



## 지상탱크 저판부의 부식손상 평가를 위한 음향방출 신호의 분석

†김승대 · 정우광\* · 이종오\*\*

서울시립상계직업전문학교 품질비파괴검사과, \*국민대학교 신소재공학과,  
\*\*한국기계연구원 시험평가센터 비파괴평가그룹  
(2007년 10월 24일 접수, 2007년 12월 11일 채택)

## Characteristics of Corrosion Damages in Bottom Plate of Above Ground Tank by Acoustic Emission Signal

†Sung-Dai Kim · Woo-Gwang Jung\* · Jong-O Lee\*\*

Dept. of Quality Non Destructive Testing, Seoul Sanggye Vocational School,  
Seoul Nowon-gu Sanggye 6-dong 771-2, Korea

\*Dept. of Advanced Materials Engineering, Kookmin University, Seoul Seongbuk Jeongneung-dong 861-1, Korea

\*\*Dept. of Nondestructive Evaluation Group Test & Evaluation, Korea Institute of Machinery & Materials, Kyungnam,  
Changwon-si, Sangnam-dong 66, Korea

(Received October 24 2007, Accepted December 11 2007)

### 요 약

충수된 지상 탱크 저판부에서 발생하는 AE 신호 특성을 관찰하여 누수 등 손상에 대한 신호를 분석, 평가하였다. EMI 잡음신호를 에너지, 카운트, 지속시간 등과 누적진폭 분포상의 기울기를 비교 분석하여 제거하였다. EMI 신호는 높은 에너지, 카운트, 지속시간을 나타내며, 누적 분포상에서 큰 기울기를 갖는 특성을 보였다. 남은 AE 신호의 위치표정과 클러스터 분석을 통해 부식손상의 가능성을 추정할 수 있었으며 총 20개의 클러스터로 에너지는 최대 11,990에서 8,565까지 이벤트는 최대 8에서 5까지 나타났다. 개방에 의한 손상확인을 하지 못했으나 보다 높은 고감도의 센서와 문턱값을 60 dB 이상 높여서 평가한다면 보다 정확한 발생위치 추정이 가능하리라 본다.

**Abstract** – Under the AE methods, the valid condition analysis and evaluation the leak etc, resulted by the AE signal pattern on the bottom plate of ground tank at full. In next more, the gradient of accumulation amplitude distribution analysis and comparison the energy, count, and duration time that noise of EMI signal were removed. EMI signal showed height-energy, count, and duration time, it also appeared great gradient of accumulation distribution. Then, with the pure remaining AE signals cluster analysis and location. It would possibly assume of damage with corrosion. Total cluster 20 and energy showed between the maximum 11,990 and 8,565 which is much lower than above figure and event number showed from 8 to 5. Even when it difficult to certify damage by open, as it is raised higher height-sensitivity and threshold by 60 dB. It would possibly presume of location source more accurately.

**Key words** : Acoustic Emission(AE), Condition-Based Maintenance (CBM), Electronic Magnetic Interference (EMI), Mechanical Noise

### I. 서 론

대부분의 국내 석유화학 플랜트용 지상탱크(above ground tank)는 주기적인 개방검사(Time-based Maintenance : TBM)가 실시되고 있으나 관련법규와 제도의 미흡 및 재정적인 문제로 인해 모든 탱크에는 적용되

지 않고 있다. 이는 장기간 사용에 의한 안전성 문제와 누설 사고 발생으로 인한 심각한 환경적 문제를 야기시킬 수 있다. 이러한 문제들 중 탱크 개방에 따른 작업비용 및 보수, 가동 중지 시간 등에 소요되는 비용의 심화가 가장 큰 요인으로, 상태평가(Condition-Based Maintenance : CBM)를 기초로 하여 개방검사의 필요 여부를 판단하는 음향방출(Acoustic Emission : AE) 기술이 요구되고 있다.

†주저자:duddudgu@empal.com

AE는 기존 비파괴 검사(Non-Destructive Testing : NDT)와 달리 탐촉자를 고정하고 취약부위의 응력집중에 의한 균열의 발생 및 성장, 자구의 이동, 상변태, 부식 감육 등 재료 내의 탄성장의 변화를 검출하여 평가하는 방식이다[1].

이 중 탱크 저판부의 부식손상상태의 평가 방법의 개발은 1989년 영국 석유회사의 요청으로 1990년대 중반 AE user group이 결성되어 미국, 독일, 영국, 네덜란드 외 서구 남유럽 여러 나라에서 이미 3,000기 이상이 시험되었으며 이웃 일본도 수많은 실험을 통한 권고지침 등을 정리하여 마련한 상황이다[2-6]. 그러나 AE 특성상 해석의 난해함 및 활용 데이터의 부족 등을 이유로 국내의 적용 사례는 많지 않다[7].

본 연구는 가동 중인 지상 탱크 저판부에서 발생하는 부식 감육과 공식 등의 부식 손상에 의한 저판부의 AE 신호 특성을 확인하고 현장 적용의 기초자료로 활용하기 위한 목적으로 직경 60m인 지상탱크에 신호 검출을 위한 센서와 내부의 응축 잡음 등의 제거를 위한 가드 센서를 설치하여 AE 데이터를 수집하였다. 바람 및 기계적 진동 등 기타 여러 환경 잡음을 걸러내는 일련의 과정으로 AE신호의 히트(hits), 이벤트(event), 카운트(counts), 지속시간(duration), 상승시간(rise time), 진폭(amplitude), 에너지(energy) 등의 AE 활동(activity) 특성을 비교 분석[8,9]하므로 저판부의 감육과 누수(부식에 의한 누설 및 균열) 등 손상에 대한 상태를 평가하고자 하였다.

## II. 시험방법

본 시험에서 사용된 저장탱크는 1989년 건설되어 17년간 사용 중인 물(water) 저장탱크로 전기방식 및 절연체를 사용하지 않고 내면 라이닝이 없으며 제원은 Table 1과 같다.

음향방출 탐지를 위해 사용된 센서는 PAC사의 전치 증폭기(pre-amplifier)가 내장된 공진주파수 60 kHz의 R61를 사용하였다. 신호의 감쇠를 고려하여 외장 전치

Table 1. Specification of the tank tested.

Year Built	Diameter	Height	Thickness
1989	60 m	20 m	7 mm
Columns	Lining	Mixer	Anode/CP
Yes	None	None	None
Roof Type	Base	Insulation	Heater
CRT	Sand	None	None

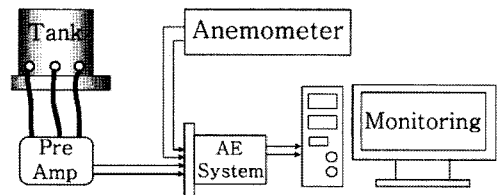


Fig. 1. Block diagram of AE inspection system.

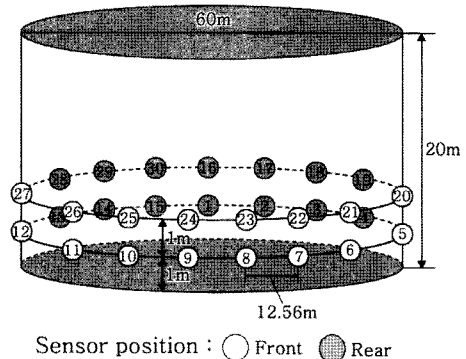


Fig. 2. Sensor position for AE testing

증폭기를 이용하여 40 dB를 증폭시켰다. 침전물(sludge)의 높이를 고려하여 탱크 하부의 AE 감지를 위한 센서와 지붕부의 액체 낙하에 기인한 잡음을 제거할 목적으로 센서를 총 2단으로 배열하였다. Fig. 1은 시험장치의 개략도이다. 그림에서 보는 것처럼 센서에서 검출된 신호는 외장 전치증폭기를 통하여 AE 장비에 연결되며 PC를 통해 신호처리 된다. AE 장비의 외부 입력으로 풍속계(anemometer)의 신호를 입력한다. 원주방향에 대하여 등 간격으로 12.5 m 간격을 두어 지상에서 1 m 높이에 1단(이하 실측센서), 2 m 높이에 2단(이하 가드센서)으로 각 15개씩 총 30개를 배치하였고 Fig. 2는 센서배치를 나타낸다.

음향방출 실험을 위한 저장탱크는 잡음을 최소화하기 위해 시험 24시간 전 연결 밸브를 닫고 유체의 유동을 최소화 하였다.

탱크 표면의 도료에 의한 음향방출 신호의 손실을 최소화하고 충분한 감도를 얻기 위해 센서 부착 위치를 약 5×5 cm 크기로 그리UNDER 연마하였다. 접촉매질로는 진공 그리스(vacuum grease)를 사용하였으며 센서의 고정을 위해 마그네틱 홀더(magnetic holder)와 고정테이프를 사용하였다.

샤프심 파괴(0.3 mm pencil break test) 시험을 실시하여 발생한 인공 AE 신호가 90±2 dB내의 진폭 감도 범위 내에 있는 것을 각각 확인하였다. 또한, 나무망치로

Table 2. Information of AE testing.

Calibrating AE system		Cable	Sludge level	THR
Disp AE Work Station		RG58AU	0.5 m	48 dB
AE test level		Setting time	AE test temp °C	Weather
16 m		24 hours	Ambient (14°C)	Calm/Sunny
Sensor			Noise/Filter detail	
Total	Rows	Setting height		
30	2	1.0 m 2.0 m	Electronic magnetic interference(EMI), internal condensation and mechanical noise	

탱크 벽면을 3차례 타격하여 음파의 전달을 통하여 센서의 전체적인 감도와 위치표정(부착 감도)을 확인하였다.

풍속계와 누설감시기(leak monitor)를 사용하여 탱크 주변에 부는 바람의 유입 및 유출 관 내부의 유체이동 등에 의한 배경 잡음 정보를 취득한 다음 최적의 신호 데이터를 얻기 위해 문턱값(threshold), 이득(gain), 증폭 등을 조절하였다. 측정을 위한 AE 장비로는 PAC사의 32 Channel Disp AE Work Station이 사용되었고 시험을 통한 AE 데이터는 3시간동안 실시간으로 시스템에 저장되었으며 AE 시험의 개략적인 정보는 Table 2에 나타내었다.

### III. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1. AE 실험 결과

탱크 저판 이상부에서 발생하는 AE신호들 중 탱크 저판이나 외벽을 통하여 센서로 전달된다. 종파는 센서가 부착된 부분까지 전달되면서 감쇠에 의해 신호는 약해지고 모드 변환에 의해 신호가 복잡하여지는 반면 물을 통과하여 직접 센서 쪽으로 전달된 종파는 신호의 왜곡 없이 거의 모든 거리에서 측정된다[8]. AE 법에 의한 탱크 저판부의 부식손상 평가 시험은 통상 1시간 계측으로 실시된다[4-7]. 그러나 개별 센서에서 잡음 신호가 검출되는 경우에는 계측 시간을 연장하여 잡음이 없는 시간대의 것을 이용하여 해석할 필요가 있으므로 본 시험은 약 3시간 동안 측정하였다.

Fig. 3은 문턱 값을 48dB로 설정하여 시간에 대한 전체 채널의 히트 수를 (a)에 나타내며 총 3,980,650개

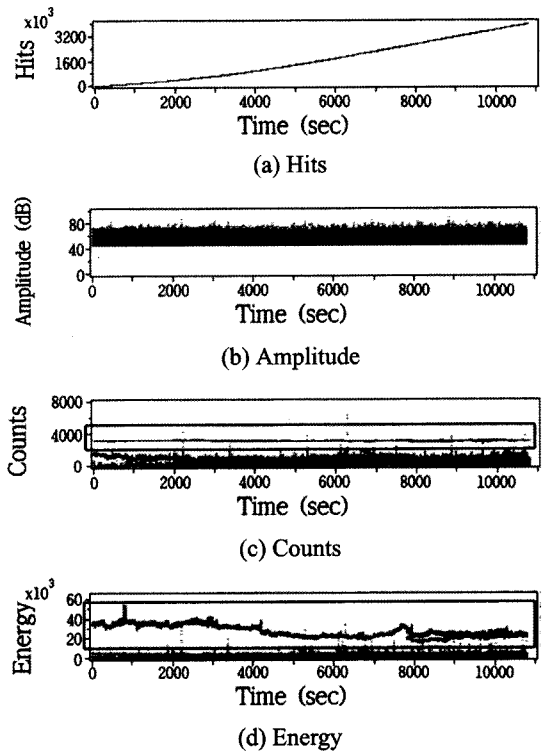


Fig. 3. Result of AE testing by time.

가 발생하였다. (b)는 시간에 대한 진폭을 나타낸 것으로 대부분 45~75 dB 영역 내에 분포하며 75 dB 이상의 고진폭도 발생하였다. (c), (d)는 각각 시간에 대한 카운트와 에너지를 나타낸 것으로 카운트와 에너지는 유사한 거동을 보인다. (c)의 3,000대의 카운트와 (d)의 상부에 존재하는 에너지 파형은 전자기 간섭(Electronic Magnetic Interference : EMI)에 의해 발생하였다.

발생된 AE 신호의 발생기구의 분석방법으로 power law model이 이용되는데, 일반적으로 peak amplitude의 분포는

$$N(A_i) = C(A_i)^{-m} \tag{1}$$

로 나타낼 수 있고[10], 여기서  $N(A_i)$ 는 peak amplitude  $A_i$ 를 가지는 신호발생 수이고  $C$ 는 비례상수인데,  $m$ 이 크다는 것은 발생된 AE 신호중 낮은 진폭의 신호비율이 많다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 시험시간 동안 잡음을 고려하지 않은 누적 진폭분포도이다. 대개의 경우 AE 신호는 누적 진폭 분포 상 1개의 직선 성분으로 관찰되나 3개의 기울기가 나타났다. 이는 다양한 요인에 의한 잡음신호들이 2가

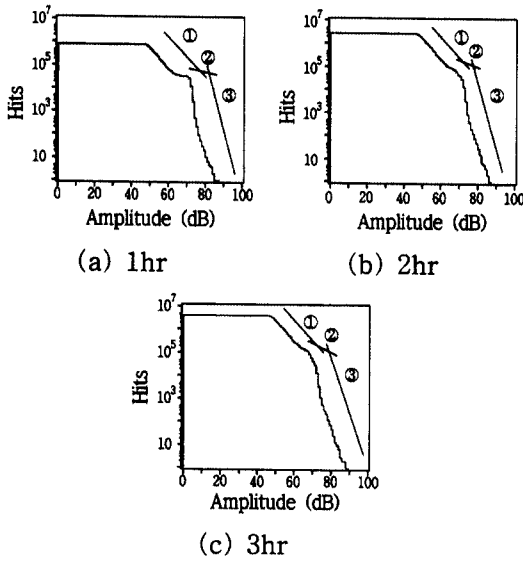


Fig. 4. Change of hits for all channels with time cumulation.

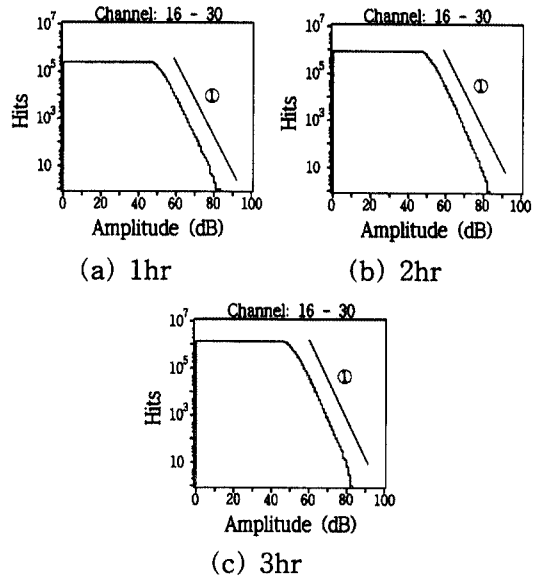


Fig. 6. Change of hits for guard channels with time cumulation.

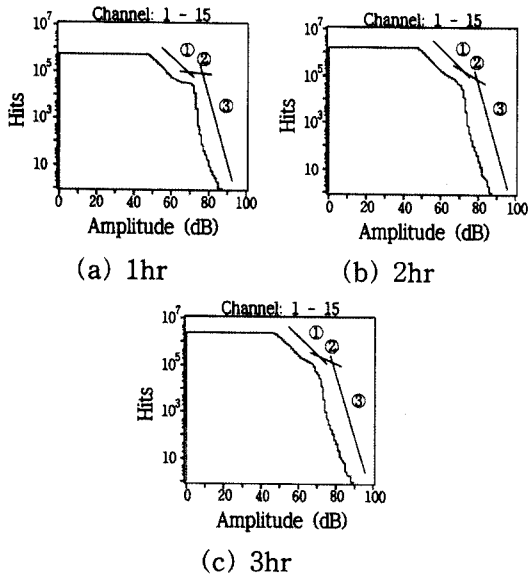


Fig. 5. Change of hits for measurement channels with time cumulation.

지 이상 혼재되어 있음을 의미한다. 시간의 경과에 따라 ②번 기울기의 변화를 볼 수 있다.

Fig. 5와 같이 실측센서의 기울기는 전체 기울기와 유사한 형태로 시간에 따라 변화하였고 Fig. 6의 가드 센서는 1개의 일정한 기울기로 잡음신호의 영향은 실측센서에 집중됨을 알 수 있다. Table 3은 측정된 기울기 값(m)이다.

Table 3. Gradient in hits vs amplitude. (-)

Channel	Time	①	②	③
All	1 hr	0.074	0.005	0.253
	2 hr	0.077	0.025	0.253
	3 hr	0.077	0.034	0.238
Measurement	1 hr	0.064	0.006	0.263
	2 hr	0.069	0.041	0.253
	3 hr	0.066	0.030	0.238
Guard	1 hr	0.136		
	2 hr	0.139		
	3 hr	0.148		

### 3.2. 잡음 신호의 특성

시험을 진행하는 동안 EMI와 기계적인 소음 및 내부 응축, 풍속변화에 의한 배경잡음이 나타났다.

발생한 EMI는 두 종류로 하나는 매우 짧은 AE 카운트를 가진 신호이며 전체 채널에서 카운트의 low level을 4로 high level을 10<sup>8</sup>로 프론트 엔드 필터 세팅에 의해 필터링하여 제거하였다. 다른 하나는 CH 3번과 CH 10번에서 탐지된 신호로 Fig. 7과 같이 다른 센서보다 높은 에너지와 카운트를 가지며, Fig. 8(a), (b)와 같이 전체 시험시간 동안 10<sup>5</sup> μs의 일정한 신호형태를 나타내었다. 이는 너무 긴 지속시간이 발생하여 장비의 측정 한계를 넘었고 측정한계(최대값)인 10<sup>5</sup> μs에

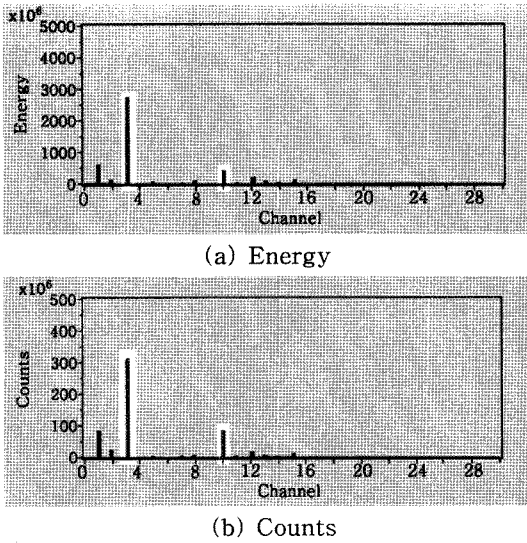


Fig. 7. EMI signal characterization for all Channels.

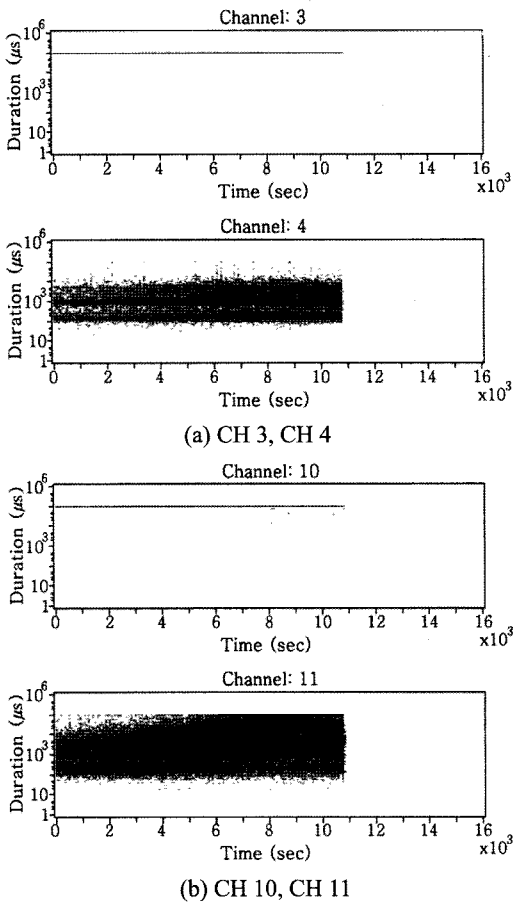


Fig. 8. Change of duration of time in EMI signal characterization.

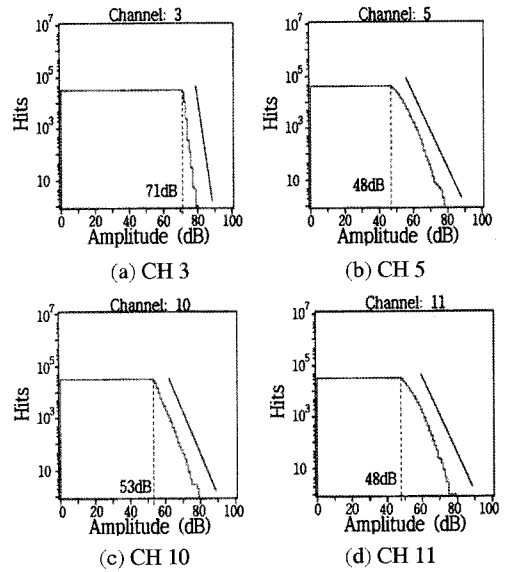


Fig. 9. Change of hits with amplitude different channels.

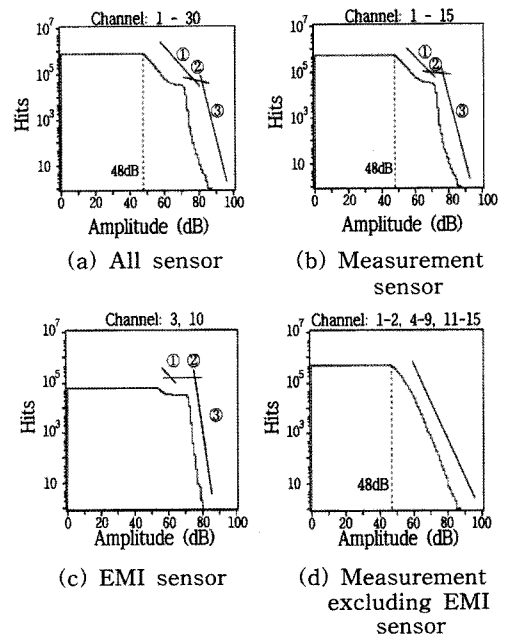


Fig. 10. Change of gradient in hits with different channels.

일직선의 형태를 나타낸다. 일반적으로 카운트가 큰 만큼 높은 에너지(큰 최대 진폭치)를 나타내며 지속시간과 종합하여 입력된 신호의 대략적인 파형에 관한 정보를 얻을 수 있다. 이 정보로 다른 발생원을 식별할 수 있다.

다른 실측 CH의 히트에 대한 진폭의 기울기를 Fig. 9

에 비교하였다. CH 3은 0.416의 높은 기울기를 형성하였고 CH 10은 0.142로 다른 실측 CH의 평균 기울기인 0.115보다 약간 높은 기울기를 갖는다. 이는 Fig. 7에서 보는 것처럼 CH 3과 CH 10을 비교할 때 CH 3의 약 1/10배의 약한 EMI의 발생으로 기울기의 변화가 크지 않은 것으로 사료된다. 이들 센서에 의한 EMI는 전체 기울기에 영향을 미치며 Fig. 10과 같이 CH 3과 CH 10을 제거하면 3개의 기울기가 1개의 기울기로 변화됨을 볼 수 있다. 따라서 CH 3과 CH 10은 센서 이상에 의한 EMI로 판단할 수 있다.

시험 중 02:21:19부터 평균 2 m/sec이던 풍속이 11.5 m/sec로 증가하였다. Fig. 11은 풍속의 상승과 유사한 시간대에 에너지 및 카운트가 증가하였고 이는 풍속의 영향으로 오인할 수 있다. 그러나 풍속이 증가하였음에도 불구하고 히트 수는 오히려 포물선을 그리며 감소하는 것을 볼 수 있다. 02:00~02:21까지의 채널별 기울기를 분석한 결과 02:11:19부터 EMI가 CH 1에 발생하였으며 이는 Fig. 11의 에너지와 카운트가 증가하는 시간과 동일하였다.

Fig. 12와 Fig. 13은 시간에 따른 에너지와 카운트 수

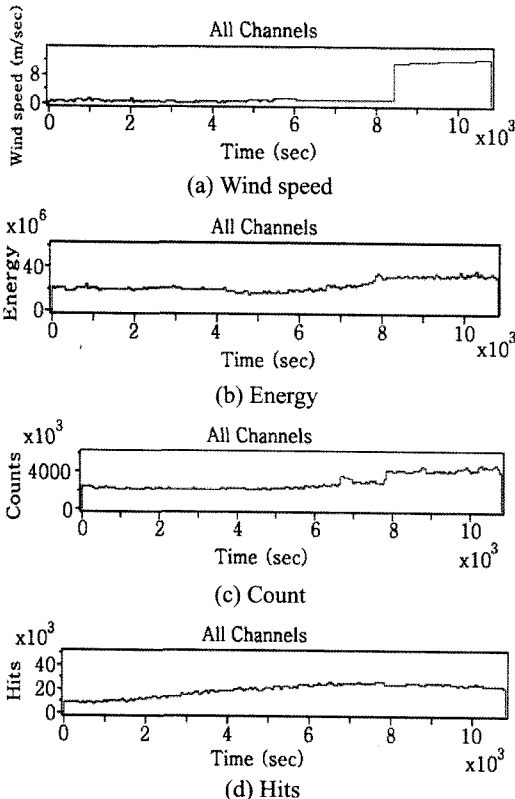


Fig. 11. Change of AE signal by raising wind speed.

의 변화로 02:11이후 CH 1에 EMI가 발생하고 점차 CH 3과 CH 10의 EMI가 감소함을 알 수 있다.

Fig. 14는 시간에 따른 CH 1의 기울기 변화로 ②의 기울기가 증가하여 CH 3과 CH 10에 나타난 특성과 같이 기울기가 0.121에서 0.270으로 증가하였다.

Fig. 15는 02:00~02:21시간 사이에 실측센서들 중 CH 3과 CH 10을 제거하면 0.080과 0.188의 2개의 기울기를 나타내며 CH 1을 추가로 제거하면 0.130의 1개의 특성 기울기를 나타냈다. 이 두 번째 EMI 신호는 높고 일정한 지속시간과 높은 에너지 및 카운트의 특징을 갖는 신호로 누적 진폭분포에서 특성 기울기를 가지므로 전체 기울기에도 매우 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

평가 데이터로 활용되지 않는 CH 16~CH 30에서 에너지와 카운트는 Fig. 12와 Fig. 13에서 보듯 특이사항을 볼 수 없고 누적 진폭분포에서도 특별한 기울기의 변화는 나타나지 않았다. 하지만 상승시간은 Fig. 16에서 보듯 전체 시험 시간 동안 CH 25, 26, 28, 29, 30에

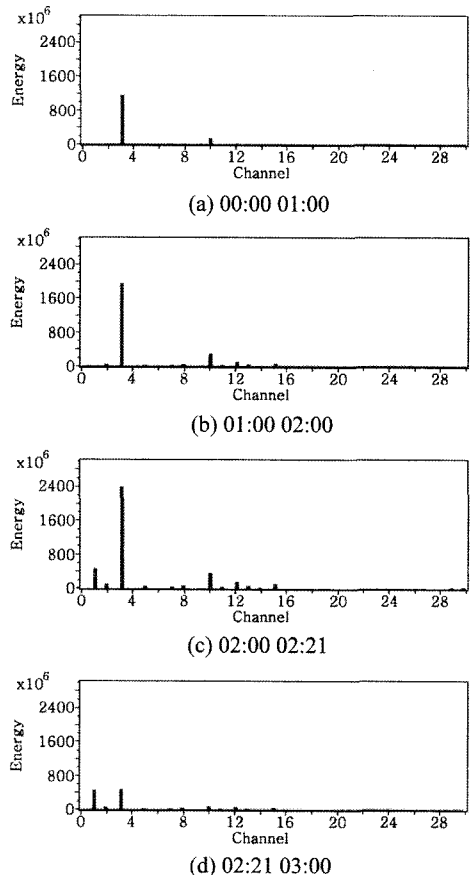
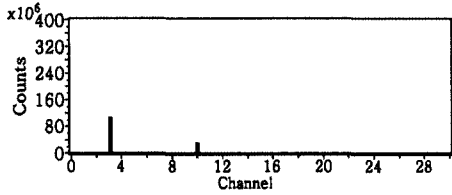
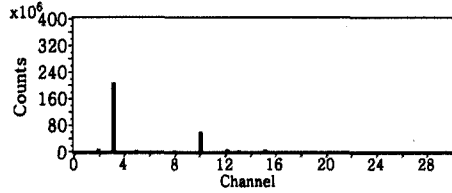


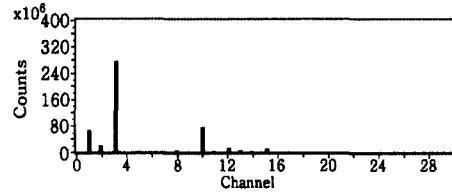
Fig. 12. Change of energy by channels in different time.



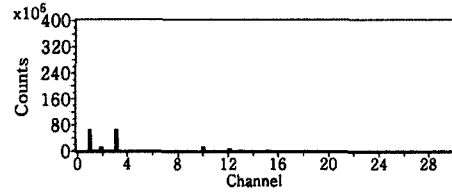
(a) 00:00 01:00



(b) 01:00 02:00

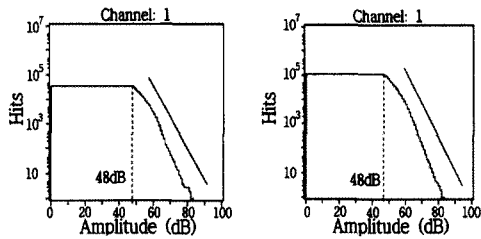


(c) 02:00 02:21



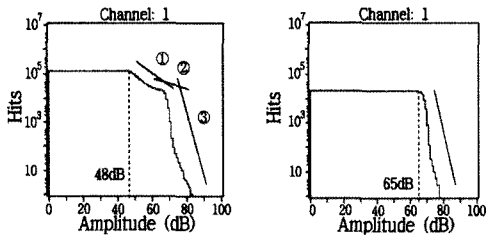
(d) 02:21 03:00

Fig. 13. Change of counts by channels in different time.



(a) 00:00 ~ 01:00

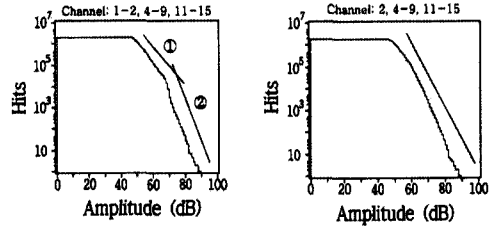
(b) 01:00 ~ 02:00



(c) 02:00 ~ 02:21

(d) 02:21 ~ 03:00

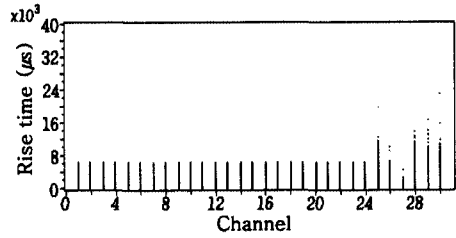
Fig. 14. Change of hits gradient in CH 1 in different time.



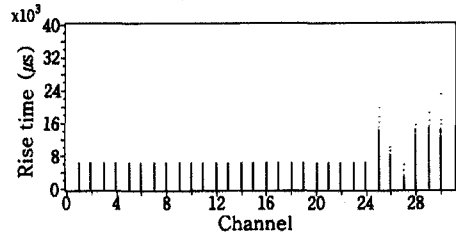
(a) CH 3, CH 10 excluding

(b) CH 1, CH 3, CH 10 excluding

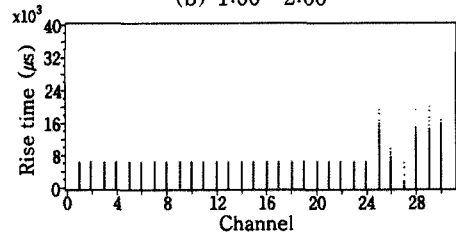
Fig. 15. Change of hits gradient in 02:00~02:21.



(a) 0:00 ~ 1:00



(b) 1:00 ~ 2:00



(c) 2:21 ~ 3:00

Fig. 16. Change of rise time in channels with time.

서 높게 나타났고 CH 27에서는 상승시간이 오히려 낮게 나타났다. 따라서 신호발생기구의 변화는 없는 것으로 판단되며 기율기 변화없이 Fig. 17에서 보듯이 단지 히트 수가 대폭 낮아진 것으로 보아 센서의 접촉 불량으로 인한 감도 저하로 판단된다. 실측 센서에서도 다른 요인에 의한 변화가 없다면 상승시간의 비교로 실험 중 센서의 감도를 추정할 수 있을 것으로 본다.

탱크 지붕에 응결된 물방울의 낙하에 의한 신호는 반드시 실측센서보다 가드센서에서 먼저 검출되기 때문에 신호의 검출 시간차로 용의하게 인식되며 제거가 가

능하다. 각각의 센서로부터 탐지된 연속형 신호들은 대부분 전원 장치로부터 기인했을 것으로 사료된다. 모니

터에 고정되었던 풍속계가 시험 후 떨어져 있었으며 지면에 떨어지면서 고장이 발생하여 Fig. 11(a)와 같은 풍속의 변화를 나타낸 것으로 추정된다.

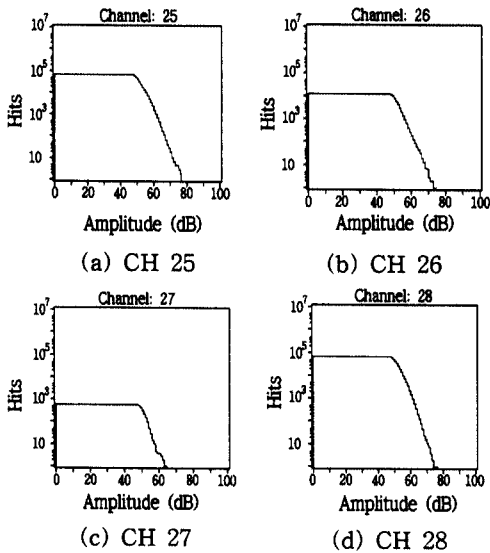
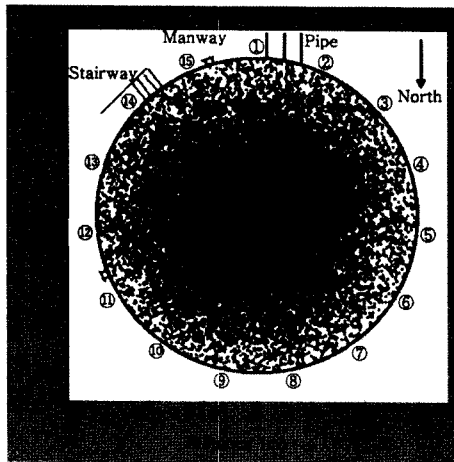


Fig. 17. Change of hits with amplitude in different channels.

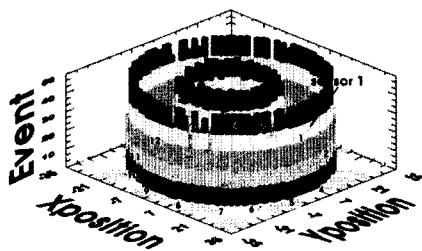
### 3.3. 결합 신호의 분석

부식손상 평가 시험은 통상 1시간 계측으로 00:00~01:00의 측정 결과를 이용하였고 EMI 연속 신호가 탐지된 CH 3과 CH 10을 제외한 모든 채널에서 균일한 신호를 얻었다. CH 3과 CH 10의 연속된 신호를 여과한 후 CH 3은 어떤 히트도 남아 있지 않았고 CH 10은 단지 7개의 히트만이 남았으나 분석의 정확성을 위해 이 두 채널을 제외한 나머지 13개의 채널을 이용하여 측정된 신호의 발생원 위치표정 결과를 Fig. 18에 나타내었다. 부식에 기인하는 AE 신호와 명확히 밝혀지지 않은 낮은 진폭의 주변잡음은 혼재한다.

걸러진 AE 신호를 가지고 군집 분석(cluster analysis)을 수행하였다. 감육 결합의 가능성이 높은 잠재적 누설 신호들 중 높은 에너지와 많은 이벤트를 가진 집단을 클러스터로 묶어 Fig. 19에 나타내었다. 총 에너지량은 최대 11,990에서 6,351까지 나타났으며 이벤트는

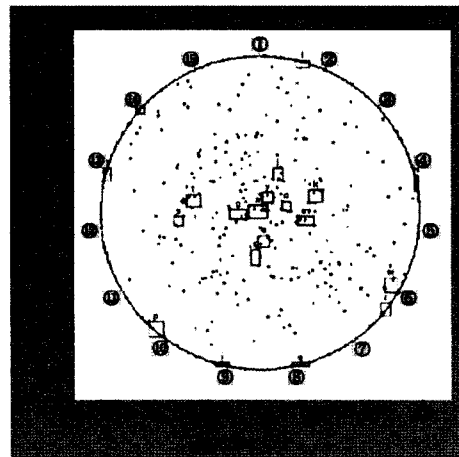


(a) Plot-plan view

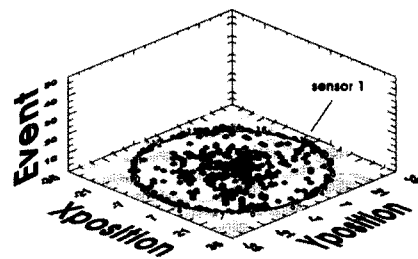


(b) 3D view

Fig. 18. Bottom plate location view.



(a) Plot view



(b) 3D view

Fig. 19. Potential leak data-bottom plate location.



최대 8에서 5까지 나타났다. AE 신호에 의한 클러스터의 발생은 저부 내면 또는 외면의 부식으로 생긴 생성물의 박리 및 균열 등에 의해 발생된다고 보며 이러한 활성 부식에 의한 새로운 부식 생성물이 생길 때 큰 체적 팽창을 동반하기 때문에 이미 존재하는 부식 생성물이 박리되어 균열이 되며 활성화된 AE 신호를 방출한다.

탱크 개방이 어려워 직접적인 손상확인하지 못하였으나 보다 고감도의 센서를 이용하고 문턱 값을 60 dB 이상 높여서 평가한다면 보다 정확한 발생위치 추정이 가능하리라 본다.

#### IV. 결 론

본 연구는 충수된 지상 탱크 저판부에서 발생하는 AE 신호 특성을 관찰하여 누수 등 손상에 대한 신호를 분석, 평가하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

1) 시험 진행 동안 발생하는 EMI 잡음신호의 히트와 진폭의 관계를 고려할 때 0.125 이상의 기울기를 나타낸다.

2) EMI 잡음신호는 높은 에너지와 카운트를 나타내며 높은 지속시간( $10^5 \mu s$  이상)을 나타냄으로 평가에서 여과 가능하다.

3) 실험 중 센서의 접촉이상 등의 감도는 상승시간의 변화로 확인할 수 있다.

4) 따라서 히트와 진폭을 이용한 신호의 기울기를 이용하면 잡음과 손상에 의한 신호를 구별할 수 있고 적정한 탱크의 건전성 평가에 이용할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구의 결과를 위해 도와주신 한국가스안전공사 이태희 박사님과 Nippon Physical Acoustics Ltd.의 Dr Z. W. Li and S. Yuyama께 감사드립니다.

#### 참고문헌

[1] Lee, J.-O., W.-H. Yoon, T.-H. Lee and J.-K. Lee, "Pre-

service Acoustic Emission Testing for Metal Pressure Vessel", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, **23**(3), 280-284, (2003)

[2] Cole, P.T. and P.J. Van de Loo, "Listen to your Storage Tanks to Improve Safety and Reduce Cost, Acoustic Emission-Beyond the Millennium", T. Kishi., M. Ohtsu and S. Yuyama editors, Elsevier, 169-178, (2000)

[3] Shigenori Yuyama, Minoru Yamada, Kazuyoshi Sekine and Shigeo Kitsukawa, "Verification of AE Evaluation on Floor Conditions in Above Ground Tanks by Comparison of AE Data and Floor Scan Inspection", *Journal of High Pressure Institute of Japan*, **40**(4), 176-184, (2002)

[4] Guide pour Linspection et la Maintenance des Reservoirs Metaliques Aeriens Cylindriques Verticaux Dhydrocarbures Liquides en Raffinerie, Edition Aout 2000, Union Francaise des Industries Petrolieres, (2000)

[5] HPIS (G 110 TR), "Recommended Practice for Acoustic Emission Evaluation of Corrosion Damage in Bottom Plate of Oil Storage Tanks", High Pressure Institute of Japan, (2005)

[6] T.J. Fower, "Recent Developments in Acoustic emission Testing of Chemical Process Equipment", Progress in Acoustic Emission IV, Proceedings 9th International Acoustic Emission Symposium, Kobe, Japan, 391-404, (1988)

[7] Kwon, J.R., G.J. Lyu, T.H. Lee and J.Y. Kim, "Acoustic Emission Testing in Cylindrical-Type Storage Tank", *KIGAS*, **4**(1), 9-15, (2000)

[8] Lee, J.-O., J.-S. Lee and K.-S. Cho., "The Analysis of Failure Mechanism during Tensile Test of CFRP", *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, **5**(2), 11-23, (1992)

[9] Physical Acoustic Corp., "MONPAC Technology Package", Vol I, II, (1987)

[10] Pollock, Adrian A., "Acoustic Emission Amplitude Distributions", Dunedan/Endevco, DE-79-10, (1979)