[논 문] - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 27, No. 2 (2007. 4)

SPPH강의 용접결함과 응력부식에 따른 음향 방출 신호의 특성

Characterization of Acoustic Emission Signal for Welding Flaw and Stress Corrosion of SPPH Steels

김승대*,†, 정우광**, 이종오***, 정유진****

Sung-Dai Kim*,†, Woo-Gwang Jung**, Jong-O Lee*** and Yu-Jin Jung****

초 록 SPPH강의 응력부식 균열과 용접 결함의 AE 신호의 특성을 살펴보았다. 고압배관 용접부의 결함 진전을 유도하기 위하여 부식용액(NaOH)과 국부가열 후 급랭 등의 기법을 적용하여 시험체를 제작하였다. AE 신호분석 결과, 결함으로 의심되는 영역에서 발생되는 AE 신호의 진폭은 60~75 dB로 나타났으며, 누적 진폭 분포 특성 조사에서 용접결함만이 존재하는 시험체는 0.034, 0.034, 0.035의 기울기를 나타내며 부식을 가한 시험체는 용접결함 기구와 부식기구가 합해져 새로운 기울기인 0.040, 0.039, 0.041로 그 차이는 적으나 기울기의 증가가 확인되었다. 가압 3분 이후 각 구간에서 응력부식결함에 의한 AE신호의 검출이 용이하였고 본 실험을 통하여 급작스런 취성파괴를 일으키는 특성을 가지고 있는 응력부식균열(SCC)의 발생 예측과 파해 예방이 가능함을 알 수 있었다.

주요용어: 음향방출, 응력부식균열, 프렉탈, 취성파괴

Abstract An investigation has been made on the relationship between characteristics of Acoustic Emission (AE) signal in welding flaw and the stress corrosion defect in-service for the high pressure pipe steel. In order to tackle the problem of welding flaw in high pressure pipe, specimens were made by the aid of the application of both corrosion liquid usage and a quenching method after local heating. The amplitude of signal was 60~75 dB in the territory which is suspected for defect, and the specimens which only have welding flaw showed gradients of 0.034, 0.034, 0.035. Moreover, there is a certain increase in gradient even though the differences are very slight. That is, corrosion specimens showed new gradients of 0.040, 0.039, 0.041 which put welding flaw and corrosion mechanism together. After pressurizing 3 minutes, AE signal has been detected from welding flaw easily in each part of the section. It is possible to predict the occurrence and also prevent the damage of stress corrosion crack which has characteristics of cleavage fracture.

Keywords: Acoustic Emission(AE), Stress Corrosion Cracking(SCC), Fractal, Brittle Fracture.

1. 서 론

압력배관은 플랜트의 구성 요소 중 하나로 없어서는 안 되는 중요한 설비이다. 배관 설비는 사용조건에 따라서는 피로 및 부식 등의 발생으로 인해 변형되거나 파괴 될 수 있다. 대부분의 변형 및 파괴는 배관의 취약한 용접부에서 발생하는데[1] 슬래그(slag), 기공(porosity) 등 미세 결함과 열영향부(heat area zone: HAZ)의 불균일한 조직으로 인한 부식손상이 일어날 가능성이 높기 때문이다[2].

(접수일: 2007. 2. 26, 심사완료일: 2007. 4. 5) * 서울시립상계직업전문학교 품질비파괴검사과, ** 국민대학교 신소재공학과, *** 한국기계연구원, **** 서울검사(주), † Corresponding author: Department of Quality Non-Destructive testing, Seoul Sanggye Vocational School, 771-2, Sanggye-dong, Seoul 139-831 (E-mail: duddudgu@empal.com)

압력배관에서 나타날 수 있는 대표적인 부식손상 기구 중 하나인 응력부식균열(stress corrosion cracking: SCC)은 국부적으로 진행되다가 갑작스럽게 취성파괴를 일으키는 특성을 가지고 있어 발생의 예측과 피해예방이 매우 어렵고 배관의 안전성을 저해하는 중요한 요인이다[3,4]. 이러한 이유로 배관 용접부에 대한 주기적인 검사가 필요하며, 특히 가동 중 실시간으로 진단할 수 있는 검사방법이 절실히 요구된다. 음향방출(acoustic emission: AE)은 결함에 의한 구조물의 파괴 과정에서 국부적으로 형성되었던 변형 에너지가 급격히 방출하는 탄성 응력파(elastic stress wave)를 감지하여 결함의 위치를 추정하는 비파괴검사(non-destructive test) 방법이다[5,6]. 실시간 진단이 가능하여 대형 저장탱크, 압력용기 등의 상태를 진단하고 안전도 평가 및 모니터링의 수단으로도 사용되고 있다. 그러나 AE 시험의 누적된 카운트와 에너지에서 잡음(noise)을 분리해내는 일은 매우 어렵고 난해하다. 최근에는 검출된 신호를 파형과 스펙트럼으로 분류하여 파괴특성을 규명하는 연구가 활발히 진행되고 있으며 신호가 가지는 시간 영역과 주파수 영역의 정보를 동시에 나타낼 수 있는 시간 주파수 해석(time frequency analysis)을 이용한 비파괴 평가 연구와 여러 방면의 현장 적용이 시도되고 있다[7-12].

본 연구는 고압탄소배관의 부식 환경 하에서 발생하는 SCC의 AE 신호 특성을 규명하여 안전도 평가 및 모니터링의 기초자료로 활용하기 위한 것으로 SPPH 강관에 용접부를 만들고 후열처리(post-weld heat treatment : PWHT)를 거치지 않은 상태에서 가성소다(45 % NaOH)를 강관 내부에 주입하고 노 내에 장시간 방치하여 가성응력부식(caustic stress corrosion)을 발생시킨 뒤 단계적으로 사용압력을 주어 발생하는 AE 데이터를 수집하여 비교, 분석 하였다.

2. 시험체 준비 및 시험압력

2.1. 시험체 제작

Fig. 1은 시험체의 형상을 보여 준다. 시험은 6가지로 수행되었으며 test #1, #2는 길이 400 mm, 두께 5 mm로 test #3, #4는 길이 400 mm, 두께 8 mm로 test #5, #6은 길이 250 mm, 두께 7 mm로 제작하였다. 강관을 가공 용접하여 test #1~#4는 중앙부분에 140 mm의 길이방향(length direction) 용접부를 test #5~6은 중앙 부분에 원둘레(circumference) 용접부를 형성시켰다. 또한, 각 시험체의 양 끝단을 플랜지로 봉하고 그 중앙부에 가압 및 감압을 위한 밸브를 두었다. 시험체에 용접부를 형성시킨 후 후열처리(PWHT)와 같은 응력제거 열처리를 행하지 않았다. Table 1은 Fig. 1의 치수 및 응력부식(SCC) 적용 여부를 나타내며 시험체의 화학적 성분과 기계적 특성은 Table 2와 같다.

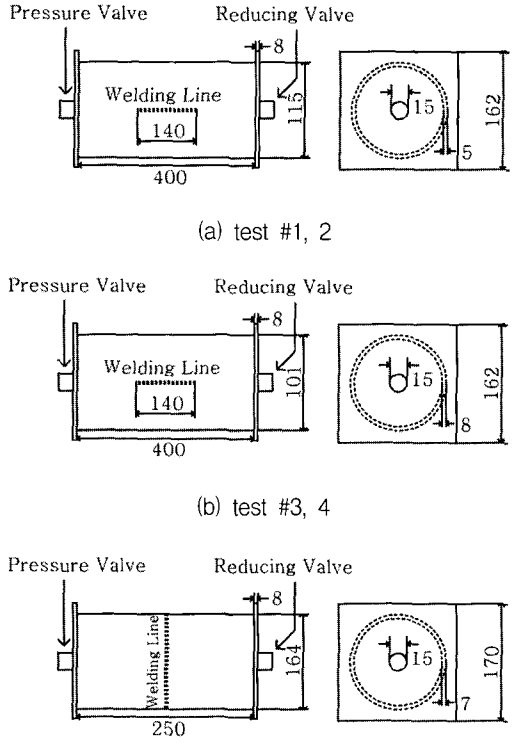


Fig. 1 Dimension and sketch of specimens (Unit : mm)

Table 1 Specimen requirements

(Unit : mm)

No	Length	Outer diameter	Inner diameter	Thickness	Welding	S.C
1	400	115	105	5	Length direction (140)	x
2						o
3		101	85	8		x
4						o
5	250	164	150	7	Circumfer-ence	x
6						o

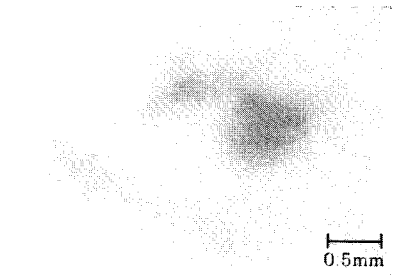
Table 2 Chemical composition (wt %) and mechanical properties of used steel

Material	C	Si	Mn	P	S
SPPH	0.25	0.10~0.35	0.30~1.10	0.035	0.035

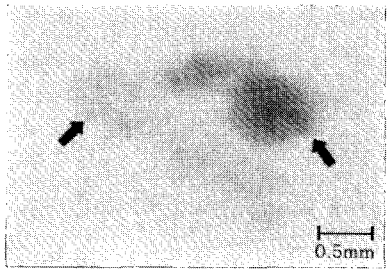
Tensile strength(MPa)	Yield strength(MPa)	Elongation(%)
373	216	30

2.2. 응력부식

가성응력부식 균열을 발생시키기 위해 강관 내부의 용접 결함부에 댐을 만들어 45 % 희석시킨 가성소다(NaOH) 용액을 주입하고 6시간마다 용액을 보충하였다. 가성 응력 부식이 활발해지도록 82℃ 상태를 1주일간 유지하였고 가성소다 용액 적용부위 이외는 산화를 방지하기 위해 아르곤 가스를 유통시켰다. 내부응력에 의한 균열을 보다 용의하게 생성시키기 위해 가성소다 용액 적용부위에 분젠버너를 이용하여 가열(500~600℃)후 급랭을 15회 반복하였다. Fig. 2는 test #4의 결함부위를 확대한 것으로 용접결함에 부식 적용 후 결함 주위는 부식에 의한 필름 농도 변화를 보인다.



(a) As welding



(b) After corrosion

Fig. 2 X-ray film of test #4

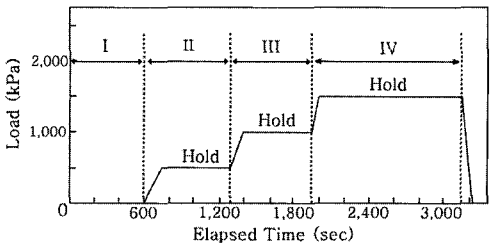


Fig. 3 Loading sequence

2.3. 시험 압력

시험압력의 가압조건은 Fig. 3과 같으며, I 구간은 배경 잡음을 점검하기 위한 구간으로 충수 후 10분간 유지하였다. 가압과 압력유지 시간을 포함하여 II구간은 500 kPa, III구간은 1,000 kPa, IV구간은 1,500 kPa로 단계적으로 상승하여 각각 10분간 압력을 유지하였다.

3. AE 실험

AE실험의 개략도를 나타내는 Fig. 4와 같이 시험체의 압력을 가하기 위하여 고압 호스를 시험 장치에 연결하고 가압장치를 이용하여 가압하였다. 시험체에서 발생된 AE신호는 센서로 감지되어 전치증폭기(pre-amplifier)를 통해 AE 분석 시스템으로 전달되며 연결된 컴퓨터로 AE 신호를 분석하였다. 신호선으로 들어오는 외부잡음을 최소화하기 위해 RG 58AU(미국 PAC사) 동축 케이블을 이용하였다. 또한, 결함 진전시 발생되는 AE신호를 적절히 감지하기 위해 일반적으로 많이 사용되는 결함 탐상용 센서인 R15I(미국 PAC사)와 부식 및 누출신호 감지에 적합한 R6 센서를 사용하여 압력을 상승·유지한 상태에서 실시간으로 측정하였다. R15I는 전치증폭기가 내장되어있고 공진주파수는 150 kHz이며, R6은 공진주파수가 60 kHz로 외장 전치증폭기를 추가하여 사용하였다. test #1~4는 R15I 2개와 R6 1개, test #5~6은 R15I 2개와 R6 2개를 용접부 주위에 설치하였고 그 위치를 Fig. 5에 나타냈다. AE신호의 감쇠 손실을 줄이기 위하여 시험체 표면을 그라인더로 연마하였으며 접촉매질로 진공그리스(high vacuum grease)를 사용하였다. 아울러 센서를 고정하기 위하여 마그네틱홀더 및 고정테이프를 사용하였다.

감지된 AE 신호는 PAC사의 32 Channel Disp AE Work Station을 이용해 저장하였다. AE파의 전달속도 및 감도측정을 위해 시험체 내부에 물을 채운 상태에서 샤프심 파괴(0.3 mm pencil break test)시험을 3회 이상 실시하였다. 시험체 온도는 16℃, 평균음속은 3,440 m/s이며, 사용 센서의 평균 진폭은 88 dB로 모두 3 dB 이내였다.

AE신호 측정을 위한 최적의 시험 문턱값(test threshold value)설정을 위해 배경잡음을 10분간 점검하여 45 dB를 시험 문턱값으로 설정하였다.

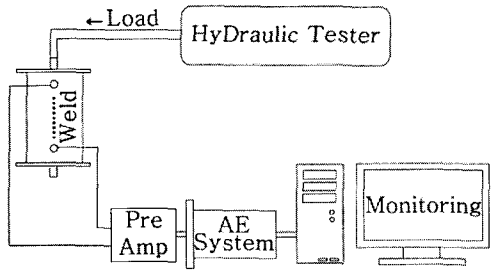
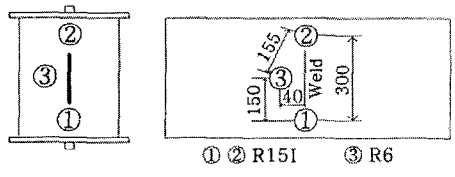
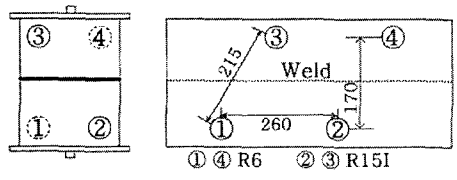


Fig. 4 Block diagram of AE inspection system



(a) test #1~#4



(b) test #5~#6

Fig. 5 AE sensor location

4. 결과 및 고찰

4.1. 잡음신호 특성

Table 3은 test #1~#6의 시험 문턱값과 시험동안 발생한 AE신호의 총 히트(hits), 카운트(counts), 에너지(energy)의 측정결과이다.

Table 3 AE test summary

Test No.	Threshold (dB)	Total hits	Total counts	Total energy
#1	45	4,799	168,006	131,049
#2	45	2,803	142,421	178,940
#3	45	2,257	152,116	150,749
#4	45	887	72,406	111,297
#5	45	175,040	861,482	701,732
#6	45	1,018	83,470	39,025

시험 중 이물질 및 녹 스케일 등의 부유물로 추정되는 신호와 가압기 작동으로 인해 빠른 유속이 시험체 벽면을 타격하여 발생한 high flow noise 그리고 시험장 주위의 기계적 소음이 혼합하여 발생하였다. 잡음 요인으로 판단되는 관찰사항들은 빠짐없이 기록하여 AE신호 평가 시 필터링함으로 잡음을 제거한다. 잡음의 여과 방법은 1차는 데이터 수집 시 관찰된 기록을 참고로 시간에 대하여 여과하며 2차로 AAR(American Associate of Railroad)의 지속시간과 진폭 이력관계를 참고하여 히트, 진폭, 지속시간의 상관관계를 참고로 여과하여 결함신호 특성 분석에 이용했다.

4.2. 결함신호 특성

일반적으로 AE신호의 분석방법으로 AE신호의 최대진폭을 A라고 할 때 최대진폭이 A부터 A+dA의 범위에 있는 AE 신호수 n(A)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$n(A)=k\ A^{-m} \tag{1}$$

위와 같은 형태의 해석을 AE 신호에 적용하여 식 (1)에 표시한 것처럼 선형분할로 미분형 분포 f(x)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f(x)= c\ x^{-m} \tag{2}$$

이를 log 표시하면 다음과 같다.

$$\log f(x) = -m \log x + \log c \tag{3}$$

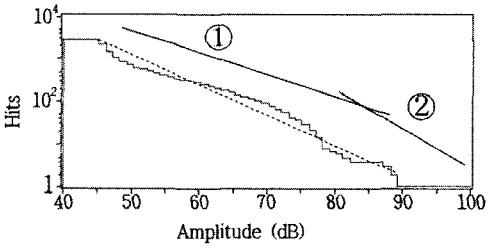
log 그래프에서 기울기의 직선 분포가 음(-)이 되는 스펙트럼 형상을 프랙탈이라 부른다. AE 신호의 진폭분포는 일반적으로 식 (3)에 주어진 것처럼 log

표시로 음의 기울기 m의 직선분포를 나타낸다[13]. 따라서 검출 신호의 크기별 도수분포인 진폭분포는 프랙탈 특성을 갖게 된다.

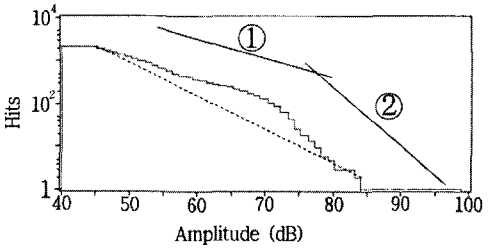
이러한 데이터 해석 평가법을 이용하여 히트를 log로 하여 진폭의 관계를 기울기로 비교하였다. 검출된 신호 특성으로 Fig. 6에 용접결함만이 있는 시험체를 나타내었고 용접결함에 부식을 가한 시험체를 Fig. 7에 나타냈다.

모든 시험체에서 2개의 서로 다른 음의 기울기가 나타났다. 이는 결함 신호 이외에 한 가지 이상의 잡음신호에 의해 기울기가 변화되었음을 의미한다. Table 4에 기울기 값으로 보아 시험체 및 용접부의 형상과 치수와는 서로 무관함을 알 수 있다.

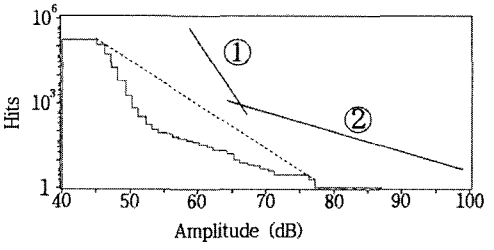
일반적으로 결함의 활성적인 AE신호의 발생은 65 dB 이상에서 나타나는 것으로 알려져 있다[8]. 따라서 데이터의 세밀한 분석을 위해 60 dB이상에서 분석하였다. 의미 있는 신호의 기울기는 60~75 dB의 진폭영역으로 용접결함만이 존재하는 Test #1, #3, #5는 0.034, 0.034, 0.035를, 부식을 가한 test #2, #4, #6은 0.040, 0.039, 0.041의 기울기가 나타났다. 용접 결함 기구에 부식이라는 기구가 더해져 발생한 기울기의 특색으로 그 값의 차는 약 0.005로 미미하나 기울기의 증가를 나타냈다.



(a) test #1

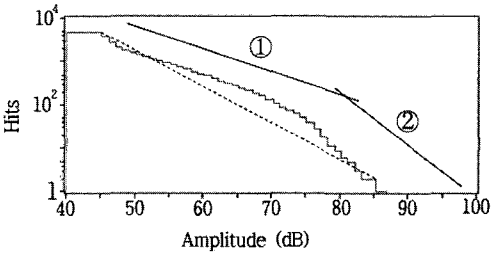


(b) test #3

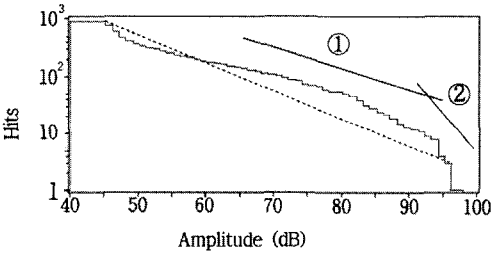


(c) test #5

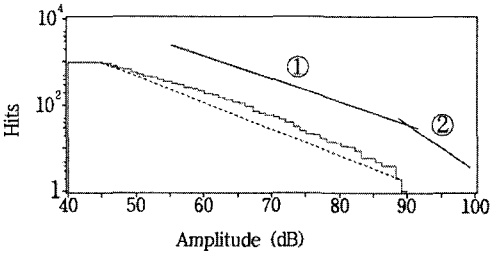
Fig. 6 Gradient of welding defect



(a) test #2



(b) test #4

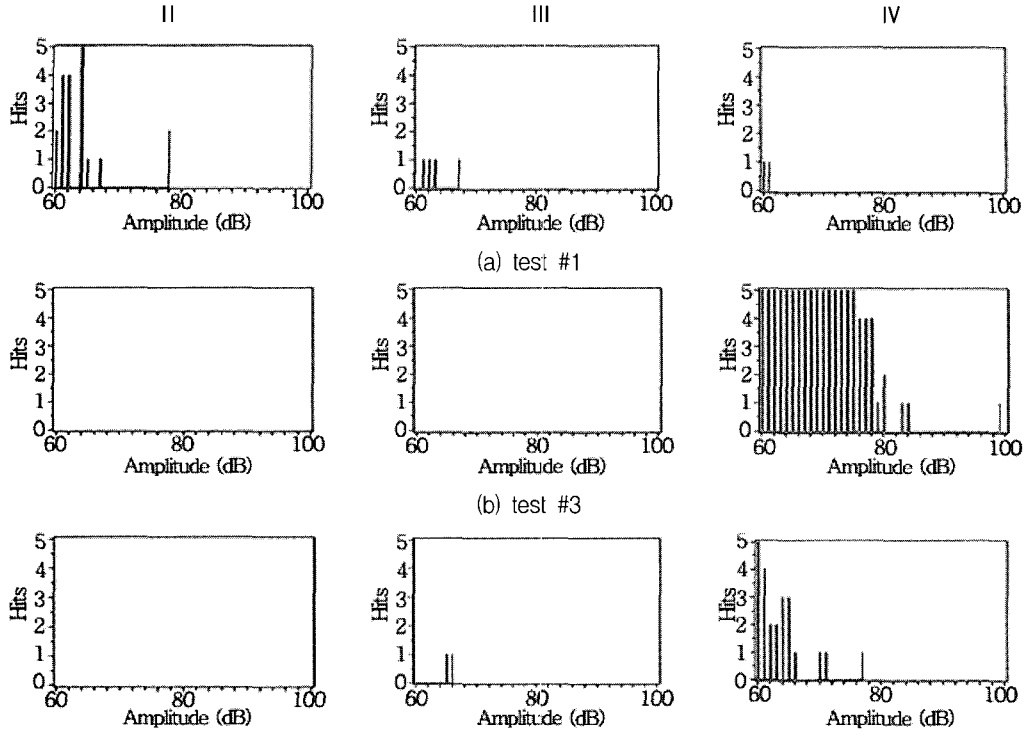


(c) test #6

Fig. 7 Gradient of welding defect and corrosion

Table 4 Gradient of hits vs amplitude

Test No.	Total	①	②
#1	0.058	**0.034**	0.070
#3	0.060	**0.034**	0.102
#5	0.080	0.185	**0.035**
#2	0.067	**0.040**	0.092
#4	0.045	**0.039**	0.108
#6	0.046	**0.041**	0.083

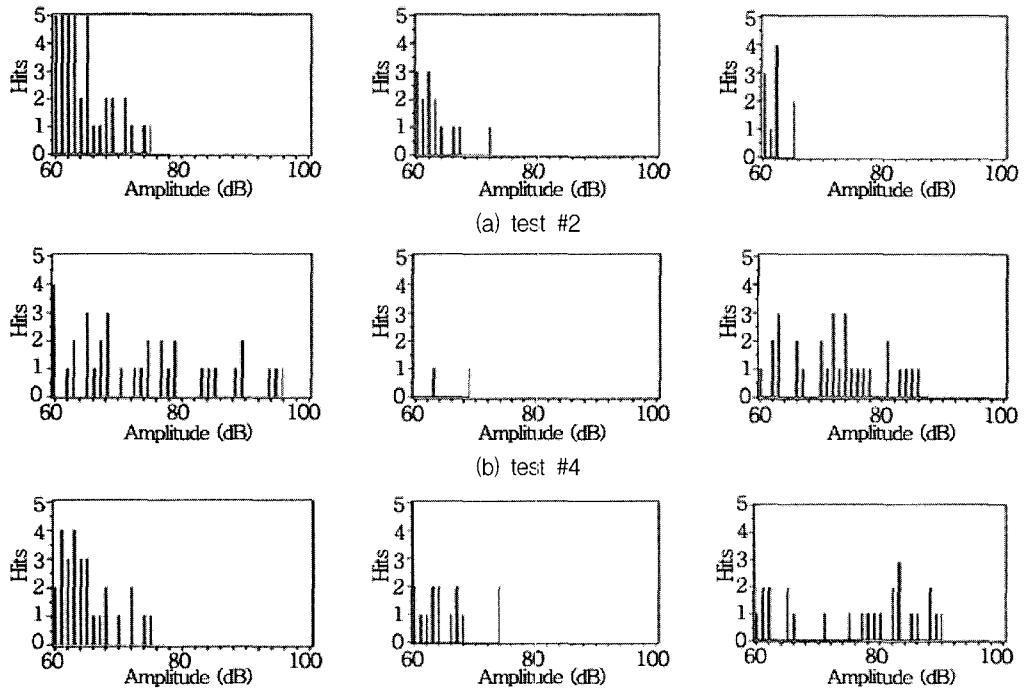


(a) test #1

(b) test #3

(c) test #5

Fig. 8 Hits vs amplitude & time of welding defect



(a) test #2

(b) test #4

(c) test #6

Fig. 9 Hits vs amplitude & time of welding defect & corrosion

Fig. 8과 Fig. 9는 각 구간별로 가압 시간과 가압 후 잡음이 안정되는 시간을 합한 3분을 제외하고 문턱값을 60 dB이상으로 하여 진폭에 따라 히트를 나타내었다. Fig. 8은 용접결함 시험체로 test #1의 500 kPa인 Ⅱ구역의 10이상의 히트는 기계적, 전기적 소음으로 인해 발생한 신호로 보이며 test #3과 #5의 1,500 kPa인 Ⅳ구역의 AE 신호는 밸브의 누수와 압력유지를 위한 가압기 조작에 따른 신호이다. 이외의 영역은 주로 1이하의 히트를 나타낸다.

Fig. 9는 부식결함 시험체로 거의 모든 구간에서 2 이상의 히트가 나타났고 최대 88 dB의 AE 신호도 발생하였다. 이는 부식결함 부위에 응력집중이 발생하여 부식생성물의 결합력은 저하되었고 이러한 부식생성물은 탈락과 결합을 유발하며 부식결함 부위를 따른 미세 균열의 발생 및 성장에 의해 AE 신호가 활성화된 것으로 사료된다.

Fig. 10은 AE신호에 의한 위치 표정으로 용접부의 신호와 플랜지 이음부에 의한 좌우 끝부분의 신호들이 발생하였다.

AE 실험 종료 후 균열의 발생은 극히 일부지만 Fig. 11에 test #4의 결함부위를 나타내었고 좌측 하단부에 미세 균열이 발생 하였다. 항복점보다 낮은 응력에서도 균열은 진행될 수 있지만 이는 상대적으로 매우 드문 경우로 시험에 적용한 응력은 낮았으나 가성응력부식 후 급속한 열처리에 의한 잔류응력이 파괴를 생성시킬 수 있는 요인을 제공한 것으로 사료된다.

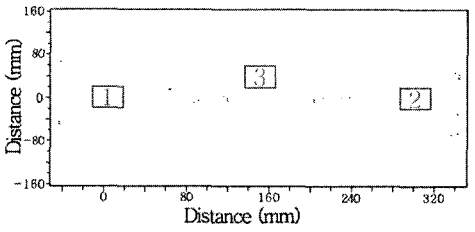


Fig. 10 Source localization of test #4

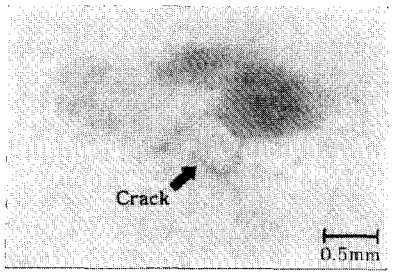


Fig. 11 X-ray film after AE testing of test #4

5. 결 론

본 연구는 고압배관(SPPH)의 사용압력 하에서 AE 시험을 통해 용접결함과 응력부식결함에서 발생하는 AE신호 데이터를 수집하고 비교, 분석하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) 결함으로 의심되는 진폭영역은 60~75 dB로 용접결함만이 존재하는 시험체는 0.034, 0.034, 0.035의 기울기 값을 나타내었다.
2) 부식을 가한 시험체는 용접결함 기구와 부식기구가 합해져 새로운 기울기 값인 0.040, 0.039, 0.041로 그 차는 미미하지만 기울기가 증가하는 것으로 관찰되었다.
3) 가압 3분 이후 각 구간에서 응력부식결함에 의한 AE신호의 검출이 용이하였으며 급작스런 취성파괴를 일으키는 특성을 가지고 있는 응력부식균열(SCC)의 발생 예측과 피해 예방이 가능할 것으로 사료 되었다.

후 기

본 연구는 2006년도 국민대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었으며, 결과를 위해 도와주신 한국가스안전공사 이태희 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

[1] 유종회, 이수창, "강용접부의 소성변형시 음향방출거동", 대한금속학회지, Vol. 35, No. 12, pp. 1660-1667, (1997)
[2] 나의균, 김훈, "음향방출에 의한 고장력강 용접부의 부식손상 특성평가", 비파괴검사학회지, Vol. 23, No. 3, pp. 212-219, (2003)
[3] 유효선, 정세희, "부식환경하에서 음향방출신호 특성에 미치는 변형률속도의 영향", 한국재료학회지, Vol. 5, No. 1, pp. 12-21, (1995)
[4] A. A. Shreinker and J. D. Wood, "Stress corrosion cracking of high strength steel" ASTM STP518, pp. 16-18, (1972)
[5] 이종오, 윤운하, 이태희, 이종규, "금속압력용기의 사용 전 음향방출시험", 비파괴검사학회지, Vol. 3, No. 3, pp. 280-284, (2003)
[6] 이종오, 이주석, 윤운하, 이승희, "음향방출시험에 의한 복합 재료 접합부의 비파괴평가", 비파

괴검사학회지, Vol. 16, No. 2, pp. 79-85, (1996)

[7] P. Pellionisz and P. Szucs, "Acoustic eission monitoring of pressure vessel," International Journal of Pressure Vessels and Piping, pp. 287-294, (1993)

[8] Physical Acoustic Corp., "MONPAC technology package," Vol. I, II, (1987)

[9] 권오양, "음향탐상(AE) 기술의 형황과 활용방안", 안전보건학술지 No. 129, pp. 283-317, (2005)

[10] P. R. BlackBurn and M. D. Rana, "Acoustic emission testing and structural evaluation of seamless, steel tubes in compressed gas services," ASME J. Pressure Vessel Technology, Vol. 108, pp. 234-240, (1986)

[11] H. Barthelemy, "Periodic inspection of compressed gas cylinder and tubes - flaw detection using acoustic emission testing," ASME J. Pressure Vessel Technology, Vol. 110, pp. 161-167, (1986)

[12] 권정락, 류근준, 이태희, 김지윤, "원통형 저장탱크의 음향방출시험", KIGAS, Vol. 4, No. 1, pp. 9-15, (2002)

[13] Adrian A. Pollock, "Acoustic emission amplitude distributions," Dunedan/Endevco, DE-79-10, (1979)