

● 論 文

음향방출법을 이용한 해양구조물의 온라인 감시에 관한 실험적 연구

원 순 호* · 조 경 식**

(99년 1월 15일 접수)

Experimental Study on the On-line Monitoring of Offshore Structures Using Acoustic Emission Technology

Soon-Ho Won* · Kyung-Shik Cho**

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Nondestructive Testing(비파괴시험), Offshore Structures(해양구조물), Underwater(수중), Attenuation Measurement(감쇠측정)

Abstract

In this research, an experimental study is presented to check the possibilities of offshore structures monitoring using AE techniques. The underwater transducer and preamplifier are fabricated. And, it is proved that this unit can be used for the detection of AE in offshore structures. Wave propagation studies have shown that supplementary attenuations due to seawater are significantly reducing the detection range of the sensors. It excludes the possibility of offshore structures monitoring with a small number of sensors. We conclude that AE waves would be correctly detected for a path of about 3m. Tubular joints have been tested in air and underwater using simulated elastic wave. Ability of AE techniques to detect and locate cracks early in their evolution has been demonstrated. Several parameters of AE generation have been set in evidence. It has also been shown that crack development goes with an increase of AE parameter. Conclusively, it is shown that AE techniques can provide practical alternatives to present methods being used for inspection of deep-water offshore structures undergoing structural degradation due to fatigue crack growth.

1. 서 론

인구의 증가 및 육상자원의 고갈에 따라 세계적으로 해양공간 이용과 해양자원의 개발을 위한 노

력이 경주되고 있다. 해양산업은 2천년대 초반에는 세계시장 규모가 연간 약 9백억 달러에 이를 전망으로 있다. 이와같이 해양개발의 경제성이 중요시됨에 따라, 세계적으로 해상 공항이나 저장기지,

* 정회원, 한국기계연구원 비파괴평가그룹

** 한국기계연구원 비파괴평가그룹

해저 에너지자원, 광물자원개발 등 해상, 해중, 해저에 걸쳐 그 이용도가 다양화 및 대규모화되고 있다.

그러나 해양을 이용하기 위한 해상 또는 해저지지와 같은 구조물의 건설에는 수중용접에 따른 수중 비파괴검사가 반드시 필요하며, 사용중에는 강풍이나 파도, 수압, 해수에 의한 피로균열이나 부식 등에 의한 파손으로 막대한 물질적 손실과 더불어 환경오염을 초래할 수 있다. 따라서 해양자원의 이용을 위한 기반기술로서 해양구조물의 건설과 설비의 보수유지 및 안전성 확보를 위한 수중 비파괴 검사기술의 개발이 반드시 필요하며 앞으로 그 수요가 급증할 것으로 예상된다.

이러한 수중 비파괴검사기술은 1960년대 말에서 1970년대 초기에 유럽의 북해유전 및 가스전 개발을 위해 시작되었으며 현재 영국, 프랑스, 독일, 스웨덴, 노르웨이 등의 유럽국가를 비롯하여 미국, 구소연방, 일본 등에서도 많은 연구가 이루어져 해양구조물의 손상 및 안전성진단, 피로수명 예측 등에 널리 활용되고 있고, 일부 국가에서는 음향방출시험 기법을 활용하여 해양구조물의 사용중 급작스런 파손을 방지하기 위한 온라인 감시기술을 개발 중이거나 일부는 이미 적용중에 있다.¹⁾⁻¹⁰⁾ 또한 영국이나 미국 등에서는 수중 비파괴검사 전문요원의 자격인증제도가 이미 확립되어 있고 북유럽에서는 수중 비파괴검사학회까지 구성되어 적극적인 연구와 기술을 보급하고 있는 상황이다.¹¹⁾⁻¹⁴⁾ 그리고 이러한 수중 비파괴검사기술은 영국(Lloyds Register of Shipping), 노르웨이(Det Norske Veritas), 미국(The American Bureau of Shipping), 프랑스(Bureau Veritas), 독일(Germanische Lloyd) 등의 협회에서 공인되어 있다.¹⁵⁾

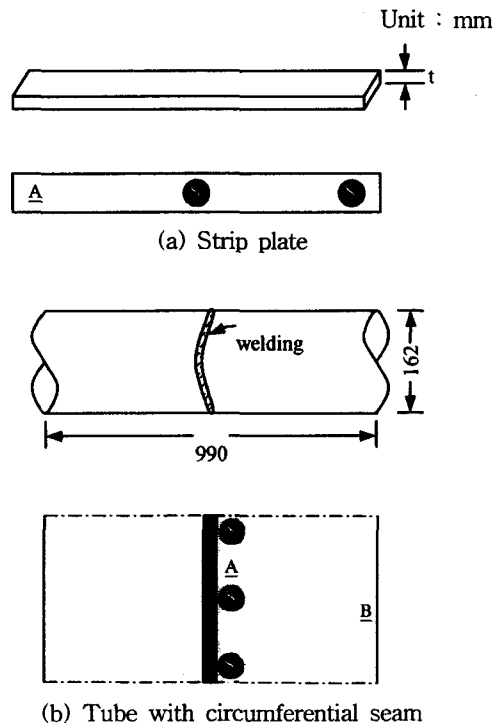
수중에서 적용되는 비파괴검사기술은 자분탐상시험(magnetic particle testing : MT), 방사선투과시험(radiographic testing : RT), 초음파탐상시험(ultrasonic testing : UT), 전자기탐상시험(electromagnetic testing : ET), 음향방출시험(acoustic emission testing : AET) 등이 있으며 이들 검사법들은 결합탐상이나 온라인 감시에 활용 가능한 기법들이다. 현재 국내에는 육상에서 검사하는 범용 비파괴검사는 통상적으로 널리 수행되고 있으나 수중에서 수행해야 하는 수중 비파괴검사기술의 확립이나

경험은 축적되어 있지 않은 상황으로서, 우리나라도 해양공간이용이나 해양자원을 발굴하고, 국제적인 경쟁에서 뒤지지 않기 위해서는 조속히 수중 비파괴검사 기술을 확립해야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 수중 비파괴검사로 AE를 이용한 해양구조물의 온라인 감시기술을 확립하는데 그 목적이 있다.

2. 실험

2.1 시편준비

실험에 사용된 시험편 및 위치표정은 Fig. 1과 같다. 수중에서의 AE 감쇠특성을 알아보기 위하여 Fig. 1 (a)와 같은 두께가 각각 다른 SS40 강판 5종과 재질에 따른 감쇠특성을 고찰하기 위한 SUS 310, 316L, 304 등 스테인리스강판 3종을 시험편으로 준비하였다. AE 기법을 이용한 해양구조물 감시 가능성에 대한 연구는 Fig. 1 (b), (c)와 같은 형상의 원주용접부 및 T-node 용접부를 갖는 시험편을 아크용접하여 제작한 후 실험을 수행하였다.



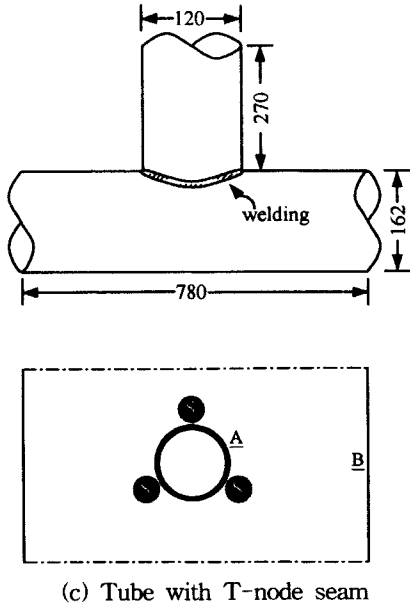


Fig. 1 Shape, dimension and source location of the specimens

2.2 실험방법

수중실험을 위해서 실험용 수조와 수중에 적용되는 AE 센서 및 전치증폭기(preamplifier)를 제작하였다. 인위적 해수조건을 만들기 위해서 D 제약사에서 제조된 NaCl을 이용하여 5% 수용액을 만들어 실험하였다. 수상과 수중에서 AE 감쇠특성을 고찰하기 위하여 송, 수신 센서의 거리를 변화시키면서 수신신호의 진폭으로부터 감쇠를 측정하고, 진폭을 측정할 때 파장의 배수위치에 수신센서를 설치하여 최대 진폭을 측정하였다. 측정된 진폭값은 다음 식 (1)에 대입하여 감쇠를 구하는데 사용하였다.

$$\alpha = \frac{20 \log \frac{p_0}{p}}{d} \quad \text{dB/m} \quad (1)$$

여기서, p_0 : $d=0$ 에서 초기음압
 p : 거리 d 에서의 음압
 d : 매질을 전파한 거리
 α : 감쇠계수

AE 기법을 이용한 수중환경에서의 균열검출 특성을 규명하기 위해서는 수신신호로부터 진동회수 (ring-down count) 및 최대진폭(peak amplitude)을 해석하는 방법을 이용하였다. 실험장치의 구성도는 Fig. 2와 같고 175 kHz 공진형 센서를 사용하였다. 검출된 AE 신호는 125-250 kHz의 여파기(filter)를 가진 전치증폭기에서 40 dB로 증폭한 후 주증폭기(main amplifier)에서 6 dB 증폭하여 문턱전압(threshold voltage) 0.2 V 이상의 신호에 대하여 분석하였다.

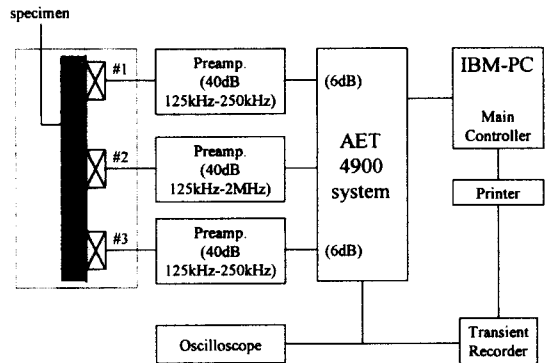


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for AE measurement

3. 실험결과 및 논의

3.1 수중 적용성

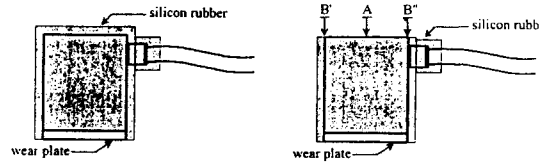
해양환경은 AE 센서를 부착하는데 있어 큰 장애물로 작용한다. 또한 해양구조물에 AE 기법을 적용하기 위해서는 센서와 전치증폭기가 수중환경에서 사용될 수 있도록 제작되어야 하고, 300 m 이상의 해저구조물에 발생한 미세한 AE원도 검출할 수 있는 조건이 전제되어야 한다. 따라서 해양환경에서 센서 및 전치증폭기를 장시간 유지해야 할 경우를 고려한 연구를 수행하였다.

3.1.1 센서의 수중 적용성

바닷물은 대부분이 NaCl 수용액으로 센서의 수중 적용성을 고찰하기 위하여 5% NaCl 수용액에 3개의 센서를 침지시킨 후 시간에 따른 센서의 특성을 분석하였다. 모의펄스에 의한 센서로부터의

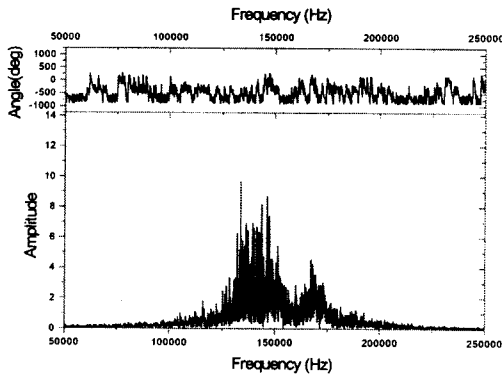
수신신호를 푸리에 변환(FFT)하는 방법으로 케이 블 연결부위의 방수와 내마모층 부분의 상태를 관찰하였다. 방수방법은 실리콘을 이용하여 Fig. 3 (a), (b)와 같은 방법을 사용하였다. 그 결과 (a)의 경우는 완전방수가 가능하였으나 (b)의 경우는 센서 하우징 A에서 발생된 부식이 B'와 B''부분으로 진행되어 실리콘의 방수능력을 파괴시킴을 알 수 있었다. Fig. 4는 Fig. 3 (b)와 같은 방법을 사용했을 때 AE 센서로부터의 주파수 특성을 약 150시간을 간격으로 분석한 결과이다. NaCl 수용액에 침지 후 약 750시간 후에 방수에 실패하고 있음을 보여주고 있으며 이러한 결과는 실험에 사용된 다른 2개의 센서에서도 공통적으로 나타난 결과였다. 그 외 내마모층의 부식에 의한 석출물의 영향정도를 알아보기 위하여 방수가 실패한 시점에서 내마

모층의 광학현미경 사진을 관찰하였다. 실험에 사용된 AE 센서 내마모층의 광학현미경 사진이 Fig. 5에 보여지며 실험 전, 후의 상태를 비교할 때 알루미늄과 같은 석출물의 영향은 발견되지 않았다. 따라서 NaCl 수용액이 내마모층에 미치는 영향은 없는 것으로 고려되었다.

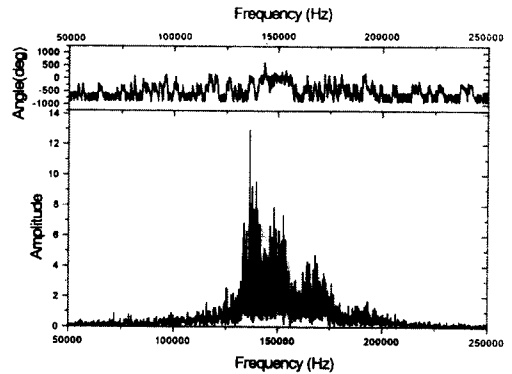


(a) Correct method (b) Incorrect method

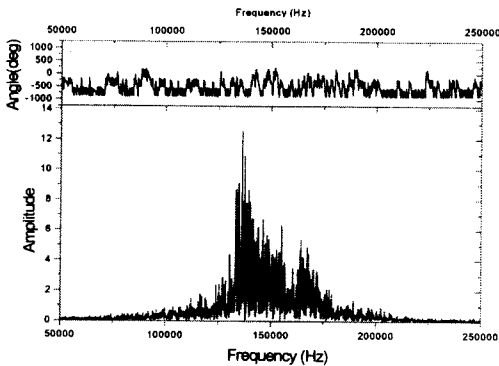
Fig. 3 Waterproof of AE sensor using silicon rubber



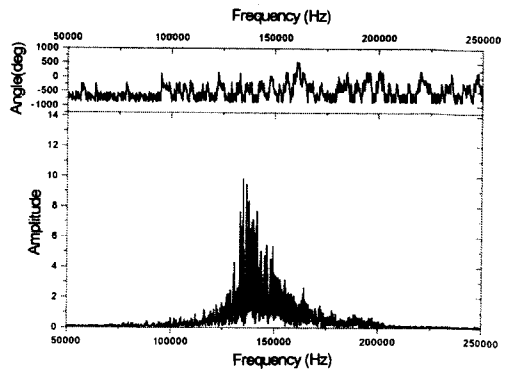
(a) 0 hour



(c) 300 hours



(b) 150 hours



(d) 450 hours

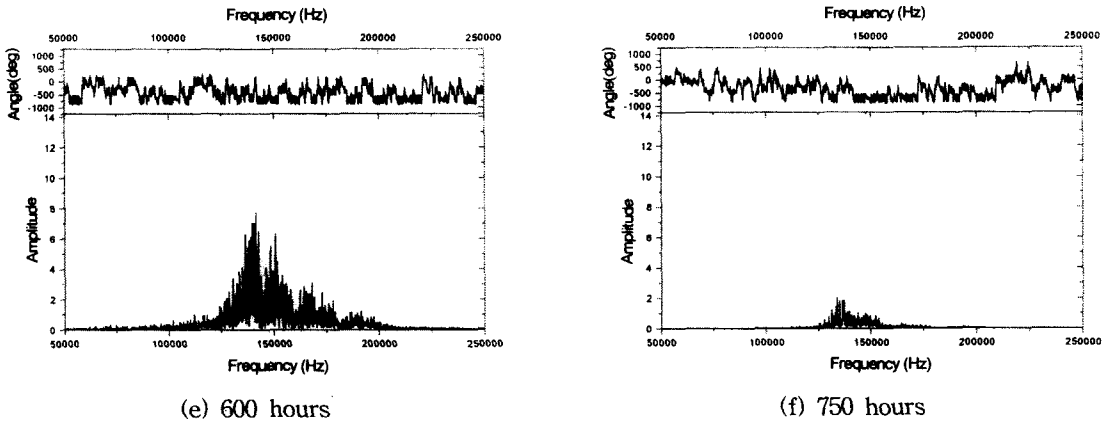


Fig. 4 FFT result according to time in leaked sensor

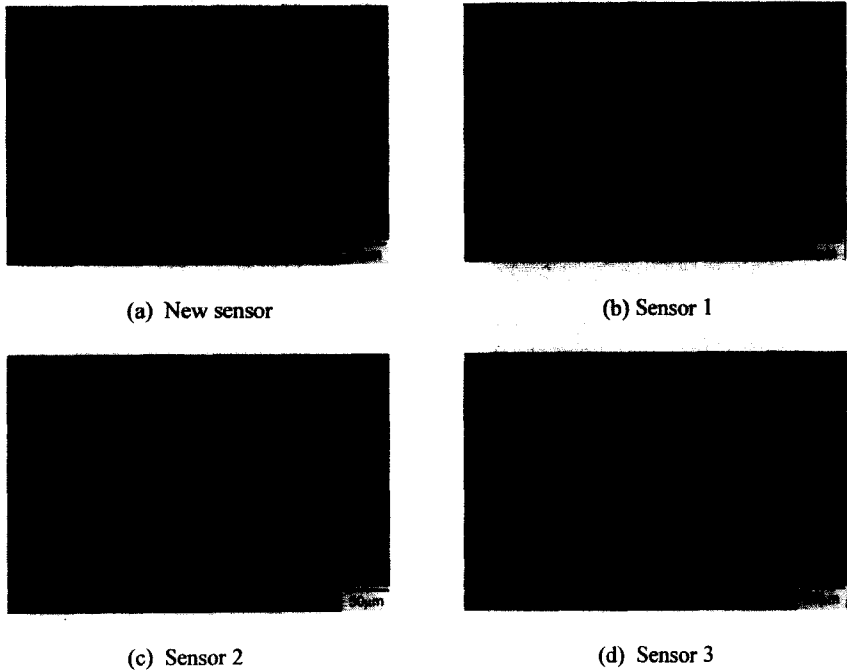


Fig. 5 Optical microstructure of sensor wear plate

3.1.2 전치증폭기의 수중 적용성

전치증폭기도 직접적으로 수중환경에 적용되는 부분으로 AE 센서와 마찬가지로 수중 및 부식환경에서 지속적으로 견딜 수 있는 조건이 전제되어야 한다. 따라서 내식강 SUS 304를 사용하여 수중적

용이 가능한 전치증폭기를 제작하였다. Fig. 6에 제작된 전치증폭기를 나타내었고, 수중적용에 대한 실험을 수행한 결과 약 720시간에서도 방수에 대한 효과적인 결과를 얻을 수 있었다.

3.2 수중 AE 감쇠특성

실제의 플랫폼과 같은 해양구조물은 실린더형 소재로 제작되고, 그 두께는 직경에 비해 매우 작다. 이러한 기하구조에서 파의 전파는 Lamb파의 고전적 해에 따른다. Lamb파는 대칭 또는 비대칭 모드에 대해서 종파와 횡파성분이 서로 혼합되어져 있고 액체에서 종파성분의 감쇠가 현저하게 나타난다. 시험편은 각각 두께가 다른 SS40 강종과 스테인리스 계열의 강종을 선택하였다. 측정결과로부터 AE 기법을 이용하여 해양구조물을 감시하는데 일차적으로 제기되는 AE 센서의 설치간격을 구하였다.

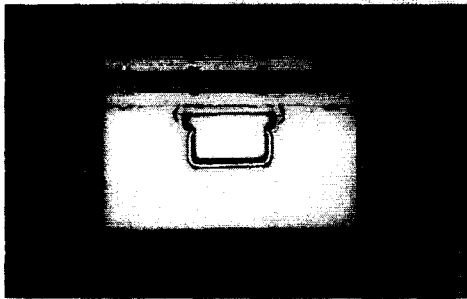
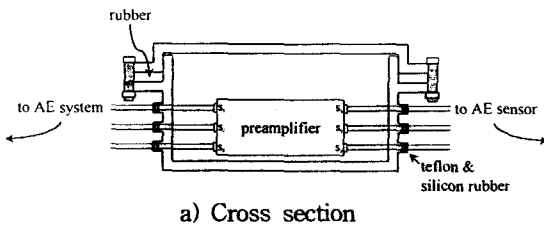


Fig. 6 Shape of preamplifier for underwater experiment

3.2.1 두께에 따른 감쇠특성

2개의 센서를 일정간격으로 배열한 후 모의펄스를 사용하여 수상과 수중환경하의 시험편에서 AE 신호를 측정하였고, 실험오차를 줄이기 위하여 똑같은 경로를 적용하는 상대적인 측정방법을 사용했다. 도장을 하지 않은 상태에서 AE 감쇠특성은 Fig. 7의 실험결과에 나타난 바와 같이 감쇠가 두께의 증가에 따라 증가하는 경향을 보여주었다. 또

한 수중에서의 AE 신호는 수상에 비해 부가적인 감쇠를 나타내고 있으며, 감쇠의 크기는 약 2-8 dB/m로 수상에서의 감쇠와 비교하면 두께가 두꺼울수록 현저하다. Fig. 8에 수상과 수중에서의 AE 파형을 예시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 수중 AE 신호의 진동회수 및 진폭은 감쇠의 영향으로 현저하게 줄어들고 있음을 알 수 있다. 결론적으로 수중구조물에 대하여 AE 기법을 적용하기 위해서는 수상의 조건과 비교하여 훨씬 많은 센서가 요구되며, 두께에 따라 차이가 있지만 실제의 S/N비를 고려할 때 약 3 m에서 AE 신호를 정확하게 검출할 수 있다고 결론지을 수 있다.

3.2.2 재질별 감쇠특성

내식성이 요구되는 국부적인 위치에 사용될 수 있는 스테인리스강에서의 AE 감쇠특성이 고찰되었다. 실험에 사용된 310, 316L, 304강의 감쇠특성은 Fig. 9와 같다. 감쇠의 크기 및 일반적인 경향은 SS40강과 비교할 때 거의 유사하며, 이는 재질사이의 음향임피던스가 거의 같기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 10에 SUS 304 강판에서 발생한 AE 파형을 예시하였으며, 수중에서 AE 신호의 현저한 감쇠를 나타내고 있다.

3.3 결함검출 특성

모의펄스를 이용하여 해양구조물에서 발생한 피로균열의 온라인 감시방법으로 AE 기법의 적용가능성을 실험하였다. 이것이 실제의 해양구조물 감시

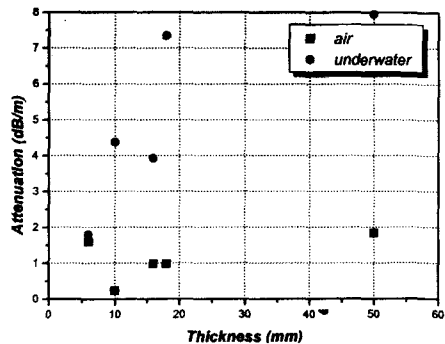
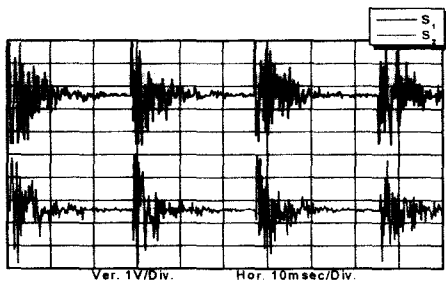
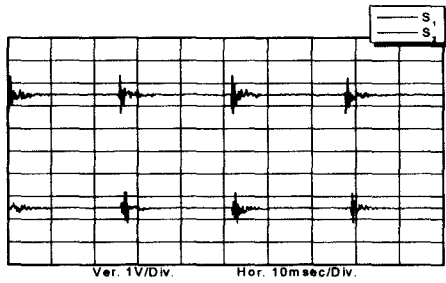


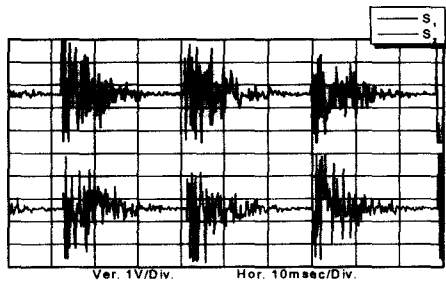
Fig. 7 Experimental determination of wave attenuation versus thickness in steel plate of different thickness



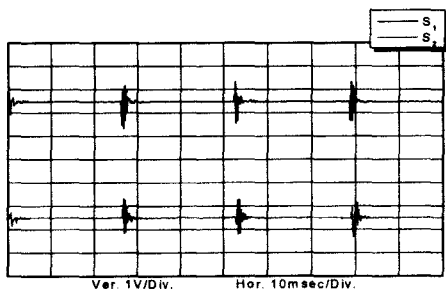
(a) SS40, t=10 mm, air



(b) SS40, t=10 mm, underwater



(c) SS40, t=18 mm, air



(d) SS40, t=18 mm, underwater

Fig. 8 AE waveforms obtained from steel plate of different thickness

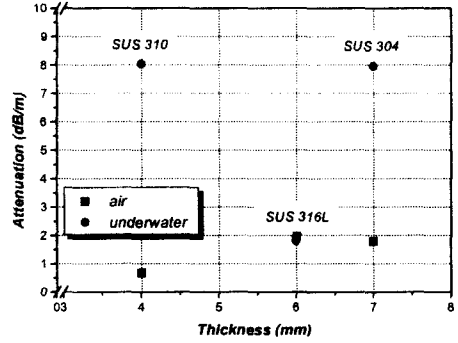
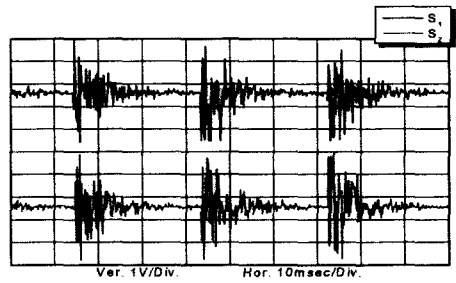
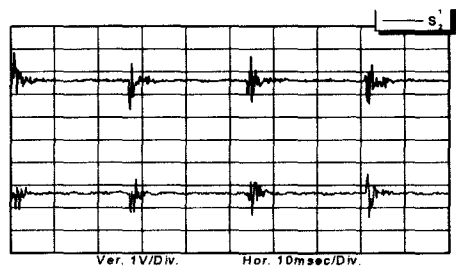


Fig. 9 Experimental determination of wave attenuation in stainless steel plate



(a) SUS 304, t=7 mm, air



(b) SUS 304, t=7 mm, underwater

Fig. 10 AE waveforms obtained from stainless steel plate

방법은 아니지만 실험결과로부터 균열발생에 대한 AE 기법의 해양구조물 적용가능성을 검토하였다.

3.3.1 원주용접부의 균열검출

감시시스템의 개략도는 Fig. 2와 같고 실험용 시험편은 Fig. 1 (b)이다. 검출용 센서는 한 개로도 충분하지만 모의펄스에서 발생한 신호들을 정확하

계 검출하기 위하여 175 kHz 3개의 센서로 구성된 시스템을 사용하였다. 응력 취약부위¹⁶⁾를 용접부로 간주하여 센서는 원주용접부를 따라서 120° 등간격으로 설치하였고, Fig. 1 (b)의 A 위치에 AE원으로 모의펄스를 설치한 경우의 각 센서에서 얻어진 신호를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 12는 Fig. 1 (b)의 A와 B 위치에서 모의펄스를 발생시켰을 때 각 센서에서 얻어진 진동회수와 최대진폭의 평균치를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 수중에서 AE의 감쇠가 현저하지만 응력집중부위에서 발생되는 피로균열이 AE 기법에 의해 검출됨을 알 수 있다.

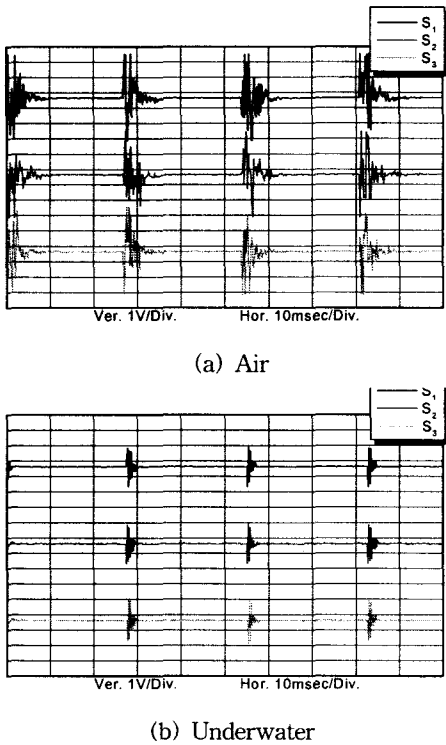


Fig. 11 Acoustic signals emitted from circumferential welding seam

3.3.2 T-node 용접부의 균열검출

실험용 시험편은 Fig. 1 (c)이다. 3.3.1과 동일한 방법으로 T-node 용접부를 따라서 175 kHz 3개의 센서를 120° 등간격으로 설치하였고, Fig. 1 (c)의 A 위치에 AE원으로 모의펄스를 설치한 경우의 각 센서에서 검출된 AE 파형의 결과가 Fig. 13 (a),

(b)이다. 그림의 결과는 수중에서도 AE 신호를 정확하게 검출하고 있음을 나타내고 있다. Fig. 14는 수상과 수중에서 각 센서에서 검출된 AE 변수를 분석한 결과이고 T-node 용접부를 갖는 수중구조물의 온라인 감시가 AE 기법으로 가능함을 증명하고 있다.

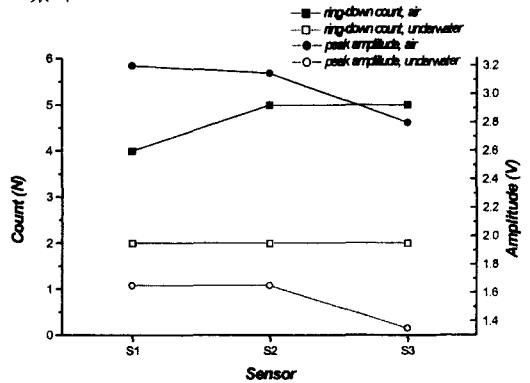


Fig. 12 Analysis of AE parameter from circumferential welding seam

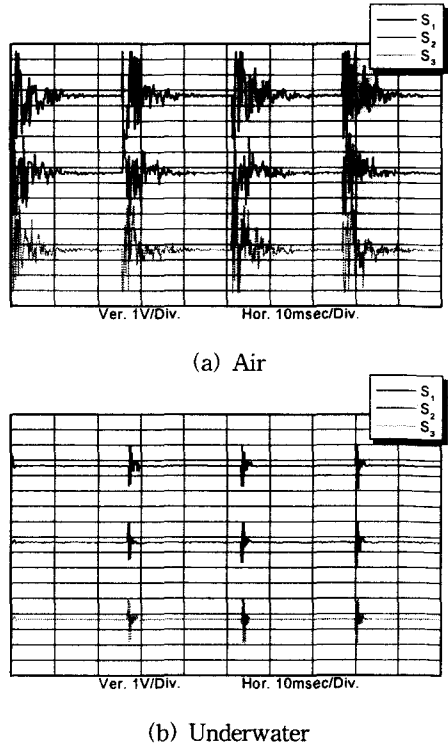


Fig. 13 Acoustic signals emitted from T-node welding seam

참고문헌

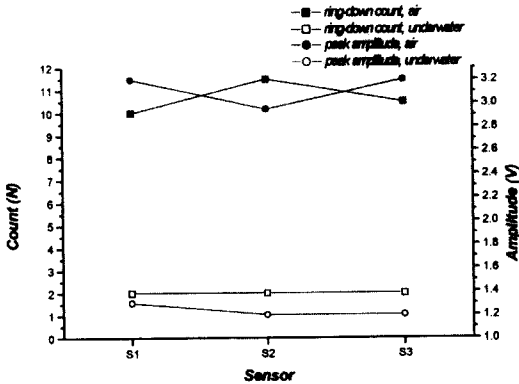


Fig. 14 Analysis of AE parameter from T-node welding seam

4. 결론

해양구조물에서 발생하는 피로균열을 온라인으로 감시하기 위한 방법으로 AE 기법의 적용가능성에 관한 실험실적 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과는 고하중, 피로조건하의 해양구조물 감시방법으로 AE 기법의 적용이 매우 긍정적임을 보여주었다. 따라서 피로로 인해 구조적 파괴에 이르는 깊은 해저의 구조물 검사방법으로 AE 기법이 실제적인 대안을 제시할 수 있을 것으로 증명되었다. 결론적으로 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 경제성이 고려된 해양구조물의 온라인 감시방법으로 AE 기법의 타당성을 검토하였고, 실리콘을 이용한 AE 센서 및 전치증폭기의 수중적용 기법을 제안하여 실험적으로 그 결과를 증명하였다.
- 2) 두께 및 재질에 따라 차이가 있지만 S/N비를 고려할 때, 약 3 m에서 AE 신호를 정확하게 검출할 수 있다.
- 3) 원주용접부 및 T-node 용접부에서 발생한 AE는 수상과 비교할 때 수중에서의 감쇠가 더욱 크나, AE 신호의 검출은 가능하였다.
- 4) 실제의 피로균열에 의한 AE 검출 및 잡음신호로부터 분리하기 위한 기술은 향후 연구에서 해결해야할 문제로 고찰되었다.

- 1) Matsuyama, K., A. Ishibashi, T. Fujiwara Y. Kanemoto, S. Ohta, S. Hamada and M. Ohtsu, "Application of AE to Evaluate Deterioration of Port and Harbor Structures", Fourth Far East Conference on NDT, pp. 589-598, 1997
- 2) Raine, G. A. and N. Smith, "NDT of On and Offshore Oil and Gas Installations Using the Alternating Current Field Measurement (ACFM) Technique", Materials Evaluation, pp.461-465, 1996
- 3) 정대혁, "플랜트 해양구조물의 자동 초음파탐상 검사", 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 1, pp. 42-45, 1998
- 4) Parry, D. L., "Nondestructive Examination of Subsea Structures using Acoustic Emission Technology", The 9th Annual Offshore Technology Conference, Ppr OTC 2866, pp. 467-474, 1977
- 5) Dunegan, H. L., "Acoustic Emission-New Inspection Technique", The 9th Annual Offshore Technology Conference, Ppr OTC 2851, pp.349-356, 1977
- 6) Rogers, L. M., "Detection and Monitoring of Cracks in Offshore Structures by Acoustic Emission", Test and Transducer Proc, Vol. 3, Conf. on Test and Transducer, Wembley UK, pp.185-204, 1986
- 7) Newton, K., "The Transparency of Fatigue Cracks to NDT Methods used for the Inspection of Offshore Structures", Offshore Europe 87 Conf., Vol. 2, SPE 16576, 1987
- 8) Thorpe, T. W., P. M. Scott, A. Rance, and D. Silvester, "Final Report for the UK Offshore Steels Research Project : Corrosion Fatigue of BS4360 : 50D Structural Steel in Seawater", Harwell Report AERE R10679, 1982, [Also Int. J. Fatigue, Vol 5, No. 3, pp. 123-133, 1983]

- 9) Thaulow, C. and T. Berge, "Acoustic Emission Monitoring of Corrosion Fatigue Crack Growth in Offshore Steel", NDT International, Vol. 17, No. 3, pp.147-153, 1984
- 10) Dumoussseau, P. F., P. Laffont, J. M. Thebault, "Experimental Study of Acoustic Emission Monitoring of Crack Propagation in Offshore Steel Tubular Joint", The 11th Annual Offshore Technology Conference, Ppr OTC 3425, pp.593-599, 1979
- 11) Street, R., "The Requirements for the Testing and Inspection of Offshore Installations under the Mineral Workings (Offshore Installations) -Act 1971, British Journal of NDT, pp. 80-82, 1975
- 12) Forli, O., "NDT Offshore", British Journal of NDT, Vol. 31, No.8, pp.441-444, 1989
- 13) Muri, G., "Certification for In-Water Survey and Inspection", British Journal of NDT, pp. 256-266, 1979
- 14) Moncaster, M. B., "Underwater Inspection of Welds : An Assessment of Some Techniques and Their Reliability", Journal of the Society for Underwater Technology, pp.7-12, 1982.
- 15) Goldberg, L., "Diversity in Underwater Inspection", Materials Evaluation, pp. 401-403, 1996
- 16) 이현엽, "해양구조물의 피로해석 기법에 대한 검토 및 전산프로그램의 개발", 한국해양공학 회지, Vol. 10, No. 2, pp.13-19, 1996