

두께변화에 따른 엔지니어링 플라스틱의 파괴인성과 AE특성

남 기 우* · 김 선 진** · 안 병 현*
(96년 8월 6일 접수)

Fracture Toughness and AE Characteristics of Engineering Plastic according to Thickness

Ki-Woo Nam* · Seon-Jin Kim** · Byung-Hyun Ahn*

Key Words : Engineering Plastic(공업용플라스틱), Polymer(고분자재료), Fracture Toughness(파괴인성), Stress Intensity Factor(응력확대계수), Acoustic Emission(음향방출), Specimen Thickness(시험편 두께), Weibull Distribution(바이블 분포)

Abstract

A standard method for the evaluation of the fracture toughness of the high polymer materials has not been fully developed in comparison with that for metallic materials, and has not yet established. In this paper, fracture toughness tests using polycarbonate specimens were carried out. The fracture toughness of commercial polycarbonate were dependent on the specimen thickness. The specimen thickness is necessary above 8mm to obtain the valid K_{Ic} . AE cumulative counts were slightly dependent on specimen thickness.

1. 서 론

오늘날 공업계는 에너지절감 및 경량화에 따라 종래부터 사용되어 온 금속재료대신에 신소재의 이용이 활발하게 진행되고 있다. 그 중에서도 고분자재료는 금속재료에 비해서 역사적으로 짧기 때문에 연구개발, 제품개발 및 제조기술의 개량이 활발하게 이루어지고 있다. 특히, 최근 공업용 플라스틱은 구조용 재료로서 고강도 경량화 및 소형화에 따르는 고정도가 요구되어, 종래는 금속재료가 사용되던 부분에 공업용 플라스틱이 사용되고 있

다^{1),2)}. 그러나, 고분자재료는 금속재료에 비교하여 강도특성에 관한 신뢰성이 떨어지고 있기 때문에 그 용도는 제한되어 있다. 특히, 실용화를 이루기 위한 파괴인성평가는 반드시 필요한 것이다. 그러나 고분자재료의 파괴인성시험법에 관한 표준화는 금속재료에 비교해서 뒤지고 있다^{3),4)}. 또한, 비파괴 기법의 하나인 AE는 가동중인 구조물의 안전도를 평가하는 수단으로 사용하려는 연구가 수행되고 있다⁵⁾⁻¹⁰⁾.

본 연구에서는 금속재료에 대하여 확립되어 있는 파괴인성시험법 ASTM규격 E399를 폴리카보

* 부경대학교 공과대학 재료공학과

** 부경대학교 공과대학 기계공학과

네이트에 적용하여, 초기균열길이와 시험편 두께가 파괴인성에 주는 영향을 조사하였다. 또한, 파괴시의 AE도 검출하여 시험편 두께에 대하여 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 시험편 형상

본 연구에 사용한 재료는 시판중인 폴리카보네이트판이다. 노치선단의 균열은 나이프카터로서 0.5mm깊이 까지 삽입하였으며, 노치선단의 곡률반경은 0.2mm이었다. 시험편은 가공후 잔류응력을 제거하기 위하여 130℃에서 3시간 열처리를 행하고, 그 후 실온까지 냉각시켰다. 그 결과 노치선단의 잔류응력은 편광현미경으로 확인하였더니 거의 나타나지 않았다. 사용한 시험편은 Fig. 1과 같은 CT시험편을 사용하였다. 균열길이 $a_0/W=0.17\sim 0.55$ 이고, 시험편 두께는 4.5mm, 6.5mm, 7.8mm, 10mm의 4종류를 사용하였다. 시험시의 cross head속도는 0.5mm/min로 하였다.

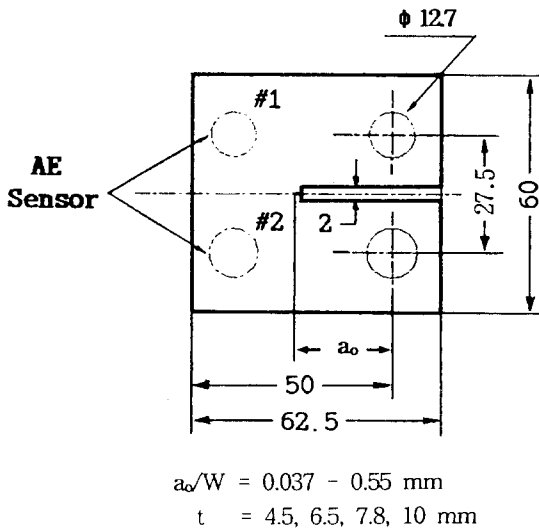


Fig. 1 Dimensions of compact tension specimen ; all dimensions of mm

2.2 응력과 변위곡선

인장시험은 시험편을 KS규격에 따라 제작한 후,

CT시험편과 같은 조건으로 열처리를 실시하였다. 사용한 시험기는 UTM-5Ton(Instron사)으로 실온(15℃)에서 cross head speed는 0.5mm/min로 하였다. 전형적인 인장시험의 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

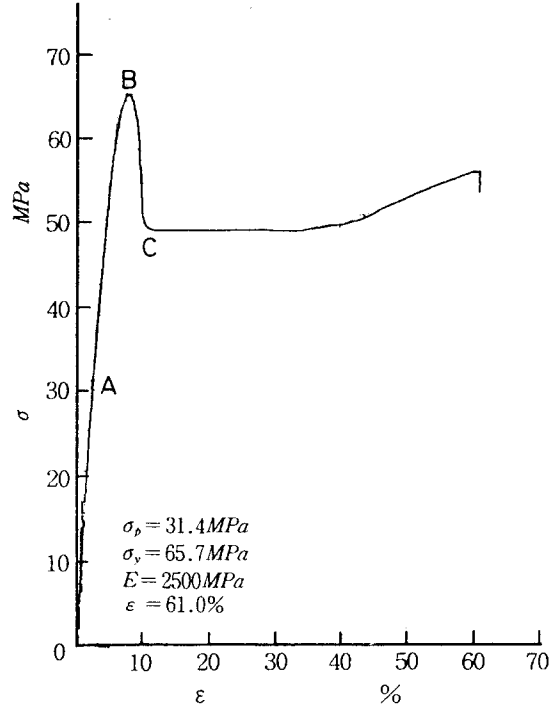


Fig. 2 Stress-strain diagram

일반적으로 금속재료는 항복응력까지 선형이 거의 유지되어 종탄성계수는 일정하다. 그러나 폴리카보네이트에서는 항복응력까지 응력의 증가와 함께 종탄성계수는 서서히 변화한다. 이 그림에서 A점은 응력-변위곡선이 초기직선에서 벗어나는 변곡점으로 비례한도 응력은 $\sigma_0=31.4\text{MPa}$ 이고, 그때의 종탄성계수E는 2500MPa이다. B점은 항복점으로 항복응력은 $\sigma_y=65.7\text{MPa}$ 이다. 항복후 응력의 저하와 함께 C점에서 일정한 단면수축이 일어나고, 축방향으로 전파하며 응력이 일정하다. 그 후 재료는 연신강화에 의해 강도가 상승하고 파괴하였다.

2.3 파괴인성의 평가

평면변형을 파괴인성치 K_{Ic} 는 ASTM규격 E399

에 따르면 응력-변형률 곡선을 사용하여 평가한다¹¹⁾. 본 실험에 적용한 하중-변위곡선의 일례를 Fig. 7에 함께 나타내었다. 그림에서와 같이 P_Q 는 5% off set선과 P-V_g곡선과의 교점하중, P_m 은 최대하중, P_r 는 불안정 파괴개시 지점의 하중이다. CT시험편의 응력확대계수 K_Q 는 아래의 식(1)에 5% off set곡선의 교점하중 P_Q 를 대입하여 구하였다.

$$K_Q = P/B\sqrt{W} \cdot F_1(\xi) \quad (1)$$

$$F_1(\xi) = 4.55 - 40.32\xi + 414.7\xi^2 - 1698\xi^3 + 3781\xi^4 - 4287\xi^5 + 2017\xi^6$$

여기서 $\xi = a_0/W$, B는 판두께, W는 판폭, a_0 는 균열길이, $F(\xi)$ 는 시험편형상 및 부하방식에 따른 수정계수이다. 얻어진 K_Q 가 유효한 K_{Ic} 값으로 성립하기 위해서는 다음에 나타내는 식(2)의 소규모항복조건, 평면변형률조건을 만족할 필요가 있다.

$$a_0, W - a_0, B > 2.5(K_Q/\sigma_Y)^2 \quad (2)$$

2.4 AE계측

파괴인성시험시의 파괴거동을 해석하기 위하여 파괴과정에서 발생하는 AE신호를 측정하였다. 이 때 사용된 AE실험장치는 LOCAN 320이다. Fig. 1에서와 같이 센서 #1, 2 는 AE신호의 검출감도를 높이기 위해서 175KHz 공진형 센서를 사용하였으며, 센서는 실리콘 그리스를 바르고 테이프로 고정하였다. 검출된 신호는 100-300KHz범위의 band-pass filter를 거쳐서 pre-amp.에서 40dB, main amp.에서 26dB로 증폭하였다. 이 때의 한계전압은 0.42V로 하였다. 두 센서는 노치선단을 중심으로 1.5cm간격을 두고 부착하고, 인장시험기 및 지그 부위에서와 같은 곳에서 발생하는 잡음을 제거하기 위하여 윤활유를 발라서 최소화하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파면양상과 파괴기구

파단면의 대표적인 일례를 Fig. 3에 나타낸다. 이것은 파단 최대하중 $P_{max} = 1.5KN$, 초기균열길이

$a_0 = 13.9mm$ 일 때의 CT시험편이다. 그림에서 A부분은 예비노치부분을 나타내고, 노치선단에서 B부분인 안정균열성장 영역이 관찰된다. 이것으로 부터 P-V_g곡선이 초기직선부에서 기울어져가는 주원인이 균열진전에 의한 것이라고 생각된다. 불안정 파괴는 안정균열의 C영역에서 발생하고, 파괴발생점에서 균열이 방사상으로 전파한다. 또 그것과 교차하는 원호상의 Wallner line이 보인다¹²⁾. 이와같은 선은 통상 대단히 취약한 재료에 나타나는 현상으로서, 전파하는 균열선단과 탄성충격파의 간섭에 의해서 발생한다.

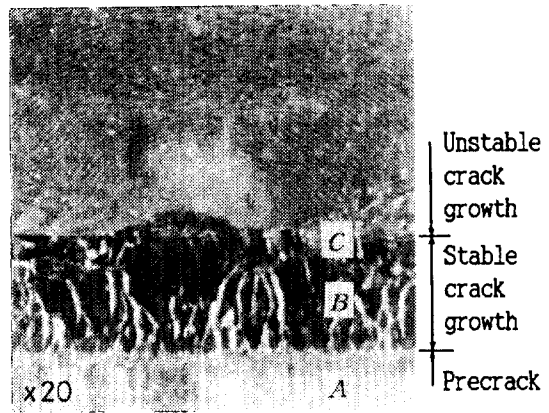


Fig. 3 Fracture surface

3.2 파괴인성값에 미치는 제인자 의존성

3.2.1 균열길이에 대한 파괴인성값

균열길이가 다른 다수의 시험편과 두께가 다른 시험편 다수를 사용하여 각각의 K_Q 값을 식(1)에서 구하였다. 이 때 사용한 하중은 P_Q 의 하중을 사용하였고, 균열길이는 초기균열길이인 a_0 를 사용하였다. 이렇게 구한 K_Q 값과 a_0 와의 관계를 Fig. 4에 나타낸다. 이 그림에서 파괴인성은 두께가 얇을 경우, 초기균열길이가 짧을 때는 큰값을 나타내지만, 균열길이가 길어지면 두께가 두꺼운 경우와 유사한 값을 나타내고 있다. 즉 균열길이가 짧은 경우는 판두께 의존성을 나타내지만, 균열길이가 길어지면 판두께 의존성이 적어지고 있다. 또한 판두께가 두꺼워지면 균열길이에 관계없이 파괴인성치는 일정한 값에 수렴하고 있다.

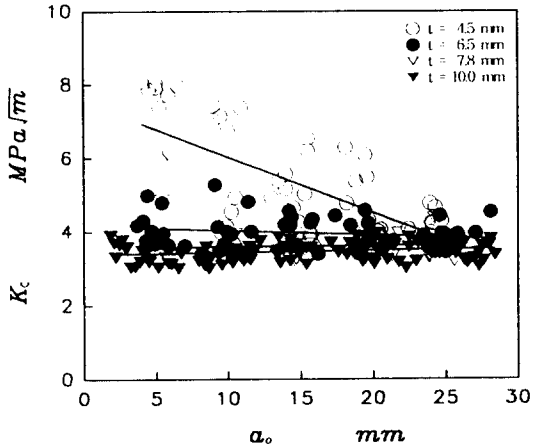


Fig. 4 Fracture toughness versus initial crack length

3.2.2 시험편두께에 대한 파괴인성값

폴리카보네이트의 경우, 파괴인성의 두께에 대한 의존성을 알아보기 위하여 본 실험에서 사용한 모든 균열치수($a_0/W=0.17\sim 0.55$)에 대한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 4종류의 시험편 두께에 대한 파괴인성은 시험편 총수에 대하여 두께가 얇을수록 분산이 크게 나타나고 있지만, 강도의 경우와 같이 두께의 영향이 발생하고 있다. 즉, 두께가 얇은

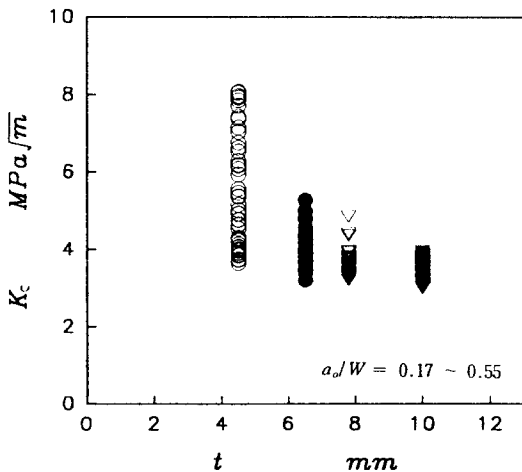


Fig. 5 Fracture toughness versus specimen thickness

시험편의 경우가 파괴인성이 큰 분산값을 나타내고, 두께가 두꺼울수록 적은 분산값을 나타내는 경향을 띄고 있다. 이러한 경향에서 폴리카보네이트의 평면변형율파괴인성이 성립하는 시험편 두께를 알아보기 위하여 강에서 일반적으로 사용되고 있는 식(2)로서 확인하였다. 이때 사용한 K_{Qc} 값은 각 시험편 두께에 대하여 평균값(두께 7.85mm에서 $3.6MPa\sqrt{m}$, 10mm에서 $3.47MPa\sqrt{m}$)을 사용하였다. 이 결과는 Petrie 등의 결과와 일치하고 있다¹³⁾. 따라서 폴리카보네이트 시험편의 경우 두께 약 8mm전후에서 평면변형율 파괴인성이 성립함을 알 수 있었다.

3.2.3 파괴인성값의 통계적성질

본 실험에서 얻어진 각 시험편 두께에 대한 파괴인성값을 Weibull확률지¹⁴⁾에 그려본 것을 Fig. 6에 나타낸다. 이 그림에서 K_c 및 K_{Ic} 의 분산특성은 식(3)으로 주어지는 3모수 Weibull분포에 잘 따르고 있음을 알 수 있다.

$$F(x) = 1 - \exp[-(x - \gamma/\beta - \gamma)^\alpha] \quad (3)$$

여기서 α 는 형상계수, β 는 척도계수, γ 는 위치계수이다. 이 그림에서 폴리카보네이트는 두께가 얇을수록 큰 분산을 나타내고 있고, 두꺼울수록 분산이 적음을 알 수 있다. 또한, 각 두께에 있어서 실선으로 나타낸 식(3)은 거의 같은 하한값에 수렴하고 있다. 각 시험편 두께에 대한 특성을 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Distribution value for each specimen thickness

t mm	Weibull parameters			Mean, K_c $MPa\sqrt{m}$	Standard deviation	C.O.V %
	α	β	γ			
4.5	1.61	5.51	2.94	5.21	1.450	27.83
6.5	2.64	4.08	2.90	3.94	0.435	11.04
7.8	2.29	3.67	2.99	3.60	0.318	8.80
10.0	2.13	3.56	2.92	3.47	0.247	7.12

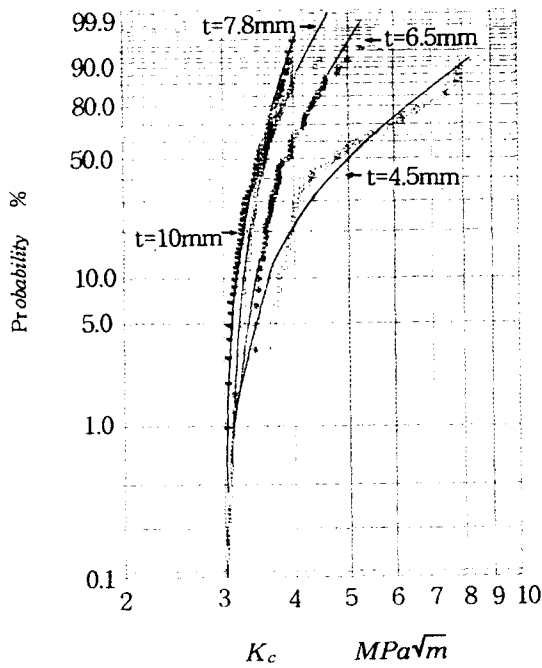


Fig. 6 Weibull distribution of fracture toughness for each specimen thickness

3.3 AE와의 상관성

고분자재료의 파괴인성시험시에 발생하는 AE를 계측하여 파괴역학 파라미터와 AE계측 파라미터

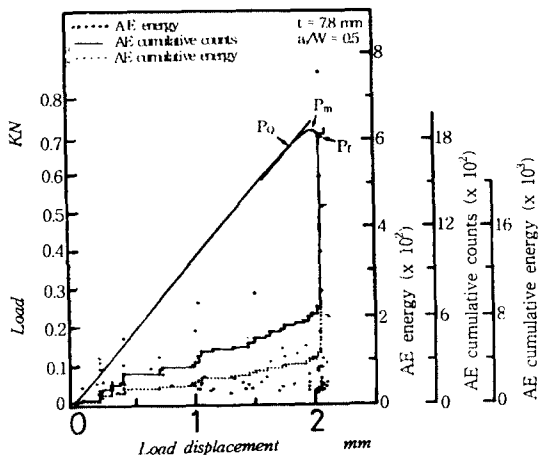


Fig. 7 Comparison of load, displacement and AE factor

와의 대응관계를 규명하고, 파괴인성 평가에 있어서 AE의 유효성을 분명히하기 위하여 AE와의 상관성을 조사하였다. 그 대표적인 결과를 Fig. 7에 나타낸다. 이 그림은 두께 7.8mm, $a_0/W=0.5$ 인 시험편으로 하중점변위에 대하여 하중, AE누적 counts, AE 누적에너지 및 AE에너지를 나타내었다.

하중은 하중변위와 선형적 비례관계를 가지고 증가하다가 하중의 최대점 근처에서 비례관계를 이탈하고 최종파괴에 이르고 있다. 한편 개개의 AE는 하중이 증가하는 초기단계에 집중적으로

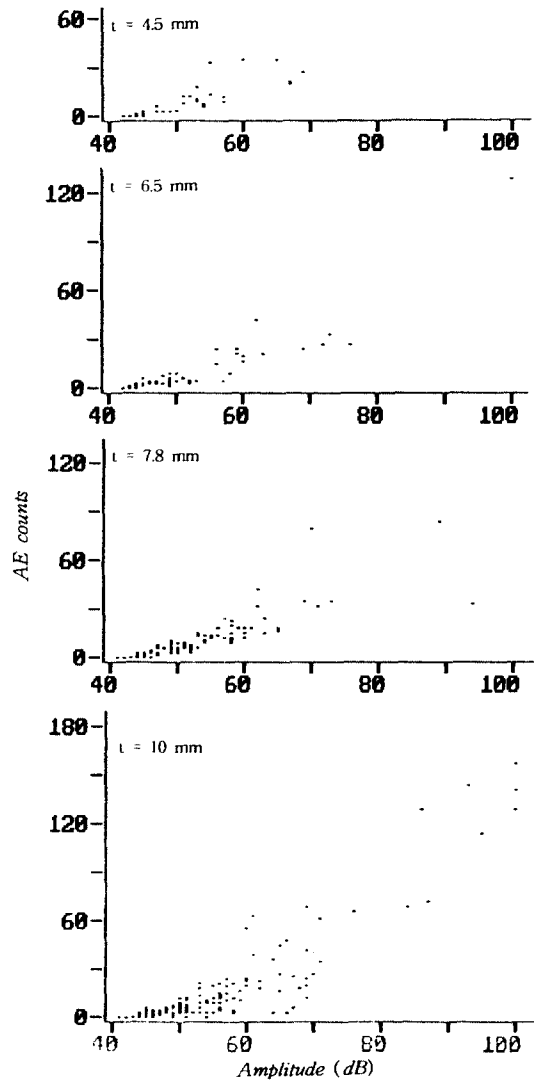


Fig. 8 Comparison of AE counts and amplitude

발생하여 일정한 양을 유지한 후, 최대파괴하중 시점에서 다시 많은 AE에너지의 발생을 보이고 있다. 또한 AE누적counts와 AE누적에너지는 균열의 진전에 따라서 낮은 계단상으로 증가하고 있다. 이것은 대빈도, 소진폭 AE events의 발생에 의해서 AE counts 및 AE에너지가 지배되어 있기 때문이다.

4종류의 두께에 대한 균열길이비 $a_0/W=0.5$ 의 시험편에 있어서 AE counts와 진폭관계를 Fig. 8에 나타낸다. 이 그림에서는 시험편 두께가 두꺼울수록 고진폭의 AE counts가 증가함을 알 수 있다. 또한 시험편의 두께가 두꺼울수록 약 55dB이상의 진폭이 급증하는 경향을 보이고 있다.

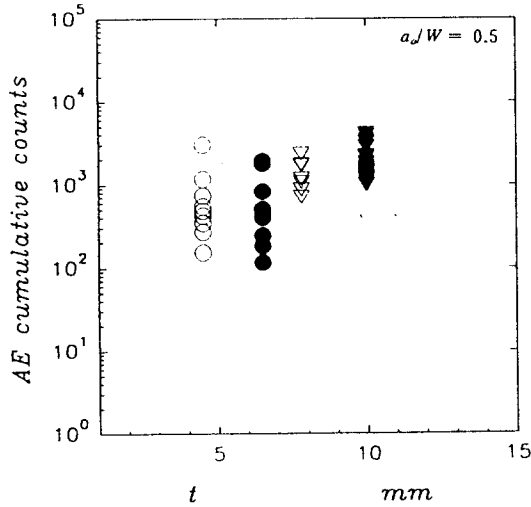


Fig. 9 Comparison of AE cumulative counts and specimen thickness

Fig. 9는 Fig. 8의 결과에서 AE 누적 counts와 시험편 두께와의 상관성을 나타낸 것이다. 이 그림에서 시험편 두께가 증가할수록 AE누적 counts도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 시험편 두께가 증가할수록 균열진전에 따른 에너지 방출이 많은 것에 기인한다고 생각된다.

각 시험편의 두께에서 균열길이 $a_0/W=0.5$ 의 파괴인성값과 AE누적수와의 관계를 Fig. 10에 나타낸다. 이 그림에서 AE누적수는 두께가 두꺼울수록 파괴시 많은 에너지가 방출되므로, 많이 발생하고 있다. 반면 파괴인성값은 적어지고 있으며,

일정한 값으로 수렴하고 있다. 이것은 위에서도 설명한바와 같이 두께 8mm전후에서 평면변형을 파괴인성값이 존재하기 때문에 파괴인성값은 일정한 값으로 수렴하고 있으나, 두께가 두꺼운 관계로 파괴시 에너지 방출이 많아서 AE누적수가 많다고 생각된다.

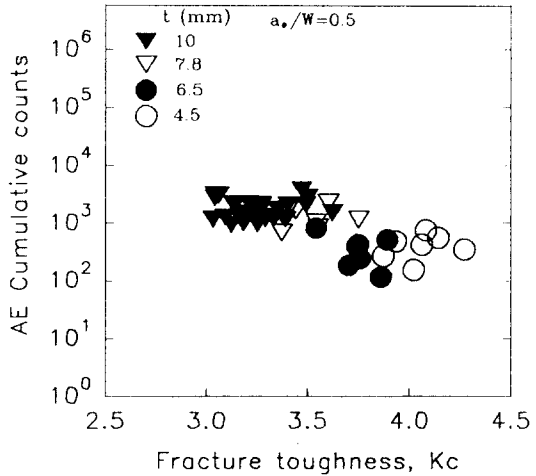


Fig. 10 Comparison of AE cumulative counts and fracture toughness

4. 결 론

본 연구에서는 금속재료에 대하여 확립되어 있는 파괴인성 시험법 ASTM규격 E399를 폴리카보네이트에 적용하여 파괴인성평가를 실시하고, 여러 가지 인자가 파괴인성에 주는 영향을 조사하였다. 그리고, 파괴시의 AE도 검출하여 파괴인성과의 상관성도 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) PC의 파괴인성은 시험편 두께가 얇을 경우, 초기균열 길이 의존성을 나타내었다. 그러나 두께가 두꺼워 질수록 균열길이에 상관없이 일정한 파괴인성값을 나타내어, 금속재료와 같이 판두께 의존성을 나타내었다.

2) AE 누적 counts는 시험편의 두께가 증가할수록 에너지방출이 많이 발생하는 판두께 의존성을 나타내고 있으나, 파괴인성은 평면변형률 조건을 만족하는 범위로 수렴하고 있으므로 작다.

참고문헌

- 1) 김낙중, "특수 엔지니어링 플라스틱", 고분자과학과 기술, 제1권, 제3호, p.162, 1990
- 2) Ogata, N, "エンブラの性能と機能", 繊維と工業, Vol.47, No.5, p.237, 1991
- 3) 横堀武夫, 成澤郁夫, "고분자재료강도학", 오ム社, 1982
- 4) Narisawa, I, Kuriyama, T. and Hatada, K., "高分子の非線形破壊靱性", 日本機械學會材料力學講演會論文集, Vol.B, p.31, 1991
- 5) 오세규, "AE에 의한 비파괴검사와 응용" 한국박용기관학회지, 제12권, 제4호, p.195, 1988
- 6) 정희돈, "AE의 공학적 이용을 위한 기초" 대한기계학회지, 제34권, 제1호, p.20, 1994
- 7) 홍창선, "복합재료 응용기술 및 현황", 대한기계학회지, 제34권, 제5호, pp.364-379, 1994
- 8) 정석주, "첨단복합재료에 대한 최근의 기술동향과 응용", 대한기계학회지, 제31권, 제4호, pp.364-379, 1991
- 9) 이강용, "음향방출법에 의한 복합재료와 금속재료의 균열거동해석", 대한기계학회지, 제32권, 제1호, pp.28-38, 1992
- 10) 이상국, 오세규, 남기우, 김옥균, "음향방출법에 의한 탄소섬유복합재료의 인장 및 파괴인성시험시의 파괴거동에 관한 연구", 비파괴검사학회지, Vol.15, No.1, pp.277-290, 1995
- 11) ASTM규격 E399, ASTM, 1983
- 12) Wallner, H., Z.Physik, p.114, 1939
- 13) Petrie, S.P., DiBenedetto, A.T. and Miltz, J., Polyn. Eng. Sci., Vol.20. p.385, 1980
- 14) Weibull, W., Trans. ASME, J. Applied Mechanics, Vol.18. p.293, 1951