환산하여 재료의 충격 특성치를 비교·판단하는데 매우 유용한 방법으로 널리 사용되어 왔다. 그러나 최근 파괴역학의 발달과 더불어 이러한 파단에너지 뿐만 아

†주저자:pmk@mju.ac.kr

나라 중요한 파괴역학 설계인자인 응력세기계수와 에너지 해방율(strain energy release rate)과의 관계를 규명하는 것이 매우 중요한 의미를 갖게 되었다.

고분자 재료의 파단에너지에 대한 많은 자료와 연구 보고에 비해 이들 에너지와 파괴역학 설계인자와의 관계를 규명하는 연구는 매우 제한되어 있는 실정이다. 특히, 현대사회에서 구조물의 안전한 설계와 신소재의 개발을 위해서도 에너지와 파괴역학 설계인자의 관계 규명은 절실히 필요하다.

최근 보강 고분자 재료의 동적파괴 거동에 대한 연구는 활발히 이루어지고 있으며[1-6], 특히 사파충격시험에서 노치의 가공 반경이 충격강도에 미치는 영향에 관한 연구는 매우 활발한 실정이다[7-11]. 그러나 시편의 노치각도 변화에 따른 충격특성에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 나일론 열가소성 플라스틱 재료를 사용하여 시편노치의 각도를 30°, 45°, 60°로 변화시키면서 충격에너지 값을 산출하였으며, 이 에너지 값으로부터 에너지 해방율을 계산하고, 이를 비교·분석하였다. 또한 노치각도의 변화에 따른 최대 하중값을 산출하여 동적파괴 인성치를 산출하고, 이를 비교하였다. 그리고 동적파괴 특성을 규정하기 위해 연성지수(ductility index)를 제안하여 재료의 동적하중 하에서 취성 및 연성 여부를 정량적으로 평가하였다.

끝으로 사파 시편의 노치형상 각도에 따른 파괴특성을 예측하기 위하여 유한요소법을 사용하여 3점 굽힘하중 하의 사파 시편의 모델을 개발하고, 하중을 가할 때 노치의 형상에 따른 응력분포와 크기를 비교하였다.

## II. 이 론

### 2.1. 파단에너지로부터 에너지 해방율 계산

에너지 관점에서 기본 파괴역학 관계식을 선형파괴역학 관점에서 유도하면 다음과 같은 관계식들을 얻을 수 있다[8]. 즉, 하중과 변위의 관계는 다음과 같다.

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

여기서  $x$ 는 변위,  $p$ 는 하중,  $C$ 는 컴플라이언스,  $a$ 는 균열길이이며, 변위는 탄성영역이고, 흡수된 에너지는 하중-변위곡선에서 면적이 된다.

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

여기서  $w$ 는 변위에너지이다.

일정한 두께( $B$ )의 시편에서 에너지 해방율( $G$ )은 다음과 같다.

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

선형파괴역학에서는  $G$ 가 임계값( $G_c$ )과 같을 때 파괴가 일어난다고 가정하기 때문에 임계 에너지 해방율은 다음과 같다.

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

또한 응력과 파괴 인성치와의 관계는 일반적으로 다음과 같이 주어진다.

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

여기서  $\sigma$ 는 최대 응력,  $Y^2$ 는 시편의 폭( $D$ )에 대한 균열길이 차원으로,  $(a/D)$ 의 비율과 유한 폭 및 자유곡면 효과를 포함한 임의의 형상계수이다. 이때,  $K_c$ 와  $G_c$ 의 관계는 다음과 같다.

$$K_c^2 = EG_c \quad (6)$$

여기서 평면응력 상태에서의 탄성계수( $E$ )는 평면 변형률 상태에서  $E/(1-\nu^2)$ 으로 대체된다[9].

따라서 식 (4)~식 (6)으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

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

식 (7)에서  $dcd(a/D)$ 는 실험적 또는 이론적으로 구할 수 있고, 계수  $Y^2$ 는 시편의 파괴 시 측정된 최대 하중을 이용하여  $K_c$  값을 얻은 후 식 (5)에서 구할 수 있다. 만약 하중대신 에너지 값을 측정하였을 경우에는 식 (2)와 식 (4)를 이용하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$w = G_c BD \Phi \quad (8)$$

여기서

$$\Phi = \frac{C}{dcd(a/D)} \quad (9)$$

식 (8)에서  $\Phi$ 를 결정할 수 있으면 파단에너지( $w$ )와  $BD\Phi$ 와의 관계로부터  $G_c$ 를 구할 수 있다.

### 2.2 동적파괴 인성치 계산

일반적으로 취성파괴 현상을 보이는 재료에 대해서는 동적파괴 인성치( $K_{Id}$ )를 구하고, 연성파괴 현상을 보

이는 재료에 대해서는 동적 탄소성 파괴 인성치( $J_{Id}$ )를 구한다.

본 연구에서는 샤피충격시험기를 계장화 시켜 최대 하중을 측정하였다. 최대 하중은 일반적으로 균열개시 하중으로 가정할 수 있으므로, 이 하중과 식 (10)을 이용하여 취성 동적파괴 인성치를 산출하였다.

$$K_{Id} = \frac{6p\sqrt{a}}{BD}f(a/D) \quad (10)$$

여기서

$$f\left(\frac{a}{D}\right) = 1.93 - 3.07\left(\frac{a}{D}\right) + 14.53\left(\frac{a}{D}\right)^2 - 25.11\left(\frac{a}{D}\right)^3 + 25.8\left(\frac{a}{D}\right)^4 \quad (11)$$

### III. 실험

#### 3.1. 실험장치

충격시험기는 아이조트와 샤피 테스트가 가능한 용량 5.65 Joule의 Tinius Olsen사의 92T 충격시험기를 사용하였다. 하중과 시간에 따른 관계를 얻기 위해 샤피 충격 tup에 스트레인 게이지를 붙여 계장화 하였으며, 데이터 획득장치(GRC 830-I)를 이용하여 시간에 따른 최대 하중을 구하였다.

장치의 구성도는 Fig. 1과 같다.

#### 3.2. 시편 및 실험방법

정확한 데이터를 얻기 위해 먼저 충격시험기를 보정(calibration)하였다. 보정방법은 먼저 펜들룸을 가장 낮은 부분에 놓고, 30초 동안 완전히 정지시킨 후 다시 펜들룸을 걸쇠에 걸어 놓고, 펜들룸을 자유롭게 풀어놓는 방법을 통해 보정하였다. 그리고 선정된 에너지 값이 3% 이내이면 보정된 값으로 인정하였다.

본 연구에서 사용한 재료는 NMC6 나일론 계열의 복

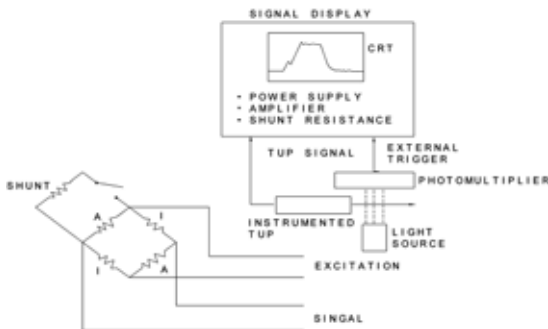


Fig. 1. Block diagram of Charpy impact test machine.

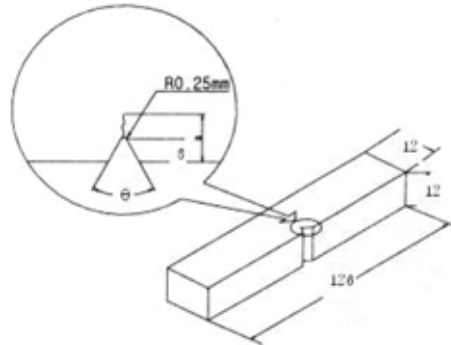


Fig. 2. Geometry of Charpy specimen ( $\theta$ : 30°, 45°, 60°).

합 카스타마이드 MF200(유승산업)이었으며, 시편의 제조방법은 MC 나일론 계열의 재료를 주조방법에 의해 모재 판재를 제작한 후 시편을 가공하였다. 사용된 시편은 ASTM-D-256에서 제안한 치수를 사용하였으며, 형상은 Fig. 2와 같다.

실험은 상온에서 실시하였으며, 노치각도(30°, 45°, 60°)마다 5개의 시편을 시험하였고, 이들의 결과 중 최대값과 최소값을 제외한 3개 시편의 평균 파단에너지와 최대 하중의 평균값을 산출하였다. 그리고 에너지 해방율은 샤피충격시험기에서 측정된 파단에너지의 평균값을 식 (8)에 대입하여 산출하였다. 이때,  $\Phi$  값은 시험이나 이론적으로 산출할 수 있으나, 본 연구에서는 Williams 등[8,9]이 제안한 이론식으로부터 산출하였으며, 그 값은 약 1.75이었다.

동적파괴 인성치는 계장화된 tup과 데이터 획득장치 830-I로부터 최대 하중값을 구하여 식 (10)에 의해 산출하였다. 동적파괴 인성치를 계산하기 위해서 예리한 면도칼로 시편을 탭핑하여 적절한 예비균열을 내어 실험하였다.

### IV. 유한요소법

시편의 노치각도에 따른 주응력과 Von-Mises 응력분포와 크기를 알기 위해 유한요소법을 이용하여 시편 내부의 응력을 해석하였다. 즉, 노치각도가 30°, 45° 및 60°일 때 응력 분포 및 크기를 알기 위해 노치 곡률반경이 0.25 mm인 시편에 대해 모델링 하였다. 그리고 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS 8.0을 사용하여 해석하였다. 이때, 시편의 모델 생성을 위해 4절점을 갖는 평면요소인 PLANE42 요소를 사용하였으며, 요소망 개수는 1,560개를 생성하여 해석하였다. 구속조건은 위의 Charpy 충격시험기의 고정단 길이와 같은 부분에 Y축 변위를 0으로 고정하였으며, 적용하중은 각 시편의 노

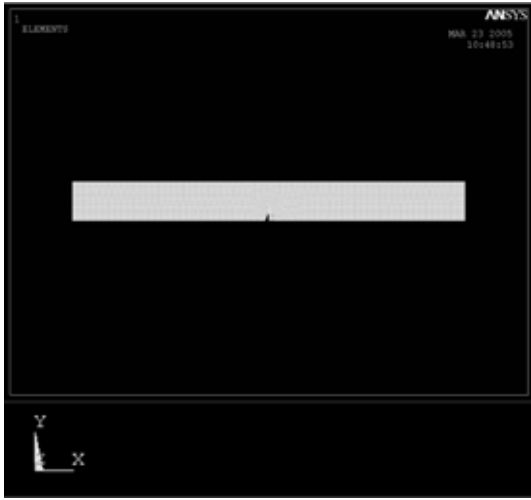


Fig. 3. Finite element model of Charpy specimen.

치부 상단 중앙에 1.7kN을 가하였다. 이때, 45° 시편에 대해 생성된 매쉬 형상은 Fig. 3과 같다.

## V. 결과 및 고찰

### 5.1. Charpy 충격시험 결과

일반 파괴충격시험장치의 충격날에 스트레인 게이지를 붙여 계장화하여 얻은 결과, 노치각도에 따른 파단 에너지, 최대 하중 시까지 소요되는 에너지 그리고 최대 하중은 Table 1과 같다.

Table 1. Experimental results for Charpy impact test.

Notch angle (°)	Charpy breaking energy [J]	Breaking energy [J]	Energy to max. load [J]	Max. load [kN]
30°	2.41	2.58	2.41	1.39
45°	3.17	3.31	3.17	1.68
60°	0.91	0.96	0.77	0.80

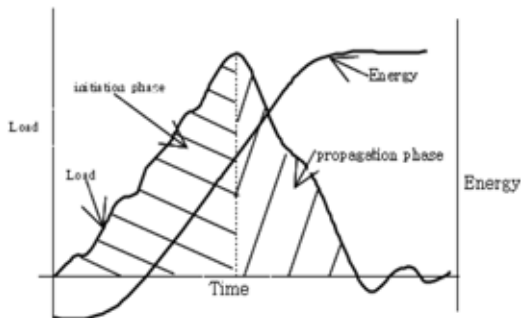


Fig. 4. Curve for load and energy versus time.

Table 2. Calculated  $K_{Ic}$  for specimen with different angles using GRC 830-I.

Notch angle (°)	30°	45°	60°
$K_{Ic}(\text{MPa}\sqrt{m})$	5.5	6.7	3.2

Table 3. Calculated  $G_c$  for specimen with different angles using fracture energy.

Notch angle (°)	30°	45°	60°
$G_c (\text{kJ/m}^2)$	9.5	12.5	3.6

또한 시편파단 시 나타나는 전형적인 하중 및 에너지 곡선은 Fig. 4와 같다.

Table 1에서 노치각도가 30°인 경우보다 45°에서 큰 파단에너지가 소요될 뿐만 아니라 최대 파단 시까지 많은 에너지가 소요됨을 알 수 있다. 또한 파단 시 요구되는 최대 하중도 30°에서 1.39 kN이었으나 45°에서는 1.68 kN이었다. 그러나 노치각도가 45°를 넘어 60°에 이르면 매우 적은 에너지와 하중으로 시편을 파괴시킬 수 있음을 알 수 있다. 이 결과는 노치각도가 어느 정도까지는 각도가 증가됨에 따라 보다 많은 파단에너지와 최대 파단하중이 소요되지만 45°를 넘는 경우에는 훨씬 적은 에너지로 보다 쉽게 파단시킬 수 있음을 의미한다. 따라서 설계 시에는 임계 노치각도를 설정하고, 임계 노치각도 이상의 노치각도를 피하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

노치각도에 따른  $K_{Ic}$  값을 산출한 결과와 노치각도에 따른 파단에너지를 이용하여 에너지 해방율을 계산한 결과는 각각 Table 2 및 Table 3과 같다.

충격 시 재료의 파단에 소요되는 총 에너지는 균열진전에 소요되는 에너지와 균열개시에 소요되는 에너지로 나눌 수 있다. 즉, 연성재료의 충격 파손에너지는 균열진전에 많은 에너지를 소모하며, 반면에 취성재료의 경우에는 균열개시에 많은 에너지가 소모하고, 상대적으로 균열진전에는 적은 에너지가 소모된다.

따라서 균열진전 에너지를  $E_p$ 라 하고, 균열개시 에너지를  $E_i$ 라 하면 연성지수(ductility index, DI)는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$DI = \frac{E_p}{E_i} \quad (12)$$

식 (12)에서 연성지수를 %로 환산했을 때 100%에 가까우면 연성파괴가 압도적으로 지배하고, 약 10% 미만의 경우에는 충격 시 상대적으로 취성이 지배하는 재료로 정의할 수 있다. 따라서 연성지수를 사용하면 재료의 충격하중 시 상대적인 평가가 가능하므로 본 연

**Table 4.** DI index values for different notch angles.

Property	30°	45°	60°
$E_i$ [J]	2.41	3.35	0.96
$E_p$ [J]	0.17	0.17	0.19
DI	0.07	0.05	0.2

구에서는 동일 재료에 대해 충격하중 시 각도에 따른 취성 지배 여부를 판단하였다.

식 (12)에 의해 산출한 시편 노치부위 각도에 따른 DI 값은 Table 4와 같다.

위의 결과에서 NMC6 나일론 계열은 동적하중 하에서 매우 취성이 큰 재료라 할 수 있다. 그리고 DI 값을 보면 노치각도가 45° 시편의 경우 균열개시 에너지 대비 약 5% 정도가 균열전파에 소요되었으므로, 매우 쉽게 균열이 전파됨을 알 수 있다. 또한 노치각도에 따른 DI 지수는 60°일 때 가장 크며, 이 각도에서는 균열을 전진시키는데 보다 많은 에너지가 소요됨을 알 수 있다.

사파충격 실험결과와 계장화 장치로부터 얻은 결과를 살펴보면 파손에너지의 대부분이 초기 균열을 개시 하는데 소모되고, 균열을 전파하여 최종 파손 시까지 소요되는 에너지는 매우 적음을 알 수 있다. 이것은 노치부위 각도에 상관없이 공통적으로 발생함을 알 수 있으며, 본 실험에 사용된 나일론 플라스틱 재료는 동적하중 하에서 매우 취약한 재료라 판단할 수 있었다.

따라서 균열전파 에너지를 증가시키기 위해서는 다른 연성재료를 첨가하여 복합재료로 만들어 충격저항의 향상을 시도할 수 있다[3].

**5.2 유한요소법 해석결과**

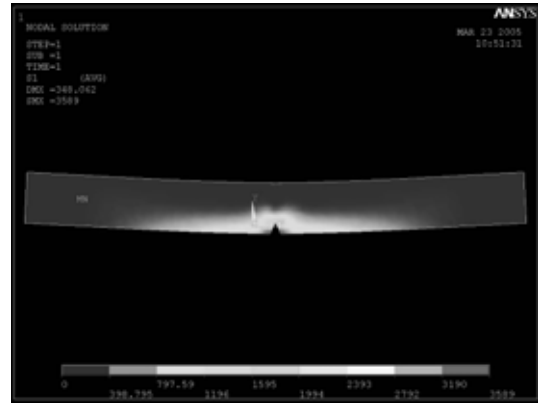
노치각도가 45°인 시편에 대해 유한요소법을 이용하여 얻은 최대 주응력과 Von-Mises 등가응력 분포는 Fig. 5 및 Fig. 6과 같다.

이들 결과를 살펴보면 노치 주변에 응력이 집중되며, 이 주변에서부터 파손이 시작됨을 쉽게 알 수 있다. 예상대로 굽힘하중에 의한 인장응력으로, 모드1 균열이 개시 발생함을 알 수 있었다.

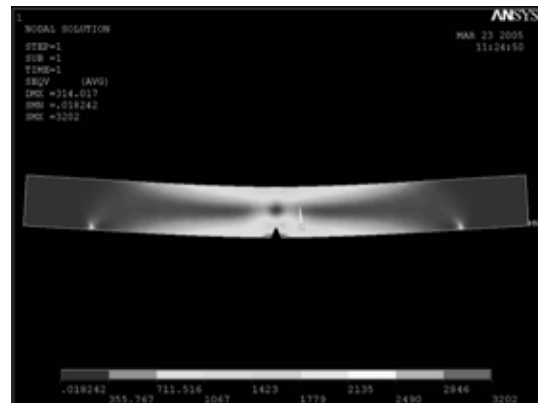
Fig. 7 및 Fig. 8은 노치부 각도에 대한 최대 주응력과 Von-Mises 응력을 나타낸 것이다.

주응력 및 Von-Mises의 등가응력분포를 비교해 보면 노치각도가 60°일 때 가장 큰 응력이 발생함을 알 수 있다. 즉, 60°의 노치각도에서 가장 큰 응력이 발생하는 것은 다른 노치각도보다 쉽게 파괴될 수 있음을 의미한다. 이것은 60°에서 실험을 통하여 얻은 임계 동적파괴 인성치,  $K_{Ic}$  값이 최소로, 가장 쉽게 파괴

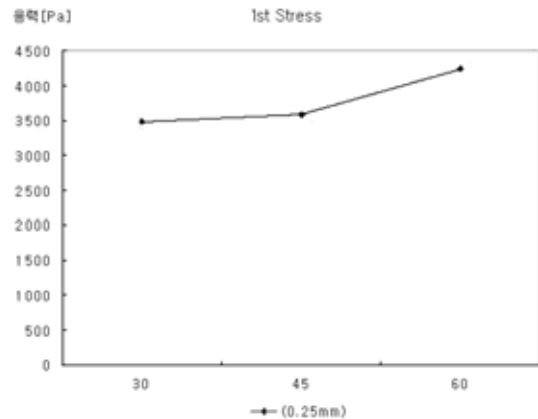
될 수 결과와 일치한다. 따라서 가장 적은 에너지를 가지고, 쉽게 파괴될 수 있는 노치각도는 60°임을 알 수 있었다.



**Fig. 5.** Picture of Max. principal stress distribution.



**Fig. 6.** Picture of Von-Mises stress distribution.



**Fig. 7.** Variations of maximum principal stresses with notch angles.

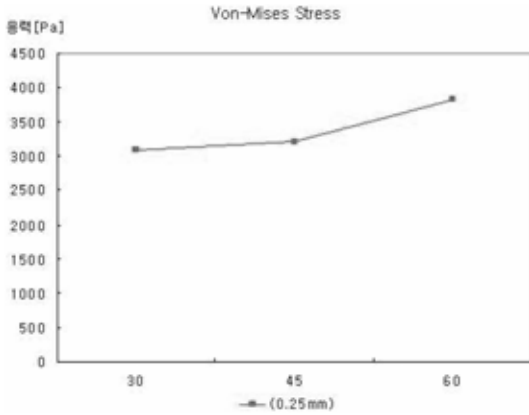


Fig. 8. Variations of Von-Mises stresses with notch angles.

## VI. 결 론

본 연구에서는 계장화된 사파충격시험기를 이용하여 나일론 열가소성 플라스틱 재료의 사파 노치각도(30, 45, 60°)를 변화시키면서 시편이 파괴될 때 균열이 개시되는 임계 하중(최대 하중), 균열개시 에너지 및 균열전파 에너지를 산출하였다. 그리고 이들 결과로부터 동적파괴 인성치와 연성지수를 산출하였으며, 파단에너지로부터 에너지 해방율을 산출하였다. 또한 유한요소법을 사용하여 노치각도에 따른 응력분포와 크기를 비교하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 노치부의 각도에 따른 파단에너지 및 최대 하중은 30°에서보다 45°에서 보다 큰 하중과 파단에너지가 소요되었으나, 60°에서는 현저히 작아짐을 알 수 있었다.

2. 나일론 고분자 재료의 에너지 해방율은 3-13 kJ/m<sup>2</sup> 정도이고, 60°에서 가장 적은 값을 나타내었다. 그리고 동적파괴 인성치는 45°에서 가장 큰 값을 나타내었다.

3. 제안된 연성지수로부터 각종 재료의 동하중시 재료의 취성정도를 정량적으로 평가할 수 있었다. 특히, 본 시험에 사용된 나일론 고분자 재료는 균열전파에 소요되는 에너지가 20% 미만으로 매우 취성인 재료임을 알 수 있었다. 또한 노치각도가 증가할수록 보다 쉽게 균열을 개시할 수 있었으나 전파에너지는 보다 많이 소요되었다.

## 참고문헌

- [1] Cho, K. "The Effect of Modulus of the Dispersed Particle on Fracture Toughness of Toughened Poly (Methyl Methacrylate)", *Polymer(Korea)*, **17**, 176-185, (1993)
- [2] Bucknall, C.B., I.K. Partridge and M.V. Ward, "Rubber Toughening of Plastics", *J. Material Sci.*, **19**, 2064-2072, (1984)
- [3] Cho, K.W., J.H. Yang, S. Yoon, M.K. Hwang and S.V. Nair, "Toughening of Polycarbonate: Effect of Particle Size and Rubber Phase Contents of the Core-shell Impact Modifier", *J. of Applied Polymer Science*, **95**, 748-755, (2005)
- [4] Kinloch, A.J. and J.G. Williams, "Crack Blunting Mechanisms in Polymers", *J. Material Sci.*, **15**, 987-9226, (1980)
- [5] Fraser, R.A. and I.M. Ward, "The Fracture Behaviour of Notched Specimens of Polymethylmethacrylate", *J. Material Sci.*, **9**, 1624-1630, (1974)
- [6] Cho, K.W., J.H. Yang, B. Il, C. Kang and E. Park, "Notch Sensitivity of Polycarbonate and Toughened Polycarbonate", *J. of Applied Polymer Science*, **89**, 3115-3121, (2003)
- [7] Fraser, R.A. and I.M. Ward, "The Impact Fracture Behaviour of Notched Specimens of Polycarbonate", *J. Material Sci.*, **12**, 459-468, (1977)
- [8] Plati, E. and J.G. Williams, "The Determination of the Fracture Parameters for Polymers in Impact", *Polymer Eng. & Sci.*, **15**, 470-477, (1975)
- [9] Williams, J.G. *Stress Analysis of Polymers*, Ellis Horwood, 2nd ed., (1980)
- [10] Bucknall, C.B., P. Davis and I.K. Partridge, "Rubber Toughening of Plastics-Part 11", *J. Material Sci.*, **22**, 1341-1346, (1987)
- [11] Bucknall, C.B., P. Davis and I.K. Partridge, "Rubber Toughening of Plastics", *J. Material Sci.*, **21**, 307-313, (1986)