

## CNG 연료탱크의 내압상승시 발생하는 음향방출 변수들의 분포

지현섭<sup>†</sup> · 이종오 · 주노회 · 이종규\* · 소철호\*\*

재료연구소, \*부경대학교, \*\*동신대학교

### Distribution of Acoustic Emission Parameters during Load Holding for CNG Vehicle Fuel Tank

Hyun Sup Jee<sup>†</sup>, Jong O Lee, No hoe Ju, Jong Kyu Lee\* and Cheal Ho So\*\*

Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

\*Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*Dongshin University, Naju, Jeonnam, Korea

(2011년 6월 10일 접수 : 2011년 10월 26일 최종수정 : 2011년 11월 7일 채택)

**Abstract** This is a study on the distribution of acoustic emission parameters during a burst test for a type-II CNG vehicle fuel tank. A resonant AE sensor with a central frequency of 150 kHz was attached to the composite materials in the center of the fuel tank. The pressure was increased from 30 to 100% of the expected burst pressure and was maintained for 10 minutes at each level. Damage at 70% of expected burst pressure occurred by various damage mechanisms including fiber breakage and delamination, while that of below 60% only occurred by matrix crack initiation and growth. The count, duration and rise time of the AE signal at 60% of the expected burst pressure are distributed below 500, 5000  $\mu$ s and 300  $\mu$ s, respectively. Then, at above 70% they increased with pressure by superimposing of individual AE signal generated at a nearby place. These results confirmed that the analysis of the distribution of AE parameters is an effective tool for estimating damage of a CNG fuel tank.

**Key words** acoustic emission, AE parameter, fuel tank, GFRP.

## 1. 서 론

복합재료 고압 가스용기는 로켓 모터 케이스 같은 항공 우주 산업에서부터 출발하여 현재는 일반 차량용으로 널리 사용되고 있다. 고압 가스용기의 검사기술은 미국의 DOD, NASA 등에서 미사일 연료탱크의 검사기술로 개발되어 왔는데<sup>1)</sup> 최근 자동차용 고압연료탱크로 사용이 증가하였다. DOT에서는 NASA의 연구결과를 바탕으로 차량용 검사기술에 대한 연구를 수행하여 몇 가지 NDT 기술 중 음향방출시험(Acoustic emission test)이 가능성이 있다고 발표하였다.<sup>2)</sup> 복합재료 가스용기는 기지균열(matrix crack), 층간분리(delamination) 및 강화섬유 파단(fiber breakage)등이 대표적인 음향방출 발생원인 것으로 알려져 있으며,<sup>3)</sup> 금속재료로 제작된 압력용기와 달리 손상 메커니즘이 복잡하고 어느 정도까지는 손상이 증가하면 음향방출 활성도가 증가하다가 손상의 정도가 더욱 심해지면 음향방출 활성도가 도리어 감소하는 것으로 알려

져 있어<sup>4)</sup> 손상의 정도를 해석하기 어려운 점이 있다. 음향방출 신호의 해석에는 신호수, 계수, 진폭, 신호 세기 등의 활성도 변화 또는 주파수, 상승시간, 지속시간 등의 파형특성 등 다양한 변수가 이용될 수 있다. 또한 AE를 이용한 손상해석에는 주로 변수들의 총량 변화 또는 평균값의 변화로서 손상 메커니즘의 규명과 손상의 정도를 추정하는데 자동차용 CNG 연료탱크의 파열시험을 통해 복합재료 압력용기의 손상 메커니즘을 추정한 것이 그 예이다.<sup>5,6)</sup> 음향방출을 이용한 복합재료 결함 검출 및 손상 해석에 관한 연구는 꾸준히 진행되고 있으나,<sup>7,8)</sup> 주로 시편형태로 가공된 재료이다. 따라서 본 연구에서는 시편 형태가 아닌 실제 CNG 연료 탱크의 파열시험동안 손상 메커니즘과 손상의 정도에 따른 음향방출 신호의 진폭(amplitude), 상승시간(rise time), 계수(count) 및 지속시간(duration)의 분포경향의 상관관계를 분석하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험용기

본 연구에 사용된 시험용기는 Fig. 1과 같은 형상과 크

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-Mail : jeehs@kims.re.kr (H. S. Jee)

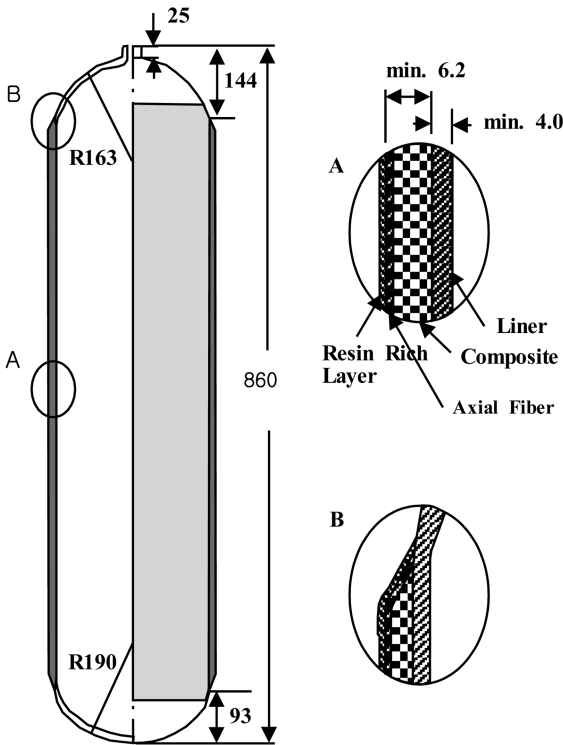


Fig. 1. The shape and dimension of fuel tank.

Table 1. Chemical composition of fuel tank. (unit : wt.%)

|       | C    | Mn   | Si   | P     | S       | Cr   | Mo   |
|-------|------|------|------|-------|---------|------|------|
| Max   | 0.38 | 1.00 | 0.40 | 0.015 | 0.010   | 1.20 | 0.40 |
| Min   | 0.25 | 0.40 | 0.10 | -     | -       | 0.80 | 0.15 |
| P + S |      |      |      |       | ≤ 0.020 |      |      |

기를 가지도록 설계된 자동차용 53리터 CNG 연료탱크이다. 용기 몸통부의 금속라이너의 두께는 약 6 mm이며 34CrMo4 판재를 사용하여 딥드로잉(Deep Drawing Ironing, DDI) 방식으로 제작되었고, 라이너 몸통부에 원주방향으로 유리섬유를 감은 type-II 고압 가스용기이다. 금속라이너의 화학 조성은 Table 1과 같으며, 용기의 사용압력은 207bar이다.

2.2 실험장치

Fig. 2는 실험장치의 개괄도를 보여주는 것으로 용기 중앙부의 복합재료 표면 위에 중심 주파수 150 kHz의 공진형 R15I(PAC)탐촉자를 진공그리스를 사용하여 부착하였고, 사용된 신호 케이블은 길이 10m의 RG58A/U이다. 파열시험의 매질은 물을 사용하였으며, 음향방출시험의 문턱값(threshold value)은 주변잡음을 고려하여 45 dB로 설정하였다. 탐촉자의 감도 측정을 위해 사용된 의사음향방출원은 직경 0.5 mm 2H 펜텔(Pentel) 연필심 파괴이고, 탐촉자의 감도는 연필심을 탐촉자와 1인치 이내

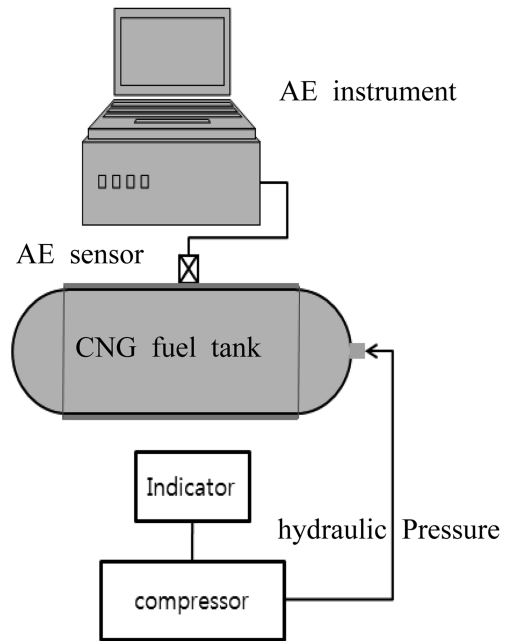


Fig. 2. Schematic diagram of experimental setup.

서 파괴시 평균 98 dB였다.

2.3 실험방법

파열시험에서 파열압력을 600bar로 예상하고 Fig. 3와 같이 예상 파열압력의 30%, 50% 60%, 70%, 80%, 90% 등으로 압력구간을 설정하였다. 각 단계별로 압력을 상승시켜 10분간 유지시킨 후 강하시켰고, 압력유지시 발생한 10분간의 음향방출신호는 PAC사의 DiSP-52 음향방출 워크스테이션에 입력하여 처리하였다. 이 때 수집된 신호는 데이터의 용량과 신호해석의 편의성을 고려하여 각 단계별로 저장하고 분석하였다.

각 단계별로 압력과 시간은 Table 2와 같으며 마지막 가압단계에서는 예상 파열압력인 600bar에 도달하기 전

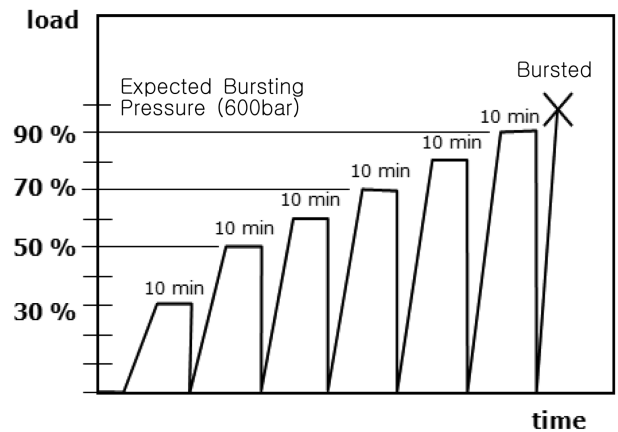


Fig. 3. Load sequence during burst test.

**Table 2.** Load holding and bursting time.

| stage | pressure (bar) | hold time start (sec) | hold time end (sec) | remark |
|-------|----------------|-----------------------|---------------------|--------|
| 30%   | ~180           | 126s                  | 728s                |        |
| 50%   | ~300           | 290s                  | 895s                |        |
| 60%   | ~360           | 396s                  | 997                 |        |
| 70%   | ~420           | 612s                  | 1218s               |        |
| 80%   | ~480           | 783s                  | 1384s               |        |
| 90%   | ~540           | 1170s                 | 1771s               |        |
| 100%  | 580            | 1347s                 | 1459s               | burst  |

인 1347초(22분 27초)에 580bar에서 400bar로 급격히 압력이 떨어지고, 1459초(24분 19초)에 용기가 파열되었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 복합재료 압력용기의 손상메커니즘 추정

파열시험을 통해 파손된 연료탱크의 형상은 Fig. 4와 같으며, 손상 메커니즘은 저자의 다른 논문에서 언급하였다.<sup>5)</sup> 용기의 파열된 부위를 살펴보면 기지균열, 층간박리, 강화섬유 절단 및 금속라이너 파괴 등을 관찰할 수 있으며(Fig. 4B), 파열이 되지 않은 부위에서는 기지가 원주방향으로 균열된 것만을 관찰 할 수 있었다(Fig. 4A). 따라서 두 부위를 비교해 좀 더 자세히 손상 메커니즘을 추정해 보면 용기는 먼저 금속라이너 몸통부에 감겨 있는 복합재료에서 기지균열이 생성되고 성장하며, 압력이 계속 상승하면 기지균열은 원주방향으로 성장하여 5~10 mm 폭을 갖는 사각 묶음들이 용기를 감고 있는 것처럼 된다(Fig. 4A). 이후 더욱 압력이 상승하면 부분적인 강화섬유의 절단과 층간박리가 일어나고, 사각 형태의 묶음이 절단되면서 압력유지 기능이 상실되며 금속라이너의 팽창변형 후 파괴되어 최종적으로 용기가 파열되는 것으로 추정할 수 있다(Fig. 4B). 마지막 100%

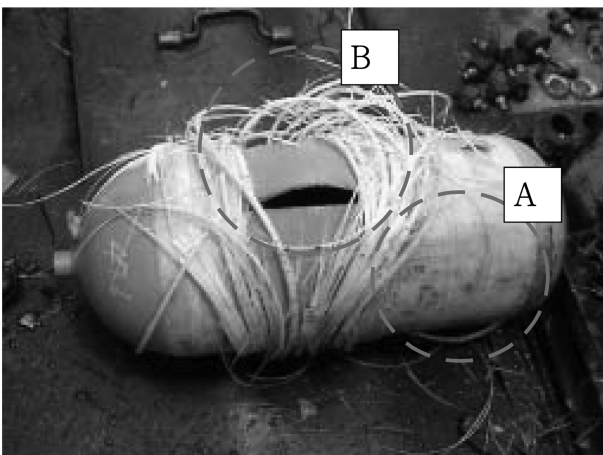
가압단계에서 사각 형태의 강화섬유 묶음의 절단은 파단음으로 확인하였다.

#### 3.2 내압유지시 발생한 AE 신호

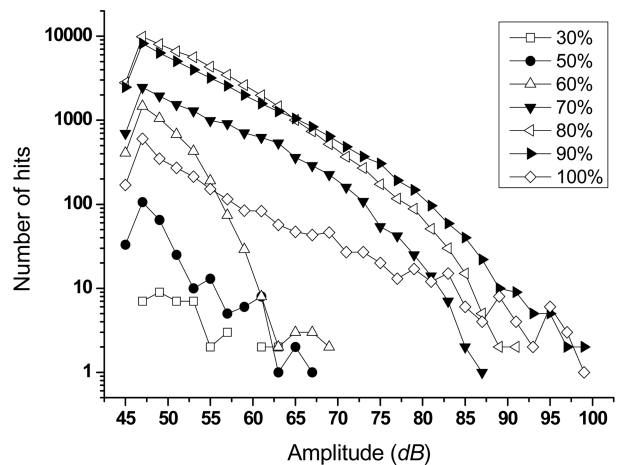
일반적으로 내압시험 시에는 가압구간에서 유체의 유동잡음을 포함하게 되므로 유동잡음을 최소화하기 위하여 압력유지시간 10분 중 유체의 안정시간을 고려하여 초기 2분간 발생한 신호를 분석에서 제외하였다. 이 후 유지시간동안 발생한 음향방출 신호의 총 신호(hit)수와 크리프(creep) 효과를 관찰하였다. 예상과열 압력의 60% 이하에서는 기지 균열의 생성 및 성장이 있으나 용기의 수명에 영향을 미치는 손상을 거의 입지 않고 70% 에서 손상이 급격히 진행됨을 알 수 있었다.<sup>5)</sup>

Fig. 5는 각 압력단계에서 압력유지 2분 후 발생한 신호들의 진폭분포를 보여준다.

가압 60%이하에서는 60 dB 이상의 신호가 많지 않으며 전체적으로도 70 dB 이하의 진폭을 가지는 신호들이 발생하였다. 이 때는 용기손상의 초기단계로서 용기를 감싸고 있는 복합재료 기지에 균열의 발생과 이들 균열의 성장 또는 제작 중에 내재된 기지균열의 성장이 있는 것으로 예상할 수 있다. 사용압력인 207bar에서 피로시험 시 약 20000회 이상에서 기지균열을 육안으로 관찰할 수 있었다. 사용압력은 예상 파열압력의 30%(180bar) 이상이며, 파열시험에서 30% 에서 60% 단계에서 발생하는 진폭의 분포를 보면 60% 단계까지 신호수는 많이 증가하였으나 진폭의 증가는 크지 않다. 따라서 가압 60%까지는 크리프 효과가 나타나지 않음과 낮은 진폭의 신호만이 주로 발생하는 것을 볼 때 용기의 주된 손상 메커니즘은 기지균열의 생성과 성장에 기인한다고 볼 수 있다. 70% 가압이후에는 AE 신호가 현저히 증가하는 크리프 효과와 85 dB 이상의 높은 진폭을 가지는 신호들이 발생되었고 또한 이전 가압 단계와는 뚜렷이 구분되는 진



**Fig. 4.** Fuel tank after burst test.



**Fig. 5.** Amplitude distribution during load holding.

폭 분포가 나타나고 있는 점으로 볼 때 용기의 손상이 상당히 진행되었음을 알 수 있다. 이는 복합재료 기지균열의 발생과 성장이 더욱 많아지고 강화섬유의 절단, 기지박리 등으로 용기의 손상이 더욱 심해지고 다양한 손상 메커니즘이 복합적으로 발생되기 때문으로 판단된다. 또한 일반적으로 진폭 분포의 기울기는 신호발생의 메커니즘과 관련된 것으로 알려져 있는데<sup>9)</sup> 70% 이상에서는 그 기울기가 유사한 것으로 보아 동일한 손상 메커니즘으로 발생한 신호로 판단된다.

Fig. 6은 각 압력단계에서 발생한 AE 신호의 계수분포를 나타낸다. 손상이 주로 기지균열의 생성과 성장으로 이루어지는 60% 이하에서는 계수가 500 이하인 신호가 주로 발생되었으나, 용기가 손상을 크게 받은 것으로 판단되는 80~90% 이후에는 계수가 1000 이상, 마지막 파열 단계에서는 2500 이상을 보이고 있다.

Fig. 7을 보면 가압 70% 단계까지는 음향방출 신호의 지속시간이 5000  $\mu\text{s}$  범위 내에서 발생되었으며, 80% 이후에서는 10000  $\mu\text{s}$ 를 초과하는 신호들이 나타나기 시작했

으며, 90% 단계에서는 20000  $\mu\text{s}$  이상, 그리고 마지막 파열단계에서는 25000~50000  $\mu\text{s}$ 의 신호들이 분포되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 8은 초기 30% 가압 단계까지는 rise time이 100  $\mu\text{s}$  이하와 100~200  $\mu\text{s}$  인 신호가 주로 발생하였다. 이는 진폭 분포에서 20000회 피로 시험 결과를 예로 들어 설명한 것처럼 30%의 압력에서는 기지균열의 생성과 성장 외의 다른 메커니즘은 포함될 수 없다고 본다면 200  $\mu\text{s}$  이하의 신호는 기지균열의 생성과 성장에 의해 발생한 신호로 볼 수 있다. 50%와 60% 가압단계에서는 300  $\mu\text{s}$  이상의 신호가 각각 1개와 4개가 발생하였으나 전체 신호수에 비해 무시할 정도이고, 새로운 손상 메커니즘의 발생보다는 복합재료 기지균열의 생성과 성장이 더욱 증가한 것으로 보여 진다. 가압 70% 단계에서는 이전 가압 단계보다 상승시간이 긴 250~450  $\mu\text{s}$ 의 신호가 나타난 것으로 보아 새로운 손상 메커니즘 포함되었을 것으로 보인다. 이는 내압의 증가로 기지균열의 급격한 성장과 더불어 부분적인 강화섬유의 절단과 기지박리 같은 추가적인 손상메커니즘에 의한 것으로 추정된다. 가압 80~90% 단계에서는 상승시간이 500  $\mu\text{s}$  이상의 신호가 관찰되는데 기존의 기지균열의 성장, 강화섬유의 절단 및 기지박리 등의 복합적인 손상 메커니즘이 인접영역에서 다수 발생되어 그 신호들의 중첩 영향이 있는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 앞에서 언급된 계수 분포나 지속시간 분포에서도 동일하게 설명될 수 있다. 복합적인 손상메커니즘에 의해 인접영역에서 연속적으로 발생하는 중첩된 음향방출 신호의 관찰로 용기의 손상정도를 평가할 수 있을 좋은 도구가 될 것이다.

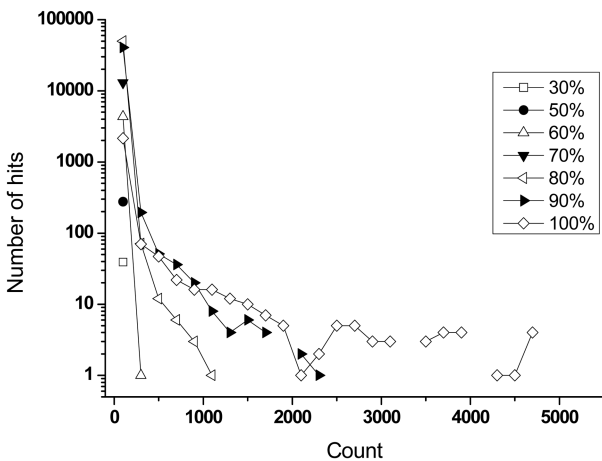


Fig. 6. Count distribution during load holding.

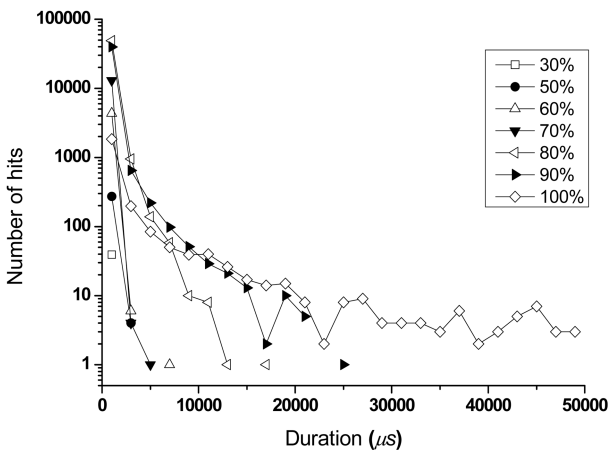


Fig. 7. Duration distribution during load holding.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 자동차용 CNG 연료탱크의 파열시험을

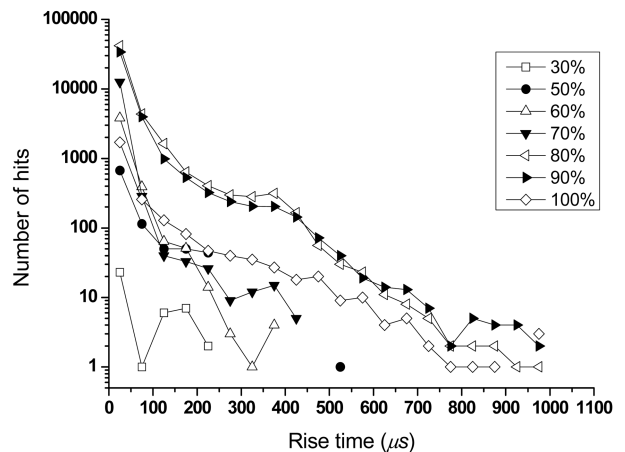


Fig. 8. Risetime distribution during load holding.

통해 손상 메커니즘을 추정하고, 예상과열압력의 30~100% 까지 압력을 단계적으로 증가시키면서 획득한 음향방출 신호의 진폭, 계수, 지속시간 및 상승시간과 같은 음향방출 신호 변수의 분포를 관찰하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1) 예상과열압력의 60%인 360bar까지의 주된 손상메커니즘은 기지균열의 생성과 성장이며, 70%인 420bar 이상의 가압단계에서는 기지균열의 생성과 성장뿐만 아니라 섬유절단, 기지박리 등의 복합적인 손상 메커니즘에 의해 손상된다.

2) 60%의 가압까지는 발생한 신호의 진폭은 대부분 60 dB 이하이며, 70%이상의 가압에서는 85 dB 이상의 높은 진폭의 신호가 발생한다.

3) 압력이 60% 이상에서 AE 신호 계수, 지속시간, 상승시간은 압력이 증가할수록 증가하는 경향을 보이는데 60% 가압까지는 기지균열의 생성과 성장에 의한 신호로 500 이하의 계수, 5000  $\mu$ s 이하의 지속시간 그리고 300  $\mu$ s 이하의 상승시간을 갖는다. 70% 이상의 압력에서는 손상이 증가함에 따라 인접영역에서 발생하는 손상의 빈도가 증가하여 중첩된 음향방출 신호가 증가하므로 계수, 지속시간, 상승시간이 증가하는 것으로 판단된다.

4) 음향방출 신호의 진폭, 계수, 지속시간, 상승시간 등의 분포를 분석함으로써 압력용기의 손상 정도를 정성적으로 평가할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 재료연구소의 자체연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. H. D. Beeson, D. D. Davis, W. L. Ross and R. M. Tapphorn, Composite Over-wrapped Pressure Vessels (TP-2002-210769), p. 19, NASA, USA (2002).
2. M. Toughiry, Examination Of The Nondestructive Evaluation Of Composite Gas Cylinders (NTIAC/A7621-18: CRC-CD8.1), p. 10, DOT, USA (2002).
3. J. O. Lee, J. S. Lee, U. H. Yoon and S. H. Lee, J. KSNT, **16**(2), 79 (1996) (in Korean).
4. A. Akhtar, D. Kung and D. R. Westrook, Mater. Eval., **58**(3), 462 (2000).
5. H. S. Jee, J. O. Lee, N. H. Ju and J. K. Lee, Trans. KSME A, **35**(9), 1131 (2011).
6. H. S. Jee, J. O. Lee, N. H. Ju, J. K. Lee and C. H. So, J. KSCM, **24**(4), 36 (2011).
7. I. Kampara and I. Ohsawa, in Proceedings of the 9th International Acoustic Emission Symposium (Kobe, Japan, Nov. 1988) p. 732.
8. J. S. Park, K. S. Kim and H. S. Lee, J. KSCM, **16**(6), 16 (2003).
9. S. Yuyama, T. Kishi and Y. Hisamatsu, Tetsu-to-Hagen, **68**(14), 2019 (1982).