

특집

유지 관리 모니터링 최신 기술

미시적 파괴 특성 모니터링 기술

- Monitoring of Micro-Failure Characterization
in Concrete -



윤동진*

1. 서론

최근 토목 구조물 및 대형 구조물의 사고에 따라 교량이나 도로, 댐과 같은 토목 구조물의 안전 진단에 대한 관심이 높아지고 있는 게 현실이다. 이들의 붕괴는 구조물의 내·외부 영향에 의해 재료 내에서의 미세 파괴로부터 시작된 균열의 성장으로 결국 파손에 이르게 되는 게 일반적이다.

음향 방출(Acoustic Emission : AE) 기술은 재료의 파손 기구를 연구하거나 내부에 존재하는 결함을 검출하는 기술로서 최근에 많은 관심을 끌고 있다. 이는 광범위한 부분에 대해 표면에서는 검출되지 않는 재료의 내부 손상을 검출할 수 있다는 큰 장점이 있기 때문이다. 콘크리트 및 토목 분야에서는 다른 분야에 비해 적은 수이지만 최근 많은 연구자들에 의해 콘크리트 재료나 구조물에의 적용이 이루어져 오고 있다.

대체적으로 이전의 연구 분야들은 크게 두 부류로 나눌 수 있는데, 첫째는 균열 선단에서 전개되는 파괴 진행 영역(Fracture Process Zone, FPZ)에 대해 미시적 파괴 메커니즘을 규명하거나, 균열의 위치 또는 균열의 전파 과정을 설명하는 것이었다. 이 분야의 연구에서는 균열의 진전을 알아내기 위해 기존의 위치 표정(source location) 방법이 쓰였을 뿐만 아니라 균열의 발생원이나 방향을 설명하기 위해 모멘트 텐서 분석(moment tensor analysis)이 많이 사용되어져 왔다. 두 번째 연구 분야는 음향 방출 기술을 실제 구조물에의 안전성 진단의 개념에서 구조물의 건전성을 평가하거나 손상을 검출하는 데 초점이 두어졌다.

본고에서는 콘크리트 구조물에서의 미시적 파괴 특성 고찰에 효율적으로 적용되고 있는 음향 방출 기술의 연구 사례를 중심으로 소개하고자 한다.

2. 미세 균열의 전개

일반적으로 콘크리트와 같은 반-취성(quasi-brittle) 재료의 파괴 진행 형태는 전형적으로 세 단

* 한국표준과학연구원 비파괴평가그룹 책임연구원

계로 나누어질 수 있다. 첫째는 전체적으로 분포된 미세 균열의 형성이며, 둘째는 이들 균열의 합체로 인한 임계 균열로의 연결, 그리고 임계 균열의 전파로 나눌 수 있다.

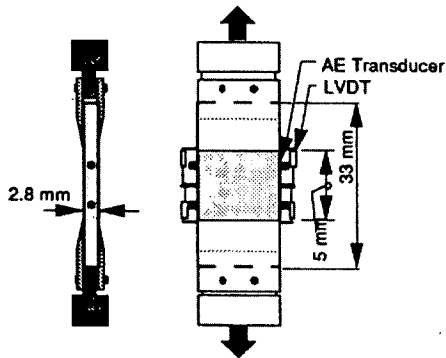


그림 1. 인장 시험 및 AE 측정

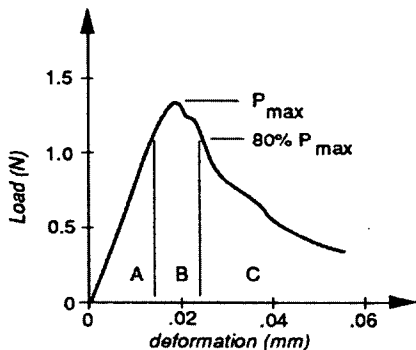


그림 2. 하중-변위 곡선

예로서 콘크리트 시편의 단축 인장 시험시 미세적 파괴 거동을 관찰하면 다음과 같다. 이들 미세 파괴 특성을 고찰하기 위해 <그림 1>과 같이 단축 인장 시험시에 음향 방출 시험을 통해 미세 균열의 전파 과정을 살펴보았다. 4개의 음향 방출 센서를 사용하였으며 시편의 두께가 길이에 비해 매우 얇으므로 2차원 평면으로 간주하여 균열 전파의 위치 표정을 관찰하였다. <그림 2>는 이 실험에 대한 하중-변위 곡선을 보여주고 있다.

<그림 3>은 인장 시험시 시편에서 발생된 미세 균열의 전파 경로를 위치 표정한 결과를 나타내며, 그림에서 보는 바와 같이 각각 센서에 도달하는 신호의 시간 차를 계산하여 하중에 따른 각 단계에서 발생하는 균열의 위치를 보여주고 있다. 즉, 단계 A는 초기 하중시의 결과를, 단계 B는 최고 하중 80% 부근에서의 결과를, 그리고 단계 C는 최고 하중의 80% 이후의 결과를 각각 나타낸다. 앞서 언급한 바와 같이 초기의 분포된 미세 균열들이 최고 하중 부근을 지나면서 점차 국부적으로 균열이 모여서 진전하게 됨을 볼 수 있다.

3. 미세 균열의 특성

다음은 3점 굽힘 시험시에 발생하는 미세적 파괴 특성에 대한 예이다. 본 실험은 시멘트 기지 재료에 대한 미세적 파괴 메커니즘을 확인하고 미세적 및 거시적인 파괴 기구 사이의 관계를 알아보기 위한 것이 목적이다. 따라서 <그림 4>와 같이 8개의 음향 방출 센서를 사용하여 3차원 위치 표정을 실시하였다. <그림 5>에서 보는 바와 같이 좌측의 하중-변위 곡선에서 진하게 표시된 지점까지의 하중 하에서 관찰된 실제 균열의 모습 및 음향 방출 위치 표정 결과를 동시에 그려보았다. 즉, 최대 하중 부근에서 3개의 분리된 균열 발생 지역이 나타났으며, 변형이 증가됨에 따라 빔의 중앙에 집중된 위치 표정 결과 및 균열의 진전을 관찰할 수 있다. 우측의 결과는 균열이 진전한 빔의 단면 상태를 보여주고 있다. 따라서 음향 방출 기술을 이용하여 균열이 진전되는 위치 및 그 양상에 관한 정보를 얻을 수 있으며 특정한 부위에 대해서 파괴의 진행 상황이나 이상 발생 등을 관찰하기 위한 연속적인 모니터링도 가능하다고 볼 수 있다.

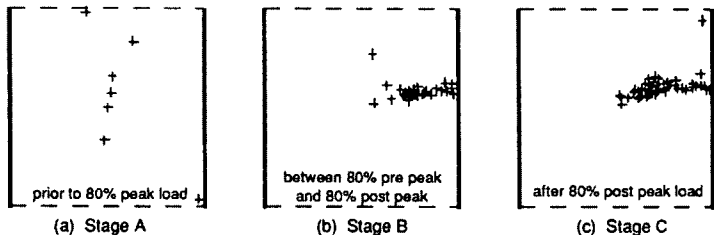


그림 3. 단축 인장 시험시 발생된 음향 방출 사건(event)의 위치

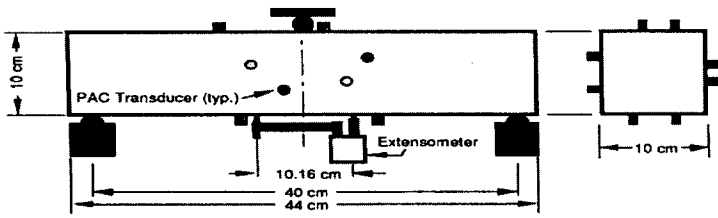


그림 4. 3점 굽힘 시험 시편에 대한 AE 센서 위치 및 제원

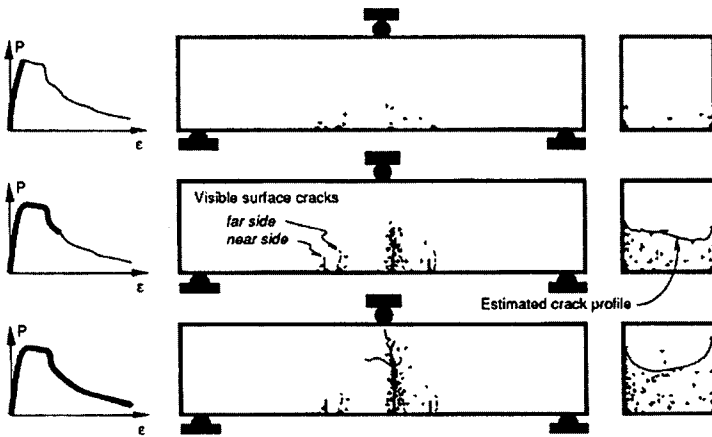


그림 5. 모르타르 빔 시편에 대한 음향 방출 위치 표정

4. 모멘트 텐서 분석과 균열 진전 방향

다음은 모멘트 텐서 분석을 통한 미세 균열의 전파 방향 및 균열 평면의 방향을 고찰하는 연구 결과를 소개하고자 한다. 다소 학술적인 내용이지만 미시 파괴 거동의 연구에 도움이 되리라 생각된다.

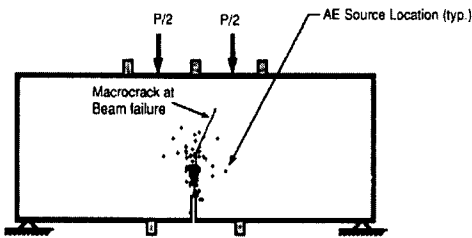
실험은 <그림 6>과 같이 중앙에 노치가 있는 시편과 중앙에 위치하지 않은 노치가 있는 시편에 대해 4점 굽힘 시험시 음향 방출 시험 결과를 고찰하였다. 균열의 진전 위치는 앞의 실험과 같이 각 센서에 도달하는 신호의 시간차를 이용해 위치 표정을 계산하였으며, 모멘트 텐서 해석을 위해서는 4개의 표면 변위로부터 얻은 신호를 계산에 사용하였다.

가) 미세 균열 이동 방향

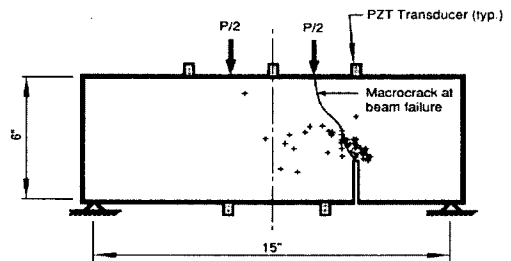
각 빔에서의 주 거시적 균열은 예측한 것에 따라 (즉, 중앙 노치 시편의 경우는 모드 I, 편축 노치 시편의 경우는 모드 II와 복합 모드) 전파되었으나, 미시적 균열은 거시적 균열과 다른 양상을 보였다.

다시 말해 <그림 7(a)>에서 모드 I의 미시적 균열은 노치의 축을 따라 약간 집중되는 것으로 나타났으나, 모드 II와 복합 모드의 미

시적 균열은 모드 I과 같이 집중되지 않고 그 주위에 분산되어 나타나고 있다. 즉, 이들 결과로부터 재료 내에서의 국부 손상 지역은 상당수의 모드 I 미시적 균열들로 이루어지며, 많은 수의 복합 모드와 모드 II 미시적 균열로 둘러 쌓인다는 사실을 알 수 있다.



(a) 중앙 노치 빔(Center-Notched Beam)



(b) 비 중앙 노치 빔(Off-Center-Notched Beam)

그림 6. P-파 도달 시간 차에 의한 음향 방출 위치 표정 결과

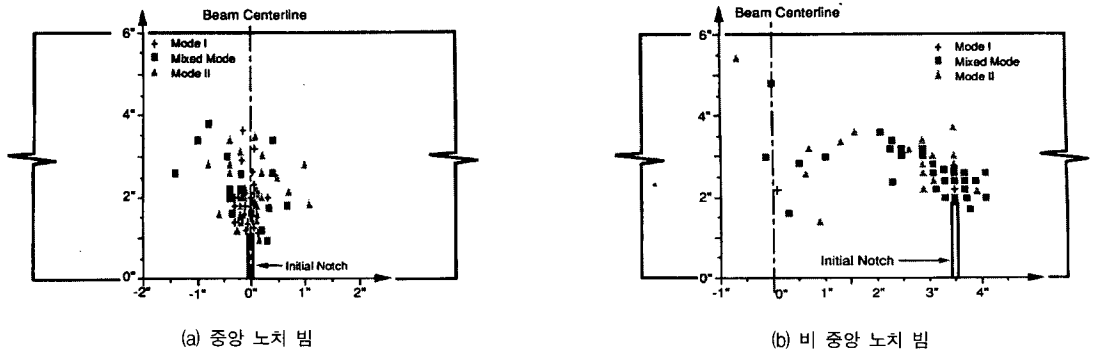


그림 7. 중앙 노치 빔 및 비 중앙 노치 빔에 대한 미세 균열의 위치 파괴 모드

나) 미세 균열 평면의 방향(Orientation of microcrack plane)

〈그림 8〉에서는 두 종류의 빔 형태에 대한 미세 균열 면의 방향각 β 의 분포를 보여주고 있다. 중앙 노치 시편의 경우 많은 수의 음향 발출 사건이 $\beta=0^\circ$ 근처에서 나타나고 있는데 이는 대부분의 미세 균열면이 인장 응력 방향에 수직임을 의미한다. 반면 비 중앙 노치 시편의 경우는 방향각 β 의 분포가 고루 분포됨을 볼 수 있다. 이는 중앙 노치 시편은 초기 노치와의 일직선 상의 인장으로 인하여 파손되고, 비 중앙 노치 시편의 경우 초기 노치의 비틀림(kink) 인장으로 인해 파손될 것이라는 거시 기구적 관찰과 일치함을 보여주고 있다.

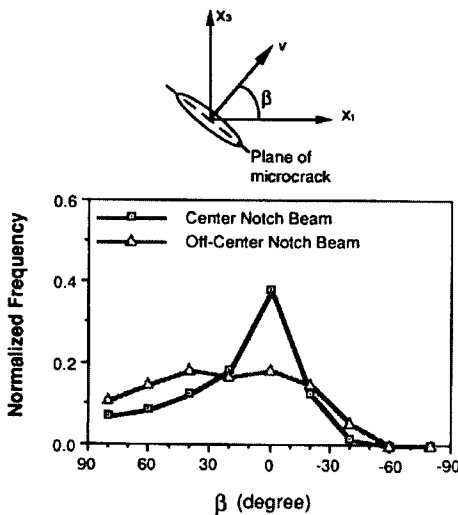
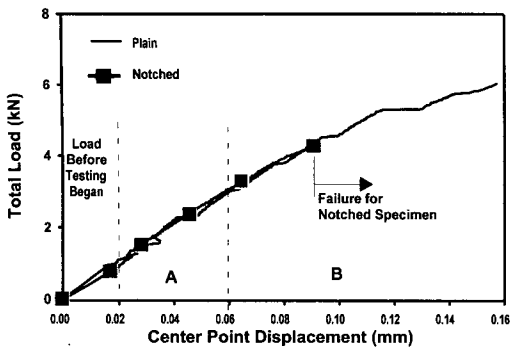


그림 8. 중앙 노치 빔 및 비 중앙 노치 빔에 대한 미세 균열 평면의 방향 분포

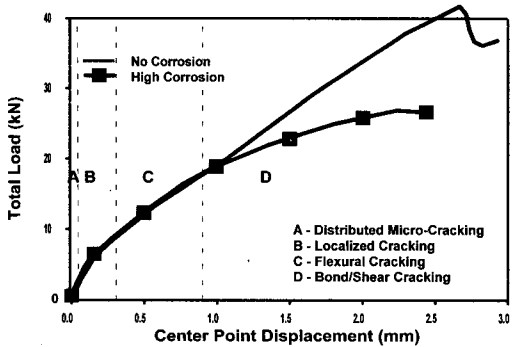
5. 철근 콘크리트의 손상 평가를 위한 모니터링

일반적으로 철근이 내재된 콘크리트 빔의 균열 거동 모드를 보면 〈그림 9〉와 같이 설명 될 수 있다. 무근 콘크리트와 노치가 있는 무근 콘크리트 시편에 대한 전형적인 하중-변위 곡선을 〈그림 9(a)〉에 나타내었으며, 철근 콘크리트 시편 중 부식이 안된 시편과 부식이 심하게 된 시편에 대한 하중-변위 곡선을 〈그림 9(b)〉에 나타내었다.

무근 콘크리트 빔의 경우에는 그림에서 보는 바와 같이 빔 전체에 분포된 미세 균열을 나타내는 구간 A와 국부 균열 전개를 나타내는 구간 B로 크게 두 단계로 나눌 수 있다. 반면, 철근 콘크리트 빔 시편의 경우에는 그림에서와 같이 네 단계로 나눌 수 있었다. 구간 A는 앞의 경우와 마찬가지로 분포된 미세 균열을 나타내며, 역시 구간 B는 4점 굽힘 시험의 경우 시편 중앙부의 일정한 모멘트 지역에서의 국부 균열 진전을 나타낸다. 구간 C는 계속되는 미세 균열 및 국부 균열의 전개, 그리고 철근을 따라 발생하는 콘크리트와 철근 사이의 박리를 나타낸다. 반면, 구간 D는 빔에서의 전단형 균열 또는 철근을 따라 발생하는 접합부 파단 균열(bond-splitting cracking)의 전개를 나타내고 있다. 이 두 하중-변위 곡선에서 얻은 흥미 있는 하나의 사실은 철근 콘크리트 시편의 경우 처음 세 단계 구간 A, B, C에서는 각 시편에서 비슷한 특성을 보였으나, 반면 구간 D에서는 매우 다른 양상을 보였다는 점이다. 즉, 부식된 시편에서의 강성의 저하를 뚜렷이 볼 수 있었다. 〈그림 10〉에서는 앞서 설명한 콘크리트 빔의 4점 굽힘 시험시의 전형적인 파손 메커니즘을 그림으로 나타내었다.



(a) 무근 콘크리트



(b) 철근 콘크리트

그림 9. 무근 콘크리트 빔 및 철근 콘크리트 빔의 하중-변위 곡선

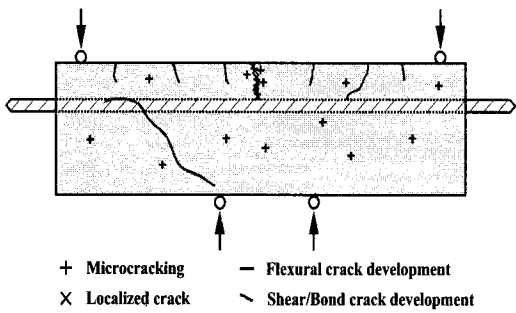


그림 10. 철근 콘크리트 빔의 4점 굽힘 시험시 전형적인 손상 메커니즘

일반적으로 Felicity ratio는 콘크리트와 같은 복합 재료에서 사용되는 손상평가지수로서 이전 하중 사이클 이력에서의 최대 하중에 대한 다음 하중 사이클에서의 AE가 발생되기 시작하는 시점에서의 하중의 비로 정의된다. 이 값은 섬유 강화 복합 재료(FRP)나 구조물에서의 손상의 정도를 평가하는 기준으로서 많이 사용되어져 왔다.

〈그림 11〉은 앞에서 언급된 시편에 대한 4점 굽힘 시험시 단계별 반복 하중에 의한 음향 방출 시험을 통해 각 시편에 대해 계산된 Felicity ratio 값을 보여 주고 있다. 각각의 점은 각 사이클 단계에서 계산한 값을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 부식이 심해질수록, 즉 손상의 정도가 심할수록 사이클 단계가 증가함에 따라 Felicity ratio 값은 감소함을 알 수 있다. 또한 덜 부식된 시편에 비교하여 심하게 부식된 시편의 경우 Felicity ratio 값이 급격히 감소하고 있음을 볼 수 있다. 이는 부식이 심할수록 또는 손상이 심할수록 철근과 콘크리트 계면과의 상태가 상대적으로 불안정하기 때문에 재하시나 재하중을 가할시에 상대적으로 일찍 AE가 발생하는 것으로 추정할 수 있다. 이 결과로부터 Felicity ratio 값의 변화 역시 콘크리트 구조물의 부식에 의한 손상 정도를 예측하는데 아주 효과적인 변수로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

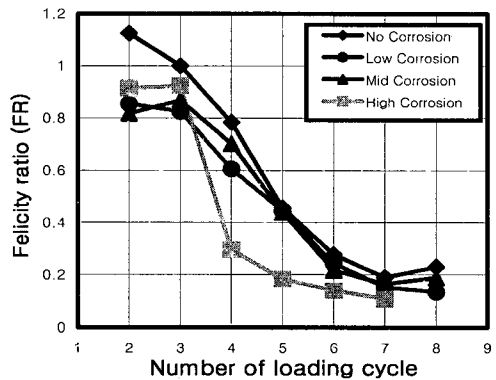


그림 11. 손상 정도 및 부식 상태에 따른 Felicity ratio의 변화

6. 맺음말

앞서 서론에서 언급한 바와 같이 음향 방출 기술을 이용한 미시적 파괴 특성 모니터링의 연구는 크게 재료에 대한 파괴 거동 연구와 실구조물에서의 적용에 대한 연구로 나뉘어지고 있으며, 최근 들어 토목 구조물의 안전 및 유지 관리에의 응용 차원에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 기술은 근본적으로 장단점을 가지고 있지만 효과적으로 사용한다면 구조물의 안전을 위한 모니터링에의 역할도 긍정적으로 기대할 수 있을 것이다. □

참고문헌

1. A. Maji and S. P. Shah, "Process Zone and Acoustic Emission Measurement in Concrete", *Experimental Mechanics*, March, 1988
2. A. K. Maji, C. Ouyang, and S. P. Shah, "Fracture Mechanisms of Quasi-Brittle Materials Based on Acoustic Emission", *J. Mater. Res.* 5(1), 1990
3. E. N. Landis, S. P. Shah, and Z. Li, "Application of Quantitative NDE to Basic Fracture Research of Concrete". *Review of Prog. In QNDE*, 13, 1994
4. M. Ohtsu, T. Okamoto, and S. Yuyama, "Moment Tensor Analysis of Acoustic Emission for Cracking Mechanisms in Concrete", *ACI Structural Journal*, Mar.-Apr., 1998
5. Z. Li and S. P. Shah, "Localization of Microcracking in Concrete Under Uniaxial Tension", *ACI Materials Journal*, Jul.-Aug., 1994
6. Z. Li, "Microcrack Characterization in Concrete Under Uniaxial Tension", *Mag. Of Conc. Res.* 48(176), 1996
7. S. Yuyama, T. Okamoto, M. Shigeishi, and M. Ohtsu, "Quantitative Evaluation and Visualization of Cracking Process in Reinforced Concrete by a Moment Tensor Analysis of Acoustic Emission", *Materials Evaluation*, June, 1995
8. T. Uomoto, "Application of Acoustic Emission to the Field of Concrete Engineering", *J. of Acoustic Emission*, 6(3), 1987
9. K. Matsuyama, T. Fujiwara, A. Ishibashi, and M. Ohtsu, "Field Application of Acoustic Emission for Diagnosis of Structural Deterioration of Concrete", *J. of Acoustic Emission*, 11(4), 1993
10. S. W. Hearn and C. K. Shield, "Acoustic Emission Monitoring as a Nondestructive Testing Technique in Reinforced Concrete", *ACI Materials Journal*, Nov.-Dec., 1997
11. C. Ouyang, E. Landis, and S. P. Shah, "Damage Assessment in Concrete Using Quantitative Acoustic Emission", *ASCE J. of Engineering Mechanics*, 117(11), 1991
12. D. J. Yoon, W. J. Weiss, D. W. Prine and S. P. Shah, "Assessing Corrosion Damage in Reinforced Concrete Beams Using Acoustic Emission", *SPIE's Int'l Symp. on NDE Techniques for Aging Infrastructure & Manufacturing*, 1999
13. D. J. Yoon, W. J. Weiss and S. P. Shah, "Assessing Damage Mechanisms in Reinforcement Concrete Using Acoustic Emission", *ASCE 99 Engineering Mechanics Division*, 1999
14. D. J. Yoon, W. J. Weiss, and S. P. Shah, "Assessing damage in Corroded Reinforced Concrete Using Acoustic Emission", *ASCE J. of Engineering Mechanics*, March, 2000
15. 이준현, 이진경, 장일영, 윤동진, "음향방출을 이용한 mortar 재료의 미시적 파괴거동에 관한 연구", *콘크리트학회지*, 제10권 6호, 1998
16. 이준현, 이진경, 윤동진, "음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 온라인 모니터링", *비파괴검사학회지*, 제19권 1호, 1999