

광대역 탐촉자를 이용한 자동차용 CNG 탱크의 음향방출 신호 분석

Analysis of Acoustic Emission Signal for Vehicle CNG Tank Using Wideband Transducer

지현섭*[†], 이종오*, 주노회*, 소철호**, 이종규***

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

초 록 본 연구에서는 광대역(100 kHz - 1 MHz) 탐촉자를 사용하여 자동차용 CNG연료탱크의 파열시험시 발생하는 음향방출신호의 분석을 통해 압력용기의 손상정도를 평가하였다. 압력이 420 bar까지 올라가기 전의 각 단계에서는 Kaiser 효과가 나타나고 creep 효과가 거의 나타나지 않으나, 420 bar 이상 상승시 creep 효과가 현저히 나타남으로써 용기가 손상을 입었다는 것을 알 수 있었으며, 480 bar 압력 상승 단계에서는 Kaiser 효과가 없어졌다. 540 bar의 압력 단계에서 공진형 탐촉자의 경우에는 480 bar의 압력단계에 비하여 energy나 count 같은 activity가 감소하였으나 광대역 탐촉자의 경우 계속적으로 증가하였다. 또한 rise time이나 주파수 분석을 통해서 복합재료 압력용기의 손상 메커니즘을 관찰하기 위해서는 일반적으로 금속압력용기에서 많이 사용되는 공진형 탐촉자(150 kHz)보다 광대역 탐촉자가 효과적임을 알 수 있었다.

주요용어: 음향방출, 연료탱크, 손상해석, 광대역 트랜스듀서

Abstract This study is damage evaluation for CNG fuel tank during the burst test through the analysis of acoustic emission signals. Kaiser effect until the pressure 420 bar appears, but More than 420 bar by the creep effect appears significantly damaged vessels, and 480 bar pressure, the Kaiser effect of the rising phase was missing. Resonant transducer at 540 bar than 480 bar decreased activity such as energy and count Continually, but increased wideband transducer. In addition, through the rise time or frequency analysis of composite pressure vessels in order to observe the damage mechanisms wideband transducer is more effective than resonant transducer

Keywords: Acoustic Emission, Vehicle Fuel Tank, Damage Evaluation, Wideband Transducer

1. 서 론

일반적으로 CNG 자동차는 사용압력의 증가와 경량화를 위하여 금속 라이너 위에 후프(hoop)방향으로 섬유강화 복합재료를 감은(wrapping) Type II 용기가 사용된다. 1984년 이래 미국에서 80건 이상의 자동차용 가스연료탱크 사고를 경험하였

고[1] 국내에서도 8번의 CNG탱크 폭발사고가 보고되고 있어 고압가스용기의 검사기술 개발이 요구된다. 고압가스 연료탱크의 검사기술은 미국의 경우 DOD, NASA 등에서 미사일 연료탱크의 검사기술로 개발되어 왔는데[2] 수송용으로 고압연료탱크의 사용이 증가하면서 DOT에서 NASA의 연구결과를 바탕으로 차량용 검사기술에 대한 연

[접수일: 2011. 6. 20, 수정일: (1차: 2011. 8. 11, 2차: 2011. 10. 22), 게재확정일: 2011. 12. 8] *재료연구소 원자력 공인검사단, **동신대학교, ***부경대학교, [†]Corresponding Author: Korea Institute of Materials Science, Changwon 641-831, Korea (E-mail: jeehs@kims.re.kr)

구를 수행[3,4] 하여 몇 가지 NDT 기술 중 음향 방출(acoustic emission)이 차량용 검사기술로서 가능성이 있다고 발표하였다.

섬유강화 복합재료로 제작된 가스압력용기는 금속재료만의 압력용기와 달리 손상이 증가하면 음향발생 활성도가 증가하나 손상의 정도가 더욱 심해지면 음향방출 활성도가 도리어 감소하는 것으로 알려져 있어[5,6] 손상의 정도를 정량적으로 해석하기 어려운 점이 있다. 이 때문에 음향방출 변수(AE parameter)의 분석 및 데이터베이스의 확보가 필요하다.

본 연구에서는 자동차용 CNG 가스압력용기에서 파열 시험 시 광대역(100 kHz - 1 MHz) 및 공진형(150 kHz) 탐촉자를 이용하여 음향방출 신호를 획득하고 이들 신호에 대한 음향방출 변수의 분석을 통해 압력용기의 손상평가 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1. 실험용기

본 연구에 사용된 시험용기는 자동차용 53 리터 CNG 연료 탱크이다. 용기 몸통부에서의 라이너(liner)의 두께는 약 6 mm이며 34CrMo4 steel plate를 사용하여 DDI(deep drawing ironing) 방식으로 제작되었고, 라이너(liner)의 몸통부에 유리 섬유를 감은 type II 용기이다.

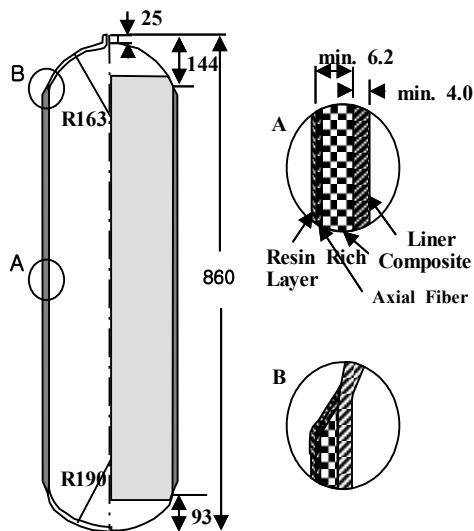


Fig. 1 The shape and dimension of CNG fuel tank

2.2. 실험 방법

Fig. 2는 압력용기의 가압과 음향방출시험을 위한 실험장치의 개괄도를 보여준다.

파열시험에서 가압조건은 파열압력을 600 bar로 예상하고 Fig. 3와 같이 예상파열압력의 30, 50, 60, 70, 80, 90 % 등을 60 bar/min의 속도로 압력을 상승시킨 후 10분간 압력유지하고 AE시험을 병행하여 가압시작부터 해제까지 수집한 신호를 분석하였다. 실험동안 가압속도가 압력이 증가할수록 약간 느려지지만 전체적으로는 거의 일정하였다. 실제 가압에서는 마지막 단계인 100% 가압단계에서 예상파열 압력 600 bar에 도달하기 전 580 bar에서 400 bar로 급격히 압력이 떨어지며 누설되었다.

가압동안 용기의 중간 복합재료위에 부착된 탐촉자에 의해 검출된 AE신호는 PAC사의 DiSP-52 acoustic workstation에 입력되어 신호처리 되었다. 탐촉자는 지그와 마그네틱 홀더를 사용하여 압력용기에 부착시켰고 신호의 전달효율을 높이기 위해 접촉매질로 진공 그리스가 사용되었다. 시험에 사용된 탐촉자는 100 kHz~1 MHz 광대역 WDI(PAC)와 150 kHz 공진형 R15I(PAC)이며, 케이블은 길이 10 m RG58A/U를 사용하였다. 파열 시험의 매질은 물이 사용되었으며, 시험의 문턱

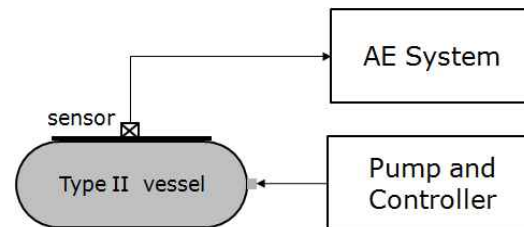


Fig. 2 The block diagram of experimental setup

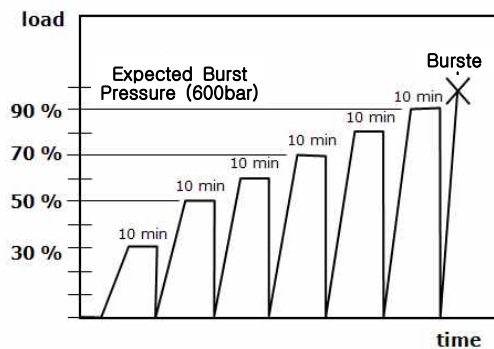


Fig. 3 Load sequence during vessel burst test

값은 45 dB로 설정하였다. 감도측정을 위한 의사 음향방출원은 직경 0.5 mm의 2H pental 연필심 파손이었고 탐촉자의 감도는 탐촉자 1인치 이내에서 평균 92 dB 였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 파열시험 동안 AE 시험

Fig. 4는 파열시험시 파열예상 압력의 30, 50, 60, 70, 80, 90 및 100%에서 검출한 음향방출신호의 진폭-시간 그래프이다.

Fig. 4에서 보면 압력이 증가함에 따라 AE 활성도는 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 공진형 탐촉자의 경우 70% 압력 상승 이후는 creep 효과가 나타난다고 알려져 있는데[7] 광대역 탐촉자의 경우도 70% 압력 상승 이후는 평가 감도 60 dB 이상인 신호가 연속적으로 발생하는 creep 효과가 나타나고 용기의 손상이 진행되고 있음을 알 수 있다.

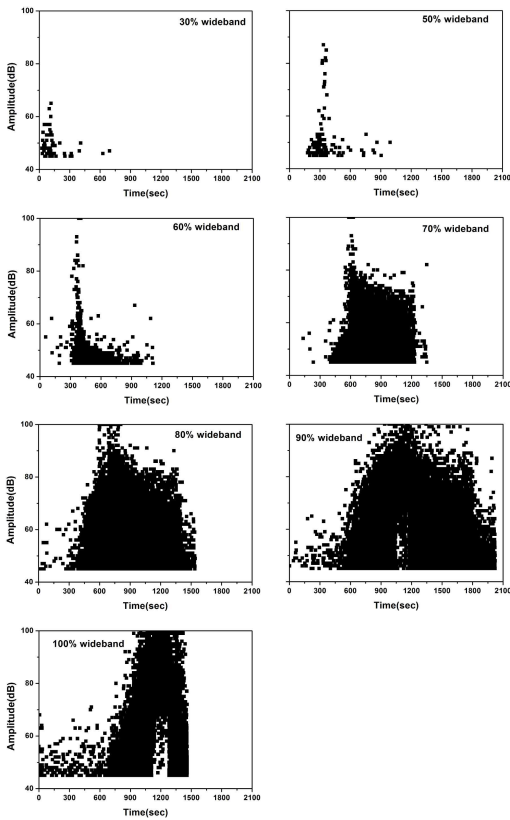


Fig. 4 Amplitude vs time plot during each load stage

Fig. 5는 파열시험 각 단계별로 시간에 따라 검출된 누적 hit수를 나타낸 것이다. ↓는 압력을 유지한 시점을 표시한 것으로 30, 50, 60%에서는 압력 유지후 hit 수의 증가가 급격하게 증가하지 않았으나 70%에서는 압력을 유지한 후에도 계속적으로 hit 발생이 증가하는 creep 현상을 볼 수 있고 Fig. 6의 진폭-시간 그래프에서 설명한 것처럼 손상이 상당히 진행되었다는 것을 알 수 있다. 특히 80, 90%에서는 압력을 유지한 후에도 압력 상승시 발생한 hit 수의 증가보다도 빠르게 activity가 증가하는 것을 알 수 있다. 이로써 용기의 손상 정도가 심하다는 것을 알 수 있다.

용기의 파괴기구는 최종파열 형상을 관찰해 볼 때 wrapping 복합재료가 fiber사이의 matrix 균열에 의해 분리된 후 fiber가 단락되고 이후 liner가 파열된 것으로 판단된다.

일반적으로 음향방출 신호에 의한 용기의 손상 정도를 관찰하기 위해서는 60 dB이상의 신호를 평가 기준으로 삼고 있다. Fig. 6은 파열시험의 각 압력단계에서 설정압력까지 가압하는 동안 발생한 hit 중 60 dB 이상의 진폭을 갖는 hit의 분포를 나타낸다. 70%의 압력까지는 AE 발생 시간이 점점 늦어지다 80%에서는 70%에서보다 빠른 것을 알 수 있다. 실험에서 압력의 상승 동안 가

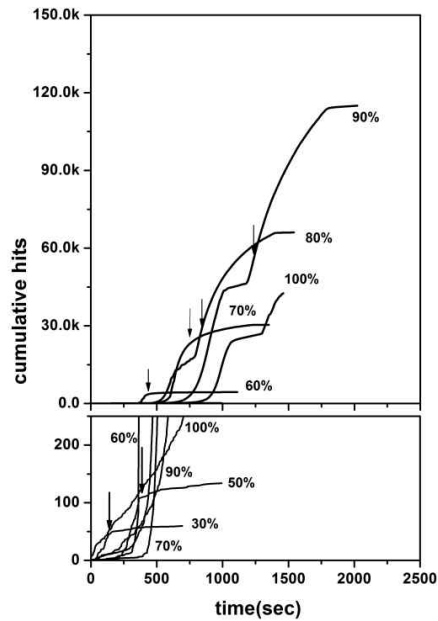


Fig. 5 Cumulative hits during each load stage

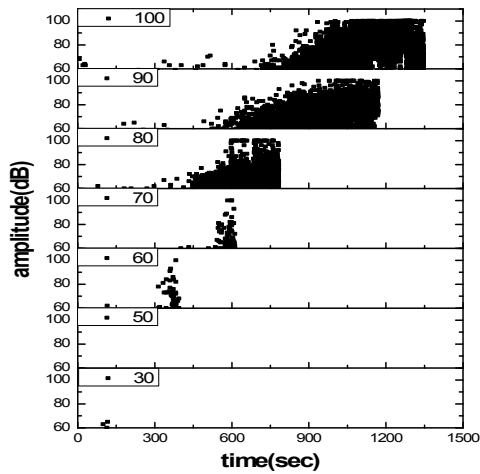


Fig. 6 Amplitude vs time plot during each loading stage (over 60 dB)

압은 거의 시간에 따라 일정하게 증가하므로 70% 가압구간에서는 이전에 용기가 경험한 60%에 압력이 도달하기 전까지는 AE 신호의 발생이 없는 Kaiser effect가 나타남을 알 수 있다. 따라서 60% 압력까지는 용기의 손상이 거의 없다고 볼 수 있고 70%의 압력 상승으로 말미암아 용기가 손상을 입었으므로 압력이 80%로 상승하는 동안 felicity 효과에 의해 압력이 70%에 도달하기 전부터 AE신호가 발생한 것으로 볼 수 있다. 이후 90, 100%의 압력 상승 구간에서도 felicity effect가 나타나고, 특히 90%이상 압력을 경험한 100%의 압력 상승구간에서는 처음부터 60 dB 이상의 AE 신호가 발생함을 볼 수 있어 손상의 정도가 심하다는 것을 알 수 있다.

3.2. AE hit parameters 분석

Fig. 7은 파열시험의 각 단계에서 검출된 AE 신호의 total energy와 total count를 나타낸다. 서론에서 언급한 것처럼 복합재료는 손상이 진전되면 activity가 감소하는 것으로 알려져 왔고 일반적으로 많이 사용하는 공진형 탐촉자의 경우는 90%에서 이전 80% 가압단계보다 total energy나 total count가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 광대역 탐촉자의 경우 70% 이상 용기 파열시까지 계속적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이

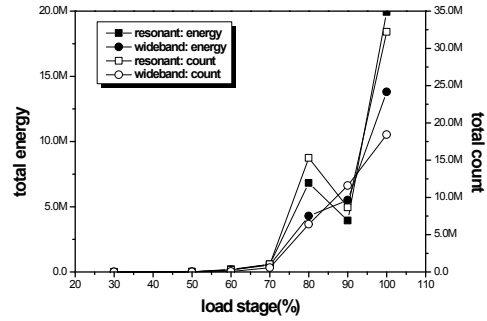


Fig. 7 Total energy and count during each loading stage

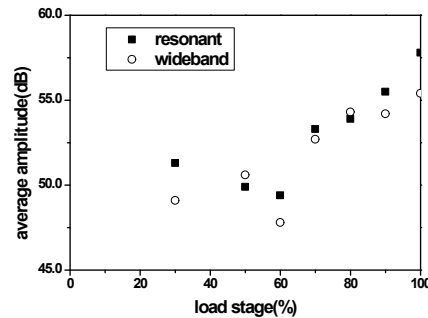


Fig. 8 Average amplitude during each loading stage

는 손상 메카니즘의 차이로 인하여 발생한 AE 신호의 주파수가 변하여 공진형 탐촉자로 검출하지 못한 것을 광대역 탐촉자가 검출할 수 있었기 때문에 판단되며, 손상 메카니즘을 구별하기 위해서는 광대역 탐촉자가 효과적이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 각 단계에서 검출된 AE 신호의 평균 진폭을 나타내고 있다. 60%까지는 진폭이 약간 감소(2 dB이내) 하다가 70%부터는 증가하여 100%에서는 6 dB 이상 차이를 보이고 있으며, 이는 손상의 증가에 따라 진폭이 증가한 것으로 나타났다.

Fig. 9는 각 단계에서 검출된 AE 신호의 평균 rise time을 나타내고 있다. 광대역 및 공진형 탐촉자의 경우 30% 단계를 제외하고는 70%까지는 감소하다가 손상이 급격히 증가한 것으로 판단되는 70% 단계 이후 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 30%에서 광대역 탐촉자의 경우 평균 rise time이 공진형보다 적은 35 μ sec로 나타나고 있는데 이는 Fig. 10의 rise time과 관련된 initial frequency를 보더라도 30%에서 초기 matrix 균열

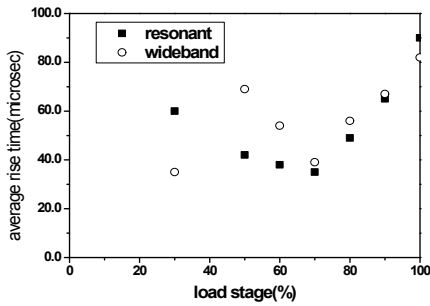


Fig. 9 Average rise time during each loading stage

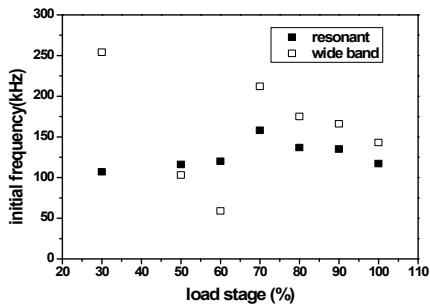


Fig. 10 Initial frequency during each loading stage

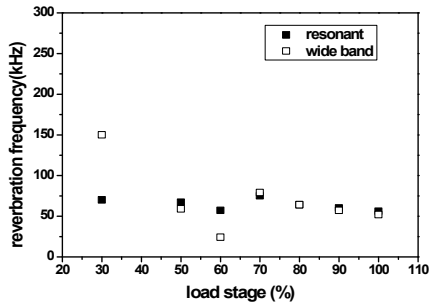


Fig. 11 Reverberation frequency during each loading stage

의 생성 시 발생된 음향방출원의 신호의 주파수 특성으로 rise time의 감소 경향이 다르게 나타난 것으로 보인다. 용기의 가압단계에서 AE 신호 발생원은 압력상승 동안 flow noise와 용기의 손상이며, 앞에서의 결과를 볼 때 60%까지의 음향 방출원의 대부분이 용기의 복합재료 matrix 균열 발생 및 성장으로 볼 수 있다. 30% 가압단계에서 초기 압력이 120 bar 정도까지 올라가는 동안 발생한 AE 신호의 평균 rise time을 계산해 보면 15 μ s 이하였고, 용기의 사용압력이 200 bar 임을 고려해 볼 때 이때의 신호 대부분은 flow noise에

의한 것으로 보인다. 또한 이전 연구에서 공진형 탐촉자의 경우 rise time이 100 μ s 정도가 matrix 균열의 생성, 10 μ s 정도가 균열의 성장으로 알려져 있어[8], flow noise의 rise time은 matrix 균열 성장의 rise time과 비슷함을 알 수 있었다. 80% 이상의 가압단계에서 rise time의 증가는 fiber 파단 등의 손상 메커니즘의 변화 및 신호 중첩 등의 영향으로 판단된다.

Fig. 10, 11은 공진형 및 광대역 탐촉자에서 검출한 AE신호의 각각 initial, reverberation frequency를 나타낸다. 이들 frequency는 rise time, duration 및 count에서 계산된 것으로서 waveform의 분석은 아니다. 공진형이나 광대역 탐촉자 모두에서 70% 가압단계를 경계로 뚜렷한 구분을 보여주고 있다. 그러나 공진형의 경우 주파수의 변화는 크지 않고 광대역의 경우 60%까지 크게 감소하고 70%에서 증가하여 다시 약간 감소하는 경향을 보이고 있으며 이는 발생원의 메커니즘과 관계있을 것으로 판단된다. 즉 30%에서 initial frequency가 250 kHz 이상이고 60%에서 50 kHz 부근으로 크게 변한 것은 주파수 분석에서 공진형 탐촉자로서는 감지할 수 없는 용기의 손상 메커니즘을 광대역 탐촉자로 구분할 수 있음을 보여주며, Fig. 9의 30%에서 짧은 rise time과 Fig. 10, 11의 30%에서 높은 주파수는 matrix 균열과 관련이 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

53리터 type II 자동차용 연료 탱크에서 파열시험 시 음향방출신호의 변수를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 압력이 420 bar까지 올라가기 전의 각 단계에서는 Kaiser 효과가 나타나고 creep 효과가 거의 나타나지 않으나 420 bar 이상 상승 시 creep 효과가 현저하여 용기가 손상을 입었다는 것을 알 수 있고 480 bar 압력 상승 단계에서는 Kaiser 효과가 나타나지 않는다.
- (2) 540 bar의 가압단계에서 공진형 탐촉자의 경우 480 bar의 압력단계에 비하여 energy나 count 같은 activity가 감소하였으나 광대역 탐촉자의 경우 계속적으로 증가하였다.
- (3) 복합재료 압력용기의 손상메커니즘 관찰을 위해서는 공진형(150 kHz) 탐촉자보다 광대역

(100 kHz-1 MHz) 탐촉자가 효과적임을 알 수 있으며, 특히 주파수 분석에서 공진형 탐촉자로서는 구분이 되지 않는 초기 matrix 균열 등의 손상메커니즘을 광대역 탐촉자로 구분할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 재료연구소 자체연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] H. E. Seiff, "Some Things to be Learned from the Other Compressed Gas Fuel System," *CNG & Hydrogen Cylinders Critical Issues Workshop in Brussels*, Belgium (2008)
- [2] H. D. Beeson, D. D. Davis, W. L. Ross and Sr. Ralph M. Tapphorn, "Composite Over-Wrapped Pressure Vessels," NASA, TP-2002-210769 (2002)
- [3] M. 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," *Journal of the KSNT*, Vol. 16, No. 2 (1996)
- [6] A. Akhtar, D. Kung and D. R. Westrook, "Acoustic emission from FRP damaged hoop wrapped cylinders," *Materials Evaluation*, Vol. 58, No. 3, pp. 462-469 (2000)
- [7] H. S. Jee, J. O. Lee, N. H. Ju and J. K. Lee, "Acoustic emission testing for high pressure vehicle fuel tank," *Annual Spring Conference of KSNT Proceedings*, pp. 264-268 (2010)
- [8] H. S. Jee, J. O. Lee, N. H. Ju and J. K. Lee, "Study of acoustic emission parameters during a burst test for CNG vehicle fuel tank," *KSME Annual Spring Conference Proceedings*, pp. 313-318 (2011)