

論文

고무변성 에폭시 수지의 균열진전과정과 음향방출 특성

이덕보⁺, 김현수⁺, 최낙삼⁺, 남기우⁺, 문창권⁺

Acoustic Emission during Crack Propagation Process of Rubber-Modified Epoxy Resin

Deok-Bo Lee⁺, Hyun-Soo Kim⁺, Nak-Sam Choi⁺, Ki-Woo Nam⁺ and Chang-Kwon Moon⁺

ABSTRACT

The damage zone around a crack tip occurring before the fracture is a significant domain, which affects the toughening mechanism of materials. In this study, the growth process of damage zone in the vicinity of crack tip for rubber-modified epoxy resin is investigated using an acoustic emission(AE) analysis. The weight fractions of rubber(CTBN 1300×8) in rubber-modified epoxy resin are 5 wt% and 15 wt%. The fracture toughness(K_{IC}) and the fracture energy(G_{IC}) were measured using 3 point bending single-edge notched specimens. The damage zone and rubber particles distributed around the crack tip were observed by a polarized optical microscope and an atomic force microscope(AFM). The damage zone around crack tip of rubber-modified epoxy resin was formed at 13 % loading and developed until 57 % loading of the fracture load. The crack initiated at 57 % loading grew repeatedly in the stick-slip propagation behavior. Based on time-frequency analysis, it was confirmed that AE signals with frequency bands of 0.15~0.20 MHz and 0.20~0.30 MHz were generated from cavitation and stable/unstable cracking inside the damage zone.

초 록

균열선단에 발생하는 손상역은 재료의 파괴인성 메카니즘을 알 수 있게 하는 중요한 영역이다. 본 연구에서는 고무 변성 에폭시 수지의 균열선단 손상역의 생성 및 성장 과정을 음향방출법을 이용하여 조사하였다. 고무변성 에폭시 수지의 고무함량은 5 wt%와 15 wt%로 하였고, 3점 굽힘시험편을 사용하여 모드 I 파괴시험에 대한 각 시험편의 파괴인성값을 구하였다. 또한, 균열선단의 손상역과 그 내부의 고무입자 변형상태를 편광현미경과 원자력간 현미경을 사용하여 관찰하였다. 고무변성 에폭시 수지의 균열선단부의 손상역은 파괴하중의 약 13 % 하중에서 생성이 되어, 약 57 % 하중까지 균열개시 없이 성장하였다. 57 % 하중 근처에서 개시한 균열은 최대하중부근까지 고착-활강거동을 반복하면서 안정/ 불안정 파괴로 진전하였다. 이 과정에서 발생한 음향방출신호의 시간-주파수 분석결과, 고무입자 내부에서의 캐비테이션 생성단계에서 주파수대역은 0.15~0.20 MHz 이었고, 그 후의 안정 및 불안정시의 주파수 대역은 0.20~0.30 MHz 이었다.

Key Words: 손상역(Damage zone), 음향방출(Acoustic emission), 파괴에너지(Fracture energy), 고무변성에폭시(Rubber-modified epoxy), 시간-주파수분석(Time-frequency analysis)

⁺ 한양대학교 안산캠퍼스 기계공학부, 교신저자(E-mail:leetokbo@hanmail.net)

⁺ 부경대학교 재료공학부

⁺ 한양대학교 기계공학부

1. 서 론

에폭시 수지는 복합재료의 매트릭스(matrix)재, 이종재료를 접합하는 접착제 및 건축재료 등 공업용재료로서 널리 사용되는 열경화성 수지이다. 하지만, 에폭시 수지는 취성적인 재료라는 결점을 가지고 있어, 강인화(toughening)에 대한 연구가 많이 진행되어왔다[1-7].

에폭시 수지에 대한 강인화 방법은 여러 가지가 있지만, 그 중에서도 액상고무 첨가에 의한 강인화 방법이 많이 사용되고 있다. 액상 고무첨가에 의한 에폭시 수지의 강인화 연구는 많은 연구자들에 의해 연구되어왔고, 고무함량이 10~20 wt%일때가 고무상의 분산이 가장 좋고, 에폭시의 강인화가 잘 발현된다는 보고가 많다[1-5,8-10]. 지금까지 액상고무를 첨가한 고무변성 에폭시 수지에 대한 연구는 강인화 메커니즘에 중점을 둔 연구가 대부분이지만, 고무입자의 변형에 의해 균열선단부에 발생하는 손상역의 생성과 성장과정을 비파괴적으로 탐지하여 강인화 메커니즘을 규명하고자 한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 고무변성 에폭시 수지의 균열선단부에 발생하는 손상역(damage zone)의 생성과 성장과정에 대해 음향 방출법(acoustic emission method)으로 비파괴분석하고자 한다.

또한, 이 분석결과를 손상역과 손상역 내부의 고무입자 변형에 대해서 편광현미경 및 원자간력 현미경(AFM : atomic force microscope)을 사용하여 관찰한 결과와 비교·검토한다.

2. 실험

2.1 재료

본 연구에서 사용한 에폭시 수지는 액상 에폭시(DGEBA) 수지(AER250, Nagase-Ciba Co., Japan)이고, 첨가물 및 경화제로는 말단부에 카르복실기를 갖는 아크릴로니트릴 부타디엔 고무(CTBN:1300x8, UBE Industries Ltd, Japan) 및 피페리딘(HY956, Nagase-Ciba Co., Japan)을 사용하였다. 고무변성 에폭시 수지는 액상 에폭시수지에 CTBN을 첨가하고, 진공 용기 속에서 모터로 10분간 200~300 rpm으로 탈포하면서 혼합한 후, 이 혼합물에 경화제인 피페리딘을 넣고, 진공 용기 속에서 탈포하면서 수동으로 10분간 혼합하였다. 그리고 이들 혼합물을 120 °C로 1시간 예열한 금형(mold)에 넣고, 120 °C에서 16시간 경화시켜, 두께 5 mm의 판형 시료를 제작하였다[8]. Table 1은 고무변성 에폭시 수지의 CTBN과 경화제의 중량함유율(wt.%)을 나타내었다. 여기에서 각 시험편의 명칭 표기는 순수 에폭시수지 (미변성 에폭시 수지)는 AER250으로 하였고, 고무변성 에폭시 수지의 경우, CTBN의 함량이 5 wt%는 AER250-5로, 15 wt%는 AER250-15로 표기하였다.

Table 1 Formulation of various epoxy resins

| Resin system | Designation | Composition (wt.%) | | |
|--------------|-------------|--------------------|------|------------|
| | | Epoxy | CTBN | Piperidine |
| AER250 | AER250 | 100 | 0 | 5 |
| | AER250-5 | 100 | 5 | 5 |
| | AER250-15 | 100 | 15 | 5 |

Table 2 Material properties of the neat and the rubber-modified epoxy resin

| Resin system | Young's modulus E (GPa) | Poisson's ratio ν |
|--------------|------------------------------|--------------------------|
| AER250 | 3.84 | 0.31 |
| AER250-5 | 3.60 | 0.33 |
| AER250-15 | 2.58 | 0.37 |

고무변성 에폭시 수지와 비교를 위해 만든 미변성 에폭시수지는 CTBN을 첨가한 부분을 생략하고 위와 동일한 방법으로 시료를 제작하였다. Table 2에 각 시험편의 재료상수를 나타내었다.

2.2 파괴 및 음향방출 시험

고무변성 에폭시수지의 판형 시료로부터 균열을 넣은 3점 굽힘 시험편(single notch 3-point bending specimen)을 제작하고, 실온에서 부하 속도를 0.1 mm/min으로 하여 모드 I 파괴시험을 하였다. 3점 굽힘 시험편의 형상[11]을 Fig. 1에 나타낸다. 각 시험편의 노치는 두께 2 mm의 금속 톱(metal saw)을 사용하여 기계가공 하였고, 각 시험편의 초기 균열은 미변성 에폭시수지에 대해서는 노치 선단을 커터 나이프(cutter knife)로 살짝 두드려서 균열을 수 mm 진전시켜 초기 균열을 도입하였다. 고무 변성 에폭시수지에 있어서는 상술의 방법에 의한 초기 균열 도입이 곤란하기 때문에, 노치 선단을 커터 나이프로 한번 베는 것에 의해 초기 균열을 도입하였다[9].

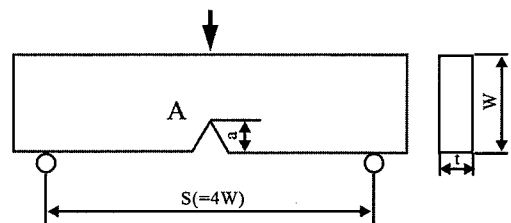


Fig. 1 3-point bending specimen($W=13$ mm, $a/W=0.4$).

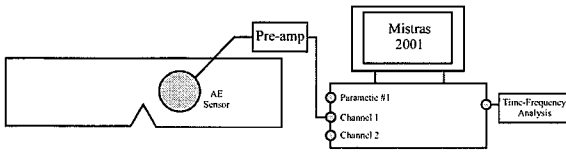


Fig. 2 Schematic diagram of acoustic emission(AE) measurement.

모드 I 파괴시험 중 발생하는 음향방출신호의 측정 시스템을 Fig. 2에 나타내었다. 굽힘시험에서 발생하는 음향방출 신호는 PAC사의 Mistras 2001(2 channel)을 사용하여 검출하였다. AE센서는 100 kHz~1 MHz의 검출주파수 대역을 갖는 광대역 센서(PICO-2573)를 사용하였고, 음향방출 신호는 100~1200 kHz 밴드패스 아날로그 필터가 내장된 pre-amp.에서 40 dB 증폭 후, Mistras 2001 board 내부에 장착된 A/D 변환기로 디지털 변환시켰다. 문턱전압(threshold)을 28 dB로 설정한 후 신호를 검출하였다.

2.3 현미경 관찰

각 시험편의 균열 선단 부근의 손상역을 관찰하기 위하여, 3점 굽힘 시험편을 파괴 직전까지 하중(평균 파괴하중의 95 %)을 가한 후 하중을 제거하고, 손상을 입은 시험편의 균열 선단 부분을 저속 다이아몬드 휠 절단기로 절단하여, 시편 양면 연마에 의한 박편(thin section)화[12]를 하였다. 이 박편(두께 약 100μm)을 이용해 균열선단부의 손상역과 손상역 내부의 고무입자의 변화를 편광현미경 및 AFM을 사용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 파괴인성치

파괴인성치(K_{IC})의 산출에 있어서는 JSMS의 응력확대계수 핸드북[11]에 준하여, 3점 굽힘 파괴실험을 하고 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$K_{IC} = \left(\frac{P_C S}{BW^{3/2}} \right) \left\{ \frac{3}{2} \left(\frac{a}{W} \right)^{1/2} Y \left(\frac{a}{W} \right) \right\} \quad (1)$$

$$Y \left(\frac{a}{W} \right) = \frac{\left[1.99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W} \right) \right] \left[2.15 - 3.93 \frac{a}{W} + 2.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 \right]}{\left(1 + 2 \frac{a}{W} \right) \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{3/2}}$$

여기서 S 는 시편의 스패길이, B 는 시험편의 두께, W 는 시험편 폭, a 는 노치길이, P_C 는 임계하중을 나타낸다. 본 연구에 사용한 미변성 에폭시 수지와 고무변성 에폭시 수지의 파괴거동에 있어서 AER250과 AER250-5의 경우, 하중-변위 곡선의 선형변형 직후에 파괴가 일어났고, AER250-

Table 3 Material properties of neat and rubber-modified epoxy resin

| Resin system | K_{IC} (MPa·m ^{1/2}) | G_{IC} (KJ·m ⁻²) |
|--------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| AER250 | 0.85 | 0.17 |
| AER250-5 | 1.32 | 0.43 |
| AER250-15 | 1.79 | 1.07 |

15의 경우, 약간 비선형 부분을 나타낸 뒤 파괴를 일으켰는데, 파괴하중과 최대하중 값은 거의 같은 값을 나타내었다[10]. 따라서, K_{IC} 값의 산출에 사용한 식(1)의 P_C 는 10개의 시험편으로부터 구한 평균최대하중을 사용하였다. 이렇게 구한 K_{IC} 와 영률(E) 및 포아송 비(ν)를 이용하여 다음 식으로 파괴에너지(G_{IC})를 산출하였다.

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E} (1 - \nu^2) \quad (2)$$

각각의 시험편으로부터 구한 K_{IC} 와 G_{IC} 값을 Table 3에 나타내었다. 각 시험편의 K_{IC} 와 G_{IC} 는 고무의 첨가량에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

3.2 균열선단의 손상역

Fig. 3은 각 시험편을 박편화하고 편광현미경을 사용하여 관찰한 균열선단 손상역(damage zone) 사진을 나타낸다. 여기서, 화살표는 미소 안정 균열선단을 표시한다. 미변성 에폭시 AER250의 균열선단에서는 손상역의 형성이 관찰되지 않았지만, AER250-5와 AER250-15의 고무변성 에폭시수지의 균열 선단부에서는 손상역이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 고무변성 에폭시수지에서는 미변성 에폭시수지에 비해 균열선단 주변부에 비교적 큰 손상역이 형성되고, 이 손상역에 의해 외력이 재료 내부로 분산되어 에너지가 흡수되므로 미변성 에폭시수지보다 높은 파괴인성치를 나타내는 것으로 알려져 있다[8-10].

Fig. 4는 원자간력 현미경(AFM)을 사용하여 미소 안정균열 선단부근(Fig. 4(a))과 손상역 내부의 변형된 고무입자(Fig. 4(b))를 관찰한 사진이다. 손상역 내부의 고무입자는 정수압적 인장응력에 의해 입자내부에 캐비테이션이 발생해 있는 것을 알 수 있다. 이것은 Pearson[2] 등이 고무입자 내부에 발생한 캐비테이션(cavitation)을 SEM으로 관찰한 것과 동일한 형상이다. 균열선단의 손상역은 고무입자 내부에 발생해 있는 캐비테이션에 의해 빛이 산란되어 파단면에서는 하얀빛(white zone)을 띄고, 편광현미경사진에서는 검게 나타나며, 고무변성 에폭시수지의 강인화 메카니즘은 정수압적 인장응력에 의한 고무입자 내부의 캐비테이션 발생에 따른 에너지의 소산이라고 제한한 바 있다[8-10].

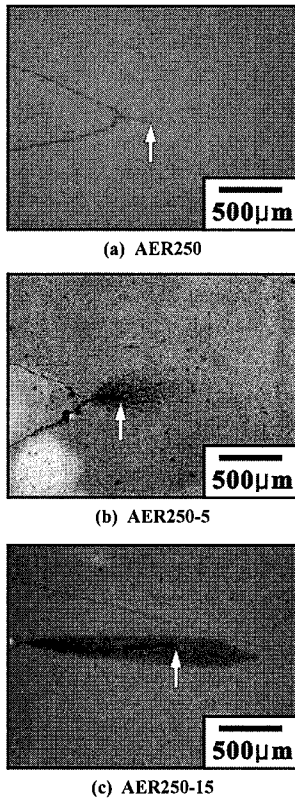


Fig. 3 Damage zone around a crack tip observed by a polarization microscope.

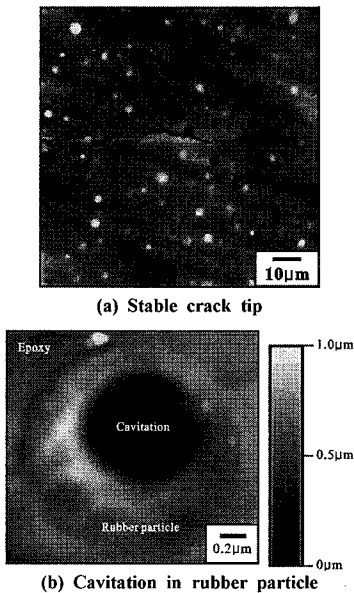


Fig. 4 Stable crack tip and rubber particles in the damage zone observed by an atomic force microscope(AFM).

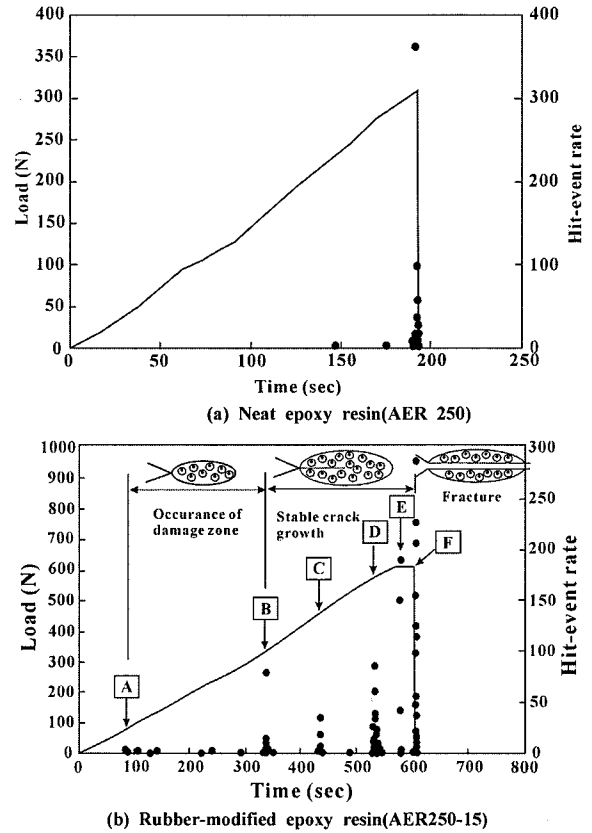


Fig. 5 Relationship between load and hit-event rate for the neat and the rubber-modified epoxy resin.

3.3 균열선단 손상역의 발달과 음향방출거동

Fig. 5는 AER250 및 AER250-15로부터 나온 음향방출(AE) 신호의 카운터(count)값과 하중거동의 대표적인 예를 나타내었다. AER250(Fig.5(a))의 경우, 하중을 가한 후 약 190 sec에서 균열이 발생하고, 균열 발생과 거의 동시에 파괴해 버리는 취성적인 특성을 나타내고 있으며, 음향방출 신호도 취성적인 특성을 잘 나타내는 것을 알 수 있다. 그리고 AER250-5의 경우에 있어서도 AER250과 비슷한 거동을 나타내었다. 그러나, AER250-15(Fig.5(b))의 경우, 음향방출 신호와 하중선도를, 크게 3단계로 나눌 수가 있다.

즉, 균열이 개시하기 전의 캐비테이션만에 의한 손상역 발생 단계(Fig.5(b)의 A-B구간), 균열의 개시 및 안정적 진전과 함께 손상역이 성장하는 단계(Fig.5(b)의 B-F구간)와 최종 파괴단계(Fig.5(b)의 F점 이후)로 나눌 수 있다. 먼저 손상역 발생단계는 파괴하중을 100%로 두었을 때, 파괴하중을 기준으로 약 13 % 하중(약 80 N)인 A점 근처에서 손상역이 발생하기 시작하여, 약 57 % 하중(약 320 N)인 B

점까지 발달을 한다. 이때 손상역은 균열이 아직 개시하지 않은 상태에서 캐비테이션만에 의해 생성·발달하는 손상영역이라 생각된다. 또한, 이 단계에서의 음향방출 신호는 경수압 하중에 의해 균열선단 부근의 석출된 고무입자 내부의 미세 보이드(void)가 산발적으로 성장 및 합체에 의한 캐비테이션 발생 신호라 생각된다. 다음으로, 57 % 하중(약 320 N) 이상의 균열의 개시 및 안정적 진전 단계에 있어서는 초기 균열 선단부근의 고무입자들 내부에서 발생한 캐비테이션이 크기가 임계치에 달하고 균열의 안정적 진전이 진행된다. 이때 균열진전에 따라 손상 wake가 남겨지면서 손상역이 성장해 간다. 균열은 Fig. 5(b)에서 나타낸 것 같이 약 57 % 하중(약 320 N)에서 개시하여, 90 sec 지난 후 약 75 % 하중인 C점에서 2차 진전하고, 3차 진전은 2차 진전으로부터 110 sec 지난 후, 약 93 % 하중인 D점에서 진전하고, 4차 진전은 3차 진전으로부터 30 sec 지난 후, 100% 하중(약 612 N) E점에서 진전하고, 4차 진전으로부터 20 sec 지난 후 최종 파괴가 일어났다. 즉, 균열진전 거동은 균열개시(B점) 부터 최종파단(F점)까지 4번에 걸쳐서 고속진전 및 균열정지(crack arrest)를 반복하면서 불연속진전을 보였으며, 소요시간은 파괴하중에 가까워질수록 점점 짧아짐을 알 수 있다. 이와 같은 균열의 반복적 고착-활강 진전거동(stick-slip propagation behavior)은 균열선단 근처에 저장된 탄성에너지가 균열이 고속진전함으로써 파면형성에너지와 운동에너지로 소모되어 균열선단에서의 응력이 일시적으로 저하하여 균열정지가 일어나게 되는 것을 반복적으로 나타낸 것이다[13]. 이 단계에서 음향방출신호는 고무입자내부의 캐비테이션 발생 및 파괴에 의한 신호와 매트릭스 파괴에 의한 크랙진전 신호가 동시에 존재하며, 손상역 발생 단계보다 비교적 많은 신호가 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 발생신호도 손상역 생성 단계에 비해 높은 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

3.4 균열선단 손상역 발달시의 음향방출 신호에 대한 시간-주파수해석

파괴기구에 대한 검토를 좀 더 명확히 하기 위해, 음향방출 신호를 시간-주파수 분석법으로 분류한 결과를 Fig. 6과 7에 나타내었다. 미변성 에폭시수지의 경우, 균열의 개시와 동시에 파괴해 버렸고, 그때의 음향방출신호의 주파수 영역은 약 0.19~0.29 MHz (Fig. 6)를 나타내었다.

한편, 고무변성 에폭시수지의 경우는 3.3절에 기술한 바와 같이 균열선단에서의 손상역의 생성 및 발달에서 파괴까지 크게 3부분으로 나눌 수 있다. 먼저, Fig. 5(b)의 A-B 구간(캐비테이션 발생에 의한 손상영역)에서 나타난 AE신호의 주파수 영역은 약 0.15~0.20 MHz(Fig. 7(a))를 나타내었고, 균열의 개시와 손상역의 성장 영역인 Fig. 5(b)의 B-F 구간에서는 약 0.15~0.30 MHz의 주파수 영역(Fig. 7(b))을 나타내었지만, 안정적 균열 진전과 관련된 신호의 주파수 대

역이 확실하게 나타나지는 않았다. 이것은 균열진전시에 나타나는 불연속적인 간헐적 신호는 주위의 캐비테이션 생성에 의한 음향방출 신호보다 미약하였기 때문으로 생각된다. 또한, F점에 대응하는 최종파괴에 있어서, 주파수 대역(Fig. 7(c))은 약 0.15~0.30 MHz의 주파수 대역을 나타내었다. 이들 시간-주파수 해석에 의한 분석 결과로서는 저하중에서부터 고하중에 걸친 전체 단계에서 0.15~0.20 MHz의 주파수 신호가 검출되었다. 이것은 고무 입자 내부의 캐비테이션의 생성에 의한 음향방출 신호라 판단되어지고, 안정적 균열진전에 의한 음향방출 신호는 미약하지만, 불안정균열의 진전에 따른 음향방출 신호는 주파수 대역이 0.20~0.30 MHz인 것을 알 수 있다.

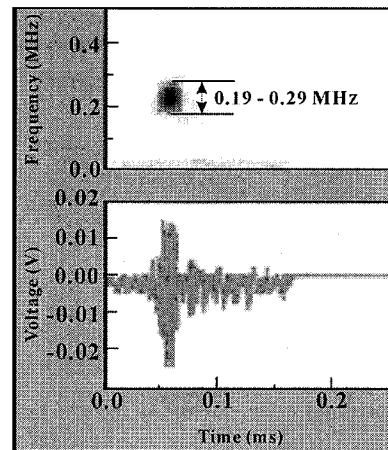
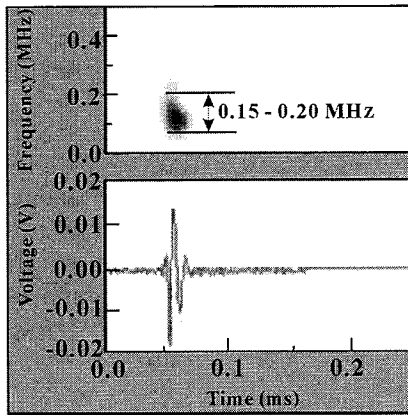


Fig. 6 Time-frequency analysis of AE signals measured from neat epoxy resin.

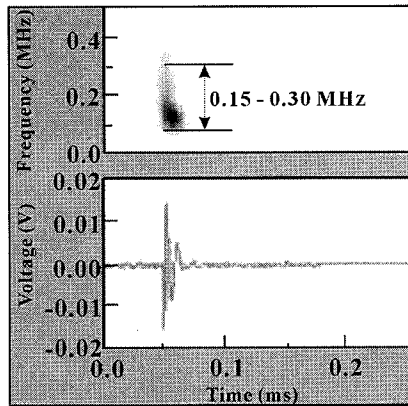
4. 결 론

고무변성 에폭시수지의 균열선단부에 발생하는 손상역의 생성과 성장과정에 대하여 음향방출법으로 분석해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

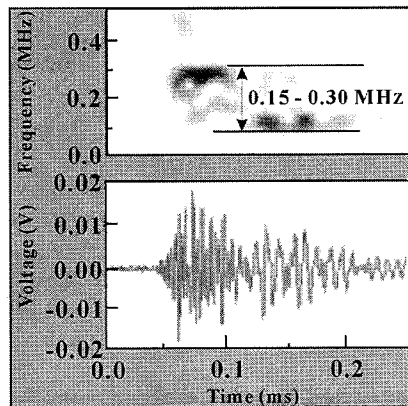
- (1) 고무변성 에폭시수지의 파괴인성치(K_{IC} , G_{IC})는 고무성분 함량(wt%)이 증가 할수록 증가 하였다.
- (2) 고무변성 에폭시수지의 균열선단 손상역은 파괴하중의 약 13 % 하중에서 캐비테이션에 의한 손상역이 생성되어, 약 57% 하중까지 성장하였으며, 손상역 내부에는 미소 균열이 없이 고무입자 내부의 캐비테이션만 존재 하였다.
- (3) 고무변성 에폭시수지의 균열선단 균열은 약 57 % 하중에서 개시하여, 생성된 손상역을 통과하고 최종파괴까지 고착-활강 균열거동을 나타내는 불연속적 진전을 반복적으로 보였으며, 각 고속진전 사이의 소요시간은 파괴하중에 가까워질수록 짧아졌다.



(a) Process between A and B



(b) Process between B and E



(c) At the final fracture (F point)

Fig. 7 Time-frequency analysis of AE signals from rubber-modified epoxy resin.

- (4) 고무변성 에폭시수지의 균열선단 손상역 발달시 음향 방출 신호에 대한 시간-주파수 해석 결과, 케비테이션 생성에 의한 음향방출신호의 주파수 대역은 0.15~0.20 MHz였고, 안정적 균열진전과 관련된 음향방출 신호는 미약하였지만, 불안정균열에 의한 음향방출 신호의 주 파수대역은 0.20~0.30 MHz인 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 한양대학교 기계공학부 BK21 사업단의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 1) Yee, A.F., and Pearson, R.A., "Toughen- ing Mechanics in Elastomer-Modified Epoxies," *J. Mater. Sci.*, Vol. 21, 1986, pp. 2462-2474.
- 2) Pearson, R.A., and Yee, A.F., "Toughen- ing Mechanisms in Elastomer-Modified Epoxies," *J. Mater. Sci.*, Vol. 21, 1986, pp. 2475-2488.
- 3) Chen, T.K., and Jan, Y. H., "Fracture Mechanism of Toughened Epoxy Resin with Bimodal Rubber-particle Size Distribution," *J. Mater. Sci.*, Vol. 27, 1992, pp. 111-121.
- 4) Daghyani, H. R., Ye, L. , Mai, Y.W., and J. Wu, "Fracture Behaviour of a Rubber- Modified Tough Epoxy System," *J. Mater. Sci. Lett*, Vol. 13, 1994, pp. 1330-1333.
- 5) Kinloch, A. J., Shaw, S.J., Tod, D.A., and Hunston, D.L., "Deformation and Fracture Behavior of a Rubber-Toughened Epoxy: 1. Microstructure and Fracture Studies," *Polym.*, Vol. 24, 1983, pp. 1341-1353.
- 6) Bascom, W.D., "The Fracture of an Epoxy Polymer Containing Elastomeric Modifiers," *J. Mater. Sci.*, Vol. 16, 1981, pp. 2657-2664.
- 7) Manzione, L.T., and Gillham, J.K., "Rubber-Modified Epoxies. I. Transitions and Morphology," *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 26, 1981, pp. 889-905.
- 8) Lee, D.B., Ikeda, T., Todo, M., Miyazaki, N., and Takahashi, K., "The Mechanism of Damage around Crack Tip in Rubber-Modified Epoxy," *Trans. Japan Soc. Mech. Eng.*, Vol. 65, 1998, pp. 25-32..
- 9) Lee, D.B., Ikeda, T., and Miyazaki, N., "Damage Zone around Crack Tip and Fracture Toughness of Rubber-Modified Epoxy Resin under Mixed Mode Condition," *The Soci. Mat. Sci.(Japan)*, Vol. 50, 2001, pp. 55-61.

- 10) Lee, D.B., Ikeda, T., Miyazaki, N., and Choi, N.S., "Damage Zone around Tip of an Interface Crack between Rubber-Modified Epoxy Resin and Aluminum," *Trans. ASME J. Eng. Mat. & Tech.* Vol. 124, 2002, pp. 206-214.
- 11) Murakami, Y., "Stress intensity factors handbook," *JSMS, Pergamon press*, 1, 1986, pp. 11.
- 12) Holik, A.S., Kambour, R.P., Hobbs, S.Y., and Fink, D.G., "Grinding and polishing techniques for thin sectioning of polymeric materials for transmission light microscopy," *Microstructural Sci.*, Vol. 7, 1979, pp. 357.
- 13) Arakawa, K., Mada, T., and Takahashi, K., "On the Correlations among Dynamic Stress Intensity Factor, Crack Velocity and Acceleration in Fast Fracture," *Trans. Japan Soc. Mech. Eng.*, Vol. 66, 2000, pp. 883-887.