

원통형 저장탱크의 음향방출시험

권정락 · 류근준 · 이태희 · 김지운

한국가스안전공사 가스안전기술연구센터
(1999년 10월 12일 접수, 2000년 1월 8일 채택)

Acoustic Emission Testing in Cylindrical-Type Storage Tank

Jeong Rock Kwon · Geun Jun Lyu · Tae Hee Lee · Jee Yoon Kim

*R & D Center, Korea Gas Safety Cooperation
(Received 12 October 1999 ; Accepted 8 January 2000)*

요 약

원통형 톨루엔 저장탱크의 구조결함을 조사하기 위하여 음향방출시험을 수행하였다. 원통형 저장탱크는 고장력강으로 제작되었으며, 최근에 저장탱크의 하부 1 및 2단은 전면 보수되었다. 음향방출은 최대설계하중의 75~84% 레벨영역에서 하중절차에 따라 실시간으로 모니터링 되었다. 시험결과는 순수 음향방출뿐만 아니라 유사 음향방출특성도 보여준다. 밸브잡음으로 판단되는 유사 방출들은 하중과는 무관하게 밸브잠금과정에서 과도적으로 발생되었다. 충수과정에서 발생한 순수 음향방출들은 결함에 기인하며, 75~84%의 시험하중영역에서는 성장을 하지 않는 것으로 평가되었다. 이 결함들은 활성센서들을 중심으로 수행된 방사선시험을 통하여 용접균열과 기공인 것으로 밝혀졌다.

Abstract - In order to investigate the structural defects of a cylindrical-type toluene storage tank, we carried out the acoustic emissions. The storage tank was manufactured with high strength steel in 1978 and its's first and second courses from bottom were entirely repaired, recently. Acoustic emissions were monitored with real time according to load sequences in the 75~84% level range of maximum allowable load. Our results show a non-genuine acoustic emissions as well as a genuine characteristics. The pseudo emissions considered as valve noises were transiently occurred on shut-off processes of inlet valve regardless of water loading. The acoustic emission events occurred during water filling phase were estimated due to defects, and in the 75~84% test load level no evidences of defect growth were observed. Those defects were ascertained as weld cracks and porosities through the post radiography testing conducted near active sensors.

Key words : storage tank, acoustic emissions, maximum allowable load, valve noises, events, active sensors, weld cracks, radiography testing.

1. 서 론

정유, 석유화학 혹은 가스설비 등과 같은 대

형 플랜트에 대한 주기적인 검사는 안전성과 경제성 측면에서 매우 중요하다. 세계적인 추세를 보면 플랜트의 가동을 연장하고 구조물의

건전성을 향상시키기 위하여 신뢰성 있는 진단 기술에 대한 요구가 증대되어 왔다. 제한적이기는 하지만 일부 음향방출 시스템은 시험절차와 응용기술에 있어서 많은 발전을 이룩하여 경제적 안전성 측면에서 음향방출의 잠재력과 신뢰성을 향상시키는 계기가 되었다[1,2,3,4]. 음향방출의 잠재적인 가치는 공정유체를 사용하여 설비가동상태에서의 가압, 플랜트 가동중지 전의 cool-down 검사, 사용중인 설비의 동적 연속 모니터링 등으로 요약될 수 있다. 1985년경 현장시험의 가능성이 어느 정도 인정되기 시작한 이래로 음향방출시험이 가장 활발하게 수행되는 분야는 압력용기 및 저장탱크의 구조적 건전성 평가이다[3,5,6,7,8]. 대부분의 압력용기 및 저장탱크들은 관련법령에 의해 주기적인 검사를 받고 있다. 이것의 주요기능은 단순 누설검사로서 사용과정에서 성장하는 결함에 대한 정보나 잠재적인 문제점을 제공하는데는 한계가 따른다.

음향방출(acoustic emission : AE)은 산업설비의 분해검사시간동안 균열의 검지 및 위치표정에 있어서 유효한 수단으로 평가되고 있다. 일반적으로 개방검사는 일련의 비가동시간(downtime), 작업비용, 보수(repair), 그리고 부분적인 비파괴시험이 고려될 때 많은 비용이 소요된다. 특히, 대용량의 압력용기나 저장탱크의 경우에는 검사나 시험의 복잡성은 훨씬 증가한다. 음향방출시험은 플랜트 가동중지기간뿐만 아니라 가동을 멈추기 전의 cool-down 과정에서 시험을 확대할 수 있다. 또한, 대상물의 전체에 대하여 실시간으로 모니터링이 가능할 뿐만 아니라 다른 NDE (non-destructive evaluation) 방법으로 검사가 곤란한 지역에도 적용이 가능한 장점을 가진다[3,4,9,10]. 이것은 사용환경에서 동적 결함을 모니터링하는데 중요하며 분해검사시간동안 NDE가 가능하여 결과적으로 검사시간단축 및 비용절감 효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 현장용을 위한 기초단계로 최근에 용접·보수한 원통형 톨루엔 저장탱크에서의 결함유무 및 결함성장에 관한 정보를 얻고자 음향방출시험을 수행하였다. 그 결과 결함의 존재를 지적하는 순수 음향방출(genuine AE)과 밸브잡음에 기인한 유사 음향방출(non-genuine AE)들이 관찰되었다.

2. 시험방법

2.1. 저장탱크

시험용기는 액체 톨루엔을 저장하기 위하여 1978년 API 650 기준[11]에 따라 A 283 등급 C의 고장력강으로 제작되어 현재까지 사용되고 있는 원통형 저장탱크이다. 이 저장탱크는 Fig. 1에서 보는바와 같이 직경이 13.36m, 높이가 12m이며, 바닥은 편평하며, 지붕은 30° 돔(dome)형으로 되어 있다. 저장탱크의 최대저장높이는 11.2m로 상온에서 사용하도록 설계되어 있으나, 실제 톨루엔 저장량은 최대설계용량의 85%레벨에서 사용하고 있다. 저장탱크벽은 (1.5m×6m) 크기의 강판이 수직방향으로 8단 그리고 원주둘레방향으로 7개가 일정한 간격으로 용접되어 있으며, 인접하는 각단의 수직용접부는 서로 교대로 위치한다. 저장탱크의 하부 1단과 2단의 벽두께는 각각 6.6mm와 6.3mm이며, 나머지 부분은 5.8mm로 되어 있다. 그리고 하부 1단에는 2개의 맨홀이 설치되어 있다. 이 저장탱크는 최근에 API 653의 보수절차서[12]에 따라 하부1, 2단 전면이 모두 용접·보수되었다.

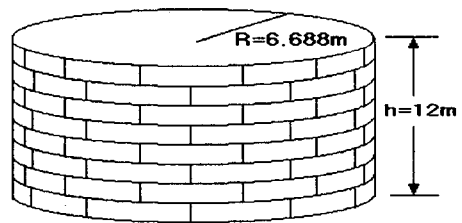


Fig. 1. Dimensions of toluene storage tank.

Table 1. Pencil break results.

거리(m)	진 폭 (dB)			
	센서(1)	센서(2)	센서(3)	평균
0.01	86	88	89	88
0.40	71	71	71	71
1.00	67	64	64	65
2.10	60	60	59	60
4.00	55	51	52	53
5.10	49	50	49	49
6.00	45	46	47	46

2.2. 시험장비 및 센서 배열

음향방출측정장비는 Physical Acoustics Corporation(PAC)의 32채널로 구성된 Spartan 2000이 사용되었다. 본 연구에서 사용된 음향방출 측정장비의 문턱 값은 환경잡음을 고려하여 45dB 레벨로 설정하였다. 음향방출센서는 40dB의 이득을 갖는 진치증폭기(pre-amplifier)가 내장된 PAC R15I를 사용하였다. 이 센서는 70~200kHz 영역의 주파수 대역을 가지며, 공진주파수는 약 125kHz 이다. Table 1은 내용물이 없는 빈 상태의 저장탱크 벽에서 연필심 부러뜨림 실험으로부터 측정된 거리에 따른 센서의 감도를 요약한 결과로서 AE 발생원에서부터 문턱값(45dB)을 상회하는 센서의 최대 거리는 6m 정도로 나타났다. 센서배열은 용접·보수한 저장탱크의 하부 1단과 2단 지역에서의 결함 검출 및 AE 발생원의 위치표정(source location)을 위하여 Fig. 2와 같이 센서를 삼각형 모양(triangular mode)으로 배열하였다. 이 그림에서 RT로 표시된 영역은 음향방출시험 후 결함의 존재유무를 확인하기 위하여 방사선 시험(radiography testing)을 행한 지역을 의미한다.

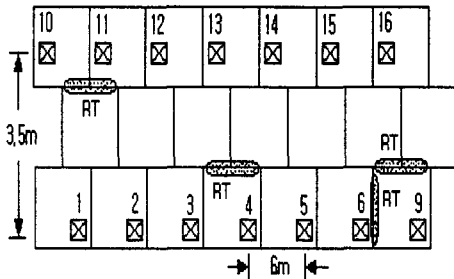


Fig. 2. Sensor arrangements.

각 센서들의 감도교정은 내용물이 담겨져 있지 않은 저장탱크의 외벽에 삼각형 모양으로 부착된 센서근처에서 3회에 걸친 연필심 부러뜨림(pencil break)시험으로 수행되었다. 이들 시험으로부터 측정된 사건(events)들의 평균 진폭값은 78dB로 평가되었으며, 이 평균값에 대하여 ± 4 dB를 벗어나는 각 센서에 대하여 감쇠요인을 제거하여 교정하였다. Table 2는 교정된 각 센서들의 감도를 보여준다. 또한, 도착시간차로부터 계산된 음향방출파의 평균속력은 3.195 m/s로 평가되었다.

Table 2. Sensor Sensitivity.

Sensor No.	Amplitude(dB)				Sensor No.	Amplitude(dB)			
	1st	2nd	3rd	Aver.		1st	2nd	3rd	Aver.
#1	81	79	81	80	#10	77	78	79	79
#2	80	78	80	79	#11	80	81	81	81
#3	77	77	78	77	#12	80	79	81	81
#4	79	78	79	79	#13	79	78	81	81
#5	73	71	71	72	#14	78	76	77	77
#6	75	76	77	75	#15	76	76	76	76
#9	80	78	79	79	#16	76	78	78	77

2.3. 하중절차

저장탱크의 시험하중은 사용유체인 톨루엔 대신에 물을 사용하였다. 충수(filling water)는 소방호수로 저장탱크 하부 1단에 부착된 입력노즐을 통하여 0.8~1.0m/h로 공급되었다. AE 모니터링은 물을 저장탱크의 최대설계용량(11.2m)의 75% 레벨(8.4m)까지 채운 후 Fig. 3에서 보는바와 같이 하중절차에 따라 실시간으로 측정하였다.

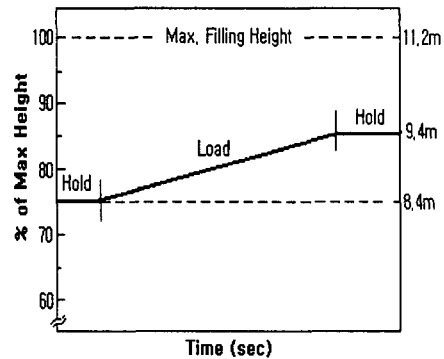


Fig. 3. Load sequence of toluene storage tank.

3. 결과 및 고찰

톨루엔 저장탱크의 75~84% 레벨영역에서 하중절차에 따른 모든 시험채널에서 검출된 음향방출들의 특성들은 Fig. 4에서 보여진다. 하중이 일정하게 유지된 75% 레벨에서는 소수의 AE 사건(events)들이 나타나며, 각 사건들은 4개 이하의 진동횟수(count)를 갖는다. 약 1.0m/h의 충수율로 하중을 증가시키는 (75~

84% 레벨영역에서는 많은 사건들이 지속적으로 발생되었으며 개별 사건들의 진동횟수는 1~100개 정도로 분포되어 있음을 알 수 있다. 또한, 하중(혹은 시간)이 증가함에 따라 사건수가 증가하는 경향은 보여주지 않는다. 한편, 84%레벨에서 하중을 일정하게 유지하기 위하여 충수를 멈추는 순간에서는 밸브잡음에 기인하는 것으로 판단되는 사건들이 비교적 짧은 순간에 걸쳐 과도하게 나타난다.

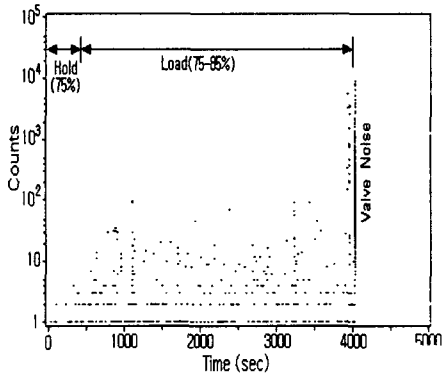


Fig. 4. Event counts versus time Correlation.

밸브를 잠그는 과정에서 14개의 모든 센서(혹은 채널)에 검출된 사건들(events)들의 음향방출 특성은 Fig. 5에서 보여진다. 이들의 진폭은 대부분은 49~60dB 영역에 속하며, 진동횟수($1 \sim 10^5$), 오름시간($1 \sim 10^4 \mu s$) 및 에너지(수십~수백) 등은 상당히 넓은 영역에 걸쳐 분포하고 있다. 이들은 하중을 일정하게 유지하기 위하여 밸브를 잠그는 과정에서만 발생되며 완전히 잠긴 상태에서는 발생되지 않는다. 이것은 Kaiser 효과[13]나 Felicity 효과[13]와는 거의 무관한 유사 AE임을 알 수 있다. 따라서 이러한 과도방출들은 재료의 변형, 균열성장, 응력 완화(stress release) 등의 순수한 음향방출특성이 아닌 밸브진동 등에 기인한 잡음신호로 판단된다. 한편, Fig. 4의 약 380초 시점 즉 75% 하중유지에서 충수를 하기 위하여 밸브를 여는 과정에서는 Fig. 6의 결과와 유사한 과도한 음향방출이 일어나지 않았음을 알 수 있다. 이러한 차이는 밸브의 개폐시 조작상태에 따른 진동발생유무에 기인하는 것으로 생각된다. 일반적으로 밸브나 유체흐름에 의한 잡음신호들은 저장탱크나 압력용기 등의 음향방출 시험과

정에서 흔히 발생되며, 시험환경에 매우 민감한 것으로 보고되고 있다[3].

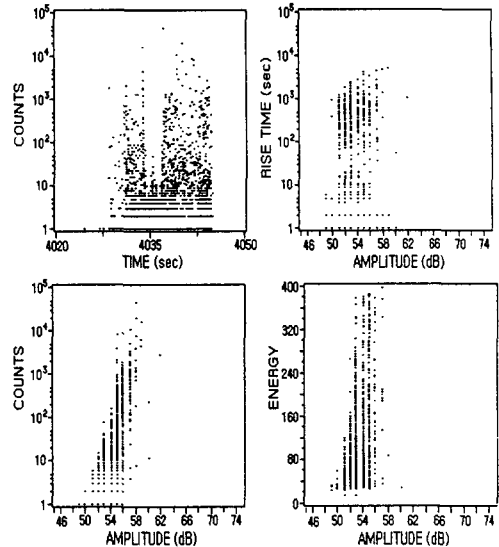


Fig. 5. Correlation plots of AE parameters observed in all channels during the valve shut-off.

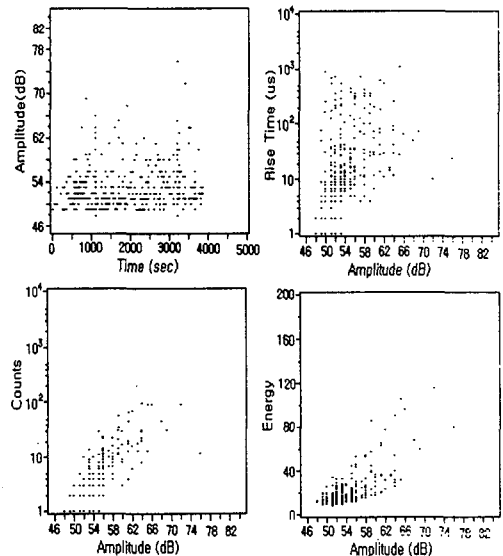


Fig. 6. Correlation plots of AE parameters observed in all channels during hold and load phases.

Fig. 6은 모든 시험채널에서 밸브잡음을 제거한 후 하중유지(hold) 및 하중(load) 과정에서 발생된 음향방출 변수들의 특성분포를 도시한 것이다. 이들은 Fig. 5의 잡음신호 특성과는 달리 하중을 가하는 동안 AE 사건들은 지속적으로 발생하며, 진폭은 대부분 49~68dB의 영역에 분포되어 있다. 이러한 거동은 Kaiser 효과[13]로 설명될 수 있으며, 용접·보수한 틀루엔 저장탱크의 원주 벽 및 하부 경판에 존재하는 결함 혹은 국소 변형 등에 의한 순수 음향방출(genuine acoustic emission)의 결과로 판단된다.

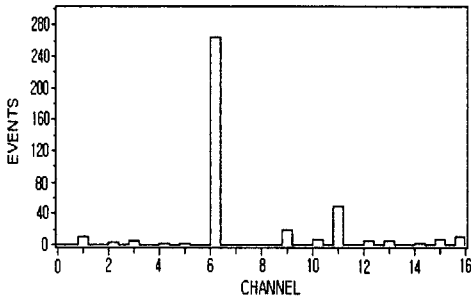


Fig. 7. Cumulative events observed in each channels.

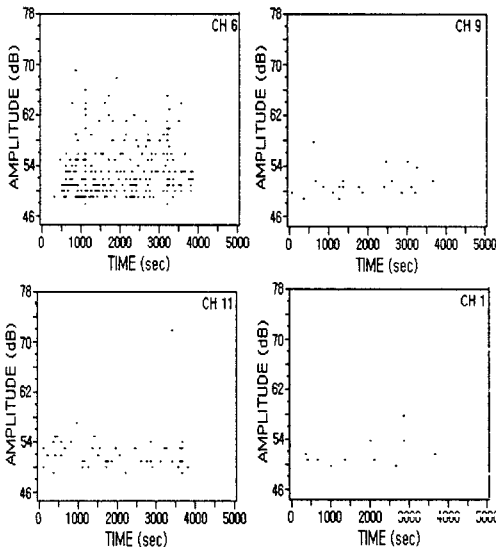


Fig. 8. Event amplitude versus time correlations in active sensors 6, 11, 9, and 1.

Fig. 7은 Fig. 6의 결과를 바탕으로 각 채널에 발생된 누적 사건수를 나타낸 것으로서 센서 6은 매우 활성적(active)이며, 센서 11과 9 등은 비교적 활성적임을 보여준다. 개별 센서에 검출된 events의 진폭과 시간과의 상관관계를 나타낸 Fig. 8에서 하중(혹은 시간)이 증가함에 따라서 사건들은 지속적으로 발생되나, 진폭의 크기는 75~84%레벨의 충수과정(water filling phase)에서 하중에 거의 무관함을 보여준다. 이것은 75~84%의 시험하중영역에서는 결함의 성장은 일어나지 않는 것으로 판단된다. 왜냐하면, 결함이 성장할 경우에는 사건의 진폭은 증가하는 경향을 보인다. 또한, 활성 센서별로 검출된 사건들의 진폭에 따른 counts, 오름시간(rise time) 및 에너지의 분포를 분석한 결과 Fig. 6의 count-amplitude 상관관계와 유사하게 사건의 진폭이 클수록 이들 변수값들은 상대적으로 큰 값을 갖는 경향을 보였다.

센서 6, 11, 9, 1의 결과들은 major 혹은 minor 결함들의 존재를 암시한다. 결함의 존재 유무를 검증하기 위하여 저장탱크의 용접부를 중심으로 방사선 시험을 하기 전에 MONPAC사의 S/W를 사용하여 AE 발생원의 위치표정을 하였으나, 뚜렷한 위치표정의 결과를 얻지 못하였다. 이것은 센서들간의 간격이 긴 것에 원인이 있는 것으로 판단되었다. 음향방출시험에서 센서간격은 시험대상체의 음향감쇠계수를 바탕으로 설정된다. AE 발생원의 위치표정을 위해서는 탄성파의 속도, 감쇠, 반사 및 다중경로 등을 고려하여 센서간격을 결정하여야 한다. 본 실험에서 센서간격은 저장탱크에서 물을 채우지 않는 상태에서 6m로 결정하였으나, 실제 AE 시험은 물이 채워진 상태에서 수행되었다. 이것은 물과 접촉으로 인하여 공기에 비해 저장탱크 내벽의 경계면에서 반사되는 에너지 손실의 증가를 수반한다. 따라서, 센서 감도 교정 및 간격결정은 시험유체를 채운 상태에서 수행되어야 할 것으로 판단된다.

활성 센서 6, 11, 9를 중심으로 Fig. 2에 도시된 지역에 방사선 시험을 수행한 결과 API 1104의 결함허용기준[14]에 부합되지 않은 결함은 센서 11 밑에 위치한 원주 용접부에서 용접균열을 포함하여 3개, 센서 4 위의 원주 용접부에서 1개의 기공(porosity)이 발견되었다. 그러나, 센서 6과 9 사이의 수직 용접부와 위쪽에 위치한 원주 용접부에서는 작은 기공들은 존재하였으나, API 허용기준을 벗어나는 용접

결합은 발견되지 않았다.

부분적으로 실시한 방사선 시험과 AE 시험 결과와의 상이함은 크게 2가지로 요약할 수 있다. 첫째, 센서 4는 센서 11에 비해 활성이 낮으나 인접한 용접부에서는 허용기준에 부적합한 기공이 발견되었다. 이것은 기공이 85%의 시험하중레벨 이하에서는 의미 있는 응력 발생원으로 작용하지 못하는 것으로 판단된다. 둘째, 센서 6은 센서 11에 비해서 상당히 많은 사건들과 더불어 상당히 큰 진폭을 갖는 사건들이 다수 발생되었음을 보여 주었다. 이들의 음향방출 변수특성은 벨브나 유체흐름에 의한 유사 음향방출이 아닌 순수 AE인 것으로 판단된다. 따라서, 센서 6에 나타난 AE 발생원은 RT를 실시하지 못한 저장탱크의 하부경판과 벽의 원주용접부 결합이나 이들 부위에서의 하중에 의한 국소변형에 기인할 가능성도 있다. 이것을 규명하기 위해서는 하중을 저장탱크의 최대사용하중까지 가하는 추가적인 시험이 요구된다.

4. 결 론

현장응용을 위한 기초단계로 20여년간 사용하고 있는 원통형 톨루엔 저장탱크에 대하여 음향방출을 실시간으로 측정하였다. 하중절차에 따른 음향방출 사건들의 거동으로부터 벨브 잡음신호와 결합신호를 구분할 수 있었으며, 일부 결합신호들은 방사선시험으로 확인할 수 있었다. 본 연구로부터 얻은 결과들을 요약하면 다음과 같다.

1. 고장력강의 저장탱크 외벽에서 측정된 음향방출과의 평균속도는 3,195m/s로 평가되었다.
2. 충수를 시작하거나 중지하는 시점에서는 벨브잡음이 발생될 수 있다. 이들은 순간적으로 과도하게 발생되며, 진폭 등의 AE 변수들은 하중과 일치하지 않고 순수 AE에 비해 상당히 넓은 영역에 걸쳐 분산적으로 분포하는 경향을 갖는다.
3. 용접결합 등에 의한 순수 음향방출은 하중이 증가함에 따라 지속적으로 발생되나, 이 시험하중영역에서 결합성장에 대한 어떠한 음향방출특성은 관찰되지 않았다.
4. 시험하중영역에서 비활성(non-active)인 결

합은 현저한 음향특성을 보이지 않는다.

참 고 문 헌

1. Core P.T., "MONPAC - Condition Monitoring for Static Plant - Case Histories", J. Acoustic Emission, Vol.8, No.3, 1989, pp.31-33
2. Miller R.K., "Acoustic Emission of Storage Tanks", Tappi Journal, Dec. 1990, pp.105-109
3. Physical Acoustics Corp., "MONPAC Technology Package", Vol. I, II, 1987
4. Tidswell R.D., Shipley M.P., Cane B.R., "An Evaluation of Acoustic Emission for In-service Crack Detection in Pressure Vessels and Pipework", PVP-Vol.336, Structural Integrity, NDE, Risk and material performance for Petroleum, Process and Power ASME 1996, pp.175-181
5. Hewerdines S., et al., "Plant Integrity Assessment by the Acoustic Emission Testing Method", Institute of Chemical Engineers, 1993
6. Fower T.J., "Recent Developments in Acoustic Emission Testing of Chemical Process Equipment", Progress in Acoustic Emission IV, Proceedings 9th International Acoustic Emission Symposium, Kobe, Japan, 14-17 Nov., 1988, pp.391-404
7. Blackburn P.R., Rana M.D., "Acoustic Emission Testing and Structural Evaluation of Seamless, Steel Tubes in Compressed Gas Services", ASME J. Pressure Vessel Technology, Vol.108, 1986, pp.234-240
8. Barthelemy H., "Periodic Inspection of Compressed Gas Cylinders and Tubes - Flaw Detection using Acoustic Emission Testing", ASME J. Pressure Vessel Technology, Vol. 110, 1986, pp.161-167
9. Peacock M.J., "Acoustic emission Monitoring of a Large Pressure Vessel During a Pneumatic requalification Test", J. Acoustic Emission Vol. 8, No.3, 1989

원통형 저장탱크의 음향방출시험

10. Shum P. W., Ducke J. C., "Critical Analysis of Acoustic Emission Monitoring of Pressure Vessels", PVP-Vol. 257, Scientific and Engineering Aspects of Nondestructive Evaluation ASME 1993, pp.1-5
11. API Standard 650, "Welded Steel Tanks for Oil Storage"
12. API Standard 653, "Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction"
13. Miller R.K., McIntire P., "Acoustic Emission Testing", Vol. 5, 2nd Ed., Non-destructive Testing Handbook, ASNT, 1987.
14. API 1104, "Welding of Pipelines and Related Facilities", Section 6.