

선박의 용접구조 피로시험에 대한 음향방출기법의 적용 연구

A Study on the Application of Acoustic Emission for the Fatigue Test of Ship Welded Structure

안성찬*[†], 김대수*, 이진희*, 박진수*

Sung Chan An*[†], Dae Soo Kim*, Jin Hee Lee* and Jinsoo Park*

초 록 본 연구에서는 선박 용접구조물의 피로균열 발생 여부와 균열의 진전 상황을 실시간으로 모니터링하기 위한 기초 연구단계로서 선박의 전형적인 용접형태인 필렛용접부(fillet welded joint)의 피로시험에 대한 음향방출(Acoustic Emission, AE)기법의 적용성을 검토하였다. 필렛용접부의 피로시험에서 균열의 발생과 진전, 위치를 검출하기 위하여 AE 카운트(ring down count)와 위치표정(source location)등을 이용하였다. 시험결과 용접 토우(toe)부의 표면균열(surface crack)이 관통균열(through crack)로 발전하기 전까지의 AE 신호는 비교적 미약하게 나타났으나 균열의 발생시점과 위치를 카운트-위치표정으로 어느 정도 추정 가능함을 확인하였다. 표면균열이 브라켓의 두께방향으로 관통한 시점에서는 AE 카운트의 양이 급격히 증가하였으며 카운트-위치표정, 이벤트(event)-위치표정으로 균열의 위치와 발생시점을 명확하게 확인할 수 있었다. 또한 AE 위치표정과 클러스터(cluster) 기능을 이용하여 균열발생 위치 이외의 영역에서 검출된 신호는 잡음에 기인한 것으로 추정할 수 있었다.

주요용어: 음향방출, 매개변수, 피로시험, 균열발생, 필렛용접, 토우 균열, 루트 균열

Abstract This paper presents the result of an investigation on the application of the acoustic emission method to the monitoring of fatigue crack initiation, growth and crack location in welded joints. Fatigue test was carried out for a typical fillet welded joint of ship structure. AE parameter such as ring down count was analyzed in time domain and crack locations were examined by source location and cluster option which is one of the functions of AE signal processor. The usability of AE method was confirmed for the detection of the initiation and location of through crack.

Keywords: acoustic emission, AE parameter, fatigue test, crack initiation, fillet weld, toe crack, root crack

1. 서 론

재료의 미시적인 변형과 파괴 과정을 시험적으로 해석하거나 비파괴검사법으로 구조물의 현 상태를 진단하고 안전도를 평가하기 위해서 음향방출에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 오늘날 많은 구

조물들은 용접에 의해서 만들어지고 있으며 특히 선박의 경우에는 거의 모든 건조과정이 수많은 용접에 의해서 이루어진다. 20년 정도인 선박의 수명 동안 용접부에 대한 정기적인 손상검사가 수행되지만 주요부재의 손상으로 인한 파손사례는 운항 중에 발생하므로 손상을 실시간으로 검출할 수 있는

시스템이 필요하다. 음향방출법은 실시간 모니터링이 가능하지만 많은 용접구조물을 가진 선박의 경우에는 다량의 센서가 필요하게 된다. 하지만 선박의 운항 중 실시간 모니터링을 주요부재에 국한한다면 소량의 센서로도 적용가능하리라 생각되며 본 연구에서는 이를 위한 기초 연구단계로 필렛용접부 피로균열의 발생과 성장에 대한 시험을 수행해 보았다.

선박과 같은 용접 구조물에 대한 음향방출기법의 적용 예는 다른 응용분야에 비해서 현재까지 많지 않지만 압력용기 및 수송관의 경우에는 많은 적용이 이루어지고 있고 해양 자켓 구조에 대한 연구도 지속적으로 수행되고 있다[1,2]. J. S. Mitchell은 North sea Ninian southern platform의 수중 자켓 구조물의 주요부위에 센서를 장착하여 3년이라는 장시간 동안 신호를 수집하였으며[1], 실험실 수준의 해양구조물에 대한 음향방출 신호의 특성에 관한 연구 결과도 있다[2].

정희돈 등은 음향방출법에 의한 용접부의 결함 탐지뿐만 아니라 용접공정의 최적화를 위한 음향방출의 적용 예도 보여주고 있다[3]. 즉, 용접공정 후의 품질이 가장 우수한 경우의 AE 신호를 이용하여 플럭스의 양과 와이어의 공급 속도를 실시간으로 제어하는 것이다. 이외에도 압력용기의 보수 후의 건전성 평가연구[4], 발전소에 사용되는 과열 장치의 온도변화에 대한 용접부 결함 발생에 관한 연구[5], 용접 금속에 대한 파괴 인성치 추정에 음향방출법의 적용 연구[6] 등이 이루어지고 있다.

2. 선박의 필렛 용접구조

선박은 대표적인 대형 용접 구조물이고 선박에서 발생하는 손상의 대부분은 피로하중에 의한 균열로부터 시작되며 이러한 균열은 용접부에서 발생한다. 선박에서 사용되는 용접 방법은 대부분 버트 용접과 필렛 용접이다.

선체의 필렛 용접부에 발생하는 균열은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 횡 방향 균열(transverse crack)과 평행 균열(parallel crack), 그리고 용접부 끝단의 boxing fillet에서의 균열이 있다. 횡 방향 균열과 평행 균열에 대해서는 많은 연구가 이루어져왔으나 boxing fillet에 대한 피로강도 평가는 아직 정립이 되어있지 않으며 S-N 선도에 관한 자료도 충분하지 않다[7].

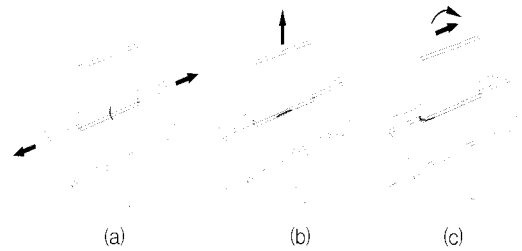


Fig. 1 Crack modes in fillet weld joint
 (a) Transverse crack to fillet weld
 (b) Parallel crack to fillet weld
 (c) Crack in boxing fillet weld

선체구조의 강도는 용접이 완벽하다는 전제하에 평가되고 있다. 그러나 필렛 용접 각장의 부족 및 응력분포의 변화 등으로 인해 용접부 강도가 충분하지 않을 때는 Figs. 2~3에 나타난 바와 같이 균열이 용접부의 내부 루트(root)에서 시작하거나 토우부의 외부 표면에서 균열이 발생하게 되며 피로강도는 상대적으로 저하된다. Fig. 2와 같이 토우부의 표면균열은 피로하중에 의해서 진전하게 되고 결국은 브라켓의 두께를 관통하게 된다. 용접 토우부에서 균열이 발생하는 경우에는 육안으로 초기 확인이 가능하지만 루트부에서 균열이 발생하는 경우에는 균열이 발생하여 용접부를 관통할 때까지 육안으로 발견하는 것은 어렵다. 따라서 용접각장의 설계시 루트부에서의 균열을 피할 수 있도록 충분한 각장 크기로 설계해야 한다.

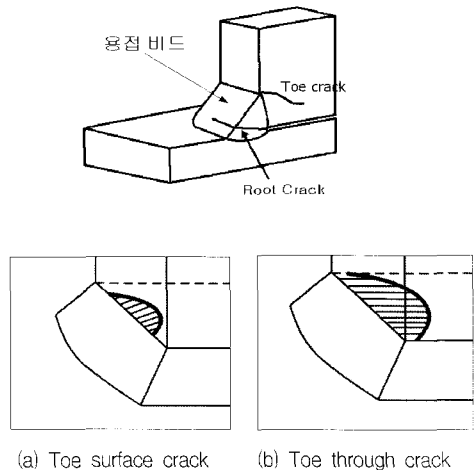


Fig. 2 Crack propagation types at boxing fillet welding bead

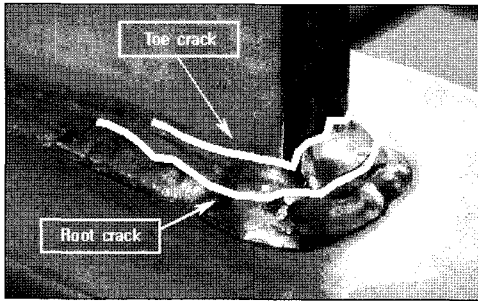


Fig. 3 Through cracks at boxing fillet weld

3. 필렛용접부 피로시험 및 고찰

3.1. 피로시험과 신호처리 방법

선체구조의 전형적인 용접방법인 필렛용접부의 피로시험시 AE를 이용한 균열의 발생 감지, 발생 위치 및 연속적인 균열의 진전 상황을 모니터링하기 위하여 Fig. 4와 같이 시편의 양끝에 AE 센서를 부착하고 피로시험을 수행하였다. 본 시험은 필렛용접부 중 용접부 끝단(boxing fillet)에서의 균열시작 및 거동을 파악하기 위한 것이다.

AE를 이용하여 용접부 균열의 발생 및 성장을 검출하는 방법에는 첫째, AE의 다양한 매개변수로부터 얻어진 신호로부터의 판단, 둘째, 위치표정을 이용한 판단 등이 있다. 본 연구에서는 균열의 개시 시점을 위치표정으로 추정해보았고 누적 카운트 그리고 클러스터 기능으로 얻어진 신호를 균열의 성장 특성과 비교해 보았다.

Figs. 4~5에 시험장치의 전체적인 개략도와 치수를 나타내었다. 균열의 생성을 위해서 응력비(R) 0.1인 3 Hz 정현파의 피로하중을 MTS 피로 하중기를 이용하여 발생시켰다. AE 신호처리를 위하여 컴퓨터에 보드형태로 삽입되는 PAC사의 4 ch. PCI/DSP-4P를 사용하였고 센서는 150 kHz 공진형 센서로 전치증폭기(pre-amplifier)가 내장된 PAC사의 R151센서를 사용하였으며 센서가 시편에 잘 고정되도록 하기위해 Fig. 4에서 보는 바와 같이 마그네틱 고정기구를 이용하였다. 두 센서간의 거리는 800 mm이고 각 센서와 균열의 발생이 예상되는 용접 토우부와의 거리는 325 mm이다. I형 빔과 받침대, 반력상은 볼트로 고정하였으며 MTS 피로하중기와 브라켓도 볼트로 고정을 하였다.

일반적으로 AE의 현장 적용시 150 kHz 부근의

주파수 대역이 가장 적합한 것으로 알려져 있으므로 잡음을 제거하기위한 방법으로 대역 필터 통과 주파수를 100 kHz - 200 kHz로 하였고 문턱값은 50 dB로 하였으며 프리앰프에서 40 dB로 증폭하였고 각 신호는 10 MHz로 샘플링 하였다.

위치표정을 하기위해서는 AE 신호의 전파속도를 정확하게 알아야한다. 두 센서 중간의 임의의 위치에서 연필심을 부러뜨려 센서간의 거리와 센서에 도착하는 AE 신호의 시간차이로 속도를 계산하였다. 이러한 속도 측정 시험을 5회 실시하고 얻어진 평균속도 4.4×10^6 mm/sec를 위치표정에 사용하였다. 위치표정을 위한 신호 인식 조건은 FTC(first threshold crossing)법을 사용하였고 위치표정의 오차를 고려하기위하여 일정 영역의 AE 신호들을 묶어서 분석하는 클러스터 옵션을 사용하였다. 클러스터가 적용되는 영역의 크기는 센서간의 거리의 10 %인 80 mm로 하였다.

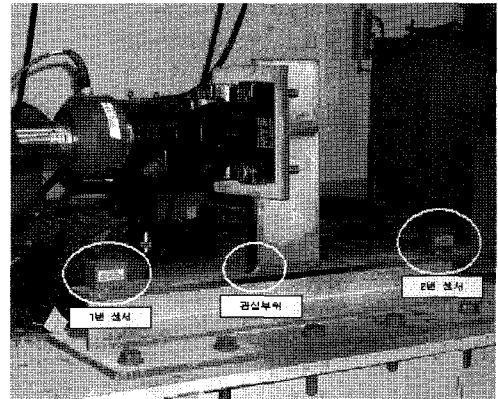


Fig. 4 AE test system

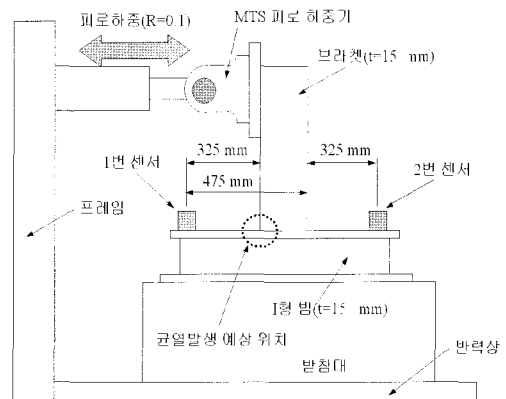


Fig. 5 Schematic of fatigue test and AE sensors

3.2. 시험결과 및 검토

본 연구의 목적은 필렛용접부의 균열을 AE로 탐지하는 것인데 너무 큰 하중으로 시작하면 균열이 바로 발생하고 반대로 너무 작은 하중은 피로균열이 발생할 때까지 많은 시간이 소요될 수 있다. 따라서 본 연구의 목적에 부합되는 적절한 하중 수준을 찾기 위하여 Fig. 6과 같이 하중을 단계적으로 증가(load pattern 1)시켜 피로시험을 하고 AE 신호를 모니터링하였다. 그림에서 A와 B는 하중을 증가시킨 시점이다.

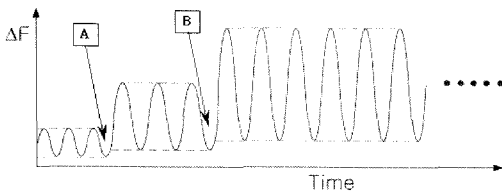


Fig. 6 Load pattern 1 of fatigue test

Fig. 7은 Fig. 6과 같이 단계적인 하중을 받는 시편에 대한 각 센서의 AE 카운트-시간 그래프이다. 하중 증가 시점인 A에서 순간적으로 많은 AE 신호가 나오고 이후의 B부분에서도 하중이 증가할 때 많은 AE 신호가 나왔다. 이것은 하중을 증가시키는 시점에 스트레인 또는 균열의 갑작스런 변화와 시험장치에 사용된 나사 체결체의 기계적 잡음이 혼재되어 나타난 현상이라고 추정된다.

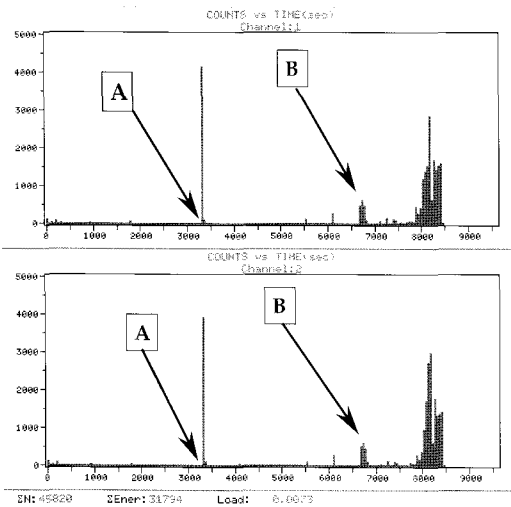


Fig. 7 Count vs time graphs of Ch. 1 & Ch. 2 for load 1

AE 진폭과 누적 카운트를 나타낸 Figs. 8~9 그래프에서도 이러한 잡음의 영향을 확인할 수 있다. 그래프의 A와 B로 표시된 시점에서 각각의 AE 매개변수의 순간적인 증가가 있었음을 알 수 있다.

Fig. 8에서 50 dB 이하의 AE 진폭신호가 표시되지 않은 것은 시험장치의 초기 설정에서 문턱값을 50 dB로 지정했기 때문이다.

이러한 AE 카운트의 분포로는 일정한 피로하중 하에서의 균열 발생을 추정하기 위한 신호분석을 어렵게 한다. 따라서 하중의 갑작스런 변화에 의한 기계적 잡음과 균열의 발생이 일어나지 않도록 하기 위하여 피로하중을 완만하게 증가하도록 하여 잡음의 영향을 최소화한 시험을 다시 실시하였다.

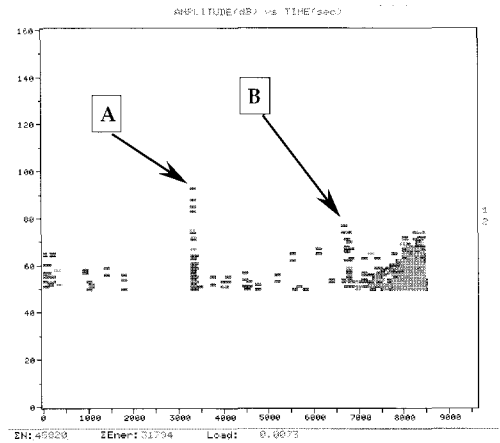


Fig. 8 Amplitude vs time plots of Ch. 1 & Ch. 2 for load 1

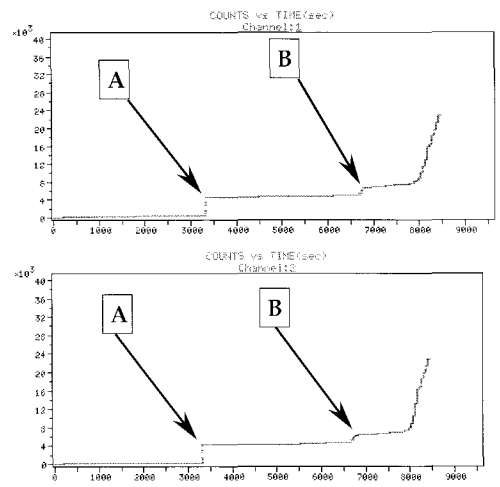


Fig. 9 Cumulative count vs time signals of Ch. 1 & Ch. 2 for load 1

잡음의 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 10과같이 최대 하중이 48 kN에서 60 kN으로 점진적으로 증가(R=0.1)하는 형태(load pattern 2)로 피로하중을 가하여 실험을 수행하였다. 하중을 증가하는 시점부터 용접 비드에 상당히 많은 관통균열이 발생할 때까지의 AE 카운트-시간그래프를 Fig. 11에 나타내었다. 피로시험 중간 중간에는 수시로 비파괴 시험법의 일종인 PT(penetration test) 시험법에 의한 육안검사로 용접 토우부의 균열을 관찰하였다. PT 검사로부터 Fig. 11의 시간축을 표면균열 영역과 관통균열 영역으로 구분하였고 C, D, E 시점에서의 AE 신호를 분석해보았다.

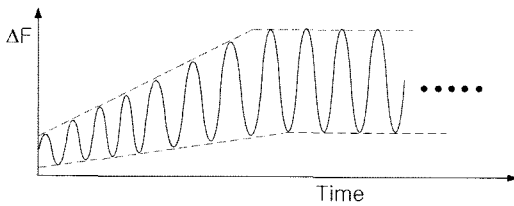


Fig. 10 Load pattern 2 of fatigue test

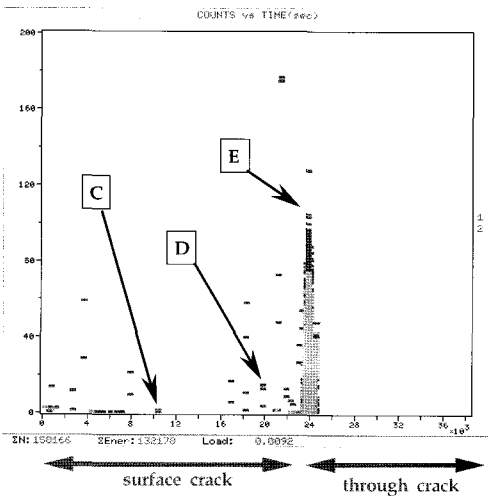


Fig. 11 Count vs time plots of Ch. 1 & Ch. 2 for load 2

Fig. 12는 Fig. 11의 C 시점에서의 이벤트-위치표정 그래프와 카운트-위치표정 그래프를 나타낸 것이다. Fig. 5에서와 같이 균열발생 예상 위치는 1번 센서로부터 325 mm 지점인데 육안 검사로도 표면 균열을 확인할 수 있었고 실제 위치표정 신호도 약 300 mm 부근에서 발생하였다. 신호처리의 오차를 감안한다면 AE 위치표정으로 표면균열의 검출이

어느 정도 가능하다고 판단된다. 균열 발생의 가능성이 전혀 없는 약 100 mm에서도 위치표정 신호가 검출되었는데 이것은 잡음으로 생성된 AE 신호라고 판단된다.

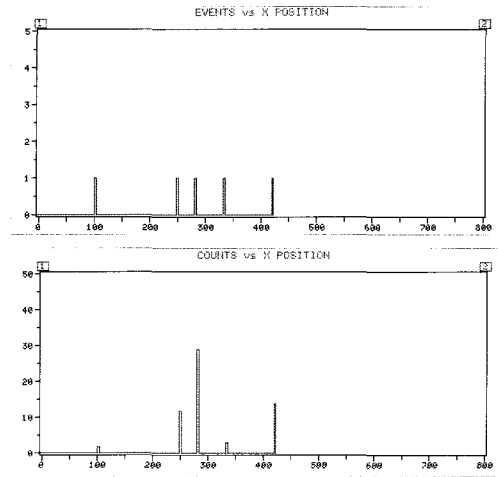


Fig. 12 (1) Event vs source location and (2) Count vs source location at time C (for load 2)

1번 센서로부터 약 475 mm 지점의 용접 토우부는 압축응력만 받고 있지만 위치표정 신호는 발생하였다. 하지만 PT에 의한 육안검사는 용접 토우부의 균열을 확인할 수 없었다. 용접 토우부에 압축응력만 작용한다면 균열의 성장이 힘들겠지만 피로하중을 받는 브라켓의 움직임이 약간이라도 기울어져서 좌우하중을 받게 된다면 전단응력에 의한 토우부 또는 루트부 균열의 가능성은 존재한다고 판단된다.

일반적으로 위치표정은 이벤트로 나타낸다. 하지만 표면균열의 경우에는 신호가 미약하므로 Fig. 12에서 보는 바와 같이 이벤트의 발생횟수가 전 영역에서 같음으로 인해 균열발생 위치와 잡음의 위치를 구별하기가 힘들어진다. 따라서 관통균열의 발생시점 이전까지는 이벤트에 포함된 카운트를 모두 나타내고 상대적인 발생빈도를 비교하는 것이 표면균열과 잡음을 구분하는 좀더 용이한 방법이라고 판단된다.

Fig. 13은 D 시점에서의 카운트-위치표정을 나타낸 것으로서 잡음의 영향으로 인해 균열발생의 가능성이 거의 없는 약 160 mm 위치에서 순간적으로 많은 카운트-위치표정신호가 발생하였음을 알 수 있다. 하지만 1번 센서로부터 325 mm 지점 근방에서는 지속적으로 카운트-위치표정 신호가 검출됨도 함께 확인할 수 있다.

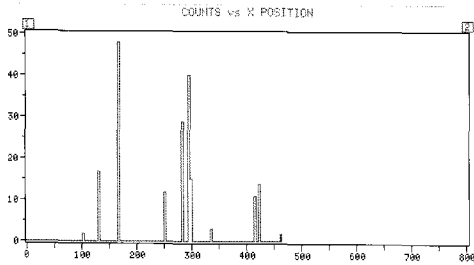


Fig. 13 Count vs source location at time D (for load 2)

Figs. 12~13으로부터 표면균열 발생 예상 영역에서 가장 많은 카운트-위치표정 신호가 나왔으나 잡음에 의한 위치표정 신호도 검출되었기 때문에 균열의 존재 여부를 AE 위치표정 모니터링만으로는 판단하기는 쉽지 않다. 따라서 어느 정도의 위치표정 오차를 감안하고 잡음의 영향에 의한 모니터링의 왜곡을 보정하기 위하여 일정 영역의 신호를 묶어서 분석하는 클러스터 기능을 사용할 필요가 있다.

Figs. 14~15에 나타낸 바와 같이 E 시점부터는 위치표정 신호가 균열 예상위치에서 카운트뿐만 아니라 이벤트도 다량으로 검출되어 육안으로 시편의 용접부를 확인한 결과 토우부의 표면균열이 관통균열로 성장하고 있었다. 또한 AE 누적 카운트를 나타내는 Fig. 16에서도 관통균열이 관찰되는 E 시점부터 AE 신호의 양이 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 관통균열의 개시시점은 AE 신호의 카운트-위치표정과 이벤트-위치표정 모니터링을 통하여 판단할 수 있었으며 균열발생위치도 정확히 찾을 수 있었다.

잡음의 영향에 의한 위치표정 모니터링의 왜곡현상을 보정하기 위하여 클러스터 기능을 이용하여 Fig. 14에서와 같이 그룹화하였고 Fig. 17에서 그룹화된 Y영역과 Z영역의 누적 이벤트-시간 그래프를 나타내었다. 클러스터 기능의 그룹화 조건은 80 mm 내에서 발생한 위치표정 신호는 하나의 그룹으로 묶어지도록 하였다. Fig. 17을 살펴보면 Fig. 13에서 균열 발생 신호처럼 보였던 약 160 mm 위치(영역 Y), D 시점에서 이벤트 신호는 그 이후 신호가 발생하지 않았고 균열발생 예상 위치였던 325 mm 위치(영역 Z)에서의 이벤트 신호는 지속적으로 증가하였으며 관통균열이 관찰된 시점부터는 급격히 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 잡음의 영향으로 인한 위치표정 모니터링의 왜곡현상을 클러스터 기능으로 어느 정도 보정할 수 있음을 확인하였다.

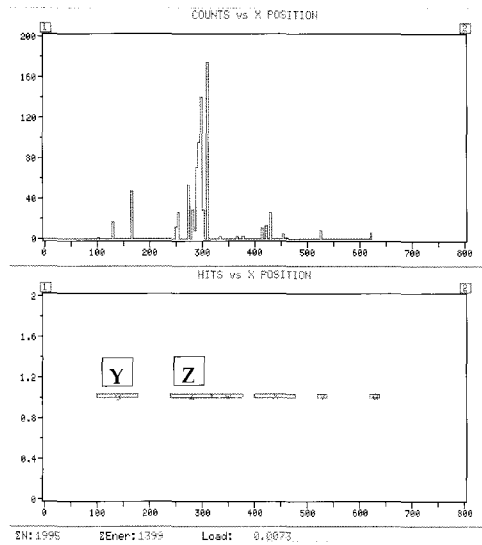


Fig. 14 Count vs source location at time E and grouping source location using cluster function (for load 2)

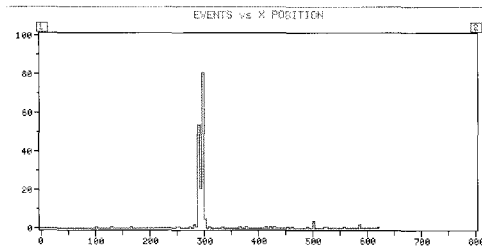


Fig. 15 Event vs source location at time E (for load 2)

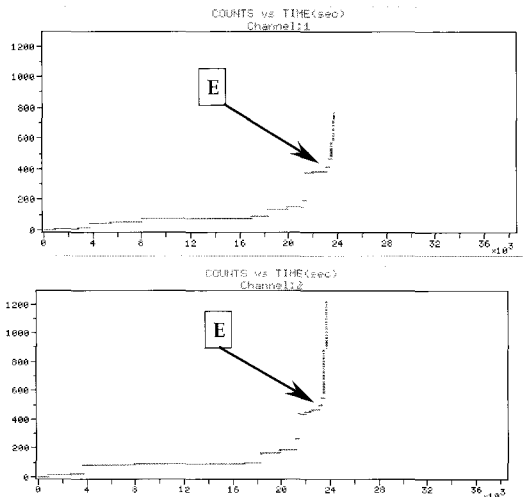


Fig. 16 Cumulative count vs time signals of Ch. 1 & Ch. 2 (for load 2)

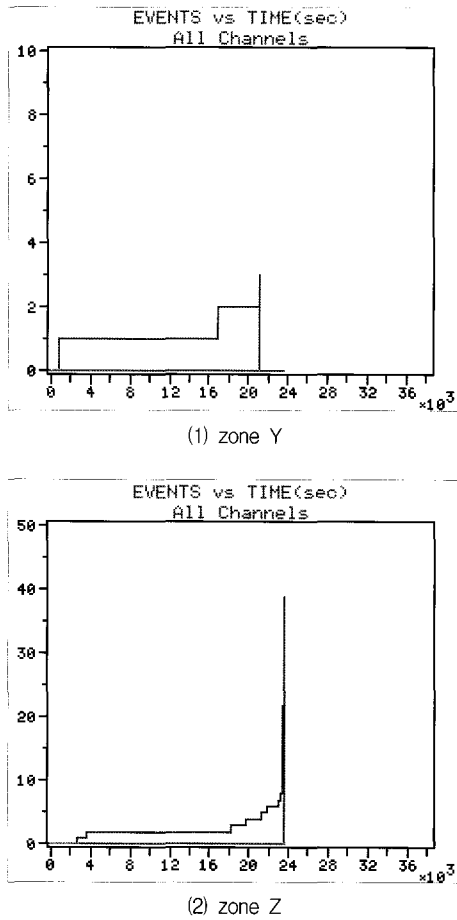


Fig. 17 Events of source location group by cluster function(Refer to Fig. 14, for load 2)

4. 결론

선박 건조시의 전형적인 용접형태인 필렛용접부 피로시험에서의 균열 검출에 대하여 AE를 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 피로하중의 증가시점에서 순간적으로 많은 AE 신호가 나왔는데 이것은 스트레인 또는 균열의 갑작스런 변화와 시험장치에 사용된 나사 체결체의 기계적 잡음이 혼재되어 나타난 현상이라고 추정되었다. 이러한 잡음의 영향은 피로하중의 증가를 완만하게 함으로서 해결할 수 있었다.
- 2) 용접 토우부의 표면균열이 관통균열로 발전하기 전까지의 AE 신호는 비교적 미약하게 나타났고 누적 카운트 증가량도 작았으나 표면균열 발생 예상 영역에서 가장 많은 카운트-위치표정을 얻을 수 있었다.

- 3) 표면균열이 판의 두께 방향으로 관통한 후의 AE 신호 양상은 카운트의 양이 급격히 증가했으며 카운트, 이벤트-위치표정 두 가지 신호 모두 균열의 위치를 명확히 확인할 수 있었다.
- 4) 초기 표면균열 진전시에 잡음의 영향으로 인한 위치표정 모니터링의 왜곡현상을 보상하기 위하여 클러스터 기능을 사용하여 이벤트의 변화량을 조사한 결과 잡음으로 인해 위치표정 신호가 검출된 영역은 그 시점 이후에는 신호의 발생이 없었고 관통균열이 발생한 용접 토우부에서는 이벤트 신호의 지속적인 증가가 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같이 AE 신호의 카운트-위치표정과 클러스터 기능을 적절히 사용함으로써 잡음으로 발생된 신호를 구분할 수 있었다.

참고문헌

- [1] J. S. Mitchell, et al. "Monitoring structural integrity of north sea production platforms by acoustic emission," Offshore Technology Conference, pp. 111-118, (1992)
- [2] 원순호 외 1명, "음향방출법을 이용한 해양구조물의 온라인 감시에 관한 실험적 연구," 한국해양공학회지, Vol. 13, No. 3, pp. 73-82, (1999)
- [3] 정희돈 외 2명, "용접부검사법으로서의 Acoustic Emission," 대한용접학회지, Vol. 11, No. 2, pp. 1-12, (1993)
- [4] J. R. Kwon, et al., "Acoustic emission testing of repaired storage tank," Pressure Vessels and Piping, Vol. 78, pp. 373-378, (2001)
- [5] B. C. Morgan, et al., "Inspection of power plant headers utilizing acoustic emission monitoring," NDT & E International, Vol. 32, pp. 167-175, (1999)
- [6] X. Long, et al., "Investigation of fracture and determination of fracture toughness of modified 9Cr-1Mo steel weld metals using AE technique," Materials Science & Engineering, A270, pp. 260-266, (1999)
- [7] W. S. Kim, et al., "Fatigue test of typical weld joints (A proposal of S-N diagram for welded ship structure)," Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., (2000)