

論文

고압가스 연료탱크의 손상평가를 위한 음향방출 변수의 분석

지현섭⁺, 이종오^{*}, 주노희^{*}, 이종규^{**}, 소철호^{***}

Damage Evaluation for High Pressure Fuel Tank by Analysis of AE Parameters

Hyun-Sup Jee⁺, Jong-O Lee^{*}, No-Hoe Ju^{*}, Jong-Kyu Lee^{**} and Cheal-Ho So^{***}

ABSTRACT

This paper described analysis of acoustic emission parameter for the damage evaluation of type II vehicle fuel tank during fracture test. The observation of Kaiser effect, Felicity effect and creep effect is the means of damage evaluation method. It is possible to evaluate tank damage by the ratio of hit of over 60 dB and total hit. Damage mechanism of pressure tank can be estimated by analysis of average rise time, average amplitude.

초 록

본 논문은 자동차용 type II CNG 연료탱크의 손상평가를 위하여 파열시험 중 발생하는 음향방출 변수의 분석에 관한 연구이다. 음향방출 신호의 kaiser effect, felicity effect 및 creep effect의 관찰과 전체 hits에서 진폭 60dB이상의 hits가 차지하는 비율 계산으로 연료탱크의 손상도를 평가할 수 있었으며, 평균 rise time, 평균 진폭 및 평균 initial, reverbration 주파수를 분석함으로써 압력용기의 손상메커니즘을 추정하였다.

Key Words : 음향방출(Acoustic Emission), 음향방출변수(AE Parameter), 자동차 연료탱크(Vehicle Fuel Tank), 손상평가(Damage Evaluation)

1. 서 론

천연가스 연료자동차는 이탈리아에서 처음 상업화 된 이후 세계적으로 천만대 정도가 운행되고 있으며, 국내에서도 저압의 LPG 자동차가 170만대 정도[1], 250 bar의 고압인 CNG 자동차가 17,000여대가 운행되고 있으며 점차 증가하는 추세에 있다[2].

일반적으로 CNG 자동차는 사용압력의 증가와 경량화를 위하여 금속 라이너 위에 후프(hoop)방향으로 섬유강화 복합 재료를 감은 Type II 용기가 사용된다. 1984년 이래 미국에서 80건 이상의 자동차용 가스연료탱크 사고를 경험하였고 [3] 국내에서도 5건의 CNG탱크 폭발사고가 보고되고 있어

고압가스용기의 검사기술 개발이 요구된다. 고압가스 연료탱크의 검사기술은 미국의 경우 DOD, NASA 등에서 미사일 연료탱크의 검사기술로 개발되어 왔는데[4] 수송용으로 고압 연료탱크의 사용이 증가하면서 DOT에서 NASA의 연구결과를 바탕으로 차량용 검사기술에 대한 연구를 수행[5,6] 하여 몇 가지 NDT 기술 중 음향방출(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[7,8] 손상의 정도를 정량적으로 해석하기 위하여 음향방출 변수(AE parameter)의 분

접수: 2011년 5월 16일, 수정: 2011년 8월 11일, 게재승인: 2011년 8월 16일

⁺ 한국기계연구원 부설 재료연구소, 교신저자(E-mail: jeehs@kims.re.kr)

^{*} 한국기계연구원 부설 재료연구소

^{**} 부경대학교

^{***} 동신대학교

석 및 보다 많은 데이터 베이스의 확보가 필요하다. 본 논문에서는 type II CNG 연료탱크에서 탄성파의 전파특성을 평가하고 용기의 파열시험시 발생하는 음향방출 신호의 변수분석을 통해 압력용기의 손상메커니즘과 손상정도에 따른 음향방출신호 변수와의 상관관계를 평가하고자 한다.

2. 실험

2.1. 실험용기

본 연구에 사용된 압력용기는 자동차용 53 리터 type II CNG 연료탱크이다. 용기몸통부의 금속라이너의 재질은 34CrMo4로 두께는 약 6 mm이며 DDI(deep drawing ironing) 방식으로 제작 되었고, 용기몸통부 라이너에 유리섬유를 감은 용기이다.

2.2 실험방법

Fig. 1는 압력용기의 가압과 음향방출 시험을 위한 실험 장치의 개괄도를 보여준다.

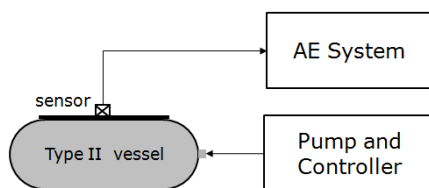


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

파열시험에서 가압조건은 파열압력을 600 bar로 예상하고 Fig. 2와 같이 예상파열압력의 30, 50, 60, 70, 80, 90 % 등으로 압력을 상승시킨 후 10분간 유지하면서 AE시험을 병행하였다. 실험동안 가압속도가 압력이 증가할수록 약간 느려지지만 전체적으로는 거의 일정하였다. 실제 가압에서는 단계별로 압력과 시간은 Table 1과 같으며 마지막 단계에서 예상파열 압력 600 bar에 도달하기 전인 22 분 27 초에 580 bar에서 400 bar로 급격히 압력이 떨어지며 누설되었다.

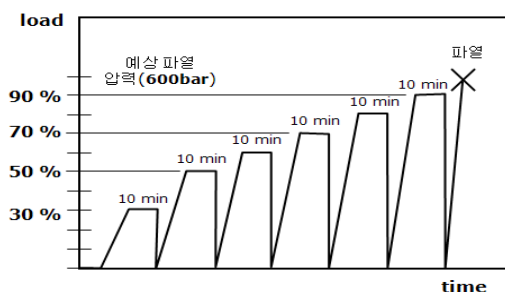


Fig. 2 Load sequence during fracture test.

가압동안 용기의 중간 복합재료위에 부착된 탐촉자에 의해 검출된 AE신호는 PAC사의 DiSP-52 Acoustic Emission workstation에 입력되어 신호처리 되었다.

Table 1 load hold and down start time

stage	p(bar)	hold mm:ss	down mm:ss	AE end	remark
30 %	180	02:06	12:08	-	
50 %	300	04:50	14:55	-	
60 %	360	06:36	16:37	18:32	
70 %	420	10:12	20:18	-	
80 %	480	13:03	23:04	-	
90 %	540	19:30	29:31	33:42	
	580	22:27	-	24:19	leak

탐촉자는 지그와 마그네틱 홀더를 사용하여 압력용기에 부착시켰고 신호의 전달효율을 높이기 위해 접촉매질로 진공 그리스가 사용되었다. 시험에 사용된 탐촉자는 중심 주파수 150 kHz의 공진형 R15I(PAC)이며, 케이블은 길이가 10 m인 RG58A/U를 사용하였다. 파열시험의 매질은 물이 사용되었으며, 시험의 문턱값은 45 dB로 설정하였다. 감도측정을 위한 의 사용방향출원은 직경 0.5 mm의 2H pental 연필심 파손이었고 탐촉자의 감도는 탐촉자 1인치 이내에서 평균 98 dB 였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 초음파의 전파 속도

시험용기에서 의사 음향방출 신호에 의한 초음파의 속도 측정 결과 복합재료 위에서는 물이 채워져 있는 경우와 없는 경우 측정된 속도 차이가 거의 없이 유리섬유를 감은 방향에 대해서는 5700 m/sec, 유리섬유를 감은방향에 수직인 경우 4500 m/sec로 속도에 대한 이방성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 라이너 위에서는 용기 안에 매질이 없을 때는 4300 m/sec, 물이 채워진 경우는 약 3000 m/sec의 속도를 관찰 하였다. 이는 물에 의한 후방산란으로 에너지 손실에 의해 두 번째 센서의 신호측정 위치가 늦어지기 때문으로 판단된다.

3.2. 파열 시험 동안 AE 시험

일반적으로 음향방출 신호에 의한 용기의 손상정도를 관찰하기 위해서는 60 dB이상의 신호를 평가 기준으로 삼고 있다. Fig.3은 파괴시험의 각 단계의 가압기간 동안 발생한 hit 중 60 dB 이상의 진폭을 갖는 hit의 진폭분포를 나타낸다. 70 %의 압력 까지는 AE 발생 시간이 점점 늦어지다 80 %에서는 70 %에서보다 빠른 것을 알 수 있다. 실험에서 압력은 거의 시간에 따라 일정하게 증가하므로 70 % 가압에서는 이전에 용기가 경험한 60 %에 압력이 도달하기 전까지는 AE 신호의 발생이 없는 카이저 효과(Kaiser effect)가 나타남을 알 수 있다. 따라서 60 %의 압력까지는 용기의 수명에

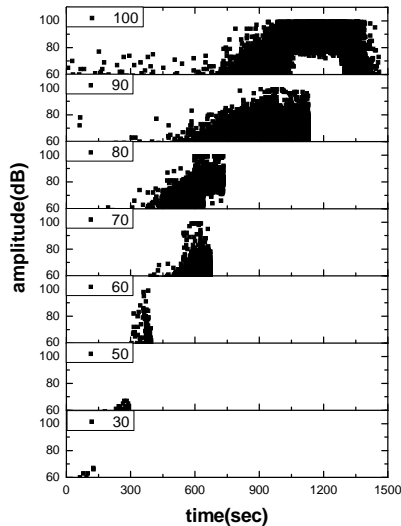


Fig. 3 Amplitude distribution during loading at each loading stage (over 60dB).

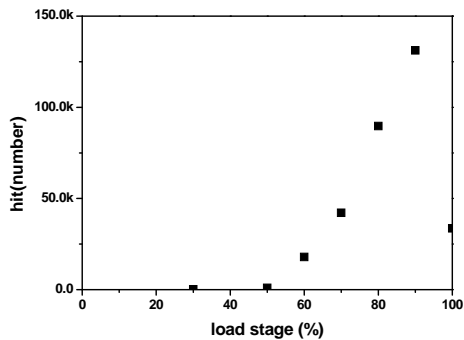


Fig. 4 Total hits during each loading stage.

영향을 미칠만한 손상이 거의 없다고 볼 수 있고, 70 %의 압력 상승으로 말미암아 용기가 손상을 입었으므로 압력이 80 %로 상승하는 동안 페리시티 효과(Felicity effect)에 의해 압력이 70 %에 도달하기 전부터 AE가 발생한 것으로 볼 수 있다. 이후 90, 100%의 압력 상승 구간에서도 페리시티 효과가 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. 실제 파열시험에서 type II 용기의 손상 메커니즘은 초기 hoop방향으로 matrix 균열이 발생하고 생성된 균열의 성장과 matrix의 층간분리(matrix 균열이지만 손상모드가 다름)가 일어나며 이후 fiber 또는 fiber 뭉치의 파단에 따라 금속 liner의 파열이 일어난다[9]. 60 % 단계까지는 육안으로 hoop방향의 matrix 균열을 확인할 수 있을 뿐이고 hoop방향의 matrix 균열은 용기의 파열압력에 영향을 주지 않았다[10].

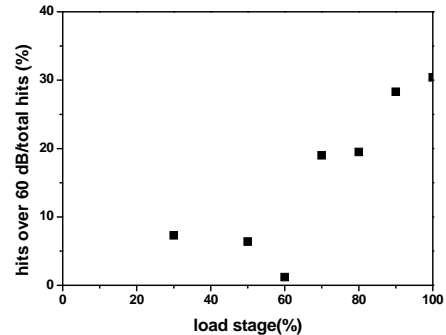


Fig. 5 Ratio of hits over 60dB/total hits during each loading stage.

Fig. 4는 파열 시험동안 각 단계에서 발생한 총 hit 수를 나타낸 것으로 마지막 파열단계를 예외로 하고 압력의 증가에 따라 hit 수가 급격히 증가하고 있음을 볼 수 있다. 마지막 100 %에서는 페리시티 효과에 의해 초기부터 AE가 발생하였지만 파열까지의 압력증가와 압력유지구간이 포함되지 않아 상대적으로 총 hit 수가 적은 것으로 판단된다. 60 % 이상의 압력에서 단계별로 손상이 있을 것이고 압력의 증가에 따라 손상이 심해질 것을 예상하나 총 hit 수로서는 정확히 어디서부터 용기의 수명에 영향을 줄 만한 심각한 손상이 있는지는 알기는 어려움이 있었다.

Fig. 5는 파열 시험동안 각 단계에서 발생한 hit수 중에서 60 dB가 넘는 hit의 비율을 나타낸 것이다. 가압 30 % ~ 60 %까지는 비율이 7 %에서 1 %정도로 감소하다가 이후 가압 70 % 단계에서는 20 %로 60 dB 이상의 신호가 급격히 증가하고 이후 가압 100 % 단계에서는 그 비율이 30 %까지 증가한다. 초기에 60 dB가 넘는 신호들은 복합재료 matrix 균열의 생성에 의한 것으로 판단되며 이후 약간 감소하는 것은 생성된 균열의 성장 시는 균열의 생성보다 진폭이 낮기(60 dB 이하) 때문으로 판단된다. 한편 70 % 이상에서는 matrix 균열 뿐만 아니라 fiber의 파단과 같은 새로운 손상 메커니즘에 의해 손상이 급격히 일어나 60 dB 이상의 신호비율이 증가한 것으로 판단된다. 압력용기의 평가 기준 감도인 60 dB를 기준으로 총 hit 수에서 60 dB 이상의 hit 수의 비율 계산은 손상의 정도를 파악하는 좋은 도구가 됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 각 stage에서 검출된 AE 신호의 평균 rise time을 나타내고 있다. 가압 70 % 단계까지는 60 μ s에서 35 μ s로 점차적으로 감소하다가 이후 80 ~ 90 %에서는 점차 증가하여 100 % 가압단계에서 90 μ s로 증가하고 있다. 한편 30 % 가압단계에서 초기 압력이 120 bar 정도까지 올라가는 동안 발생한 AE 신호의 rise time은 평균 15 μ s 이하였다. 각 가압 구간에서 AE 신호는 압력상승 동안 flow noise와 용기의 손상에서 발생하며 60 % 까지 손상의 대부분이 용기의 hoop 방향으로 복합재료 matrix 균열과 균열의 성장으로 본다면, 사용압력이 200 bar임을 고려할 때 120 bar 압력 상승에서

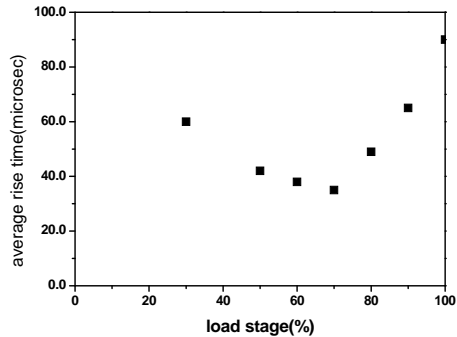


Fig. 6 Mean rise time during each loading stage

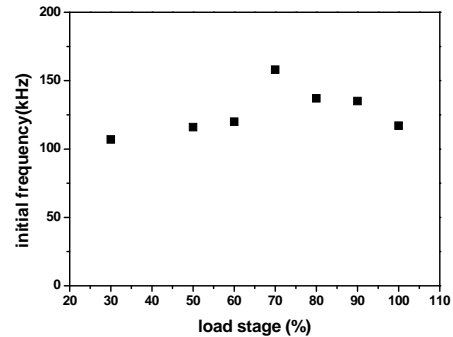


Fig. 8 Mean initial frequency during each loading stage.

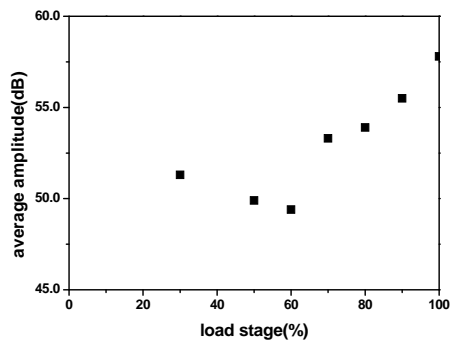


Fig. 7 Mean amplitude during each loading stage.

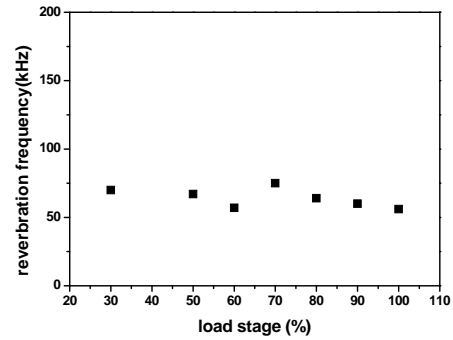


Fig. 9 Mean reverberation frequency during each loading stage.

발생한 신호의 대부분은 flow noise에 의한 것으로 볼 수 있다. 따라서 30 % loading에서 발생한 신호의 평균 rise time이 60 μ s임을 생각하면 matrix 균열에 의한 신호의 rise time은 60 μ s이상으로 판단된다. 70 %이상의 가압단계에서 rise time의 증가는 fiber 파단과 같은 새로운 손상 메커니즘의 발생과 신호 증첩의 영향이 있는 것으로 추정된다.

Fig. 7은 각 stage에서 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 있다. 이러한 경향은 total hit 중 60 dB 이상 hit 수 비율과 같은 경향을 보이는 것으로 비록 그 차이가 크진 않지만 손상의 평가에 좋은 도구가 될 수 있다고 본다.

Fig. 8-10은 AE 신호의 각 가압단계에서 평균 initial, reverberation, average frequency를 나타낸다. 이들 주파수는 웨이브폼의 분석이 아닌 rise time, duration과 count로 계산한 것이며, 주파수는 70 %의 가압단계를 경계로 뚜렷한 구분을 보여주고 있다. initial frequency의 경우 60 %까지 100 kHz 근방으로 큰 변화를 보이지 않고 70 %에서 증가하여 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 발생원의 메커니즘과 관계 있을 것으로 추정되며, 60 %까지는 matrix 균열의 발생과 성장을 나타내고 70 % 이후에서는 fiber의 파단과 같은 추가

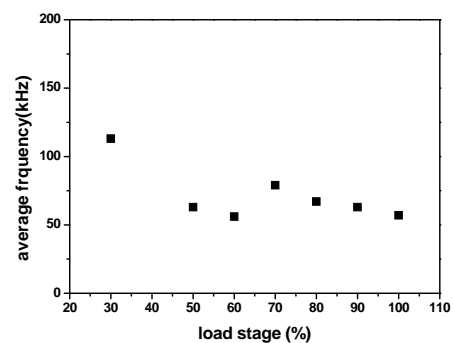


Fig. 10 Mean average frequency during each loading stage.

적인 손상메커니즘에 의한 영향으로 판단된다. reverberation frequency는 70 %를 경계로 약간의 차이를 보이지만 거의 일정하며 average frequency는 초기 30 % 가압단계에서 약간 높고 이후 거의 일정하다.

4. 결 론

53리터 type II 자동차용 CNG 연료 탱크에서 음향방출을

이용한 파열시험 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 360 bar까지 압력을 받은 경우 이후 AE 시험에서 카이저 효과가 나타나며 손상을 입지 않은 것으로 보이나 420 bar 이상의 압력을 받은 경우 이후 AE 시험에서 페리티티 효과가 관찰되고 손상을 받은 것으로 볼 수 있다.
- (2) 360 bar까지 압력 상승 시 압력 상승 후 압력의 유지기간에 hit 수의 급격한 증가가 관찰되지 않아 손상을 입지 않은 것으로 보이나, 압력이 420 bar이상 상승 시 압력을 유지시킨후에도 hit 수가 계속 증가하는 것으로 보아 손상이 심함을 알 수 있다.
- (3) 총 hit 중 진폭이 60 dB 이상인 hit가 차지하는 비율로 용기의 손상 정도를 평가할 수 있다.
- (4) 평균 rise time, 평균 진폭 및 주파수 분석을 통하여 손상의 메카니즘을 추정할 수 있다.

p. 313-318, 2011.

- 10) H.S.Jee, J.O.Lee, N.H.J, “unpublished report(재료연구소 자체연구발표집),” 2010.

후 기

본 연구는 재료연구소의 자체연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- 1) 한국가스안전공사 통계(www.kgs.or.kr)
- 2) 천연가스협회 통계(www.kangv.org)
- 3) Henry E. Seiff, “Some Things to be Learned from the Other Compressed Gas Fuel System”, CVEF, 2008.
- 4) Harold D. Beeson, Dennis D. Davis, William L. Ross, Sr. Ralph M. Tapphorn, “Composite Over-wrapped Pressure Vessels”, NASA, TP-2002-210769, 2002.
- 5) Mark Toughiry, “Examination Of The Nondestructive Evaluation Of Composite Gas Cylinders”, United States Department of Transportation, NTIAC/A7621-18:CRC-CD8.1, 2002.
- 6) General Motors Corporation, “Development of Inspection Technology for NGV Fuel Tanks”, FaAA-SF-R-97-05-04, 1997.
- 7) J.O.Lee, J.S.Lee, U.H.Yoon and S.H.Lee, “Evaluation of adhesive bonding quality by Acoustic emission”, J. of KSNT, Vol. 16, No. 2, 1996.
- 8) A. Akhtar, D. Kung and D.R. Westrook, “Acoustic Emission from FRP Damaged Hoop Wrapped Cylinders,” Materials Evaluation, Vol. 58, No.3, 2000, pp. 462-469.
- 9) 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,