

## AE에 의한 압력용기의 안전성평가에 관한 연구

이주석\* · 조경식\* · 최진민\* · 장홍근\* · 오세규\*\*

### A Study on the Monitoring of Pressure Vessel Safety during Hydrotest by Acoustic Emission

J. S. LEE, K. S. CHO, J. M. CHOI, H. K. CHANG, S. K. OH

**Abstract** The behaviour of pressure vessel made of SS41 steel was investigated during hydrotest. AE tests were carried out for the vessels in as-manufactured, V-notched and weld-cracked state using microcomputer-based AE instrumentation. The following results were obtained: 1) In the case of source location using cylindrical program, to minimize the error of source location, the difference of max. Delta T values measured from each sensor should be kept as small as possible. 2) When crack grew, AE event rate increased continuously but AE event from the inclusions occurred intermittently, so by analyzing event rate, the source of AE could be derived. 3) From the spot welding part of supporter, many events with low energy occurred independent of Kaiser effect, which could be confirmed by analyzing energy parameter. 4) The b-value from the tensile specimen of was lower than that from normal specimen and the b-value from crack propagation was lower than that from deformation, so by analyzing peak amplitude distribution, the source mechanism could be derived from the b-value.

#### 1. 서론

본 연구에서는 computerized multi-channel AE system을 이용하여 소형 model-용 압력용기에 대하여 AE 시험을 실시하여 source location 및 단계적인 압력상승에 따른 AE 발생상태를 조사, 분석함으로써 압력용기에 대한 AE 시험의 적용 가능성을 판단하는 기초자료를 제시하여 국내 석유화학 플랜트의 대형용기에 대한 경제적이고 효율적인 안전성 진단에 기여하고자 함이 그 목적이다.

#### 2. 장치, 실험재료 및 실험방법

##### 2-1 AE 측정장치

본 실험에서는 AETC(USA)의 AET4900 system을 사용하였으며 본 장치는 data acquisition subsystem과 host computer system으로 크게 두 부분으로 구성되어 있다. AE 감지용 sensor는 resonance frequency가 175kHz인 AETC사의 AC 175L을 사용하였다.

\*한국기계연구소

\*\*부산수산대학교

2-2 Model 용기의 제작

압력용기의 경우 높은 인성을 요구하므로 본 실험에서는 소형용기의 재료로 많이 쓰이며 연성이 좋은 SS41을 재료로 선택하였으며 그 기계적 성질과 화학 조성은 Table 1과 같으며, 용기의 설계 압력은 20kg/cm<sup>2</sup>, 벽두께는 10mm 그리고 외경은 668mm이다. 용기의 용접부에 대한 결함 상태를 확인하기 위하여 방사성동위원소 Ir-192를 이용하여 방사선투과시험을 실시하였으며 yoke type 자분탐상장치를 이용하여 자분탐상시험을 실시한 결과 균열성의 결함은 없었으며 porosity 및 slag inclusion이 존재하고 있었으며 그 위치는 Fig. 1에 표시 하였다.

Table 1 Mechanical property and chemical composition of SS41 steel

Mechanical properties	Tensile strength kg / mm <sup>2</sup>		Yield strength kg / mm <sup>2</sup>		Elongation %
		43.4		28.3	
Chemical composition (wt %)	C	Si	Mn	P	S
	0.15	0.23	0.68	0.012	0.002

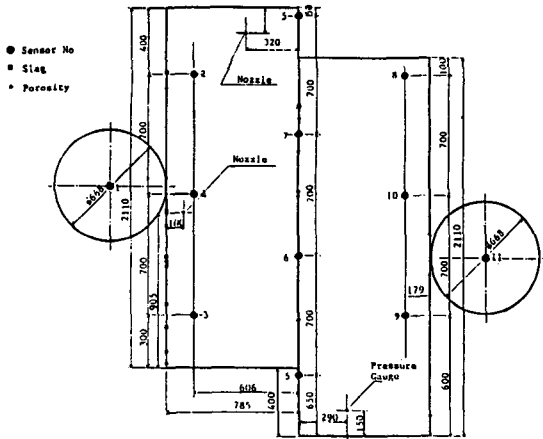


Fig. 1. Location of internal discontinuities confirmed by radiographic test

2-3 Model 용기에 대한 AE 시험

1) Source location

대형용기의 경우에는 전체 영역에 대한 위치표정의 목적이 있고 취약부에 대한 정보가 없는 경우가 일반적이므로 본 실험에서는 규칙적인 sensor 배열에 의한 cylindrical program을 사용하였으며 model 용기에서의 가능한 sensor array를 구상하여 용기의 용접선을 따라 10cm 간격으로 event를 발생시켜 가면서 최적 sensor array방법을 조사 하였다. 이

때 AE source로는 pencil lead AE source를 사용하였으며 source location은 time difference 방식에 의거 하였다. 5, 8, 10과 11 channel을 이용하여 source location 상태를 조사 하였으며 각각의 sensor array는 Table 2와 같다.

Table 2 Sensor array for source location.

Channel	Triangle Shape	Dome Sensor	Bottom Sensor	Across	Band	Delta T (μsec)
5	Isocoles	Yes	Yes	3	1	300
8	Equilateral	Yes	Yes	3	2	170
10	Isocoles	Yes	Yes	4	2	250
11	Equilateral	Yes	Yes	3	3	140

2) 인위적 결함이 없는 용기에 대한 AE 시험

a) 지지대가 용접부착된 용기

전체 11 channel을 이용하여 용기 전체를 18개 영역으로 구분 하였으며 용기에 압력매체로 물을 채운 후 수압펌프를 이용하여 단계적인 압력상승 하에서 AE 시험을 실시 하였다. Sensor 부착부위는 연마하여 파의 감지를 원활하게 하였으며 접촉 매질로는 Kraut kraemer사의 ZG5를 사용하였고 수압펌프와 용기는 고무호스로 연결하여 가압중 발생 가능한 펌프의 잡음을 줄이도록 하였다. 압력상승도는 Fig. 2와 같으며 sensor array는 Fig. 3과 같다. 또 main amp. 의 gain을 조정하여 각 channel에서의 noise level을 500mV로 설정 하였다. 전체 gain은 preamp. 에서 40 dB, main amp. 에서 40dB 로 조절하여 합계 80dB로 설정하여 AE 시험을 수행 하였다.

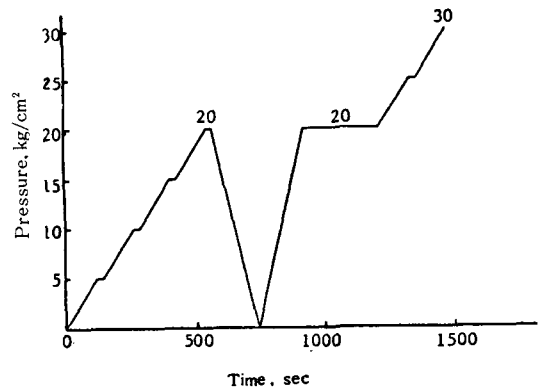


Fig. 2. Pressurization schedule for AE test on model vessel welded with supporter, without artificial defects

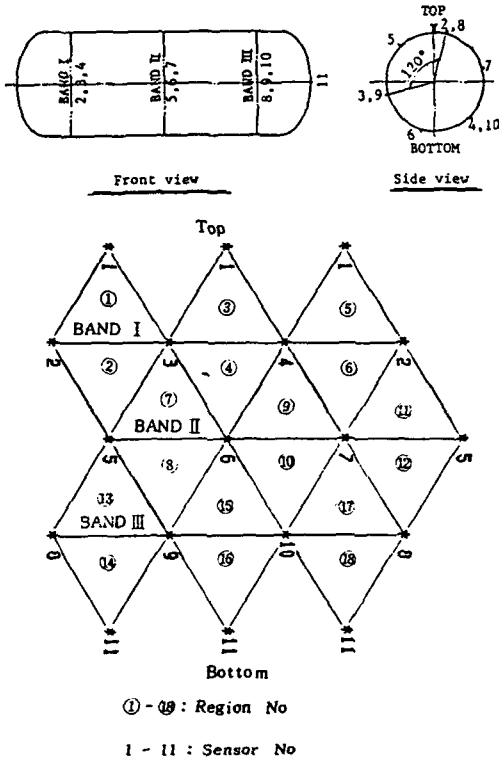


Fig. 3. Sensor array for AET

b) 지지대 없는 용기

제작 상태에서 AE 시험을 실시한 결과 약 10kg/cm<sup>2</sup>에서 부터 지지대 용접부에서 많은 event가 발생하여 지지대를 제거한 후 Fig.4와 같은 압력상승 하에서 AE 시험을 실시 하였다.

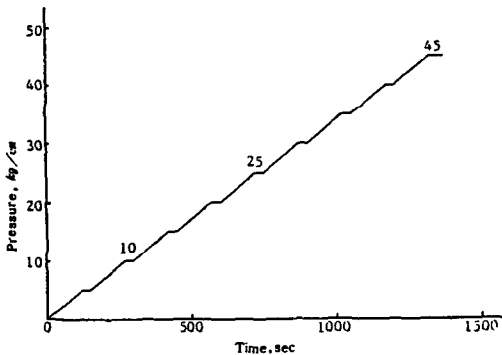


Fig. 4. Pressurization schedule for AE test on model vessel with no supporter, without artificial defects

3) V-notch를 가공한 용기에 대한 AE 시험

Fig.5와 같이 용기의 축방향으로 용기 원통부 길이의 20% (320mm) 길이의 V-notch를 가공한 상태에서 용기에 물을 채운 후 Fig.6과 같이 단계적인 압력상승하에서 source location 및 AE 발생상태를 조사하였다. V-notch는 접시형 stone을 부착한 grinder를 이용하여 가공하였으며 HSS 강을 날카롭게 연마하여 V-notch의 끝 부분을 마무리 하였다.

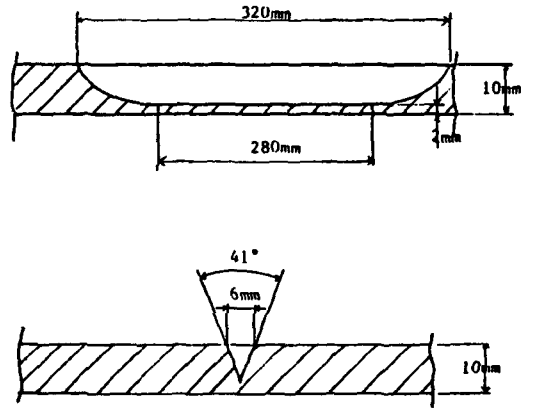


Fig. 5. Shape of V-notch

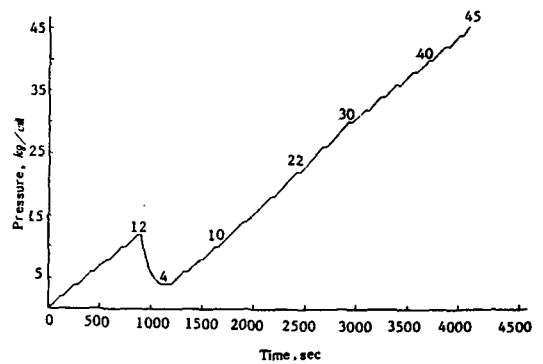


Fig. 6. Pressurization schedule for AE test on model vessel with artificial V-notch

4) 용접균열을 가진 용기의 AE 시험

V-notch를 가공하여 파열시킨 부위에 대하여 구

리선을 삽입하여 용접균열을 만들어 넣은 후에 Fig. 7과 같이 단계적인 가압상태에서 AE 시험을 실시하여 균열의 성장에 따른 AE 발생 상태를 조사하였다.

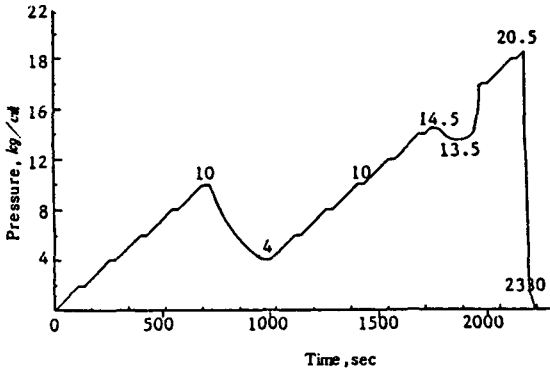


Fig. 7 Pressurization schedule for AE test on model vessel with artificial weld-caraks

### 3. 결과 및 고찰

#### 3 - 1 Source location

1) 5 channel을 이용한 용접선의 source location은 Fig. 8과 같다. # 1y, # 3y 원주용접선은 비교적 좋은 source locaiton을 보이고 있으나 # 2y 원주용접선은 좋은 source location을 나타내지 못하고 있으며 수평용접선 # 1x 및 # 2x도 경사지게 나타났다.

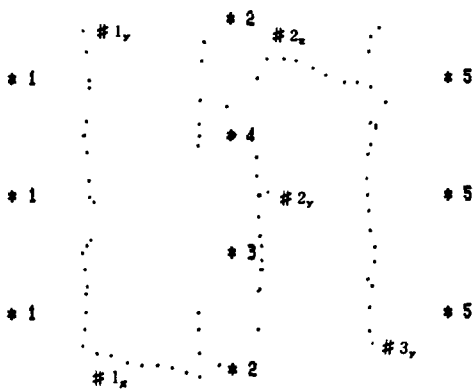


Fig. 8. Distribution of AE events from pencil break vs sensor location using 5 channels on model vessel of SS4l

2) 8 channel을 이용한 용접선의 source location은 Fig. 9와 같으며 # 1y와 # 3y 원주용접선 및 # 1x와 # 2x 수평용접선도 좋은 source location을 나타내고 있으며 # 2y 원주용접선도 5channel을 이용했을 때 보다는 개선된 source location을 나타내고 있다.



Fig. 9. Distribution of AE events from pencil break vs sensor location using 8 channels on model vessel of SS4l

3) 10 channel을 이용한 용접선의 source location은 Fig. 10과 같다. # 1y, # 2y 및 # 3y 원주용접선은 좋은 source location을 보이고 있으며 # 1x, # 2x의 수평용접선은 경사지게 표시되고 있다.

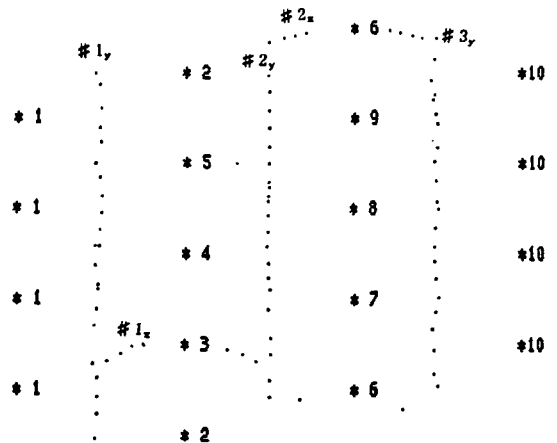


Fig. 10. Distribution of AE events from pencil break vs sensor location using 10 channels on model vessel of SS4l

4) 11 channel을 이용한 용접선의 source location은 Fig. 11과 같다. 전체 용접선은 양호한 source location을 보이고 있어서 본 용기에서의 가장 좋은 sensor array법이라고 판단된다. #1y와 #3 원주 용접선은 구조적 특징에 의하여 원호의 형상을 나타내고 있다.

Fig. 12는 영역간의 경계선에 대하여 10cm 간격으로 또 영역의 중심부에 직경 20cm의 원을 도시하여 원주상에 45°간격으로 pencil lead AE source를 이용하여 source location을 실시한 결과이며 거

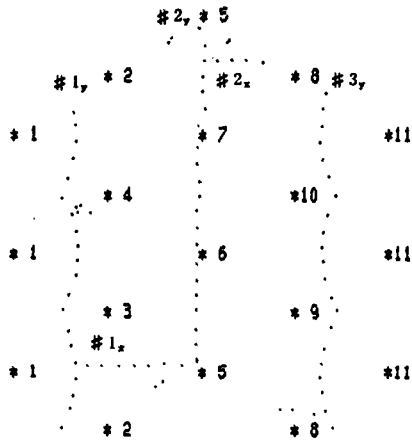


Fig. 11. Distribution of AE events from pencil break vs sensor location using 11 channels on model vessel of SS41.

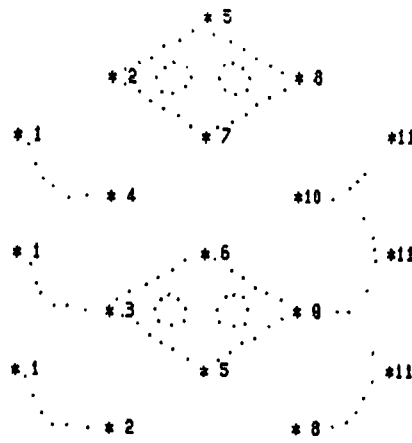


Fig. 12. Trial confirmation test of source location for the distribution of AE events from pencil break vs sensor location using 11 channels on model of SS41

의 완벽한 source location을 보여주고 있다.

이상의 결과에서 볼 때 cylindrical program을 이용한 source location에서는 한 영역을 구성하는 3개의 sensor가 이루는 삼각형의 형태에 따른 영향이 크므로 취약부위로 판단되는 부분 혹은 T 용접부 등에서는 가능한 한 정삼각형 형태를 이루도록 sensor를 구성하는 것이 바람직 하다.

3-2 압력용기의 AE 시험

1) 지지대가 용접부착된 용기

Fig. 13은 Fig. 2와 같은 수압하에서 지지대가 용접부착된 용기에 대하여 AE 시험을 실시한 결과로서, 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 많은 event가 발생하였으며 주로 event가 발생한 부위는 그림에서 "L"로 표시한 즉 지지대의 용접부라고 판단된다. 전체 영역에서 발생한 event 및 energy의 누계는 Fig. 14와 같으며 이들 event들은 Kaiser effect와는 관계없이 약 10kg/cm<sup>2</sup> 이상의 수압하에서 지속적인 발생을 보이고 있다. 즉 이 event들은 소성 변형보다는 탄성변형에 의한 것이라고 판단된다. 이것은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 수압이 항복점 미치지 못하는 범위이기 때문이다.

Fig. 13에서 보면 sensor 6, 9 & 10이 구성하는 region 15(Fig. 3 참조)에서 가장 높은 event의 발생을 보이고 있다. Region 15에서 발생된 event에 대하여 조사해 보면 Fig. 15에서 보는 바와 같이 5 이하의 낮은 energy를 가지고 있다.

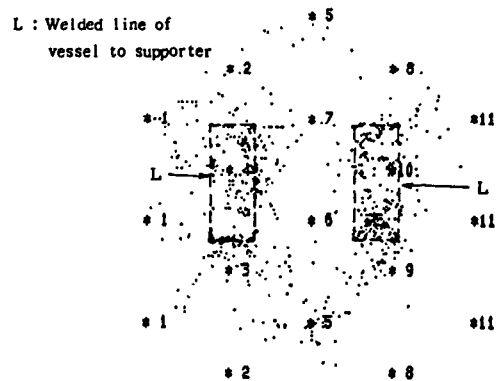


Fig. 13. Distribution of AE events from real sources vs sensor location using 11 channels on vessel of SS41 during hydrotest as in Fig. 2

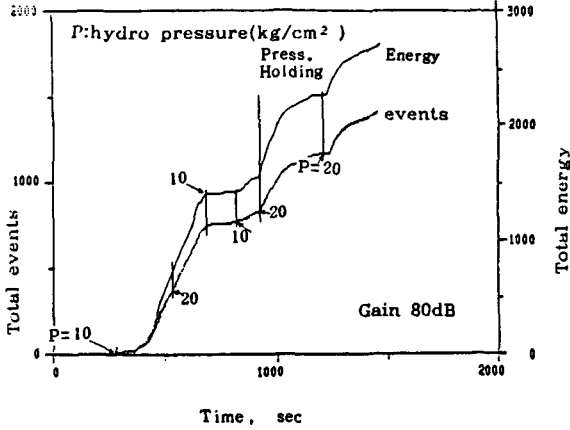


Fig. 14. Total events and energy vs time by AE test using 11 channels on model vessel of SS41 during hydrotest as in Fig. 2

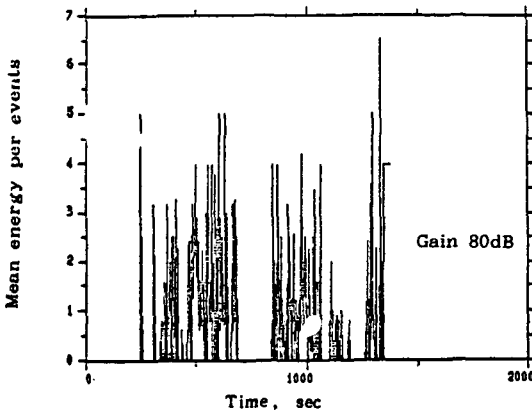


Fig. 15. Mean energy per event vs time for region ⑬ by AE test using 11 channels on model vessel of SS41 during hydrotest as in Fig. 2

2) 지지대가 없는 용기

지지대와 용기간의 fillet-용접부에서 많은 event가 발생하여 지지대를 제거한 후 Fig. 4와 같은 수압하에서 AE 시험을 실시한 결과 Fig. 16과 같은 source location을 나타내었다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 지지대가 있을 때와는 달리 event의 집중성은 나타나지 않고 있다. Fig. 16의 소원으로 표시한 부분은 가압수 주입 nozzle 부분이므로 이는 가압과정에서 발생된 무관련한 event라고 판단된다.

Fig. 17은 Fig. 4와 같은 수압하에서 발생한 총 AE event를 표시한 것으로서 약 18kg/cm<sup>2</sup>에서 최초로 event가 발생하였으며 이 event의 source는 가압수 주입 nozzle이며 35kg/cm<sup>2</sup>까지는 event의 발생이 없다가 35kg/cm<sup>2</sup>이 지나면서 부터 event의 발생은 현저하며 이들 event는 집중성을 보이지 않고 용기 전체에서 산발적으로 발생하고 있다. 따라서 35kg/cm<sup>2</sup> 이상의 압력에서 발생된 event들은 용기재질의 탄성 변형에 의하여 발생된 것이라고 판단된다. 또 Fig. 18에서 보면 이 event의 평균 energy는 4 이하로 나타났다.

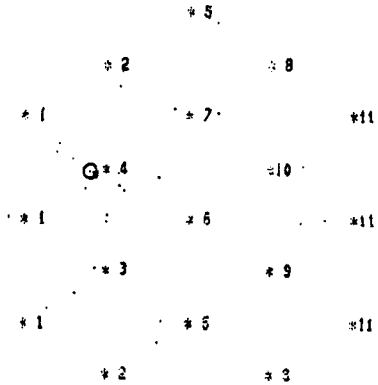


Fig. 16. Distribution of AE events vs sensor location by AE test using 11 channels on model vessel with no supporter during hydrotest as in Fig. 4

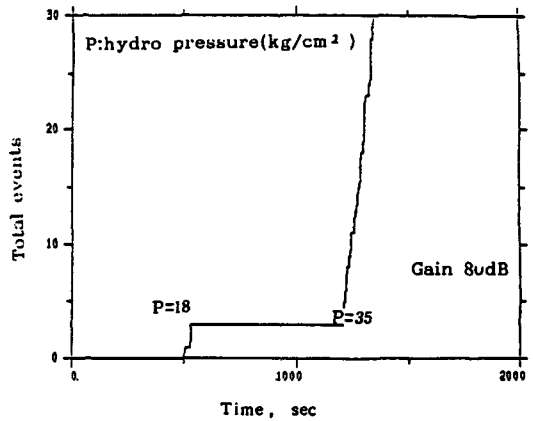


Fig. 17. Total events vs time by AE test using 11 channels on model vessel with no supporter during hydrotest as in Fig. 4

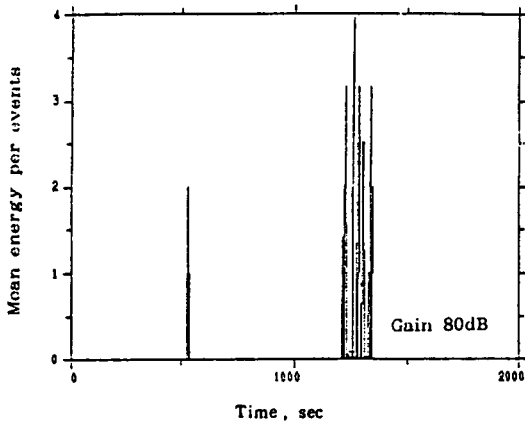


Fig. 18. Mean energy per event vs time by AE test using 11 channels on model vessel with no supporter during hydrotest as in Fig. 4

3) V-notch를 가공한 용기의 AE 시험

V-notch를 가공한 용기에 대하여 notch가 파열 될 때까지 승압하는 과정에서 AE 시험을 실시한 결과 Fig. 19와 같은 event의 발생이 나타났다. 대부분의 event는 region 11에서 즉 notch가공부에서 발생하였다. 그림에서 보면 일직선으로 가공한 V-notch주위에서도 event가 나타난 것으로 표시되고 있다. 이것은 V-notch주위의 변형에 의한 event이거나 거의 동시에 발생한 서로 다른 event를 3개의 sensor가 분해하여 감지하지 못하였기 때문이라고 사료된다. Region 11에서 발생한 event의 누계는 Fig. 20과 같다. 수압 5kg/cm<sup>2</sup>에서 부터 event가 발생하기 시작하였으며 12kg/cm<sup>2</sup>까지 승압한 후 4kg/cm<sup>2</sup>까지 감압하여 다시 승압한 결과 감압과정에서 event의 발생이 없었고 재승압하는 과정에서 10kg/cm<sup>2</sup>에서 부터 다시 event의 발생이 나타났다. 즉 V-notch 부위에서는 Kaiser effect가 나타나고 있었다. 13kg/cm<sup>2</sup>부터는 event의 발생율이 높아지고 있는데 이것은 notch부위의 항복에 의한 것으로 판단되며 약 23kg/cm<sup>2</sup>부터는 event의 발생율이 낮아지고 있다. 45kg/cm<sup>2</sup>에서 V-notch가 파열 되었으며 이때 event발생율을 나타내었으며 파단과 더불어 누수에 의한 "continuous type"의 신호가 발생하였다. Fig. 21은 sensor 2가 감지한 event의 평균 energy를 나타낸 것으로 파단시에 높은 energy를

가진 event가 발생한 것을 알 수 있다. Power Law Model에 의하여 Fig. 22와 Fig. 23에서 b-value를 구하면 변형시에 1.6, 파단시에 0.4로 나타났다. 이 값은 비용접 SS41의 인장시험시의 변형시의 b-value 1.4와 파단시의 b-value 0.4와 유사한 값이었다.

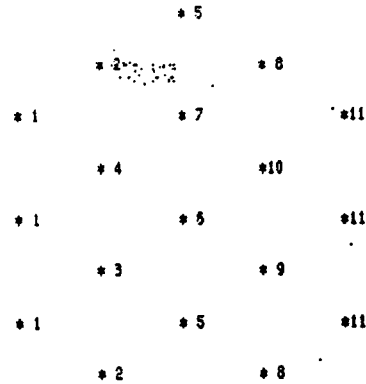


Fig. 19. Distribution of AE events from real sources vs sensor location by AE test using 11 channels on model vessel with V-notch during hydrotest as in Fig. 6

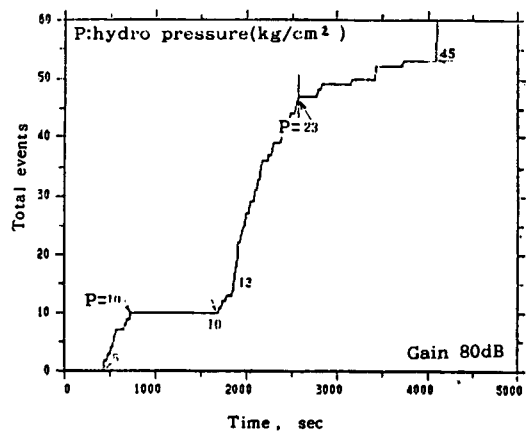


Fig. 20. Total events vs time for region 11 by AE test using 11 channels on model vessel with V-notch during hydrotest as in Fig. 6

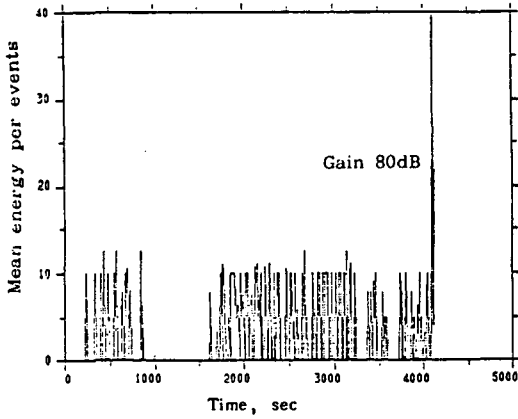


Fig. 21. Mean energy per event vs time for sensor 2 by AE test using 11 channels on model vessel with V-notch during hydrotest as in Fig. 6

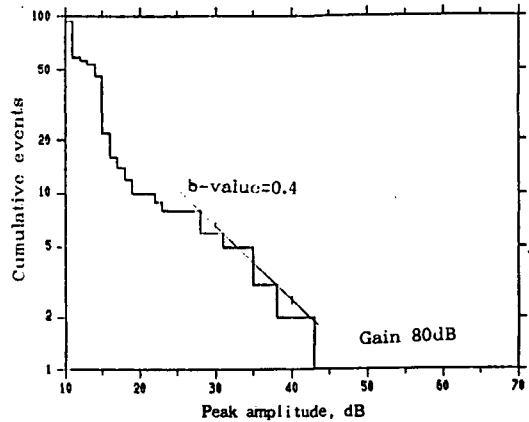


Fig. 23. Log of cumulative distribution events vs peak amplitude for fracture zone by AE test using 11 channels on model vessel with V-notch during hydrotest as in Fig. 6

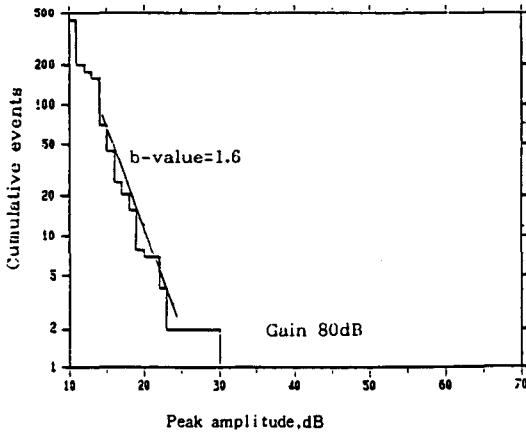


Fig. 22. Log of cumulative distribution events vs peak amplitude for elastic and plastic zones before fracture by AE test using 11 channels on model vessel with during hydrotest as in Fig. 6

4) 용접균열을 가공한 용기의 AE시험

V-notch를 가공한 부위에 구리선을 삽입하여 용접해서 만든 균열을 가진 용기에 대하여 AE 시험을 실시한 결과 Fig. 24와 같은 event의 발생분포를 나타내었다. 대부분의 event는 region 11에서 즉,

용접균열을 가공한 부위에서 발생하였으며 원주용접부위의 slag inclusion부위에서도 집중된 event가 발생되었다. 그림에서 보는 바와 같이 용접균열 주위에서도 많은 event가 나타난것으로 표시되었다.

이것은 거의 동시에 발생된 서로 다른 event를 3개의 sensor에서 분해하여 감지하지 못하였기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 25는 region 11에서 발생된 event의 누계를 나타내고 있으며 6kg/cm<sup>2</sup>부터 많은 event의 발생을 보이고 있으며 10kg/cm<sup>2</sup>까지 승압하는 과정에서 압력상승을 중지한 상태에서도 계속적인 event의 발생을 보이고 있다. 10kg/cm<sup>2</sup>까지 승압하다가 4kg/cm<sup>2</sup>까지 감압하였으며 이때는 event의 발생이 없다가 다시 10kg/cm<sup>2</sup>을 상회하면서부터 event의 발생이 활발하여 14kg/cm<sup>2</sup>에서 부분적인 누설이 발생한 후 event의 발생이 없다가 다시 event의 상승을 보이며 20.5kg/cm<sup>2</sup>에서 과열되었다. Event 당 평균 energy는 Fig. 26과 같으며 V-notch에서 발생된 평균 energy보다 높은 energy를 가진 event가 발생된 것으로 나타났다. Fig. 24의 소원으로 표시한 region 3에서 발생된 event는 원주용접선에 존재하고 있던 slag inclusion에서 발생된 것으로 확인되었으며 event의 발생상황은 Fig. 27과



같다.  $2\text{kg/cm}^2$ ,  $8\text{kg/cm}^2$  과  $12\text{kg/cm}^2$ 에서 각각 1개씩의 event가 발생하였으며 균열의 경우와 같이 연속적인 event의 발생을 보이고 있지 않다.

또 event당 평균에너지는 Fig. 28과 같으며 4 이하의 낮은 energy를 보이고 있다. Power Law Model에 의하여 b-value를 구해보면 Fig. 29에서 균열의전과시에 0.5의 값을 나타내고 있으며 V-no notch의 파열시와 비슷한 값을 보이고 있다.

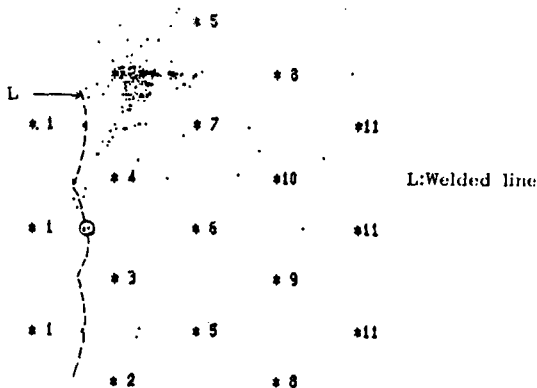


Fig. 24. Distribution of AE events vs sensor location by AE test using 11channels on model vessel with artificial weld-crack during hydrotest as in Fig. 7

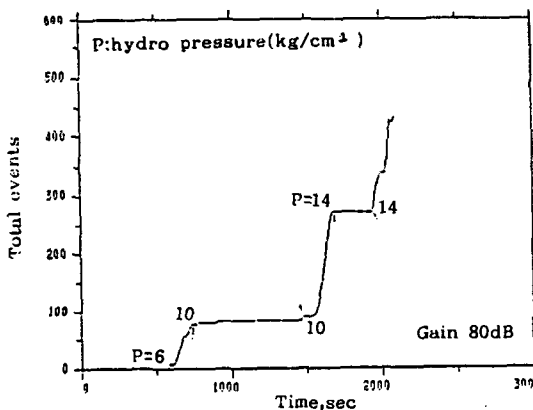


Fig. 25. Total events vs time for region ① by AE test using 11channels on model vessel with artificial weld-crack during hydrotest as in Fig. 7

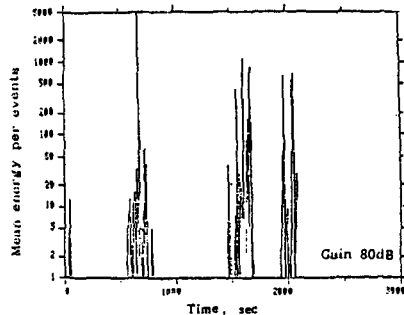


Fig. 26. Log of mean energy per event vs time for region ① by AE test using 11channels on model vessel with artificial weld-crack during hydrotest as in Fig. 7

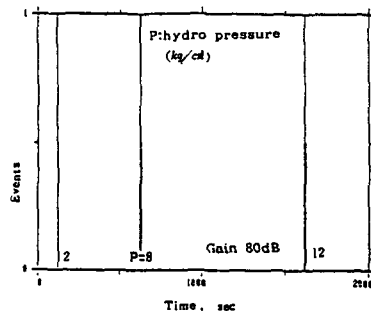


Fig. 27. Events vs time for region ③ by AE test using 11channels on model vessel with artificial weld-crack during hydrotest as in Fig. 7

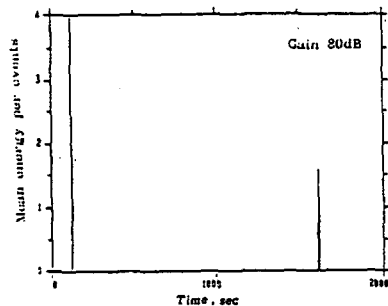


Fig. 28. Mean energy per event vs time for region ③ by AE test using 11channels on model vessel with artificial weld-crack during hydrotest as in Fig. 7

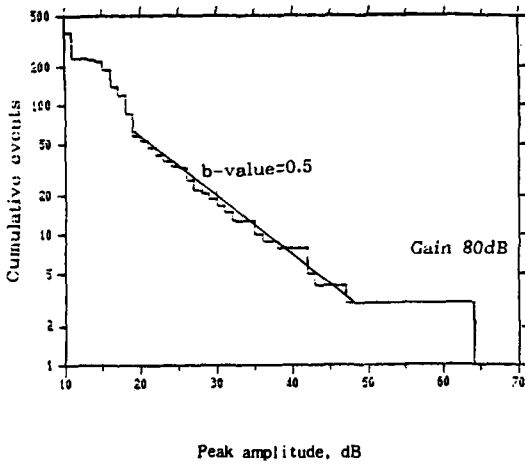


Fig. 29. Log of cumulative distribution events vs peak amplitude during crack propagation by AE test using 11channels on model vessel during hydrotest as in Fig. 7

4. 결론

- 1) Model 용기에 대한 source location은 11 channel을 이용하였을 때 가장 좋은 결과를 나타내었으며 cylindrical program을 이용한 source location에서는 정삼각형의 모양을 변형시키지 않게 sensor를 구성하는 것이 오차를 줄이는 최선의 방법이다.
- 2) 지지대와 같이 용기와 부분 용접된 부위에서는 많은 event를 발생하여 집중적인 event의 분포를 나타내었으며 이것은 비교적 낮은 energy를 가진 event들이므로 AE의 energy를 분석하여 판단할 수

있다.

3) 용기 재료에 변형이 시작될 때에는 용기 전체에 산발적으로 낮은 energy를 가진 event가 급격히 발생하였으며 event의 집중성은 없었다.

4) V-notch 및 균열의 성장시에는 집중적이고 연속적인 event의 발생을 보이며 균열의 성장시에는 notch의 변형시보다 높은 energy를 가진 event가 발생되었으며 slag inclusion에서는 energy가 아주 낮은 event가 단속적으로 발생한다.

5) V-notch에서의 탄소성 변형시 발생된 event의 b-value는 1.4이며 파단시에는 0.4의 값을 나타내었으며 인공균열의 성장시에는 b-value가 0.5로 V-notch의 변형시보다 낮은 값을 나타내었으며 V-notch의 파단시와 비슷한 값을 나타내었다. 따라서 peak amplitude 분포를 해석하여 source의 손상 mechanism을 해석할 수 있다.

참고문헌

- 1) Kaiser J. (1950) : Untersuchungen Ueber das Auftreten Gerauschen Beim Zugversuch, Ph. D Thesis Technische Hochschule, Munich
- 2) Pollock Adrian A. (1979) : Acoustic Emission Amplitude Distributions, Dunegan/Endevco