

자동차용 CNG 연료탱크의 파열시험시 발생하는 음향방출변수 분석[§]

지현섭^{*†} · 이종오^{*} · 주노회^{*} · 이종규^{**}

* 재료연구소, ** 부경대학교

Study of Acoustic Emission Parameters Involved in Burst Test for CNG-Vehicle Fuel Tank

Hyun Sup Jee^{*†}, Jong O Lee^{*}, No hoe Ju^{*} and Jong Kyu Lee^{**}

* Korea Institute of Materials Science

** Pukyong National Univ.

(Received May 3, 2011 ; Revised July 19, 2011 ; Accepted July 19, 2011)

Key Words: Acoustic Emission(음향방출), NDT(비파괴검사), Fuel Tank(연료탱크)

초록: 본 연구는 자동차용 CNG 연료탱크의 파열시험시 발생하는 음향방출변수의 분석에 관한 내용이다. 연료탱크의 복합재료 중앙부 표면에 150kHz 공진형 AE센서를 부착하여 파열시험시 발생하는 음향방출 신호를 획득하고, 가압유지시간 동안의 hit, amplitude, count, duration, risetime, signal strength 등과 같은 음향방출 변수들을 분석하였다. 음향방출 변수 중 total count, total signal strength가 연료탱크 손상정도를 평가하는데 유용한 변수임을 알 수 있었다.

Abstract: This study is performed on the acoustic emission parameters involved in a burst test for a CNG-vehicle fuel tank. A resonant AE sensor with a central frequency of 150 kHz was attached on the composite materials in the center of the fuel tank. The analysis of AE parameters such as hit, amplitude, count, duration, risetime, and signal strength during load holding was performed. The total count and total signal strength are effective tools for the damage evaluation of a CNG fuel tank.

1. 서 론

일반적으로 CNG자동차는 사용압력의 증가와 경량화를 위하여 연료탱크를 금속 라이너 위에 후프(hoop)방향으로 섬유강화 복합재료(GFRP)를 감은 Type-II 용기가 주로 사용된다. 1984년 이래 미국에서 80건 이상의 자동차용 가스연료탱크 사고가 발생하였으며,⁽¹⁾ 국내에서도 수차례의 자동차용 CNG연료탱크 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 연구를 수행하여 NDT 기술 중 음향방출시험(Acoustic Emission Test)이 차량용 검사기술로서 가능성이 있다고 발표하였다.^(3,4)

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 위하여 음향방출 변수(AE parameter)의 분석과 데이터 베이스의 확보가 필요하다. 본 연구에서는 자동차용 CNG 연료탱크의 파열 시험시 발생하는 음향방출 변수의 분석을 통하여 압력용기의 손상평가 방법을 제시한다.

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2011. 4. 21.-22., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, jeehs@kims.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Chemical composition of fuel tank

	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						

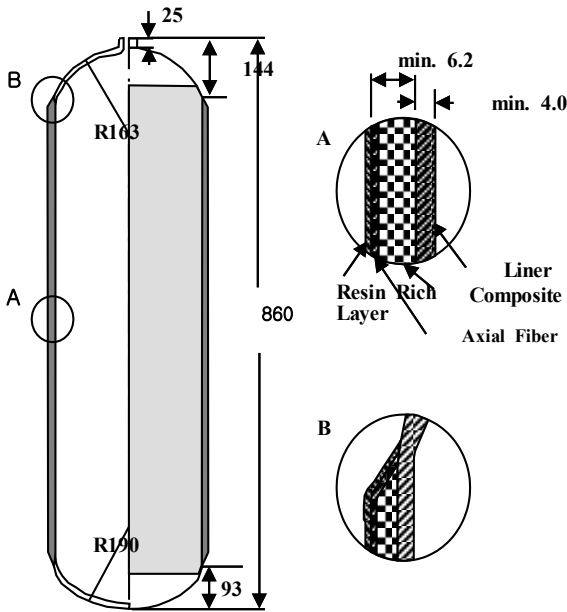


Fig. 1 The shape and dimension of fuel tank

2. 실험

2.1 실험용기

본 연구에 사용된 시험용기는 Fig. 1과 같은 형상과 크기를 가지도록 설계된 자동차용 53 Liter CNG 연료탱크이다.

실제 shell에서의 liner의 두께는 약 6mm이며 34CrMo4 steel plate를 사용하여 DDI(deep drawing ironing) 방식으로 제작 되었고, 화학 조성은 Table 1과 같으며, 용기의 사용압력은 207bar이다.

2.2 실험장치

실험장치는 Fig. 2와 같이 연료탱크의 중앙부 복합재료 표면위에 중심 주파수 150kHz의 공진형 R15I(PAC)탐촉자를 진공그리스를 사용하여 부착하고, 케이블은 길이10m RG58A/U를 사용하였다.

검출된 AE신호는 PAC사의 DiSP-52 Acoustic emission workstation에 입력되어 신호처리 되었다.

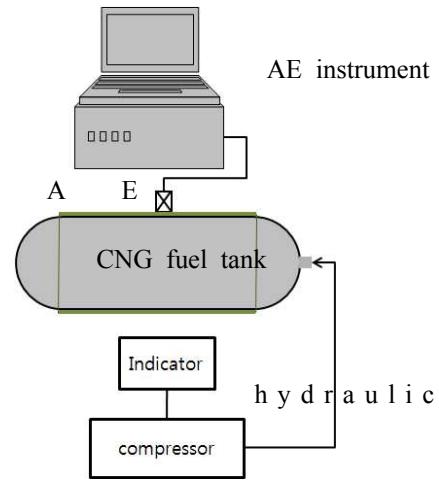


Fig. 2 Diagram of experimentation

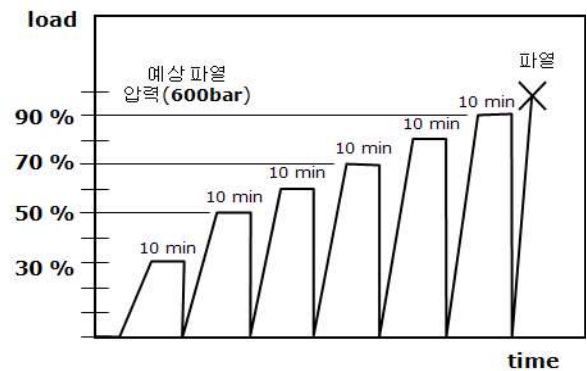


Fig. 3 Load sequence during burst test

또한 파열시험의 매질은 물이 사용되었으며, 시험의 threshold는 45dB로 설정하였다. 의사음향방출원은 직경 0.5mm의 2H pental 연필심 파손이었고, 파열시험에서 탐촉자의 감도는 탐촉자와 거리가 1인치 이내에서 평균 98dB 였다.

2.3 실험방법

파열시험에서 가압조건은 파열압력을 600bar로 예상하고 Fig. 3과 같이 예상파열압력의 30%, 50% 60%, 70%, 80%, 90% 등으로 압력을 상승시키면서, 각 stage에서 10분씩 압력을 유지하고 그 때 발생하는 AE신호를 획득하였다.

실제 가압에서는 단계별로 압력과 시간은 Table 2와 같으며 마지막 단계에서 예상파열 압력 600bar에 도달하기 전인 22분 27초에 580bar에서 400bar로 급격히 압력이 떨어지고, 24분 19초에 용기가 파열되었다.

Table 2 Load holding and down start time

stage	p(bar)	hold min:sec	down min:sec	AET 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



Fig. 4 Fuel tank after burst test

3. 결과 및 고찰

3.1 CNG 연료탱크의 손상메커니즘

파열시험을 통해 파손된 연료탱크의 형상을 살펴보면 Fig. 4와 같다. 먼저 금속liner에 wrapping되어 있는 복합재료가 matrix균열로 분리된 후 층간 박리가 일어나고, 이후 일부 강화fiber의 절단으로 강도가 약해진 부위에서 금속liner가 파괴되어 용기가 최종 파단되는 것으로 추정된다.

3.2 파열시험시 발생한 AE신호

본 실험에서는 각 압력의 유지시간중 획득한 신호중 압력유지 후 2분간은 flow noise 등을 감안하여 평가에서 제외하고 이 후 8분간의 신호를 평가대상으로 하였다. 일반적으로 용기의 건전성을 평가하는 하나의 방법으로 가압한 후 압력을 유지하고 일정시간 이후에 발생하는 음향방출신호의 활성도를 평가하는 creep 효과를 이용하는데 Fig. 5를 보면 예상 파열압력의 60%인 360bar까지는 creep 효과가 미약하여 아직까지는 큰 손상은 입지 않은 것으로 보이며, 70% 압력 상승 이후는

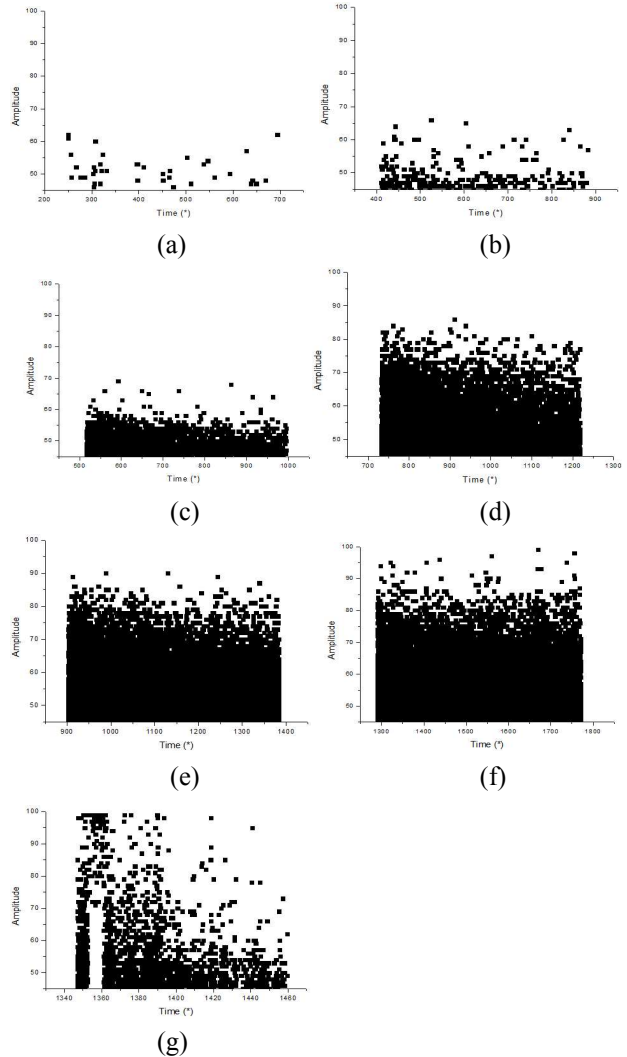


Fig. 5 Amplitude vs Time plot during load holding : (a) 30%, (b) 50%, (c) 60%, (d) 70%, (e) 80%, (f) 90%, and (g) loading start and fractured

일반적인 평가감도인 60dB 이상의 신호가 연속적으로 발생된 것을 볼 수 있어 현저한 creep 효과가 나타나서 용기의 손상이 상당히 진행되었다는 것을 알 수 있다.

압력이 80%, 90%로 상승할수록 압력유지 후에도 더 높은 진폭의 신호가 계속적으로 발생하는 것으로 보아 더 심한 손상을 입었다고 말할 수 있으며, 파열이 예상되는 540bar 이상 가압단계에서는 파열이 되기 전부터 80~100dB 사이의 진폭을 갖는 신호가 계속 발생하다가 1352초에서 1361초까지 지속적인 leak 신호가 발생하였고 압력이 400bar로 급강하 된 직후 파열되었다.

Fig. 6은 각 가압단계에서 압력유지 2분 후부터

발생한 total hit를 나타낸다. 손상이 많이 진행된 것으로 볼 수 있는 가압70% 이후에서 hit가 급격히 증가하고 90%에서는 약간 감소한 것을 볼 수 있으며, 최종 파열에서는 felicity ratio와 파열까지의 압력증가량을 고려할 때 파열까지의 시간이 짧았기 때문에 total hit가 적은 것으로 판단된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각 압력유지 단계에서 발생된 신호들의 평균 risetime과 duration을 보여준다. 가압70%단계까지는 신호의 risetime과 duration이 점점 짧아지다가 손상이 크게 증가한 것으로 판단되는 80%단계부터 파열시까지의 신호의 평균 risetime과 duration이 길어진 것을 볼 수 있다.

복합재료 압력용기는 금속용기와 달리 음향방출신호 발생원인이 matrix의 균열, 균열의 성장, 복합재료의 층간 분리, 강화 fiber의 절단 및 금속 liner의 파괴 등 다양한 손상메커니즘이 포함되어

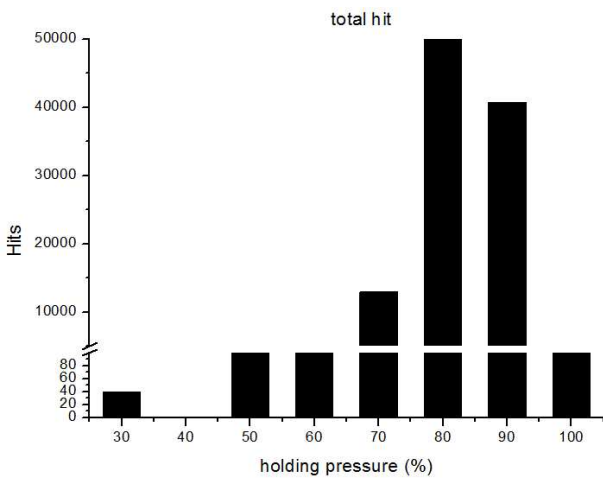


Fig. 6 Total hits during load holding

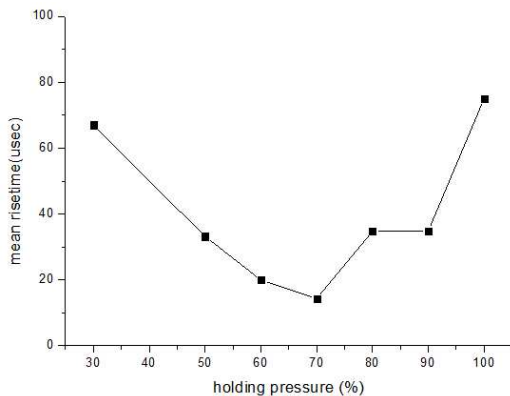


Fig. 7 Mean risetime during load holding

있다. Fig. 9에서는 가압30%단계에서는 복합재료의 matrix 균열에 의한 음향방출 활성도가 증가하여 신호의 진폭이 상승한 것으로 보이며, 가압 50~60%단계에서는 서론에서와 같이 복합재료의 손상도가 증가함에 따라 음향방출 활성도가 오히려 감소하여 신호 진폭이 감소한 것으로 생각된다. 가압70%단계에서는 복합재료의 층간분리와 강화fiber 절단이 시작되어 신호의 진폭이 다시 증가하고 이후에서는 강화 fiber의 대량 절단과 금속 liner의 파괴가 일어나면서 진폭이 약간 증가된 것으로 보여진다.

위와 같이 복합재료 압력용기는 여러 가지 손상 메커니즘이 포함되어 있으며, 초기에는 응력에 의한 matrix의 균열과 이 균열의 성장이 주된 손상 메커니즘으로 추정할 수 있는데, Fig. 10의 (a)에서와 같이 가압30%단계에서는 risetime이 10μsec 부근과 100μsec 부근으로 구분되어 나타나고 있다. 이는 matrix균열의 생성과 이 균열의 성장을

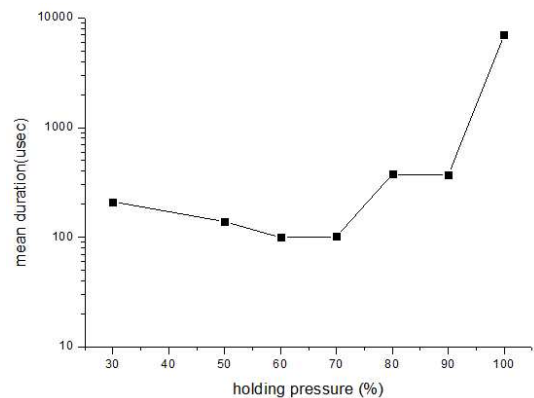


Fig. 8 Mean duration during load holding

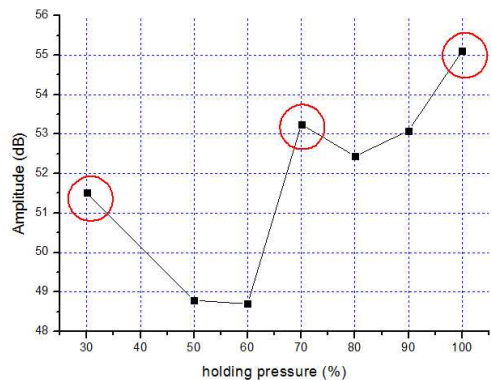


Fig. 9 Mean Amplitude during load holding

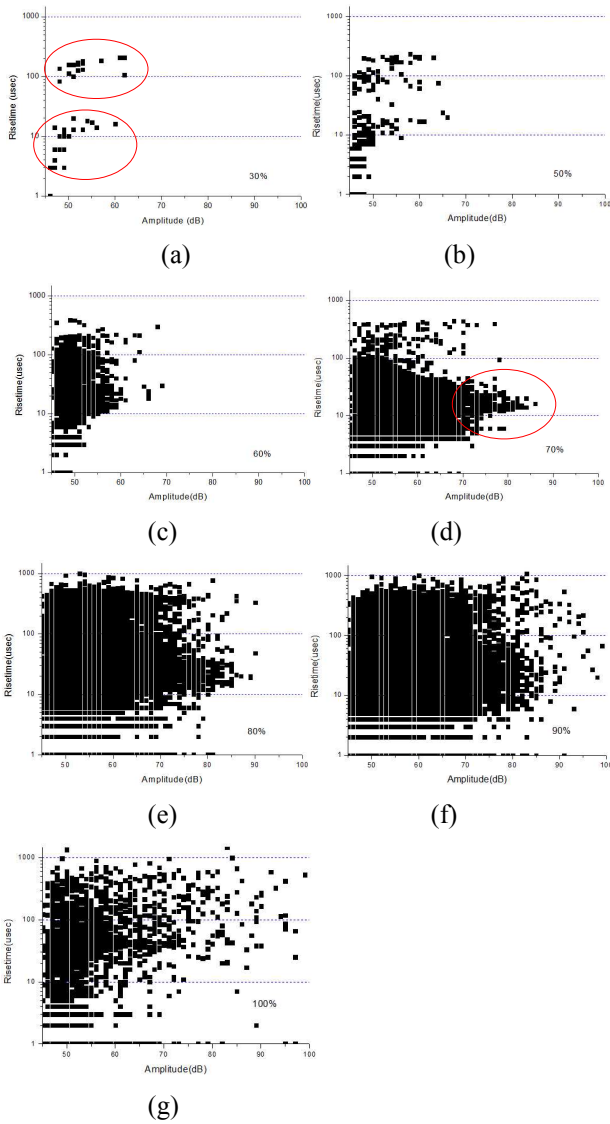


Fig. 10 Risetime vs amplitude plot during load holding : (a) 30%, (b) 50%, (c) 60%, (d) 70%, (e) 80%, (f) 90%, and (g) loading start and fractured

나타내고 있는 것을 보이며, 손상메커니즘과 이후에 발생한 신호의 설명을 위해서는 risetime이 100μsec부근의 신호가 matrix균열의 발생과 관련이 있고, 10μsec부근의 신호는 이 균열의 성장과 관련이 있는 것으로 보인다.

가압50%, 60%단계까지의 AE신호로 보아 추가적인 손상원인보다는 matrix균열의 발생과 성장이 증가하고 있는 것으로 보여지며, 가압70%단계에서는 발생한 AE신호의 risetime이 이전과는 다른 500μsec영역에서 추가적으로 많이 나타나는 것으로 보아 강화fiber의 절단과 같은 새로운 손상요인이 나타나고 있는 것으로 보여지며, 10μsec부근에

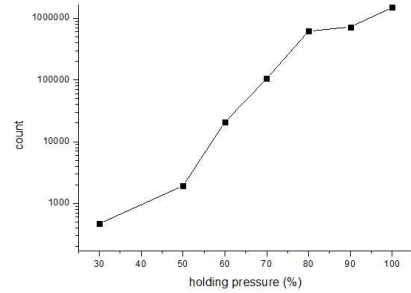


Fig. 11 total count during load holding

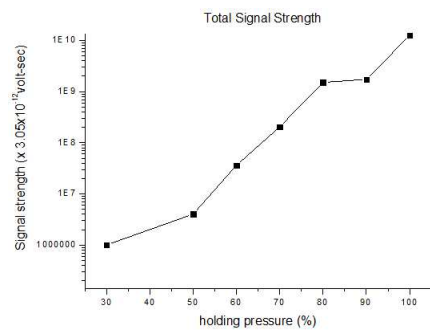


Fig. 12 total signal strength during load holding

서 급격한 AE신호의 증가로 보아 기존 균열의 성장과 층간분리와 같은 matrix균열의 성장이 급격히 증가한 것으로 보여진다. 이후 가압80~90%단계에서는 이전에 발생된 matrix균열의 성장 및 여러 가닥의 강화fiber의 절단과 같이 급격한 손상이 일어나는 것으로 추정되며 실제 여러가닥의 강화fiber의 절단음을 들을 수 있었다. 이 단계에서 보이는 risetime이 800μsec이상인 신호는 여러 가닥의 강화fiber가 동시에 절단될 때 발생하는 것으로 추정되며, 이 후 마지막 가압100%단계에서는 여러 가지 손상메커니즘이 복합적으로 일어나고 용기의 손상이 급격히 증가하여 마지막 금속liner가 파열되었다.

Fig. 11은 각 가압유지단계에서 holding 2분 후에 발생한 음향방출신호의 total count를 나타내며, Fig. 12은 total signal strength를 나타내고 있다. 이들 변수들은 Fig. 7의 mean risetime이나 Fig.8의 mean duration, Fig. 9의 mean amplitude보다 용기의 손상 정도를 더 잘 나타내고 있음을 보여준다. 각 가압 단계동안 용기의 손상이 진행됨에 따라 여러 가지의 파괴메커니즘에 따른 음향방출 활성도와 용기의 손상정도를 mean amplitude, total hit, mean risetime나 mean duration 등으로 평가하기 어려운 점이 있으며, 압력유지시 동안 발생한 음향방출신

호의 total count, total signal strength가 용기의 손상정도를 잘 나타낼 수 있는 변수임을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차용 type-II CNG 연료탱크의 파열시험시 파열압력을 600bar로 예상하고, 그 파열예상압력에 도달할 때까지 압력을 단계적으로 증가시키면서 가압후 10분의 유지시간동안 발생하는 음향방출신호를 획득하였다. 또 획득된 신호의 가압유지 직후 2분간은 flow noise 등의 잡음신호가 포함된 것으로 판단하고 가압유지 2분 이후의 신호를 평가대상으로 결정하고 그 AE변수들에 대해 분석하였다.

(1) 사용압력의 1.8배에 해당하는 파열예상압력의 60%인 360bar까지는 용기의 손상정도가 적어 creep 효과가 적은 것으로 판단되나, 파열예상압력의 70%인 420bar 이상의 압력이 가해질 때에는 용기의 손상이 심하여 creep 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

(2) 압력유지단계에서 용기의 손상으로 발생하는 음향방출신호 변수의 mean Amplitude, mean risetime, mean duration, risetime amplitude correlation은 복합재료 압력용기의 손상정도를 정확하게 평가하기는 어려우나 여러 가지 손상메커니즘을 추정해 볼 수 있었다.

(3) 압력유지단계에서의 total count, total signal strength는 용기의 손상정도를 잘 나타내주는 음향방출 변수임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 재료연구소의 자체연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Seiff, H. E., 2008, "Some Things to be Learned from the Other Compressed Gas Fuel System," *CVEF*.
- (2) Beeson, H. D., Davis, D. D., W. Ross, L., Tapphorn, Sr. R. M., 2002, "Composite Overwrapped Pressure Vessels," NASA, TP-2002-210769
- (3) Toughiry, M., 2002, "Examination Of The Nondestructive Evaluation of Composite Gas Cylinders," United States Department of Transportation, NTIAC/A7621-18:CRC-CD8.1
- (4) General Motors Corporation, 1997, "Development of Inspection Technology for NGV Fuel Tanks," FaAA-SF-R-97-05-04
- (5) Lee, J.O., Lee, J.S. Yoon, U.H. and Lee, S.H., 1996, "Evaluation of Adhesive Bonding Quality by Acoustic Emission," *J. of KSNT*, Vol. 16, No. 2.
- (6) Akhtar, A., Kung, D. and Westrook, D.R., 2000, "Acoustic Emission from FRP Damaged Hoop Wrapped Cylinders," *Materials Evaluation*, Vol. 58, No. 3, pp. 462-469.