



피로시험시 발생하는 음향방출신호를 이용한 Type II Gas Cylinder의 손상평가

[†]지현섭 · 이종오 · 주노희 · 소철호* · 이종규**

재료연구소, *동신대학교, **부경대학교
(2011년 11월 14일 접수, 12년 4월 9일 수정, 12년 4월 15일 채택)

Effect of Acoustic Emission During a Fatigue Test with Defect for Type II Gas Cylinder

[†]Hyun Sup Jee · Jong O Lee · No Hoe Ju · Cheal Ho So* · Jong Kyu Lee**

Korea Institute of Materials Science, Changwon 641-831, Korea

**Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

***Dongshin University, Naju 520-714, Korea*

(Received November 14, 2011; Revised April 9, 2012; Accepted April 15, 2012)

요약

본 연구는 Type II 가스실린더의 20,000 회 피로시험과 파열시험시 음향방출시험을 병행하여 용기의 손상정도를 평가하고자 하였으며, 실험에 사용된 용기는 결함 크기가 3 mm×3 mm×50 mm (폭×깊이×길이)이고 결함 방향이 용기의 종방향 및 횡방향인 인공결함용기와 건전한 용기 등 세 종류이다. 피로시험시 발생된 음향방출신호는 종방향결함의 경우 전체 신호 중 결함에서 발생된 이벤트의 비율이 50 % 이상이며, 음향방출신호의 위치표정도 매우 정확하게 일치하였다. 또한 파열시험에서는 인공결함용기가 결함 위치에서 예상파열압력보다 낮은 압력으로 파열될거라는 예상과는 달리 인공결함용기의 파열압력은 건전한 용기와 큰 차이가 없었으며, 단지 종방향인 공결함용기의 경우 파열위치가 결함 위치와 근접하게 발생하였다. 이는 종방향 결함의 길이만큼 복합재료의 두께가 얇아지는 효과로 나타나게 되어 금속라이너의 피로반복시 결함 발생과 성장위치에 영향을 미친 것으로 판단된다.

Abstract - This research seeks to evaluate damage on type II gas cylinder by an acoustic emission test when executing 20000 cycles fatigue test and thereafter burst test. Used gas cylinders in the experimental are three types as follows; one is sound cylinder, others are cylinders which contain longitudinal and transverse artificial defect. The size of artificial defect is a depth of 3 mm, width of 3 mm and length of 50 mm. In the case of the cylinder which artificial defect, unlike the expectation that it will burst in low pressure, the burst pressure of the cylinder did not differ much according to whether or not there were defects. However, when there was longitudinal defect, the location of burst was near the location of defect. This leads to the effect in which the thickness of the composite material becomes thinner according to the length of the longitudinal defect and this is judged to have an effect on the location of initiation and growth of crack in the liner. Also, for the acoustic emission signal, when there is longitudinal defect, the ratio of an event occurring at defect position among overall hits is more than 50 %, and the source location also accords very precisely with defect position.

Key words : acoustic emission, source location, gas cylinder

[†]주저자: jeehs@kims.re.kr

I. 서론

압축천연가스(Compressed Natural Gas, CNG) 연료 자동차는 사용압력의 증가와 경량화를 위하여 금속 라이너(liner) 위에 후프(hoop)방향으로 유리섬유를 감은(wrapping) Type II 복합재료압력용기가 주로 사용된다. 1984년 이래 미국에서 80건 이상[1], 국내에서도 8건의 자동차용 가스연료탱크 폭발사고를 경험하여 고압가스용기에 대한 안전성이 크게 요구되는 실정이다. 고압가스 연료탱크의 검사기술과 관련하여 미국의 경우 DOD, NASA 등에서 미사일 연료탱크의 검사기술로 개발되어 왔는데[2] 수송용으로 고압연료탱크의 사용이 증가하면서 DOT에서 NASA의 연구결과를 바탕으로 차량용 검사기술에 대한 연구를 수행하여 비파괴검사기술 중 음향방출 시험(Acoustic Emission Test)이 차량용 검사기술로서 가능성이 있다고 발표하였다[3,4].

섬유강화 복합재료로 제작된 가스압력용기는 일반적인 금속압력용기와 달리 손상이 증가하면 음향방출 발생도가 증가하나 손상의 정도가 더욱 심해지면 음향방출 발생도가 도리어 감소하는 것으로 알려져 있다[5,6]. 따라서 Type II 복합재료압력용기의 손상 평가를 위해서 관련된 음향방출신호의 데이터 베이스의 확보와 음향방출 신호변수(AE parameter)의 다양한 분석방법이 필요하다.

본 연구에서는 Type II 압력용기 몸통부의 복합재료에 인공결함을 구현하여 피로시험과 병행한 AE시험을 실시하여 음향방출 신호의 위치표정과 음향방출 신호변수를 살펴보고 추가로 파열시험을 수행하여 결함이 파열 압력에 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다.

II. 실험

2.1. 실험용기

본 연구에 사용된 시험용기는 자동차용 64 리터 압축천연가스 연료탱크이다. 용기는 34CrMo4 판재를 사용하여 딥드로잉(deep drawing ironing)방식으로 제작하고 라이너 몸통부에 유리섬유를 후프방

향으로 감은 type II 복합재료 압력용기이다.

2.2 인공결함

Fig. 2는 복합재료위에 구현된 인공결함의 크기를 보여주며 길이 50 mm, 폭 3 mm 이고 깊이는 복합재료 두께의 50 %인 3 mm 였다. 결함의 방향은 연료탱크의 축방향(longitudinal) 및 원주방향(transverse)으로 2가지 type의 인공결함을 구현하였다.

2.3 실험방법

Fig. 3는 압력용기의 피로시험시 음향방출 시험을 위한 실험장치의 개괄도를 보여준다.

그림에서 보는 것처럼 압력을 조절할 수 있는 펌프로 용기를 가압하면서 용기에 부착된 음향방출 센서로 음향방출 신호를 검출하여 분석하였다.

피로시험은 0에서 사용압력인 207 기압사이를 2만 회 반복하였으며, 이후 연속적으 압력을 증가시켜 파열시험을 실시하였다. Fig. 4는 시험에서 가압조건을 보여주고 있다.

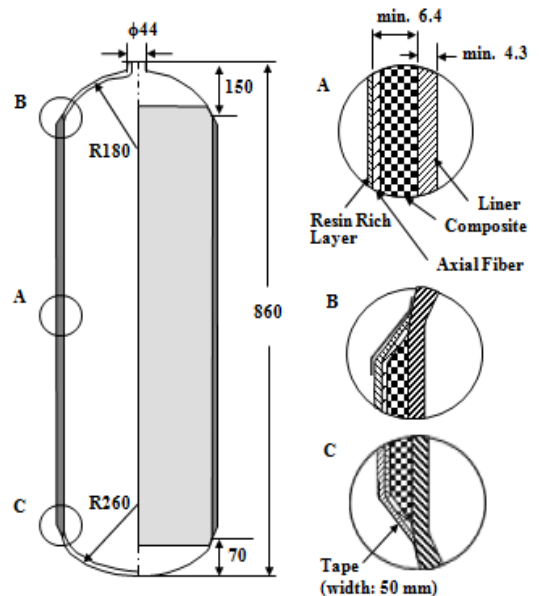


Fig. 1. The shape and dimension of fuel tank.

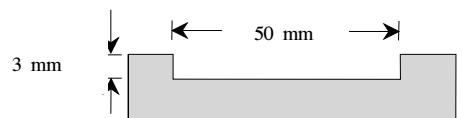


Fig. 2. Schematic diagram of artificial defect.

Table 1. Chemical composition of fuel tank

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
Max	0.38	1.00	0.40	0.01	0.01	1.20	0.40
Min	0.25	0.40	0.10	5	0	0.80	0.15
P+S	≤0.020						

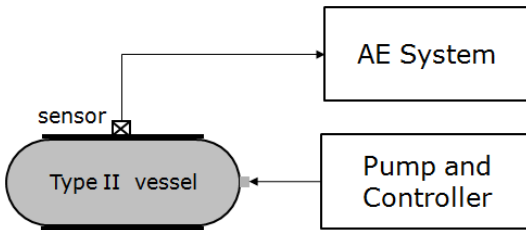


Fig. 3. Schematic diagram of experimental setup.

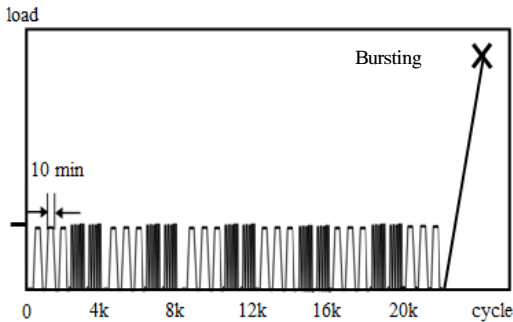


Fig. 4. Load sequence during fatigue and fracture test.

음향방출시험은 피로시험 중 0 ~ 20,000 회까지 4,000 회 간격으로 207 기압에서 10 분간 3 회 동안 음향방출 신호를 획득하였다. 복합재료위에 부착된 탐촉자에 의해 검출된 음향방출신호는 PAC사의 DiSP-52 AE workstation에 입력되어 신호처리 되었다.

탐촉자는 지그와 마그네틱 홀더를 사용하여 압력 용기에 부착시켰고 신호의 전달효율을 높이기 위해 접촉매질로 진공 그리스가 사용되었다. 시험에는 중심주파수 150 kHz 공진형 R15I(PAC) 탐촉자가 사용되었고, 케이블은 RG58A/U를 사용하였다. 가압매질은 피로시험 시는 기계유가 사용되었고 최종 파열시험 시 가압매질은 물이 사용되었다. 감도측정을 위한 의사음향방출원은 직경 0.5 mm의 2H 연필심 파손이었고 탐촉자의 감도는 탐촉자 1 인치 이내에서 평균 98 dB 였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. 파열시험

Table 2는 인공결함을 갖는 용기 및 건전한 용기의 파열시험에서 파열압력을 보여준다. 표에서 볼 수 있는 것처럼 두 종류의 인공결함을 갖는 용기와 건전용기에서 2만회 피로시험 후 압력을 지속적으로

Table 2. the burst pressure by defect type

defect type	ID	bursting pressure (기압)	remark
longitudinal	A	590	source location
	B	610	-
transverse	C	605	source location
	D	590	-
sound	E	605	-
	F	615	-

상승시켜 파열시켰으며, 그 때의 파열압력은 590~615 기압으로서 용기들의 압력차이는 5 % 이내로 결함의 유무와 크게 상관은 없었다.

일반적으로 2만 회의 피로는 용기를 1일 1회 가압한다고 하면 50 년 이상 사용한 용기에 해당하는데, 물론 실제로는 가스압력용기의 경우 가스가 가압매질로 사용되기 때문에 본 실험에서처럼 기계유를 가압매질로 사용한 경우와 다를 수 있지만, 건전용기와 인공결함을 갖는 용기가 동일 조건에서 실험된 경우 파열압력이 거의 동일한 것으로 나타나 본 연구에서는 인공 결함 크기의 경우 결함의 방향에 관계없이 수명에 영향을 거의 주지 않는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 5는 인공결함을 갖는 용기에서 파열 위치를 보여주는 사진이다. 그림에서 보여주는 것처럼 횡방향 결함 용기의 경우 최종 파열위치가 결함의 위치와 무관하게 잘 설계된 type II 용기의 일반적인 파열 위치(몸통부와 헤드부에 결침)에서 파열되는 것을 알 수 있다. 그러나 종방향 결함용기의 경우 두 용기 모두에서 최종 파열위치가 결함이 위치한 원주 방향의 원통부 내에서 일어나는 것을 알 수 있다.

이는 종방향 결함의 경우 용기의 몸통에 감긴 강화섬유를 3 mm 깊이로 50 mm 길이만큼 끊어 놓았기 때문에 복합재의 두께가 얇아지는 효과가 크게 나타나지만 횡방향 결함 용기의 경우 3 mm 깊이로 3 mm 길이 만큼만 섬유를 끊어 놓아 복합재의 두께가 얇아지는 효과가 작기 때문으로 판단된다.

본 연구에서 결함의 깊이가 얼마일 때 최종파열압력이 변하는 지는 정확히 알 수 없으나 결함의 방향과 최종 파열 위치와는 상관관계가 있고 종방향 결함이 용기의 최종파열 위치에 더 큰 영향을 미친다고 추론할 수 있다.

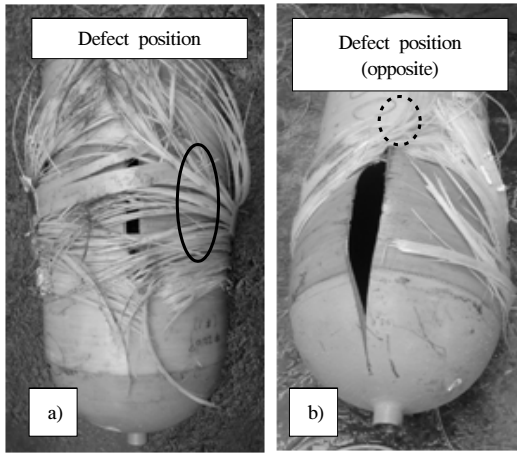


Fig. 5. The position of artificial defect: a) longitudinal, b) transverse and final fracture.

3.2. 피로시험과 음향방출시험

Fig. 6는 용기 A, C, E에 대하여 피로시험동안 탐촉자당 평균 신호 수를 표시한 것이다. 인공결함용기가 건전용기에 비해 상대적으로 신호 수가 많으며 그 증가의 경향을 보면 용기 C와 용기 E는 반복횟수가 증가할수록 신호수가 감소하는 경향을 보이는데 반해 용기 A는 4,000 회에서는 감소하였다가 8000, 12000 회에서 다시 증가하였다가 감소하는 경향을 보인다.

초기에 신호 수가 많은 것은 용기내의 상대적으로 약한 부위에서의 기지 균열의 생성, 성장과 관련이 있고 이후 새로운 균열의 생성과 성장을 일으킬 만한 충분한 탄성에너지가 축적되기 전까지 균열의 생성과 성장은 상대적으로 둔화되며 신호 수도 감소한다. 용기 A와 같은 종방향 결함의 경우 결함의 진전(균열의 성장)을 일으키기 위해 필요한 탄성에너지가 다른 용기에 비해 상대적으로 적기 때문에 8000회 및 12000회 피로시험에서 다른 용기에 비해 신호 수가 많으며 16000회 이후는 또다른 균열의 생성 및 성장을 위한 탄성에너지의 축적이 필요하기 때문에 신호 수가 감소한 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 서론에서 언급한 것처럼 복합재료에서 뚜렷하여 초기손상에서 신호 수와 같은 활성도가 증가하고 어느 정도 손상이 증가하면 이후 활성도가 상대적으로 낮다.

Fig. 7은 용기 A, C에 대하여 피로시험동안 검출한 이벤트수를 나타낸다. 이벤트란 탐촉자에 전달된 음향방출 신호를 이용하여 용기내의 음향방출 발생원의 위치를 계산한 발생원 수를 나타내는 것으로

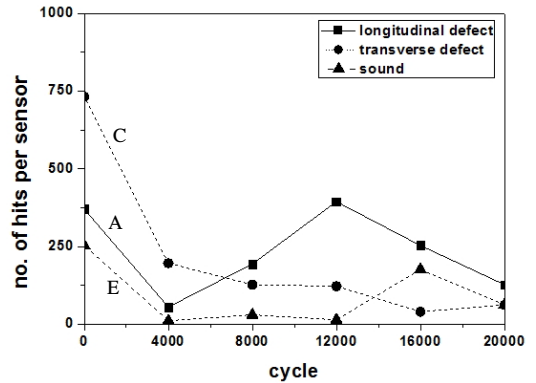


Fig. 6. The number of hits per channel during fatigue test for artificial defect(A,C) and sound(E) fuel tank.

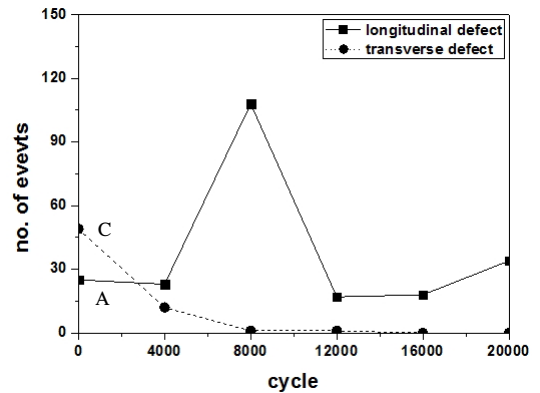


Fig. 7. The number of events during fatigue test for artificial defect(A,C) fuel tank.

횡방향균열을 포함하는 용기 C의 경우 이벤트 수가 반복횟수의 증가에 따라 현저히 감소하고 있으나 종방향 결함을 갖는 용기 A에서는 8000 회에서 크게 증가하였고 반복횟수의 증가에 따라서는 크게 변하지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 6, 7을 이용하여 탐촉자당 가압반복횟수 증가에 따른 이벤트 대 신호 비를 나타낸 것이다. 이것은 발생한 총 신호 수에서 발생원을 정확히 알 수 있는 신호가 몇 %인지를 보여주는 수치인데 용기 A의 경우 4000, 8000 반복횟수에서는 발생한 신호의 41.8 % 및 55.7 %가 발생원의 위치를 알 수 있는 신호였다.

이벤트는 발생원에서 발생한 음향방출 신호(elastic wave)가 용기의 벽면을 따라 전달되어 탐촉자에

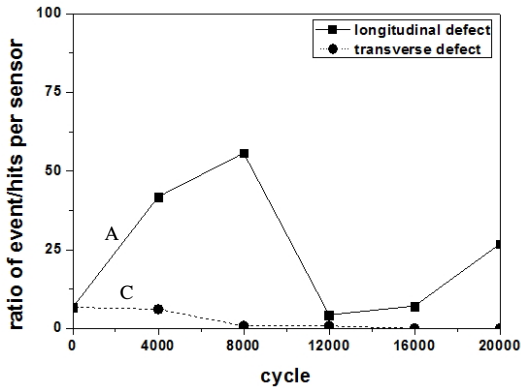


Fig. 8. The ratio of events / hits per channel during fatigue test for artificial defect(A,C) fuel tank.

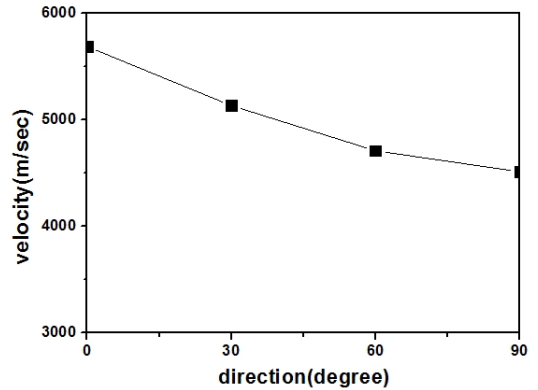


Fig. 9. The elastic wave velocity with degree between propagation and wrapping direction.

도달하는 시간차를 이용하여 계산할 수 있으며 최소 3개 이상의 탐촉자에 적절한 시간차를 두고 검출되어야 한다. 이 조건에 맞지 않은 신호들은 이벤트를 계산할 수 없으며, 의사 음향방출 신호에 의해 위치표정을 확인한 경우 신호가 미약하거나 잡음인 경우 이벤트로 기록될 수 없다. 종방향 결함을 갖는 용기 A의 경우 4000 회나 8000 회에서 신호 수는 적지만 균열의 성장을 일으키기 위해 필요한 탄성에너지가 다른 건전부위에 비해 상대적으로 적기 때문에 균열의 성장이 쉬워 3개 이상의 탐촉자에 전달될 만한 충분한 진폭을 갖는 신호를 발생하여 이벤트 대신 호 비가 증가하였다.

3.3. 피로시험과 인공결함의 위치표정

Fig. 9는 감화섬유가 감긴 복합재료 표면위에서 음향방출 위치표정을 위해 의사 음향방출원의 탄성과 속도를 측정된 결과를 보여준다. 그림에서 보는 것처럼 섬유가 감긴방향에 수직방향으로 탄성과 속도는 4512 m/sec, 섬유가 감긴방향으로 탄성과 속도는 5689 m/sec 으로 비등방의 특징을 보여주고 있다. 따라서 음향방출 신호의 시간도달차를 이용한 비등방성 위치표정(anisotropic cylinder source location) 방법을 이용하였다.

Fig. 10는 탐촉자의 위치와 의사 음향방출원을 이용한 위치표정의 확인시험 결과이다. 탐촉자는 5, 6, 7, 8 번 채널을 서로 엇갈리게 부착되었고 7번 채널은 8번 채널의 반대쪽을 의미한다. 5번 채널과 8번 채널 사이와 6번 채널과 8번 채널 사이의 대각선 방향으로 등간격의 의사음향방출원은 그림과 같이 위치표정이 잘 되고 있다.

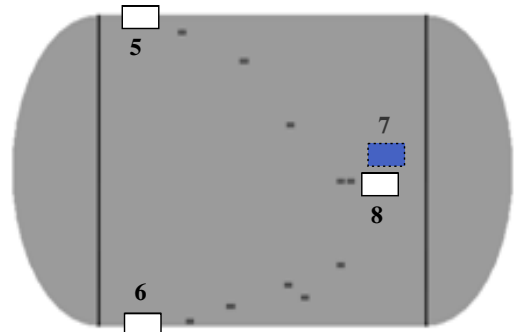


Fig. 10. source location confirm.

Fig. 11은 종방향 결함을 갖는 용기 A의 피로시험 동안 음향방출 시험에 의한 위치표정 결과이다. a)는 최초 피로 3회 동안 25개 이벤트의 위치표정을 보여주는데 인공결함의 위치를 보여주지 못하고 용기 전면에 산재된 양상을 보여준다. 그림으로 보여주지는 않았지만 횡방향 결함을 갖는 용기 C에서도 49개 이벤트가 용기 전면에 산재된 a)와 같은 양상을 보여주며 이는 최초 가압시 용기 전면의 가장 약한 부위에서 신호가 발생한 것으로 보여진다. b)의 경우 4000회 반복피로 이후 3회의 피로시험에서 23개의 이벤트가 인공 결함근처에 군집(cluster)되어 나타나는 것을 알 수 있다. 횡방향 결함을 갖는 용기의 경우 4000회 반복피로 이후 3회의 피로시험에서 12개의 이벤트가 발생하였으나 용기 전면에 산재하여 인공결함의 위치를 표시하지 못하였다. c)의 경우는 8000회 반복피로 이후에는 108개의 이벤트가 인공결함 주변에 군집되어 나타나고 Fig. 8의 설명

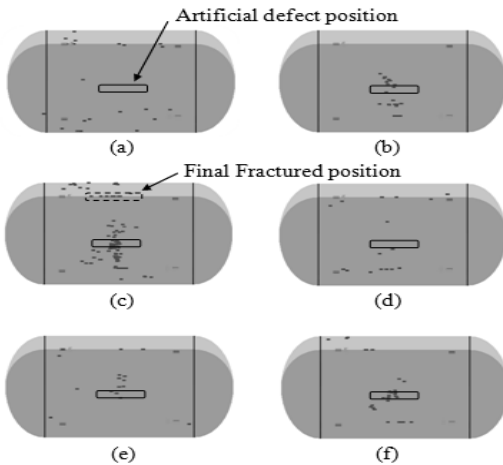


Fig. 11. The result of source location with cycle for longitudinal defect: a) 0, b) 4000, c) 8000, d) 12000, e) 16000, f) 20000 cycle.

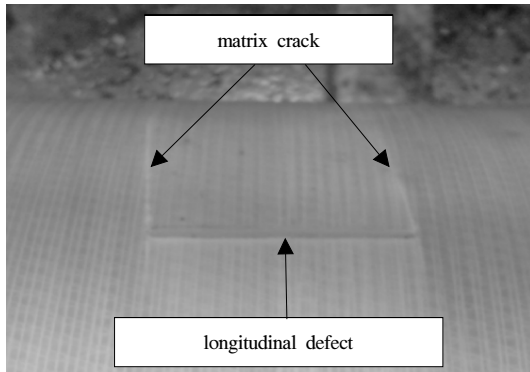


Fig. 12. longitudinal defect and matrix crack after 20000 cycle fatigue test.

에서 언급한 것처럼 용기에서 발생한 신호의 50% 이상이 인공 결함과 관련이 있는 신호였다. 이후 d)~f) 에서도 발생한 이벤트는 대부분 인공결함 근처에서 발생한 것으로 인공결함 주변에서 복합재료 손상이 진전되는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 20000 회 이후 종방향 인공결함 주변을 보여주는 것으로 결함 끝단에서 강화섬유의 감긴방향으로 기지균열이 성장되어 있는 것을 보여주고 사진에서 잘 구별하기 어렵지만 인공결함 깊이 방향 끝이 결함 전 길이에서 층간분리 현상이 관찰되었

다. 횡방향 결함을 갖는 용기의 경우 8000 회 반복피로 이후는 1개 미만의 이벤트만을 발생하였고 인공 결함의 위치를 잘 나타낼 수 없었다.

한편 20000 회 반복피로 이후 파열 시험에서 파열의 위치는 Fig. 7 c)에 표시되어 있는데 a), d), e), f) 에서도 이벤트가 관찰 되고 있다. 이때의 음향방출 신호의 발생원은 복합재료에서 보다는 금속라이너의 약한 부위에서의 피로균열이라고 추정된다. 최종 파열은 종방향 결함의 경우 피로시험과 파열시험 동안 위에서 언급한 기지 균열과 층간분리를 수반하고 이 때문에 결함 길이에 해당하는 원통부 전면이 결함 깊이 만큼의 두께가 얇은 효과로 다른 부위보다 취약하고 금속라이너의 피로균열이 발생하였던 최종파열위치에서 파열된 것으로 판단된다.

IV. 결론

Type-II Gas Cylinder의 건전용기 및 인공결함용기를 제작하여 피로시험 및 파열시험시 음향방출시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

(1) 건전용기와 횡방향 및 종방향 두종류의 인공결함을 갖는 용기를 2만회 피로시험 후 압력을 지속적으로 상승시켜 파열시켰으며, 그 때의 파열압력은 590 - 615 기압으로서 용기들의 압력차이는 5% 이내로 결함의 유무와 크게 상관은 없었다.

(2) 결함의 방향과 최종 파열 위치와는 상관관계가 있고 횡방향의 결함보다는 종방향 결함이 용기의 최종파열 위치에 더 큰 영향이 있음을 알 수 있었다.

(3) 피로시험시 발생하는 음향방출신호는 건전용기보다는 결함용기에서 많이 발생하였고, 피로시험 횟수가 누적될수록 횡방향결함용기보다는 종방향결함용기에서 신호 수가 더욱 증가함을 알 수 있었다.

(4) 종방향인공결함 용기는 이벤트가 인공결함에 군집되어 나타나고 4000, 8000 회에서는 AE신호의 41.8% 및 55.7%가 인공결함과 관련이 있는 신호이며 위치표정이 결함위치에 정확하게 표정되었으나, 횡방향인공결함용기는 이벤트가 거의 발생하지 않거나 발생하더라도 결함에 해당되는 위치와 일치하지 않았다.

(5) 용기의 종방향 결함은 피로시험과 파열시험 동안 복합재료의 기지 균열과 층간분리를 일으키며 결함길이만큼 원통부 전면이 두께가 얇아지는 효과가 발생하여 용기의 다른부위보다 취약하게 되며 금속라이너의 피로균열이 발생하였던 위치에서 최종적으로 파열된 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 재료연구소의 자체연구사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Henry E. Seiff, *Some Things to be Learned from the Other Compressed Gas Fuel System*, CVEF, (2008)
- [2] Harold D. Beeson, Dennis D. Davis, William L. Ross, Sr. Ralph M. Tapphorn, *Composite Overwrapped Pressure Vessels*, NASA, TP-2002-210769, (2002)
- [3] Mark Toughiry, *Examination Of The Nondestructive Evaluation Of Composite Gas Cylinders*, United States Department of Transportation, NTIAC / A7621-18: CRC-CD8.1, (2002)
- [4] General Motors Corporation, *Development of Inspection Technology for NGV Fuel Tanks*, FaAA-SF-R-97-05-04, (1997)
- [5] J.O.lee, J.S.lee, U.H.Yoon and S.H.Lee, "Evaluation of adhesive bonding quality by Acoustic emission", J. of KSNT, 16(2), (1996)
- [6] A. Akhtar, D. Kung and D.R. Westrook, "Acoustic Emission from FRP Damaged Hoop Wrapped Cylinders", *Materials Evaluation*, 58(3), 462-469, (2000)