

〈論 文〉

음향방출법을 이용한 글래스 복합재료의 파괴인성 및 미시파괴과정의 평가

정희돈* · 권영각* · 장래웅** · 橋田俊之***

(1993년 9월 3일 접수)

Evaluation of Fracture Toughness and the Micro-Fracture Mechanism of Porous Glass Composite by Using Acoustic Emission Technique

Hee Don Jeong, Young Gak Kweon, Rae Woong Chang and Toshiyuki Hashida

Key Words : Acoustic Emission(음향방출법), Porous Glass(기공성유리), Stainless Fiber(스테인레스 보강재), Compsite(복합재료), Fracture Toughness(파괴인성), K_{IC} (응력확대계수), K_{IAE} (AE 파괴인성), Micro-Fracture Mechanism(미시파괴기구)

Abstract

The fracture toughness and micro-fracture mechanisms of the porous glass and stainless fiber reinforced glass composite were evaluated by using the acoustice mission(AE) technique, fracture toughness test (K_{IC}) and the macroscopic observation of the specimen surface which was being under the loading. At initial portion of the loading, the AE signals with low energy, of which origins were considered as the micro-cracks formated at the crack tip, were emitted. With increasing the applied load, AE signals having higher energies were generated due to the coalesence of micro-cracks and fast fracture. Based on the such relationship between AE emission and loading condition, fracture toughness K_{IAE} could be defined successfully by using the K_I value corresponding to an abrupt change of the accumulated AE signal energies emitted during the fracture toughness test. In spite of its brittleness of glass material, nonlinear deformation behavior before maximum load was observed due to the formation of micro-cracks. Further, the stainless fiber may have attributed to the improvement of fracture toughness and the resistance to crack propagation comparing to noncomposited materials Finally, models of the micro-fracture process combined with the AE sources for the porous glass material and its composite were proposed paying attention to the micro-crack nucleation and its coalescence at the crack tip. Fiber fracture and its pullout, deformation of fiber itself were also delinated from the model.

1. 서 론

최근 구조재료의 경량화에 발맞추어 복합재료의

사용이 증가추세에 있고, 새로운 복합재료의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 신소재의 개발 과정에서 중요하게 생각되어지는 항목중의 하나는 재료의 설계, 제작과 더불어 평가가 동일 선상에서 이루어져야만 한다는 것이다. 그러나 현재 복합재료의 개발에 있어서 어려운 점의 하나로서 개발재료에 대한 명확한 그리고 정량적인 평가 방법이 미

*정희돈 산업과학기술연구소 용접연구센터

**산업과학기술연구소 용접연구센터

***日本 東北大學 파괴역학응용연구시설

비한 점을 들 수 있다. 특히, 재료의 기계적 성질에 관한 정량적인 평가는 목적으로 하는 재료의 개발 내지는 개선에 필수적이며 또한 재료의 신뢰성이나 또는 그 재료를 이용하여 제작된 구조물의 안전성을 확보하는 데에 필수적인 사항이다. 현재 이러한 관점하에서 신소재들에 적용될 수 있는 각종 평가법의 확립에 관한 수많은 연구가 정력적으로 이루어지고 있는 실정이다.^(1~5) 그 중에서도 복합재료의 재질평가를 위한 평가량을 정의하기 위해서는 무엇보다도 재료의 미시적인 파괴기구를 명확하게 해석해 두는 것이 중요하다고 여겨진다. 이러한 미시파괴과정을 이해할 수 있다면 각 파괴과정이 일어나는 조건들이 이해될 것이며, 이 결과를 기준으로 하여 새로운 평가 인자를 찾을 수 있을 것이기 때문이다.

복합재료의 미시적 파괴과정을 평가하는 수단으로서 여러가지의 기술들이 언급되고 있지만, 시험 후 파단면을 관찰하여 역으로 유추해 나아가는 방법이 일반적이며, 최근에는 전자현미경 내에서 시편의 변형과정을 직접 관찰하는 노력도 성공적으로 행해지고 있다.⁽⁶⁾

한편, 재료내부에서 변형 및 파괴가 일어날 때는 재료의 특성 및 작용응력의 형태에 따라 독특한 탄성파가 방출되는데 이러한 탄성파를 검출하여 재료 내부에서 일어나고 있는 현상들을 해석해 나아가는 기술이 새로운 재료평가법으로 각광을 받고 있다. 이것을 음향방출법(Acoustic Emission; 이하에서는 AE라고 약칭함.)이라 하며, 재료의 파괴시험시에 온라인으로 모니터링하면서 파괴과정의 유추에도 많은 도움을 주고 있다.^(7~10)

본 연구는 최근에 개발이 착수된 기포글래스 복합재료(porous glass composite)의 시작품을 대상으로 하여, 재료의 미시적 파괴기구 해석에 주안점을 두어 AE를 이용한 재료평가법 개발의 가능성을 실험적으로 조사 연구한 것이다.

2. 실험재와 실험방법

2.1 시험재료와 시험편

본 연구에 사용된 재료는 최근 건축용 재료를 목표로 개발중인 기포글래스 재료와 그것의 복합재료이다. 기포글래스 재료는 탄산칼슘의 발포현상을 이용하여 글래스내에 수많은 기공을 인위적으로 작성하여 취성파괴를 억제시키고 동시에 경량화와 단열성이 우수한 재료를 만드는 것을 목표로 하고 있다. 그러나 수많은 기공이 포함되어 있는 관계로

Table 1 Chemical composition and density of porous glass materials used in this study

	Natural glass	CaCO ₃	Sodium calcium glass	Density
B	—	—	100	0.91
K5	5	0.15	bal.	1.09
K10	10	0.20	bal.	0.99
K15	15	0.25	bal.	0.96
C	—	—	100	0.91

*C material : Compositd by stainless fiber with 2.8 vol.% (Fiber length ; 30 μ m Diameter ; 2.5um)

강도의 저하가 문제시 되고 있고, 이러한 결점을 보완하는 수단으로서 모재내에 스테인레스 파이버를 분포시켜, 구조적으로 복합화하여 강도의 향상을 꾀하는 노력이 진행되고 있다. Table 1에 본 재료의 성분과 시편의 기호를 나타낸다. 시편 B는 Sodium calcium glass만으로 구성되어 있으며, K5, K10 그리고 K15의 각 재료는 B재료에 CaCO₃와 천연글래스의 함유량을 달리했으며, 시편 C는 B재료에 직경 30 μ m 길이 2.5 mm의 304 스테인레스 파이버를 2.8 Vol%정도 복합화시킨 재료이다. 각 재료의 거시적 조직사진을 Fig. 1에 나타낸다. 그림에는 K시리즈중 K10만을 보이고 있으나 나머지 재료들도 유사한 조직을 가지고 있었다. 사진을 보면 모든 재료는 수많은 기공을 포함하고 있어 있으며, C재의 경우 검은 색으로 보이는 스테인레스 파이버(stainless fiber)가 랜덤하게 분포되어 있음을 알 수 있다.

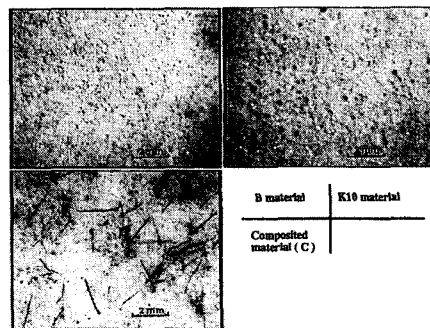


Fig. 1 Macro-structure of porous glass materials tested in this study

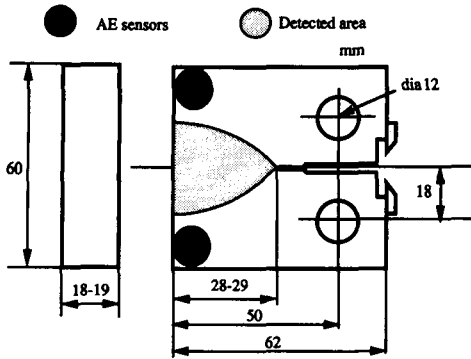


Fig. 2 Geometry and size of porous glass material specimen and the location of acoustic emission sensors

본 재료를 이용하여 만든 시편의 형상을 Fig. 2에 나타낸다. 시험편은 220 mm×160 mm, 두께 17~20 mm의 판넬로부터 채취했으며, 노치는 폭 0.3 mm의 카본커터를 이용하여 가공하였다.

2.2 파괴인성실험

파괴인성실험(K_{Ic} 실험)은 금속재료의 파괴인성 시험법인 ASTM E399⁽¹¹⁾에 따라 실시했고, 시험기로서는 모터구동방식이면서 최대 부하능력이 2 kN인 소형 인장시험기를 이용하였으며, 이때의 변위 속도는 0.2 mm/min로 했다. 특히 파괴인성시험과 병행하여 실체현미경을 이용하여 균열의 진전 거동을 직접 관찰하면서 사진촬영도 병행하였다. 또한, 시험후에는 파면관찰을 위해 초기 균열부를 중심으로 전자현미경 관찰을 실시했다.

그리고 파괴인성치 K_{Ic} 는 다음의 식을 사용하여 계산했다. 즉,

$$K_{Ic} = \frac{P_0}{B \sqrt{W}} f(a_0/W) \quad (1)$$

여기서, P_0 는 5% 오프셋(offset)에 해당되는 하중 값, B 시험편 두께, W 는 시험편 폭, a_0 는 초기 균열길이 그리고 $f(a_0/W)$ 는 시험편 폭과 초기 균열의 함수이다.⁽¹¹⁾

2.3 AE의 계측

파괴인성실험과 병행하여, AE에 의한 파괴인성치 측정과 미시파괴과정의 해석을 위한 AE의 계측도 함께 실시했다. AE계측의 계통도를 Fig. 3에 나타낸다.

본 연구에 사용된 AE계측장치는 8채널의 신호 입력부를 갖고 있는 NAIS4000이다. 시험편 내부에서 방출된 AE신호는 센서에 도착하여 전기적 신

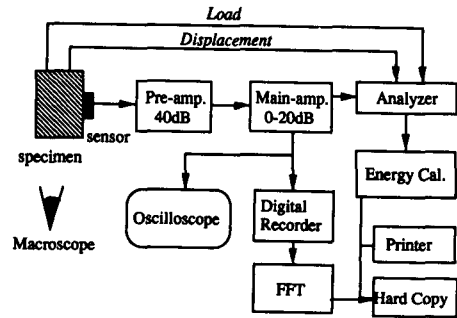


Fig. 3 Acoustic Emission measurement system used in this study

호로 변환된 다음 프리앰프(pre-amp.)에서 40 dB로 증폭되어 주앰프(main-amp.)로 이송되었는데, 주파수영역 20 kHz~1 MHz의 전역에 걸쳐 증폭되었다. AE센서는, 신호의 주파수 해석을 위해서, 전 주파수영역에 걸쳐서 동일한 응답감도를 가지고 있는 광대역(UT-1000 PAC제품)센서를 사용하였다. 대부분의 AE계측은 총 증폭도 60 dB에서 이루어졌다. 그러나 복합재료인 C재에서 방출되는 신호중, 본 연구에서 사용한 주파수 해석장치의 허용입력 전압치를 넘는 높은 에너지의 신호 주파수 특성을 조사하기 위해서 하나의 C재 시험편에 대해서만 40 dB로 측정했다. 또한 시험편의 하중 부하편이나 재료내부의 파괴현상과는 상관없이 잡음을 제거하기 위해서, 모든 시험에 있어서 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 두개의 센서를 사용하였다. 즉, Fig. 2에 표시된 바와 같이 각 센서로부터 초기균열 선단까지의 거리를 반지름으로 하는 원이 중복되는 영역에서 발생하는 신호만을 받아 들이도록 했다. 데이터정리에 있어서는 각각의 센서에 도달한 신호중 에너지가 큰 신호를 취하도록 하였다. 한편, 백색잡음의 제거를 위해서 60 dB의 경우 0.2 V 그리고 40 dB의 경우 0.1 V의 threshold를 설정했으며, 원활한 데이터의 처리 및 저장을 위해서 1msec의 wait time을 두었다. 또한 방출된 신호는 주파수 해석장치(TRA2.5-PAC사제)에 입력되어 디지털화된 후 1 MHz까지의 영역에 걸쳐 주파수 해석이 이루어졌다. AE신호 에너지의 정의는 해석장치에 포함된 기능을 이용하여 다음과 같이 계산했다. 우선 신호의 발생원에서의 최대 진폭을 구하고 그 최대 진폭의 자승값을 AE 상대에너지로 정의했다. 여기서, AE신호의 발생지점에 있어서의 최대진폭 값(V_0)은,

$$V_0 = V \times 10^{L \times ATT/20} \quad (2)$$

여기서, L (mm) : 전파거리

ATT (dB/mm) : 감쇠율

V : 총 증폭후 계측된 전압치

로 계산되며, AE 상대에너지 E 는 $(V_0)^2$ 와 같다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 하중-변위곡선과 파괴인성치 K_a

Fig. 4는 기포글래스 재료와 그것의 복합재료의 파괴인성시험중에 얻어진 하중-변위곡선을 개략적으로 나타낸 것으로서, 여기서 변위라 함은 시험편의 표면에서 측정된 변위(V_s)를 말한다. 그림에서 알 수 있듯이 파이버가 들어있지 않는 재료(B재와 K재)들은 부하 초기에는 하중의 증가에 비례하여 하중-변위의 관계가 직선적으로 변화하다가 최대하중에 가까이 가면서 약간의 변형거동을 나타 낸후, 최대하중을 지나 순간적으로 급격한 파단을 맞이하고 있다. 통상 취성적인 재료는 그림에서 나타나는 바와 같은 최대하중 부근에서의 변형거동이 보이지 않고 직선적인 하중-변위거동만을 보이는 것이 일반적이다. 마찬가지로 본 재료의 주성분인 글래스가 기공을 갖지 않은 상태였다면 매우 취성적인 파괴거동을 보이게 될 것이다. 그러나 본 연구에 사용된 기포글래스 재료는 전절의 조직 사진에서도 보였듯이 수많은 기공을 포함하고 있다. 결국, 이러한 기공들을 기점으로 하여 생긴 수많은 미시균열들이 국부적인 응력의 해방을 유도함으로써 그림과 같이 소규모이나마 비선형거동이 관찰된다고 생

각된다. 다시말해 급속한 파단에 앞서, 균열선단 부근에는 금속재료의 소성 변형영역(plastic zone)에 해당하는, 미시균열들의 생성영역인 프로세스영역(Process zone)^(12,13)이 형성되리라 여겨진다.

한편 스테인레스 파이버가 포함되어 있는 C재료는 다른 재료들에 비해서 매우 다른 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 초기의 하중조건에서는 미복합재들과 거의 동일한 거동을 보이고 있으나, 미복합재들이 비선형거동을 보이기 시작했던 하중조건에서부터 비선형거동이 시작되어 최대하중에 도달하기까지 상당한 변위의 증가를 보이고 있다. 그리고 최대하중을 넘어도 균열은 안정적으로 진전하고 있음을 보여 주고 있다. 이와 같은 하중-변위의 변화거동만을 고려하여 보더라도 스테인레스 파이버의 역할은 인성증가라는 목적에 부응하고 있다고 할 수 있다. 이러한 거동은 복합화된 취성재료에 나타나는 일반적 현상으로서, 우선적으로 파이버의 모재로부터의 박리 또는 pullout기구에 의한 것으로 간주될 수 있으나, 이에 대한 상세한 내용은 차절에서 다루기로 한다.

Table 2에는 식(1)을 이용하여 구한 각 시험편

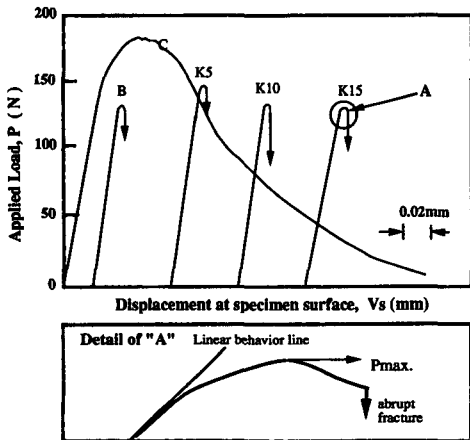


Fig. 4 Load versus displacement curves of porous glass materials and its composite obtained from fracture toughness tests

Table 2 Results of fracture toughness tests of porous glass materials and its composite

Specimen	a_0/W	P_{max}	P_Q	K_{max}	K_Q	V_{Smax}
B-0	0.41	141	141	0.26	0.26	0.022
B-1	0.39	137	137	0.25	0.25	0.022
B-2	0.42	131	131	0.24	0.24	0.022
B-3	0.41	131	131	0.24	0.24	0.028
K5-1	0.42	145	145	0.27	0.27	0.027
K5-2	0.41	152	152	0.26	0.26	0.028
K10-1	0.44	134	134	0.27	0.27	0.024
K10-2	0.44	135	135	0.26	0.26	0.030
K15-1	0.42	127	127	0.24	0.24	0.034
K15-2	0.41	139	139	0.25	0.25	0.035
C-1	0.41	216	216	0.39	0.29	0.082
C-2	0.42	192	147	0.37	0.28	0.087
C-3	0.42	165	147	0.30	0.27	0.065
C-4	0.46	184	157	0.38	0.33	0.065

(N) (N) (MPa $m^{1/2}$) (mm)

들의 응력확대계수 K 를 열거한다. 여기서, K_{max} 는 하중-변위 선상에서 구한 최대하중 값을 이용하여 계산된 것이며, K_0 는 금속재료에서 적용되는 방식으로 구한 값으로서 5% offset에 교차되는 하중 P_0 부터 얻은 값이다. 여기서, 복합화되어 있지 않은 K5, K10, K15 그리고 B로 표시되어 있는 재료들은 하중-변위 곡선상에서 P_0 값과 최대하중 P_{max} 값과 큰 차이를 보이지 않고 또한 변위가 매우 적기 때문에 두 값을 구별하기가 어려웠다. 이러한 이유에서 이러한 재료들에 대해서는 K_0 와 K_{max} 는 동일한 값을 갖는 것으로 간주했다. 한편, Table에서 계산된 K_0 는 각 재료가 갖는 파괴인성치로 정의한다. 이 결과를 살펴보면, 복합화된 C재료가 가장 높은 값을 나타내고 있으나, 전반적으로 재질의 차이에 의한 파괴인성치의 차이는 나타나고 있지 않음을 알 수 있다. 그러나 Table에 나타나 있는 V_{smax} 값 즉, 최대하중까지의 시험편 변위량을 살펴보면, 적은 값이기는 하지만, K5, K10 그리고 K15의 순서대로 그 값이 증가하고 있으며, 복합재료의 경우 다른 재료에 비해서 월등히 증가되고 있음을 알 수 있다. 이 같은 현상은 C재와 같은 복합재료의 경우에는 파이버의 역할이 주원인이 되리라 여겨지지만 미복합재료의 경우에는 재질의 차이에 따른 급속한 파괴가 일어나기 전부터 일어나는 미시적인 균열의 발생거동에 차이가 있음을 말해 주고 있다.

이와 같이, 복합재와 미복합재료의 K_0 값들을 살펴보면, 최대하중 값에 비해 큰 차이를 보이지 않고 있고 균열진전 저항력이나 인성증가에 관한 아무런 정보를 제공하지 않고 있음을 알 수 있다. 그런 면에서, 본 연구에서 사용된 재료들과 같은 기공성 재료나 그의 복합재료들에 대해서, 이러한

최대하중까지의 변위량을 하나의 평가량으로 고려해 볼 가치가 있다고 생각한다.

3.2 AE신호의 방출특성과 파괴인성 파라미터 K_{AE}

Fig. 5는 대표적인 재료의 파괴인성실험중에 측정된 AE신호의 에너지분포를 하중-변위곡선 상에 표시한 것이다. 우선 Fig. 5(a)의 B재의 결과를 살펴보면 낮은 하중에서부터 작은 에너지의 신호가 방출되기 시작하여 최대하중 부근에서 높은 에너지의 신호가 관찰되고 있다. 또한 매우 높은 에너지의 신호의 발생과 더불어 시편은 급격한 파단을 보이고 있음을 알 수 있다. Jeong 등⁽¹⁴⁾은 본 재료와 유사한 구조를 가지고 있는 AAC(발포콘크리트 복합재료)재료의 파괴인성실험중 방출된 AE신호의 발생원을 미시적 균열과 거시적 균열 생성과 관련 지우고 있다. 그들은 초기 하중에서 방출되는 소진폭의 AE신호가 균열선단에서 생성되고 있는 미시적 균열에 의해 방출되고 있고 이러한 미시균열들의 합체에 의해 상대적으로 거시적인 균열이 진전되어 갈 때 높은 진폭의 AE가 방출되고 있음을 보고했다. 또한 기공성 세라믹재료 등에 대해서도 유사한 결과들이 보고 되어지고 있다.^(15,16) 여기서 Fig. 5(a)에 나타나고 있는 AE신호들 또한 유사한 발생원을 가지고 있음을 유추 할 수 있다. Fig. 5(b)의 결과를 B재와 비교하여 보면, 전반적인 발생거동은 비슷하게 나타나고 있다. 그러나 최대하중 부근에서 발생되고 있는 높은 에너지를 갖는 AE신호가 B재보다 많이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이에 반해서 (c)에 보이는 복합재료인 C재의 경우는 매우 특이한 신호발생거동을 나타내고 있다. 즉, 초기 하중에서부터 다량의 AE신호가 방출되기 시작하여 비선형거동이 나타나는 지점부터

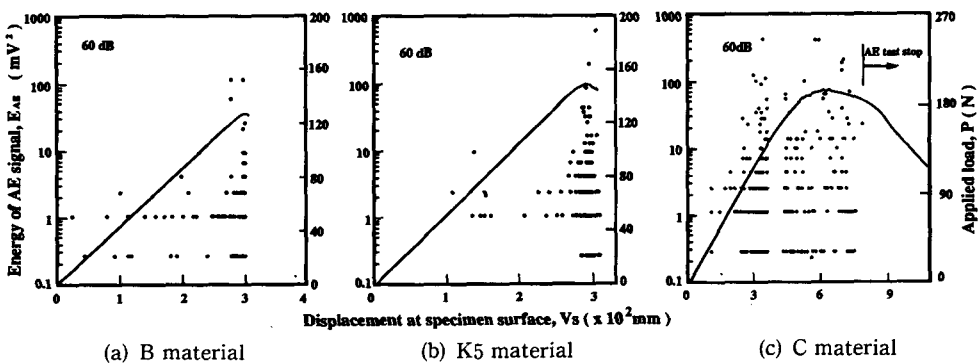


Fig. 5 Relation among load-displacement-AE energy distribution obtained from fracture toughness tests

매우 높은 에너지의 신호가 방출되고 있다. 또한 하중-변위곡선에서도 알 수 있듯이 최대하중을 넘은 곳에서도 균열은 안정적으로 진전하여 가며 이때에도 높은 에너지의 신호가 방출되고 있다.

한편, B재의 결과를 살펴보면 전반적으로 수 mV^2 이하의 에너지를 갖는 신호가 다수 방출되고 있으며, B재 이외의 재료의 결과를 살펴보면 신호의 에너지 단계의 수도 증가하여가고 있고 특히 높은 에너지의 신호가 관찰되는 것이 특징이다. 그중에서도 C재를 살펴보면, 가장 많은 단계의 에너지를 보이고 있으며 다른 재료에서는 보이지 않았던 높은 에너지의 신호도 관찰되었다. C재에 있어서의 또하나의 특징은 낮은 에너지의 신호의 발생도 다른 재료에 비해 높다는 사실이다. 이상과 같은 결과에서 알 수 있듯이 B재에 비해서 K재들이 다양한 미시파괴기구를 가지고 있으며, 복합재료에서는 더욱 복잡한 기구를 포함하고 있을 것을 쉽게 예상할 수 있을 것이다.

AE를 재료평가법으로 이용하는 항목중에 하나로서 재료의 파괴인성평가를 들 수 있다. 본 연구를 통하여서도 AE를 이용한 본 재료의 파괴인성평가의 가능성을 살펴보았다. Fig. 6은 B재와 K5 그리고 C재에 대해서, 파괴인성시험중에 방출된 모든 신호의 에너지를 적산하여 하중-변위 선도상에 나타낸 것이다.

Fig. 6(a)의 B재의 결과를 살펴보면 적산에너지의 변화가동이 어느 지점에서 급격한 상승을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 다른 K재들도 동일한 양상을 나타내고 있었다. 여기서 상승점 이하의 낮은 에너지의 분포영역은 앞에서 언급하였지만, 소규모의 변형거동 즉, 미시적인 균열의 생성에 의한 것으로 여겨지며, 상승점 이상의 높은 에너지의 영역은 상대적으로 거시적인 균열의 생성을 의미하고

있다. 즉, 적산에너지의 변곡점은 발생되고 있는 균열의 크기변화를 의미하게 된다. 통상적으로 파괴인성의 정의는 거시적인 균열의 생성조건을 의미하고 있으므로, 이러한 적산에너지의 급상승점을 본 재료의 파괴인성으로 정의하는 것은 매우 타당성이 있는 사실로 받아들여진다. 더구나 그림에 있어서 그러한 상승점은 비선형거동이 시작되는 부근에서 존재하고 있고 금속재료의 평가량인 K_{IC} 를 정의하는 하중보다 낮은 하중에서 시작되기 때문에 재료개발의 측면에서 보면 보다 정량적인 의미를 갖는 평가량이라 할 수 있다.

한편, 복합재인 C재를 보면 적산에너지의 변곡점 이상에서 증가거동이 감소하는 현상을 나타내고 있다. 여기서, C재는 Fig. 5에서도 알 수 있듯이 선형거동을 나타내는 범위에서 다른 재료에 비해서 매우 활발한 AE신호의 발생을 보이고 있다. 이는 후술하는 바와 같이 파이버 주변에서 발생하는 국부적인 다수의 미시적 파괴현상에 기인한다고 할 수 있다. 또한 이러한 국부적인 미시균열들이 결합되는 과정에서 주균열이 생성되고, 이러한 주균열의 생성개소는 앞서 발생한 미시균열의 개소에 비해 상당히 적을 것으로 여겨진다. 이와 같은 현상은 Fig. 6(c)와 같이 변곡점을 기점으로 AE적산에너지의 증가추세가 둔화되는 것을 뒷바침하고 있다. 이와 같은 이유에서 B재와 K재 등과는 변곡점 이후의 거동이 다르긴 하지만, C재에서 보이고 있는 변곡점의 물리적 의미도, 주균열 생성을 대변하는 것으로서, 다른 미복합료와 동일하다고 생각해도 무리는 없을 것이다.

이상과 같은 근거로부터 변곡점에 해당되는 하중조건을 이용하여 계산된 응력확대계수를 K_{AE} 라고 정의하고 이것을 기공성 재료 및 그의 복합재료의 파괴인성을 평가할 수 있는 평가량으로 간주한다.

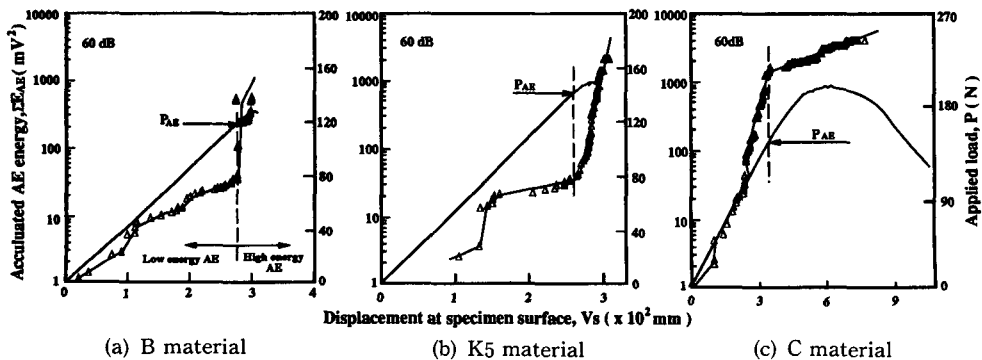


Fig. 6 Relation between applied load and accumulated AE energy

이와 같이 구한 값들을 Fig. 7에 나타낸다. 그림에는 ASTM E399에 의거하여 구한 값(K_Q)들도 함께 표시했다. 그림을 보면 K_Q 에 비해서 K_{AE} 는 낮은 값을 보이고 있으며 다른 재료에 비해서 B재의 인성치가 확실한 차이를 나타내고 있는 점, 그리고 전술한 바와 같이 재료의 미세적인 파괴과정에 기반을 둔 K_{AE} 의 정의를 고려하여 보면, 재료 성분 차이에 대한 보다 정확한 정보를 제공하고 있다고 할 수 있다. 한편, B재의 인성치가 가장 낮게 나타나는 이유는 재료의 구조적인 차이로 설명할 수 있다. 즉, 기포를 생성시키는 역할을 하는 $CaCO_3$ 가 포함되어 있지 않은 B재의 경우, $CaCO_3$ 를 포함한 다른 미복합재에 비해서 기공의 크기 및 분포에 차이를 나타낼 것이다. 이는 후술의 Fig. 9에서도 알 수 있는데, B재는 상대적으로 기공이 크며, 또한 그 숫자도 적다. 이러한 B재는, 기공의 크기가 작고 기공의 분포도가 큰 K재들에 비해서 균열선단에서의 효과적인 응력해방이 적은 결과 상대적으로 낮은 인성치를 보이고 있다고 여겨진다. 이와 같은 결과에서 알 수 있듯이, 향후 본 재료의 인성개선이라는 측면에서 기공의 크기와 분포도가 인성에 미치는 영향에 대해서 보다 정량적인 연구가 필요하며, 기공의 크기와 분포를 제어할 수 있는 제작상의 노력이 필요하다고 할 수 있다.

AE신호의 파라미터중에서 파괴기구의 특징화에 유효한 것 중의 하나로서 신호의 주파수특성을 조

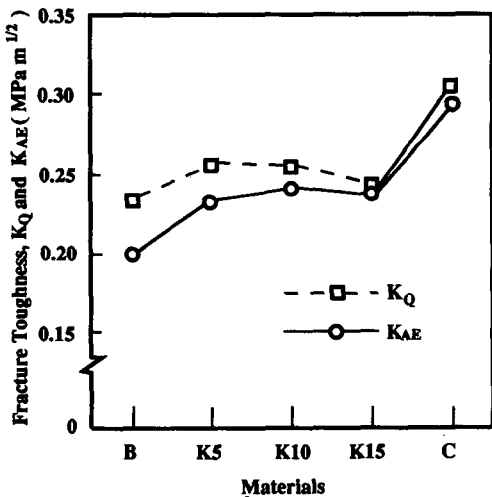


Fig. 7 Comparison of K_Q caculatyed by ASTM E399 method and K_{AE} defined by load condition corresponding to abrupt change of accumulated AE energy

사하는 것이다. 본 실험중 모든 시험편에서 방출되는 모든 AE신호의 주파수 및 파형의 특징은 크게 세가지로 나눌 수 있었고, 대표적인 것을 Fig. 8에 나타낸다. 우선 모든 미복합재들에서 방출되는 신호들은 크게 두가지로 나눌 수 있었다. 즉, 신호진폭이 낮은(신호의 에너지가 작은) 타입 A와 상대적으로 높은 에너지를 갖는 타입 B의 신호가 그것이다. 타입 A의 신호는 350 kHz와 120 kHz 부근에서 특징적인 성분을 가지고 있고 타입 B의 신호는 120 kHz와 350 kHz에 걸쳐 전반적으로 높은 에너지를 보이고 특히 120 kHz 부근이 탁월한 신호이다. 한편, 타입 C는 복합재료에 대해서 얻은 결과로서, 최대하중 부근에서 방출되는 일부의 AE신호 에너지가 주파수 해석장치의 능력을 초과하기 때문에 다른 시험의 60 dB보다 낮은 40 dB의 증폭도에서 얻은 결과이다. 이 신호는 매우 높은 에너지를 가지고 있으며, 이 신호는 350 kHz 부근에서 가장 탁월한 성분을 가지고 있다. 타입 C의 신호는 복합재에서만 방출되고 있는 것으로부터 스테인레스 파이버의 거동과 관계되는 신호라는 것을 쉽게 이해 할 수 있다. 이에 대한 고찰은 파면 관찰결과와 함께 후술하기로 한다.

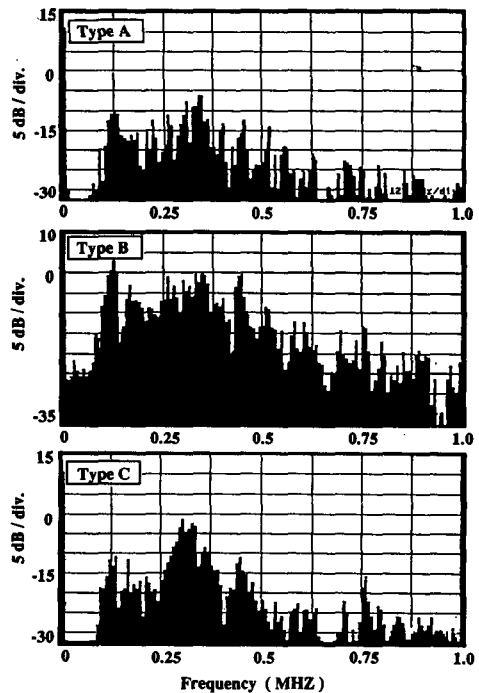


Fig. 8 Typical frequency components of AE signals emitted from porous glass materials and its composite

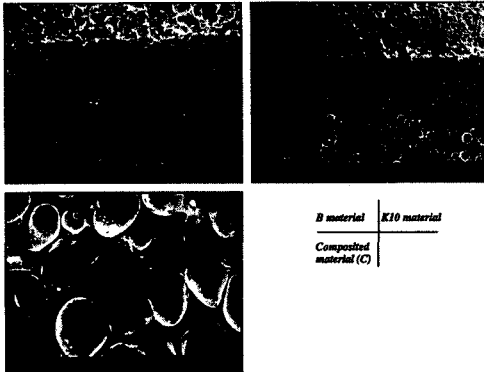


Fig. 9 Typical SEM observation results of fracture surfaces after fracture toughness tests of porous glass materials and its composite

한편, 이러한 주파수 해석결과의 이용에 있어서는, 측정장치의 제약상 각 타입별 AE신호들의 발생시기를 구체적으로 표시할 수 없었던 문제를 안고 있다. 그러나, AE신호의 발생분포로부터 (Fig. 5와 Fig. 6), K_{AE} 이전에서 방출되는 낮은 에너지의 AE신호가 타입 A의 주파수 특성을, 그리고 K_{AE} 를 넘는 하중조건에서 방출되는 높은 에너지의 신호가 전반적으로 타입 B에 해당된다고 할 수 있다.

3.3 균열진전 모양과 파면 관찰결과

파괴인성실험후의 각 재료의 파면 관찰결과를 Fig. 9에 나타낸다. 사진은 전자현미경을 이용하여 초기 균열 즉, 노치부근을 포함한 균열진전부위를 관찰한 것이다. 사진에서 알 수 있듯이 B재와 복합재료인 C재는 기공의 크기가 비슷한 반면에 K재의 기공은 비교적 작고 그의 수가 많음을 알 수 있다. 이와 같은 구조적인 차이에서 전술한 재료에 따른 AE신호의 발생거동의 차이를 설명할 수 있

다. 즉, 구조적으로 미세한 기공을 많이 포함하고 있는 K재들은 B재에 비해서 기공 주위에 미시적 균열이 다수 생성되리라는 예상할 수 있고 그 결과로서 Fig. 5에서도 알 수 있었듯이 B재보다는 높은 활성도의 AE신호가 방출되고 있다.

그림중의 복합재료의 파면에서 관찰된 파이버가 pullout되어 있는 모양이 나타나 있다. 그러나 파이버에는 모재가 견고하게 붙어있는 모양을 하고 있는 것으로부터 부하중에 파이버와 모재의 경계면에서의 박리현상은 없었던 것으로 생각된다. 다만 파이버 주변의 모재에서 파괴가 일어나고 이 부분이 함께 빠져 나온 것임을 알 수 있다. 그러나 파면의 전면적을 관찰한 결과 이러한 pullout은 매우 적은 양이었으며 이로부터 파이버 자체의 파단이 일어났음을 알 수 있고, 이와 같은 사실은 다음의 결과에서 입증된다.

본 연구에서는 파괴인성실험중에 실체현미경을 이용하여 시험편의 측면을 관찰하면서 균열의 진전 거동을 직접 확인하였다. 그 결과를 Fig. 10에 나타낸다. 이 사진은 최대하중을 지나 시험편이 붙어 있는 상태에서 하중을 제거하고 노치에서 시험편 배면까지 관찰한 것으로 균열의 진전과정을 잘 말해주고 있다. 사진상에 나타나 있는 특징적인 파괴 기구는 우선 모재의 파단(사진중 M으로 표시), 파이버 자체의 파단(F로 표시) 그리고 균열이 파이버의 계면을 비껴가는(P로 표시)의 세가지로 나눌 수 있다. 그 중에서도 파이버 자체의 파단이 특징적으로 관찰되고 있음을 알 수 있다. 여기서 중요한 사실은, 앞서 언급하였듯이 파이버의 pullout현상이 적고 파이버 자체의 파단이 일어나고 있음에도 불구하고 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 극심한 비선형거동이 나타나는가 하는 것이다. 이와 같은 결과는 스테인레스의 파이버가 파단되기 전 단계에서 소성변형을 일으킨다는 사실을 짐작케 한다.

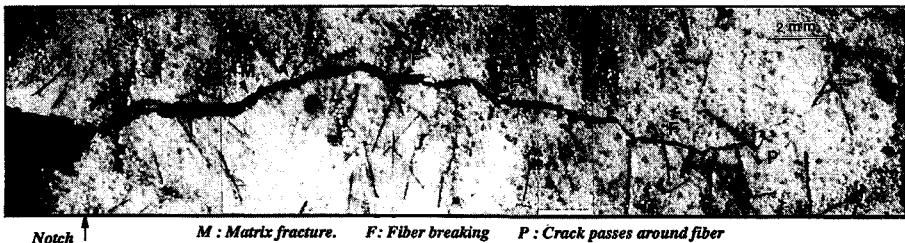


Fig. 10 Crack propagation behaviors observed at the surface of specimen by macroscope during the fracture toughness test of the stainless steel fiber reinforced porous glass material(C material)

3.4 AE를 이용한 미시파괴과정해석에 관한 고찰 이하에서는 이상의 실험결과 및 고찰 등을 이용하여 시험재료들의 미시파괴과정의 해석에 대해서 논한다. 우선 미복합재료들에 대해서 살펴보기로 한다. 미복합재들(B재와 K재들)의 하중변위 곡선을 살펴보면 모두가 초기에는 직선적인 하중-변위 관계를 보이고 최대하중 가까이서 약간의 변형을 보인 다음 급격한 파괴를 나타내고 있다.

여기서, 최대하중 부근에서의 비선형적 거동은 전술한 바와 같이 미시적 균열의 생성에 의한 국부적 응력의 해방의 결과라고 할 수 있다. 또한 AE 신호의 발생거동을 보면 부하 초기에서부터 작은 에너지를 갖는 신호가 방출되기 시작하고 최대하중에 도달하기 전에 신호의 에너지가 급상승하고 있음을 알 수 있었다.

AE신호의 발생기구로부터 작은 에너지의 신호는 낮은 응력 조건하에서 기공 주위에 생성된 균열이 그 발생원으로 생각할 수 있다. 또한 최대하중에 가까워지면서 먼저 생성되었던 미시균열들의 합체가 일어나고 최종적으로는 급격한 파단을 맞게 되며 이러한 과정에서 높은 에너지의 AE신호가 방출된다.

즉, 본 연구에서 정의한 파괴인성치 K_{AE} 를 기준으로 하여, 그 이하의 응력 조건하에서는 프로세스 영역내에서 미시균열들이 다발적으로 발생하고 그 이상에서는 미시균열들의 합체가 일어나게 된다. 또한 AE신호의 주파수 특성면에서 보면, 미시균열의 생성에 대응하는 신호는 타입 A의 신호가 그리고 K_{AE} 이후의 거시적인 균열의 성장에는 타입 B의 신호가 대응하고 있다.

한편, 스테인레스 파이버가 포함되어 있는 복합재료 C재는 매우 복잡한 기구를 가지고 있다. 이 재료 또한 수많은 기공을 내포하고 있기 때문에 미복합재에서 관찰되었던 미시파괴기구들이 함께 나타날 수 있다는 것을 쉽게 예상할 수 있고, 이에 더하여, 파이버의 존재에 의한 또 다른 미시파괴기구들이 존재하고 있을 것이다. 일반적인 복합재료의 대표적인 미시파괴기구는 다음과 같은 것들이 있다. 즉, ① 모재의 파괴, ② 모재와 파이버의 박리, ③ 파이버의 파단, ④ 모재와 파이버의 마찰과 pullout를 들 수 있다. 본 재료도 이와 같은 파괴기구를 가질 것으로 생각되며, 이중 어떠한 기구가 재료의 파괴에 가장 중요하게 관여하는가를 정량적으로 평가하는 것이 재료개발 측면에서 중요한 위치를 차지하게 될 것이다. Fig. 10의 결과에서도 알 수 있었듯이 파이버 자체의 파단이 특징적으로

나타나고 있다. 물론 Fig. 9와 같이 파이버의 pullout도 관찰되고 있기는 하지만, 그런 현상은 파면 전체에 걸쳐 그리 많지 않았던 것으로부터 파이버 자체의 파단이 가장 중요한 파괴기구로 대두되게 된다.

한편, 최대하중을 지난 시점에서, 연속적인 현미경 관찰에 의해 확인한 결과 균열의 열림상태가 크지 않았던 점, 그리고 전술한 바와 같이 pullout이 많지 않은 것에도 불구하고 급격한 파단이 일어나지 않는 것으로부터 스테인레스 파이버의 소성변형이 존재하고 있음을 생각할 수 있었다. 물론 소성변형에 사용되는 응력은 파이버 주변의 모재의 미시파괴도 함께 유도하게 될 것이다. 일반적으로 스테인레스재료는 연성이 높은 관계로, 항복응력 부근에서 집중적으로 AE신호가 방출되고 전반적으로는 활성도가 낮은 것으로 알려져 있다.⁽¹⁷⁾ 그러나 본 시험재료의 복합재료 존재하는 스테인레스 파이버는 그 직경이 $30 \mu\text{m}$ 정도로서, 그것의 소성변형에 해당되는 AE신호가 검출 가능할 정도의 에너지를 갖지 못할 것으로 생각된다. 이 같은 사실로부터, Fig. 5(c)의 최대하중을 넘는 부근에서 발생되고 있는 낮은 에너지의 AE신호는 파이버 주변의 모재의 파괴에도 그 발생원을 두고 있음을 예상할 수 있다.

한편 파이버의 존재에 의한 미시파괴기구 중의 특이한 것은 Fig. 10에서 P로 표시되는 부분이다. 즉, 균열이 파이버의 주변을 돌아 진행하고 있는 것을 알 수 있었는데, 이는 파이버의 각도가 균열 진행 방향에 대해 적당한 각도를 가질 때와 파이버 자체의 길이에 따라 충분히 나타날 수 있는 기구라고 여겨진다.

이상과 같은 설명을 근거로 Fig. 11에 기포글래스 복합재료의 미시파괴기구를 도식적으로 나타낸다. 우선 초기 부하상태에서 모재부에서 미복합재와 동일하게 미시균열의 생성이 일어나게 될 것이다. 이 단계에 있어서는 파이버의 존재에 의해서 구속되는 영역이 필연적으로 많기 때문에 균열의 생성량도 미복합재에 비해서 많을 것으로 여겨지며, 이와 같은 사실은 전절의 AE발생 거동 즉, 초기 부하에서부터 활발한 신호 활성도를 나타냈던 결과와도 일치하고 있다. 이러한 상황에서 파괴인성치 K_{AE} 에 도달하게 되면 모재에 생성되었던 미시균열의 합체가 일어나게 되고 동시에 파이버의 소성변형과 파이버 주위의 미시균열의 성장이 일어나게 된다. 이러한 현상은 최대하중에 도달 할 때까지 연속적으로 일어나게 되며 최대하중을 넘으면

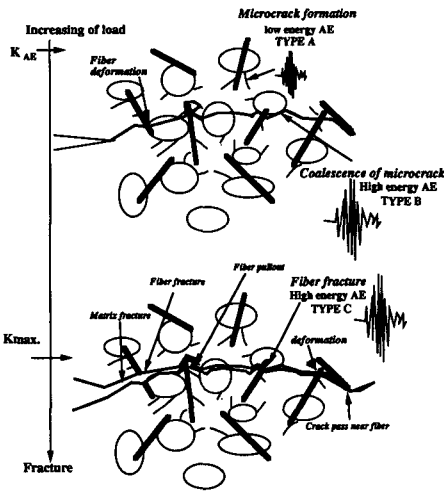


Fig. 11 Micro-fracture mechanisms and origination of acoustic signals in reinforced porous glass material with stainless steel fiber

서 파이버의 파단이 일어나게 된다. 한편 최대하중을 넘은 상태에서도 재형성된 균열선단에서 부분적으로는 파이버의 소성변형 및 파괴현상이 나타나고, 적은 양이기는 하지만 pullout기구도 함께 나타나 급속한 파괴현상은 나타나지 않게 된다. 이때 발생하는 AE신호의 발생원을 각각 구별하기는 매우 어려우나 파이버의 파단과 관련되는 AE신호는 꽤 높은 에너지를 가지고 있으리라는 것을 예상할 수 있다. 이러한 신호가 높은 에너지와 350 kHz에서 특징적인 주파수특성을 갖는 타입 C에 해당된다.

4. 결 론

복합재료의 평가법의 개발을 목적으로 파괴역학적 개념 및 음향방출법을 이용하여 기포글래스 복합재료의 미시파괴과정을 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다공성 재료인 기포글래스 재료는 취성적인 재료임에도 불구하고 기공 주위에서 생성되는 수많은 미시균열의 생성에 의한 응력해방의 결과로서, 비선형거동이 나타나 재료인성향상에 기여하고 있음을 알았다. 한편, 스테인레스 파이버를 복합화시킨 재료는 미복합재와 비교하여 일단 생성된 균열의 성장에 대한 저항력이 월등히 향상되었음을 알았다.

(2) 파괴인성시험중에 방출된 AE신호의 추적에

너지의 급상승점을 파괴인성치 K_{AE} 로 정의하고, 이 값보다 적은 하중조건에서는 기공주위에 미세한 균열들이 생성되며 그 값보다 큰 조건에서 미시 균열들의 합체에 의한 거시적 균열이 성장한다는 것을 밝혔다. 또한 AE에 의해서 구한 파괴인성값과 금속재료에 적용되는 평가법으로 구한 파괴인성치를 비교검토하여, AE에 의한 평가가 더 보수적임을 설명하고 기공성 재료의 평가법으로서 유용함을 밝혔다.

(3) 파괴인성시험과 AE시험 그리고 파면 관찰을 병행하여 재료의 미시파괴기구를 해석하는 과정을 설명하고 이와 같은 방법을 글래스 복합재료에 적용하여 여러형태의 미시파괴기구가 존재함을 보이고 각각의 기구에 대응하는 AE신호의 특성을 설명했다.

참고문헌

- (1) Pitkethly, M. J. and Doble, J. B., 1990, "Characterizing the Fiber/Matrix Interface of Carb on Fiber Reinforced Composites using Single Fiber Pullout Test," *Composites*, Vol. 21, No. 5, pp. 389 ~ 395.
- (2) Adams, D. F. and Odom, E. M., 1991, "Influence of Specimen Tabs on the Compressive Strength of a Unidirectional Composite Material," *J. Composite Materials*, Vol. 25, June., pp. 774 ~ 786.
- (3) Manoharam, M. and Lewandowski, J., 1991, "Combined Mode I-Mode III Fracture Toughness of Particulate Reinforced Metal-Matrix Composite," *J. Composite Materials*, Vol. 25, July, pp. 831 ~ 841.
- (4) Lessard, L. B. and Chang, F. K., 1991, "Damage Tolerance of Laminated Composites Containing an Open Hole and Subjected to Compressive Loadings," *J. Composite Materials*, Vol. 25, June, pp. 44 ~ 64.
- (5) 張惟敦, 金原勳, 影山化郎, 1992 "CE/EPOXY 積層板のモード I 層間破壊挙動に及ぼす纖維配向角の影響," *材料*, Vol. 41, No. 467, pp. 1292 ~ 1298.
- (6) Kwon, D., Lee, S. and Roh, B., 1993, "Local Microstructure Effects on Microfracture Process of a 2124 Aluminum Matrix Composite Reinforced with SiC Whisker," *Pro. Light Materials for*

Transportation Systems, pp. 809~819.

- (7) 鄭熙敦, 1987 "AE周波數解析による材料の微視破壊過程の破壊力學的評價に関する研究," 東北大學 學位論文
- (8) 鄭熙敦, 高橋秀明, 1987 "AEを用いたセラミックスの熱衝擊實驗" 新素材 制品 非破壊評價シンポジウム論文集, 日本非破壊協會
- (9) Choi, N. S. and Takahashi, K., 1990, "Characteristics of Acoustic Emission Wave Attenuation in Short Fiber Reinforced Plastics," *Composites*, Vol. 24, Oct., pp. 1012~1028.
- (10) Peijis, A. and Kok, J. D., 1993, "Hybrid Composites based on Polyethylene and Carbon Fibres," *Composites*, Vol. 24, No. 1, pp. 19~32.
- (11) E399-83, 1990, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials" *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 488~512.
- (12) Hillerborg, A. and Ed. by Wittmann, F. H., 1983, "Fracture Mechanics of Concrete," *Elsevier Science Publishers*, pp. 223~249.
- (13) 佐藤一志, 1989 "マイクロクラックひずみ軟化則に基づくき裂進展評價に関する研究," 日本, 東北大學 碩士學位論文
- (14) Jeong, H. D. and Takahashi, H., 1987, "Low Temperature Fracture Behavior and AE Characteristics of AAC" *J. Cement and Concrete*, Vol. 17, pp. 743~754.
- (15) 渡邊龍一, 鄭熙敦, 高橋秀明, 1990 "AE法により金屬/セラミックス複合材料の微視破壊過程評價に関する研究," 日本粉體および冶金學會論文集, 第37卷 卷2號, pp. 120~126.
- (16) Mori, Y., Nishina, M. and Aoki, K., 1988, "Acoustic Emission from Hot Pressed Si_3N_4 with Artificial Defects," *Pro. Acoustic Emission IV, JSNDI*, pp. 615~620.
- (17) Yoshida, K., Takasbo, J. and Yokogawa, H., 1986, "Acoustic Emission Behavior in Tensile Test of Steels at Elevated Temperature.," *Pro. Acoustic Emission III, JSNDI*, pp. 469~476.