

음향방출법을 이용한 Type 1 및 Type 2 가스실린더의 정량적 평가기준에 대한 연구

Study of Quantitative Assessment Standard for Type 1 and Type 2 Gas Cylinders Using Acoustic Emission Testing

김동현*†, 이상범*, 김경훈**, 윤동진***, 배동명****

Dong-Hyun Kim*†, Sang-Bum Lee*, Kyung-Hoon Kim**, Dong-Jin Yoon***

and Dong-Myung Bae****

초 록 음향방출법은 차량 내부에 장착된 실린더의 경우 분해없이 동작중에 실시간으로 측정이 가능하므로 다른 비파괴평가 방법보다 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 가지고 음향방출법은 미국 교통부(DOT)로부터 수압시험의 대체로 압력용기의 안정성 평가 방법으로 승인되었다. 본 논문은 압력용기 제조사로부터 UT 결함용기 및 결함이 있는 이음매 없는 압력용기인 Type 1과 Type 2에 대한 정량적인 평가기준에 대한 연구를 수행하였다. Type 1의 경우, ASTM E 1419-02를 기준으로 113L 규격의 준비된 용기로 피로반복시험을 통해 크랙의 성장부터 누설까지 경향을 파악하였다. Type 2의 경우, ASTM E 2191-02를 기준으로 119L 건전한 용기와 수압가압으로 불량용기를 용기에 slow-fill 방법으로 검증하였다. 본 연구에서 음향방출법을 이용한 Type 1과 Type 2의 시험은 불량용기와 건전한 용기를 효과적으로 구분할 수 있었다.

주요용어: 음향방출, Type 1, Type2, 가스실린더, 정량적 평가

Abstract Acoustic emission testing (AET) of cylinders is advantageous in that it can be directly conducted on cylinders installed in a car, without needing to disassemble them on a real-time basis. Therefore, users prefer AET over other nondestructive testing methods. Owing to these advantages of AET, it has been approved by the Department of Transportation of the U.S. as a safety evaluation method for pressure containers or as an alternative to the hydroproof testing method. This paper presents a study of the quantitative evaluation criteria for a container having ultrasonic testing defects and also for Type 1 and Type 2 gas cylinders, which are defective seamless pressure containers provided by NK, a manufacturer of pressure containers. For the Type 1 cylinder, the process from crack growth to leak was observed in a repetitive fatigue test using a 113 L container according to ASTM E 1419-02. Further, for the Type 2 cylinder, integrity was evaluated using a 119 L sound container and a container damaged by hydraulic pressure, by the slow-fill method according to ASTM E 2191-02. Based on the AET results of the Type 1 and Type 2 cylinders, quantitative evaluation criteria were established for a defective and non-defective container.

Keywords: Acoustic Emission, Type 1, Type 2, Gas Cylinder, Quantitative Assessment

1. 서 론

최근 CNG 버스의 폭발로 인한 수송기계 안전
편의 및 관련 사회안전시설에 대한 안전점검에

대한 관심이 높아지고 있다. 더불어 정확한 시험
검증 및 사고를 사전에 방지할 수 있는 검사시스
템의 개발 및 안전검사기준에 대한 필요성 또한
부각되고 있다.

[접수일: 2013. 10. 16, 수정일: 2014. 2. 10, 게재확정일: 2014. 2. 27] *㈜렉터슨, **㈜엔케이, ***한국표준과학연
구원, ****부경대학교 음향진동공학과, †Corresponding Author: RECTUSON, Co., LTD, 59, Gwangnyecheonam-ro,
Naeseo-eup, Masan Hoewon-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do 630-857, Korea (E-mail:dhkim@rectuson.com)

CNG 차량은 도심 대기오염을 줄이고자 2002년부터 도입돼 현재 전국적으로 버스와 청소차량을 포함하여 2만 5천 여대가 운행 중이다. CNG 버스에 장착된 Type 2 압력용기의 경우, 현존하는 대부분의 CNG 버스차량에 장착되어 운행되고 있다.

Type 1용기는 강 또는 알루미늄으로 만들어진 금속제 용기로 복합재료에 의한 구조적 강화 없이 금속재료만으로 압력하중을 견디도록 만든 용기이고, Type 2는 얇은 금속제 용기에 탄소섬유나 유리섬유(fiber glass)를 원주방향으로 감아서 만든 무게는 줄이고, 강도는 높은 용기를 말한다.

음향방출시험(acoustic emission test)은 이러한 압력용기에 대한 안전성 평가를 수행하는 수단 및 수압시험의 대체목적으로 1983년 미국 교통국(DOT)의 승인 하에 최초 시험검사법으로 도입되었으며, 차량에 장착된 실린더(cylinder)를 분해하지 않고 가스 충전을 통한 시험이 가능한 장점으로 다른 비파괴검사 방법보다 선호되고 있다.

일반적으로 음향방출시험으로 건전성 평가를 수행한 후 의심이 되는 부위를 2차 검증 수단으로 초음파검사(ultrasonic test)나 시험편의 전자현미경(SEM) 등으로 분석하여 최종 용기 내부의 피로균열 성장을 평가로서 상호검증(cross check)을 수행하여 용기의 건전성을 최종 평가한다.

해외의 경우 Blackburn[1]이 튜브 트레일러에 장착된 가스 충전된 이음매 없는 압력용기에 110% 충전된 압력에서 ASTM E 1419-96을 기준으로 20 cm 이내 5개 이상의 AE event가 발생할 경우 정밀검사를 요구하는 검사기준 연구를 수행하였으며, Fultineer와 Michell[2]은 natural gas vehicle(NGV)에 대한 평가기준을 ASTM-E07043-95/1을 적용하여 세 가지 기준으로 3년 이내 재시험, 1년 이내 재시험, 즉시 폐기로 분류 기준을 제안하였다. Akhtar와 Kung[3]은 4년 이상 사용된 가스 충전된 Type 2 용기 10개를 이용하여 loading, hold, unloading의 하중구간 내에서 AE 시험을 수행하였으며, Joselin[4]은 glass fiber reinforced plastic(GFRP) 피로시험에 AE법을 이용한 연구와 Anastasopoulos[5]는 metallic spherical pressure vessel에 건전성 평가를 위해 상용시스템을 이용한 시험으로 용기에 대한 건전성을 평가하였다.

한편, 국내 가스용기에 대한 정기검사는 차량 검사시 가스 누출 여부나 용기의 외관상으로 확인되는 파손 여부를 파악하는 정도가 일반적이며, 압력용기의 건전성 평가에 대한 지침으로는 ASTM이나 ASME Code를 기준으로 시험을 실시하고 있으나 정확한 기준 해석과 평가에 상당한 어려움을 내포하고 있다.

국내의 경우 Type 2 용기에 대한 피로반복시험을 통한 인공결함 용기와 건전한 용기에 대한 구분은 AE 시험으로 수행하였으나[6,7] 손상 평가의 기준을 정량적으로 제시하는데 한계가 있었다.

본 연구는 이음매 없는 압력용기에 대한 건전성 평가시스템을 개발하고, 다양한 용기에 적용하기 위해 실제 압력용기 제조사에서 생산되는 용기로 여러 형태로 용기에 손상을 가한 후 음향방출법을 이용하여 정상용기와 불량용기를 구분할 수 있는 건전성 평가에 대해서 정량적인 평가 기준 마련에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험

본 연구를 수행하기 위해 개발된 압력용기의 건전성 평가시스템은 음향방출 센서, 데이터 수집장치, 시그널 컨디셔닝 유닛, 건전성평가 소프트웨어로 Fig. 1과 같이 구성하였으며 세부사양은 Table 1과 같다.

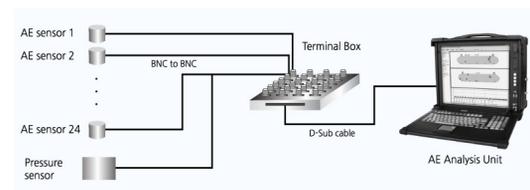


Fig. 1 Structure of the system

Table 1 Specification of AE system used in test

Description	Specification	Remark
AE sensor	140 kHz (resonant type) 40 dB (built-in preamplifier)	
Amplification Unit	50~300 kHz filter 28V power supply	
DAS	14bit, 3MSPS	
Test code	ASTM E 1419-02	Type1
	ASTM E 2191-02	Type2

2.1. 음향방출 센서

40 dB 앰프 내장형 type인 Fuji Ceramic사 제품(AE144SA40-BNC)으로 금속제 압력용기 테스트에 적합한 144 kHz 공진형센서를 용기의 곡면 부위에 장착 및 탈착이 용이하도록 마그네틱 홀더와 같이 결합하여 사용하였다.

2.2. 데이터 수집장치

채널당 3MSPS 샘플링 속도로 균열신호에 대한 고속데이터 수집 및 신호처리가 용이한 시스템으로 구성하였다.

2.3. 시그널 컨디셔닝 유닛

시그널 컨디셔너는 증폭, 필터, 전원공급의 역할을 수행하는데, 증폭의 경우 센서로부터 입력되는 균열신호는 수 μV 신호로 상당히 미약하므로, 이 신호를 수 mV로 증폭하도록 20/40 dB 증폭기능을 수행한다. 필터는 압력용기의 결합으로 발생하는 균열신호에 해당하는 주파수 대역인 50~300 kHz를 선택하여 신호를 추출하도록 설계되었다. 전원공급기능 센서에 대한 동작 전원공급 및 신호를 취득할 수 있도록 구성하였다.

그리고 채널 수는 용기 하나당 시험을 위해 2 채널 기준으로 12개의 압력용기를 동시에 시험이 가능하도록 24채널로 구성되며, 압력이나 별도의 다른 파라미터 신호의 입력이 가능하도록 2채널 입력을 설계에 포함하였다.

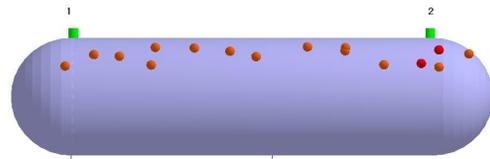
2.4. 건전성 평가 소프트웨어

소프트웨어 설계는 현장 사용자의 편의를 돕기 위해 그래픽 유저 인터페이스를 기반으로 설계되었으며, 용기 평가를 위한 ASTM 규격의 기술된 순서를 준수 하였다. Fig. 2는 용기 시험에 대한 1차원 위치추정을 나타낸 것이다.

(a)는 센서를 용기의 양 끝단에 위치시키고 실제 시험전에 센서에 대한 감도 테스트를 수행하기 위해 PLB(pencil-lead break)를 수행한 결과를 나타낸 것이고, (b)는 압력을 가압하여 유지기간(hold period) 동안 발생한 AE count에 대한 결과를 나타낸 것이다. (c)는 8개의 실린더를 동시에

테스트를 수행한 결과, 1개의 용기에서 rejection criteria인 20 cm 이내에 5개 이상의 AE count가 발생한 용기로서 불량으로 판정된다. 이때, 용기에서 발생하는 균열신호를 1차원 위치추정기법을 이용하여 화면상에 점(point)으로 표시되도록 구성하였으며, 신호의 진폭크기 비를 확인하기 위해서 용기의 아래 면을 기준으로 위쪽을 y축으로 신호의 크기를 같이 표시하였다. 시험결과, 건전한 용기는 파란색으로, 불량용기는 붉은색으로 표시하여 사용자가 직관적으로 구분이 용이하도록 개발되었다.

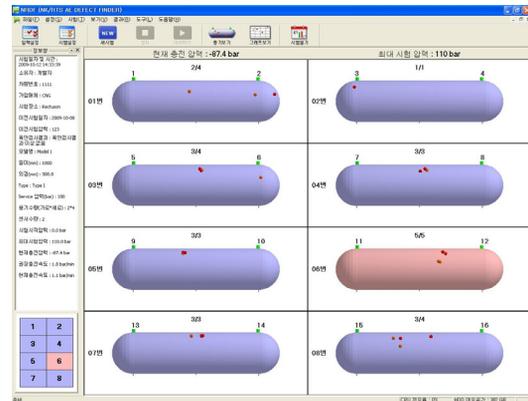
그리고 접촉식 AE 센서는 couplant를 사용하여 부착하므로 ASTM과 같은 표준화 절차를 따르더라도 부착할 때마다 sensitivity가 달라질 수 있으므로 용기시험 전 용기의 양 끝단에 센서를 부착하고 PLB(pencil-lead break)를 수행하여, 진폭의



(a) Screen showing the result of PLB (pencil-lead break method) prior to the actual hydraulic testing



(b) Screen showing the source location during the pressure holding period



(c) Screen showing the testing of eight gas cylinders

Fig. 2 Developed software for evaluation of integrity

평균값이 3 dB 이내를 벗어나지 않을 경우 시험을 수행하도록 기준을 마련하였다.

2.5. Type 1 용기

Type 1 용기에 대한 실린더 규격은 Table 2와 같고, 현장시험을 위해 ENK사 생산현장에서 UT 불량으로 판정된 DOT 3AAX규격 (용량 113 리터, 길이 1.4 m) 용기를 준비하여 반복시험기 (cycling tester)에 수압을 이용하여 가압 및 감압을 반복하여 피로를 누적시켜 용기에서 결함 발생을 유도하였다.

2.6. Type 2 용기

Type 2 용기에 대한 실린더 규격은 Table 3과

Table 2 Specified cylinders, typical dimensions, and service pressure of Type 1

Specification	DOT 3AAX	DOT 3T	DOT 3A	DOT 3AA	DOT 107A
Outside diameter, in. (cm)	22 (55)	22 (56)	9.63 (25)	9.63 (25)	18 (46)
Nominal wall thickness, in. (cm)	0.54 (1.37)	0.42 (1.07)	0.31 (0.79)	0.25 (0.64)	0.75 or 0.86 (1.9 or 2.2)
Length, ft (m)	18 to 40 (0.5 to 12)		12 to 32 (4 to 10)		33 (10)
Typical service pressure, psi (MPa)	2400 (16.6)				2600 or 3300 (18 or 23)
Typical fill pressure, psi (MPa)	600 to 3000 (14.14 to 20.68)				2600 to 3300
Alternate retest method	hydrostatic test, at 1.67 times marked service pressure every five years with volumetric expansion measurement				

Table 3 Specification of Type 2 container used in test

Specification	ANSI/CSA NGV 2-2000
DOT Type	KGS C 024-2004
Working Pressure MPa(bar)	20.7(207)
Hyd. Test Pressure MPa(bar)	31.1(311)
Auto-fretage Pressure MPa(bar)	41.0(410)
Length(mm)	1520
Volume(L)	119

같다. NK사에서 제공된 NK CNG Type 2 용기 4개를 준비하였으며, 공기압으로 시험을 진행하였으므로 안전을 위해 두께 5T의 보호용기 내부에 Type 2 용기를 위치하였다.

2.7. 실험방법

Type 1의 경우, 사용압력의 30%에서 사용압력의 110%까지 가압하여 구간 내에서 발생한 음향 방출 hit 횟수로 용기의 건전성을 검사한다. 가압은 6.0 MPa (60bar)에서 2분간 유지한 후, 16.5 MPa (165bar, 사용압력의 110%)까지 가압하고 16.5 MPa (165bar)에서 10분간 유지하여 그 구간에서 발생한 hit를 확인하여 용기를 판정한다. Fig. 3는 Type 1 용기의 양 끝단 부위에 센서를 위치하여 시험환경을 구성한 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

Type 2의 경우, slow-fill과 fast-fill 방법 중, 본 연구에서는 사용압력의 50%에서 2분간 유지한 후, 사용압력의 110%까지 가압하고 사용압력의 110%에서 10분간 유지하여 그 구간의 count의 누적값을 확인하여 용기를 판정하는 slow-fill 적용하였다. Fig. 4는 Type 2 용기의 공기압 시험을 위해 구성된 시험환경으로 원통형의 두꺼운 강철

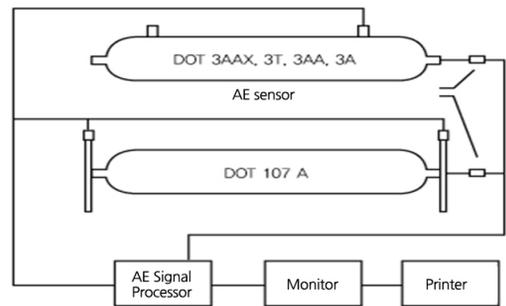


Fig. 3 Test environment for Type 1 container

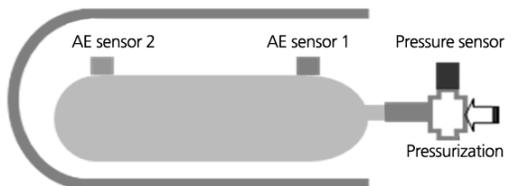


Fig. 4 Test environment for Type 2 container

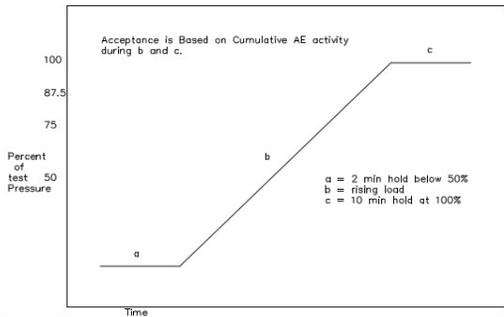


Fig. 5 Slow-fill method for Type 2 container

관 내에 용기를 위치하고 압력센서로 사용압력 범위를 조절하도록 구성된 개략도이며, Fig. 5은 slow-fill에 대한 시험방법을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Type 1 용기의 피로파괴시험

피로반복시험기(cycling tester)를 이용(Fig. 6(a), (b))하여 피로반복에 따른 빈도를 1,000회를 기준으로 누적된 음향방출 hit가 발생하는 비율에 대한 평가를 수행하였다. Fig. 6(c)와 같이 반복시험에 따른 누적빈도가 증가함을 확인하였으며, Table 4와 같이 반복시험 구간별 누적 hit 빈도를 확인할 수 있었다.

Table 4 AE count and accumulated hits per cycle for Type 1 container used in the test

Cycle count (time)	Average Hit	Standard deviation	Cycle count (time)	Average Hit	Standard deviation
0 ~ 1,000	3.91	1.86	7,001 ~ 8,000	5.07	1.27
1,001 ~ 2,000	4.14	1.43	8,001 ~ 9,000	5.95	1.54
2,001 ~ 3,000	5.01	1.33	9,001 ~ 10,000	10.31	2.16
3,001 ~ 4,000	4.66	1.19	10,001 ~ 11,000	13.65	1.98
4,001 ~ 5,000	4.6	1.20	11,001 ~ 12,000	16.81	2.18
5,001 ~ 6,000	5.41	1.34	12,001 ~ 13,000	21.22	2.30
6,001 ~ 7,000	4.69	1.26	13,001 ~ 14,000	24.28	1.85

11,000회 피로반복에서 균열신호와 유사한 특징이 확인되어 초음파검사(이하 UT)를 통해 3 mm 이내 균열 가능성을 확인하였다.

해당부위를 절단하여 확인 결과 용기내부의 표면결함을 육안으로 관측할 수 없었다.

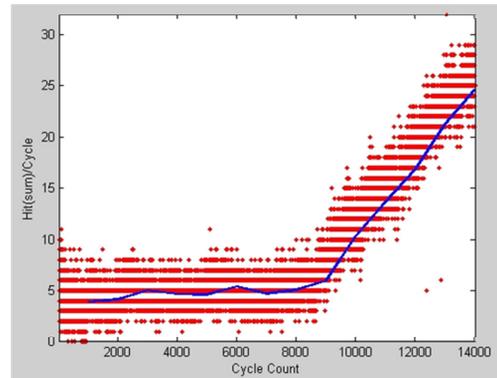
Fig. 6과 같이 약 8,000회 이후 가압구간에서 신호의 발생 빈도가 증가하였고 8,000회 이후 용기가 매우 불안정해져 이로 인해 균열신호가 발생하고 피로도에 따라 균열에서 누설로 진전되는 양상을 AE 신호로부터 확인할 수 있었다.



(a) External view of cycling tester



(b) Internal view of cycling tester



(c) AE hit rate graph for Type 1 container according to the cycle count

Fig. 6 Testing environment and testing result for Type 1 container

3.2. Type 1 용기의 정량적 판정기준 및 결과

Type 1은 ASTM E 1419-02b[8] 규격에 근거 하여 20 cm 이내에 5개 이상의 AE hit가 발생할 경우 불량인 용기로 간주하여 위치를 파악한 후, 2차 비파괴검사 방법(UT 검사 등)을 수행하여 결함의 여부를 재확인하여 건전성을 판정한다.

수압으로 반복 가압한 Type1 용기에 대해 AE 시험 결과 Fig. 7과 같이 20 cm 이내에서 5개의 균열로 추정되는 신호가 취득되어 결함용기로 구분할 수 있었다. 해당부위에 대해 UT로 검사 결과 3 mm 이내의 결함이 있는 것으로 판정되었고, 절단을 통한 확인 결과 육안결함 관측은 할 수 없었던 것으로 판단할 때, 결함이 진행중인 미시적인 균열신호로 판단된다.

3.3. Type 2 용기의 건전도 평가

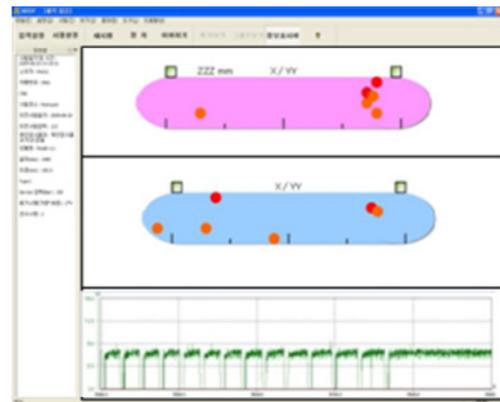
준비된 용기는 정상용기 2개 및 60.0 MPa (600bar) 수압 가압된 용기 내부가 손상된 용기 2개를 각각 준비하였다.

압력센서를 부착하여 slow-fill 방식으로 11.0 MPa(110bar)에서 2분간 유지한 후 22.8 MPa (228bar, 사용압력의 110%)에서 10분간 유지하여 그 구간의 AE count의 누적값을 확인하여 용기를 건전성을 평가하였다. 시험 결과, Fig. 8과 같이 Test 5와 Test 8 용기에 비해 Test 6과 Test 7의 용기가 압력 구간 내에 음향방출의 발생도(AE activity)가 높음을 확인하였다.

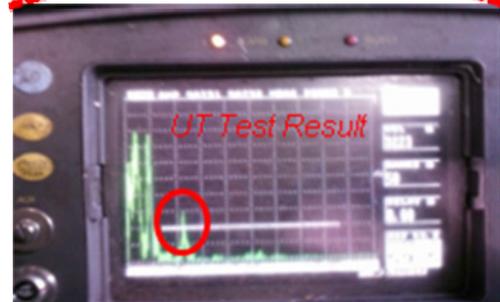
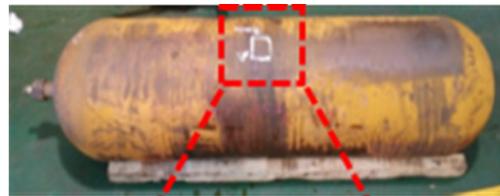
Test 6과 7의 AET result는, Fig. 8에서 압력 유지 기간 중 두 용기 모두에서 압력 유지 중 cumulative count가 지속적으로 증가하는 특징을 Test 5와 8의 AET result는 우측 하단의 2가지 그래프 특성과 같이 압력 유지 구간 중 count의 증가가 없는 완만한 특징을 가진다.

Test 6과 7의 경우, 용기를 파열 직전까지 수압을 이용하여 가압 후 압력을 제거한 용기로서 실제 용기의 표면에는 많은 균열이 발생한 상태이다. AE 시험 결과, 두 용기 모두에서 압력 유지 중 누적 count가 지속적으로 증가하였으며, 그 정도가 압력이 증가할수록 압력에 비례하여 증가하는 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

Test 5와 8의 경우, 정상 용기를 이용한 시험으로 압력 유지 중 누적 count가 증가하지 않고, 압



(a) Result of AET test



(b) Result of UT test

Fig. 7 Results of AET and UT testing for Type 1 container

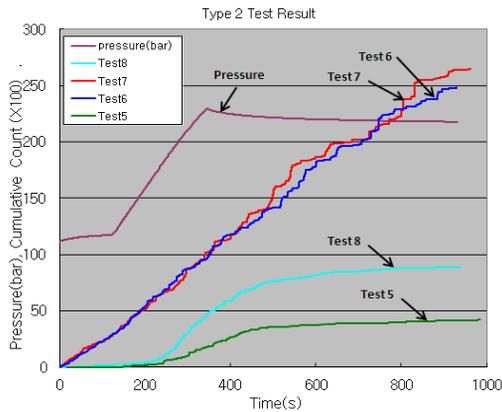


Fig. 8 Result of tests for Type 2 container

력이 증가할수록 AE count의 증가율이 완만한 특성을 지니고 있는 것으로 보아 비교적 안전한 용기라 판별된다.

3.4. Type 2 용기의 정량적 판정기준 및 결과

Type 2의 경우, ASTM E 2191-02[9] 규격에 근거하여 slow-fill 혹은 fast-fill법으로 검사하며 누적 AE count가 5만 이상이면 불량, 1만~5만이면 1년 이내의 재검사 대상으로 분류한다.

Test 5와 Test 8의 2개의 용기는 규격에서 규정하는 rejection criteria 10000 누적 count를 초과하지 않고 있기에 정상용기로 판정된다.

Test 6과 Test 7의 2개의 용기 모두 규격에서 규정하는 rejection criteria 10000 누적 count를 초과하고, 50000 누적 count는 초과하지 않기 때문에 1년 이내 재검사를 수행하면 된다.

4. 결론

음향방출기술을 이용한 Type 1 및 Type 2 용기에 대한 정량적 평가기준을 적용한 시험 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) Type 1 용기의 경우, cycling test를 통해 용기가 건전한 상태에서는 총 발생 hit의 수가 5개 내외를 유지하고, 피로가 누적될수록 발생 hit 수가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해, 발생 hit 수를 이용하여 용기의 상태를 판단하고, ASTM E1419 규격에 근거하여 정상

용기와 불량용기에 대해 정량적인 평가가 가능함을 확인하였다.

- 2) Type 2 용기의 경우, 건전한 용기와 60.0 MPa (600bar) 가압된 불량용기를 이용한 시험에서 하중 구간 내에서 음향방출의 활성도로 용기의 상태를 판단하고, ASTM E 2191 규격에 근거한 정량적 평가기준으로 용기의 건전도를 평가할 수 있었다.
- 3) 12개의 용기를 동시에 시험할 수 있도록 24채널 전용 하드웨어와 시험 순서 및 시험 결과를 즉시 알 수 있는 소프트웨어를 개발하여 국제규격에 상응하는 시험을 수행하였고, 그 결과 실제 정상용기에서는 정상 판정을, 임의 불량가공용기에 대해서는 불량 판정이 가능함을 확인하였으며, Type 1과 Type 2 압력용기에 대한 건전성 평가에 적합함을 확인할 수 있었다.
- 4) Type 1과 Type 2의 평가 규격과 실제 시험에서 취득한 누적 분포 및 AE 활성도 기반의 평가 방법을 병행한 경우, 보다 신뢰성 있는 용기의 평가기준이 가능함을 확인하였다.
- 5) ASTM 규격에 준하는 불량 판정기준 외에도 국내 실정에 적합한 Type 1과 Type 2 용기에 대한 데이터베이스를 구축하여 보다 신뢰성이 높은 정량적인 평가 시스템에 대한 연구가 지속적으로 필요하다.

참고문헌

- [1] P. R. Blackburn, "Periodic AE re-tests of seamless steel gas cylinders," Acoustic Emission: Standards and Technology Update, ASTM STP 1353, S. J. Vahaviolos, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (1999)
- [2] R. D. Fultineer, Jr. and J. R. Mitchell, "Field data on testing of natural gas vehicle (NGV) containers using proposed ASTM standard test method for examination and gas-filled filament-wound pressure vessels using acoustic emission (ASTM E070403-95/1)," Acoustic Emission: Standards and Technology Update, ASTM STP 1353, S. J. Vahaviolos, Ed., American Society for Testing and Materials,

- West Conshohocken, PA (1999)
- [3] A. Akhtar and D. Kung, "Acoustic emission testing of steel-lined FRP hoop-wrapped NGV cylinders," *Acoustic Emission: Standards and Technology Update*, ASTM STP 1353, S. J. Vahaviolos, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (1999)
- [4] R. Joselin, "A comparative study on failure pressure estimations of GRFP pressure vessels using acoustic emission technique," JNTU Hyderabad, Hyderabad, AP, India, IEEE (2010)
- [5] A. A. Anastasopoulos, D. A. Kourousis and P. T. Cole, "Acoustic emission inspection of spherical metallic pressure vessels," *TINDT* (2008)
- [6] H.-S. Jee, J.-O. Lee, N.-H. Ju, C. H. So and J.-K. Lee, "Analysis of acoustic emission signal for vehicle CNG tank using wideband Transducer," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 32, No. 1, pp. 1-6 (2012)
- [7] H.-S. Jee, J.-O. Lee, N.-H. Ju, C. H. So and J.-K. Lee, "Effect of Acoustic Emission During a Fatigue Test with Defect for Type II Gas Cylinder," *Journal of the Korean Institute of GAS*, Vol. 16, No. 2, pp. 18-24 (2012)
- [8] ASTM E 1419-02b, "Standard test method for examination of seamless, gas filled, pressure vessels using acoustic emission," ASTM (2002)
- [9] ASTM E 2191-02b, "Standard test method for examination of gas-filled filament-wound composite pressure vessels using acoustic emission," ASTM (2002)