

CNG 버스실린더의 내구안전성 평가

박용환 · 정용식

호서대학교 환경안전공학부

1. 서 론

CNG 버스는 200기압 이상의 고압가스 용기를 사용함에 따라 운행 역사가 4년이 채 안 되는 현재 운행되고 있는 CNG 버스의 연료용기에 대한 내구성 및 안전성에 대한 막연한 불안감이 상존하고 있으며, 이는 CNG 버스 보급 확대의 중요 장애 요인이 되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 현재 사용 중에 있는 연료용기에 대한 내구안전성 평가를 실시하여, 지속적인 사용 가능 여부를 확인하는 한편, 사용 초기에 나타날 수 있는 제반 문제점을 파악하고 대책을 강구하여 CNG 버스의 보급 활성화에 기여하고자 한다.¹⁻³⁾

2. 연료용기 개요

CNG 버스용 연료용기는 Table 1과 같이 크게 4종류로 분류되며,⁴⁻⁵⁾ 현재 국내에서 사용되고 있는 것은 NGV-2 타입으로 강재 라이너(Cr-Mo강 4130)에 유리섬유(E-Glass)/에폭시 복합재료로 용기의 몸통부분만 보강한 것이다. 초기 보급 용기의 용량은 버스 제원에 적합하기 위해 버스 제조사에 따라 버스 당, 84, 95, 100, 121ℓ 용량의 용기가 혼용되어 6~8개 정도 사용된 것으로 파악되었다. Fig. 1은 121ℓ 용량의 NGV-2 연료용기의 사진을 나타내고 있다.

Table 1 Classification of CNG fuel cylinders

Type	Materials	Weight Ratio
NGV-1	Seamless steel cylinders	100%
NGV-2	Seamless steel liner with carbon or glass fibers, Hoop wrap	80%
	Seamless aluminum liner with carbon or glass fibers, Hoop wrap	70%
NGV-3	Seamless aluminum liner with carbon or glass fibers, Full wrap	50%
NGV-4	Plastic liner with carbon or glass fibers, Full wrap	45%

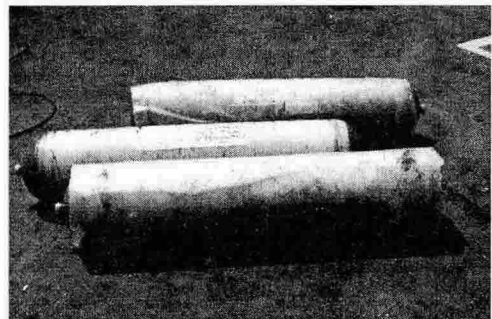


Fig. 1 NGV-2 type CNG fuel cylinders

3. 시험항목 및 샘플

3.1 시험 항목

고압가스안전관리기준에 사용 중인 용기에 대한 재검사(매 3년)의 경우 재사용을 위해 통상 육안검사에 그치고 있으나, 보다 확실한 안전성 평가를 위해서 본 연구에서는 용기 안전성과 가장 밀접하다고 생각되는 6가지 시험항목을 선정하여 관련 시험기준에 따라 실험을 실시하였다.⁶⁾ Table 2는 선정된 6가지 시험항목 및 시험기준을 요약한 것이다.

Table 2 Test criteria for CNG fuel cylinders

Test Item	Test Method	Evaluation Criteria
Leak test	foam	no leak
Bare-eye test		no corrosion, no deformation, no damage
NDE test	UT, 4MHz, 0°, 70°	wall thickness > 4mm defect depth < 0.2mm, width < 1.6mm
Hydrostatic test	1.5 x charge pressure	permanent volumetric expansion < 5%
Cycling test	1.25 x charge pressure	> 11,250 cycles
Burst test		no burst at 2.25xcharge pressure no deformation at 2.5xcharge pressure

3.2 시험 샘플

현재 운행 중인 CNG 버스 중 차량제작 사별로 가장 오래되고 많이 운행된 버스 2대를 선정하고, 장착된 연료용기 중 가장 용량이 큰 각 3기(내용적 121 ℓ)의 샘플을 수거하여 실험에 사용하였다. Table 3은 수거된 용기의 제원 및 이력을 나타낸 것이며, Fig. 2는 버스에서 탈착된 연료 용기의 사진을 나타내고 있다.

Table 3 CNG bus fuel cylinders

Type	NGV-2	
Spec.	φ12.7" x L 72"	
Capacity	121 ℓ	
Bus Maker	A	B
Operation Period	2000. 12. -	2000. 11. -
Mileage	279000km	216000km

* NGV-2 : Steel 용기 + composite winding

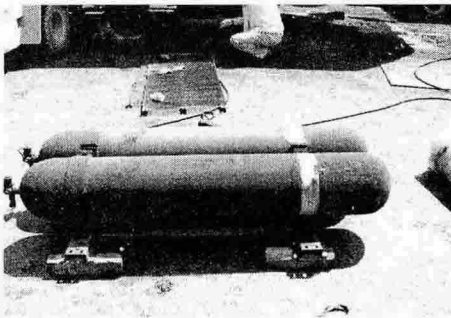


Fig. 2 Used CNG bus cylinder samples

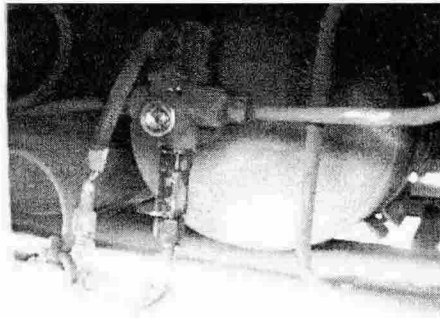


Fig. 3 Leak test for the valve and pipelines near fuel cylinder

4. 실험 및 고찰

4.1 누설검사

연료용기 밸브나 배관 연결부에서 누설이 발생할 경우 누설부위에서는 통상 고압의 가스 팽창에 의해 성애가 발견되는데, 1차 육안 검사에서 이러한 성애는 발견되지 않았다. 보다 정밀한 누설 여부를 확인하기 위하여 버스로부터 탈착하기 전에 용기 및 연료 배관라인을 따라 누설검사용 부식방지 포수용액(Swagelok사의 Snoop® 제품)을 사용하여 2차 누설 검사를 실시하였으며 전 배관라인에서 누설부위는 검지되지 않았다.

4.2 육안검사

본 연구에서 수거된 6개의 용기 샘플에 대한 탈착 후 육안검사를 실시하였다. 장착 차량에 관계없이 용기 모두 외부 손상이나 부식, 변형 등 열화의 흔적이 발견되지 않았으며, 용기의 표시 사항도 선명하게 식별 가능한 것으로 나타났다.

4.3 비파괴검사

수거된 연료용기 6개 모두에 대하여 Fig. 4와 같이 초음파 탐상(Model : EPOCH-III)을 이용한 비파괴 검사를 실시하였다. 시험방법은 ASME Code에 준하여 실시하였는데, 사용 주파수는 4MHz이었으며, 0°와 70°의 두 방향에서 검사하였다. 용기 치수로서는 압력용기로서 가장 중요한 설계변수인 벽두께를 측정하였다.

검사 결과 용기의 벽두께는 모두 설계 기준치인 4mm를 초과하는 것으로 나타났는데, 이는 반복가압에 따른 재질 열화로 발생할 수 있는 용기 벽두께의 치수 감소가 지금까지 거의 일어나지 않았음을 말한다. 또한 허용결함의 크기 기준인 용기 두께의 5%에 해당하는 깊이(0.2mm)와 폭 1.6mm를 초과하는 어떠한 균열이나 결함도 발견되지 않았으므로써 가압에 따른 새로운 균열 발생이나 균열 성장이 일어나지 않았음을 나타내었다.

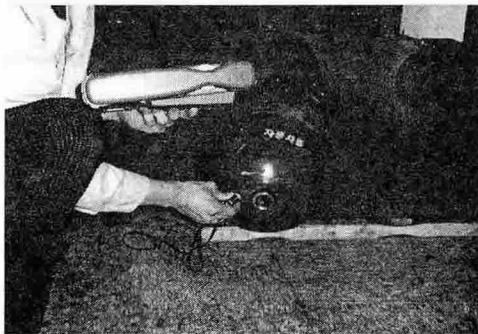


Fig. 4 Non-destructive ultrasonic test

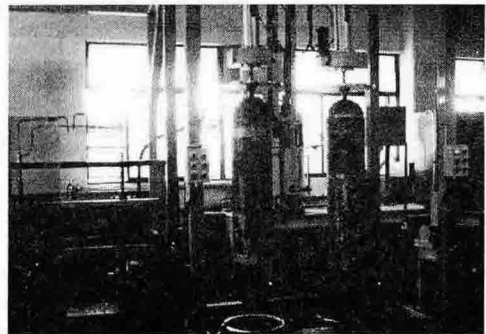


Fig. 5 Set-up for hydrostatic test

4.4 내압시험

내압시험에서는 시험 용기에 대하여 사용압력(20.7MPa)의 1.5 배의 시험압력을 30 초간 유지한 후 압력계와 팽창 측정장치를 이용하여 측정하였다.

Fig. 5는 내압시험을 위해 기름조에 들어가기 전의 모습을 나타낸 사진이고 Table 4는 내압시험 결과를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 전체 부피 팽창량에서는 약간의 차이를 보이고 있지만, 영구 부피 팽창량은 12cc로 같은 값을 나타내고 있다. 이것은 유리섬유 복합재료의 탄성한계가 강재의 탄성한계보다 훨씬 크다고 볼 때, 시험압력이 제거된 후의 영구 부피 팽창량은 강재 라이너의 순수 소성변형으로 볼 수 있으며, 따라서 강재 라이너의 치수 및 재질 특성은 거의 똑같고, 강화 복합재료의 상태에 따라 전체 부피 팽창량이 미세한 차이를 나타내는 것으로 추정된다. 두 샘플 모두 영구 부피 팽창률이 1.16%~1.24%로 한계치인 5%에 훨씬 못 미치고 있어 수거된 용기의 내압특성은 여전히 양호한 것으로 판단된다.

Table 4 Results of hydrostatic test

Item	A1	B1
Water capacity	121 ℓ	121 ℓ
Total volumetric expansion	1038cc	965cc
Permanent volumetric expansion	12cc	12cc
Permanent Increase	1.16%	1.24%
Limit	< 5%	< 5%

4.5 반복가압시험

반복가압시험은 용기가 고압의 반복되는 충전압력에 의해 강재용기 내에 피로 균열이 발생하거나 미세 결함이 성장함으로써 피로파괴가 발생할 수 있는지의 여부를 평가하는 것으로, 최고시험압력을 충전압력(20.7MPa)의 1.25배, 최저충전압력을 충전압력의 10%이하로 반복 가압하였을 때 11,250사이클(설계 수명 연수 15년 × 750회) 이전에 파손이 일어나서는 안 된다. 수거된 용기 중 차량별로 각 1기를 선정하고 반복가압시험장치와 작동유를 사용하여 시험을 실시하였다. 최고시험압력은 26.8MPa로 하였으며, 분당 3회의 속도로 시험하였다.

시험결과 기준 사이클에서 용기의 파손이나 변형이 일어나지 않았으며, 시험 후 초음파 비파괴 시험에서도 허용결함 크기 기준 이상의 어떠한 균열도 검출되지 않았다.

4.6 파열시험

파열시험은 용기가 파열될 때까지 가압하여 그 때의 압력을 측정하는 것으로 수거된 용기 중 차량별로 각 1기를 선택하여 시험을 실시하였다. 이 때 최소파열압력은 충전압력의 2.25배(46.6MPa) 이상으로 하고, 유리섬유 응력비 (2.65배 (54.9MPa), E-glass)를 확인하기 위하여 충전압력의 2.5배(51.8MPa)의 압력에서 1분간 유지하여 이상 유무를 점검하였다. 최소파열압력 80%를 초과하는 압력에서부터는 가압 속도가 초당 1.4MPa를 넘지 않도록 하였다.

두 용기 모두 충전압력의 2.25배인 최소 파열압력에서나, 충전압력의 2.5배 압력에서는 파열이 발생하지 않았다. Table 5에서 보는 바와 같이 최종 파열압력은 각각 60.2, 61.4MPa로서 설계기준압력(51.8MPa)을 상회하였으며, 제조 후 제품검사 시의 파열압력 범위(57~64MPa)와도 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 약 3년 동안의 사용에도

불구하고 제품검사 시의 초기상태에 비해 용기의 열화나 손상이 거의 발생하지 않았음을 나타내는 것으로 추정할 수 있다.

파열시의 파괴모드는 용기에 따라 원주방향 파열 또는 길이방향 파열 모두 발생하였는데, 원주방향 파열은 축응력에 의해 돔(dome) 부분과 몸통 연결부에서 발생하였으며, 길이방향 파열은 후프응력에 의해 몸통부에서 최대 폭 약 70mm, 길이 약 300mm 가량 발생한 것으로 나타났다. Fig. 6은 시험용기의 길이방향 파괴모드를 나타내고 있는 그림이다. 내압시험 결과에서 보았다시피 용기의 강제 라이너가 매우 균일하게 제조되었다고 가정할 때, 파열모드가 다르게 나타난 것은 복합재료에 의한 보강 정도가 약간 다르기 때

문으로 추정되었다. 즉, 균일 두께의 용기에서는 원주방향 응력이 축방향 응력의 2배이므로 길이방향 파열이 우선적으로 발생하여야 하나 복합재료 보강력의 크기 정도에 따라 후프응력에 의한 길이방향 파열보다는 축방향 파열이 먼저 일어날 수도 있다고 본다. 축방향 파열은 용기의 돔 부분이 갈라져 분리되므로, 장착 부위에 충분한 안전 방호장치가 필요한 파괴모드라고 할 수 있다. 따라서 향후 보다 정밀한 응력해석을 통하여 길이방향 파열을 의도적으로 유도할 수 있는 복합재료의 최적 보강력에 대한 연구가 필요하다고 본다.

4.7 절단시험

절단 시험은 CNG 가스 내 수분으로 인하여 예상되는 강제 용기 내부의 부식 발생 정도를 확인하기 위한 것으로, 띠틈을 이용하여 용기를 길이방향으로 2등분 하였다. Fig. 7은 용기내부 표면을 나타낸 사진으로 강제 라이닝임에도 불구하고 용기내부의 부식 흔적은 전혀 발견되지 않았다. 이러한 이유로는 가스의 압축 시 사용되는 압축기용 윤활유 오일이 고온(약 150℃ 이상) 고압의 증기 상태로 가스와 함께 연료 배관라인을 따라 용기내로 전이되며, 전이된

Table 5 Burst test results (unit: MPa)

Test sample	Failure mode	Burst pressure	Design pressure	Burst pressure at product test
A2	Circumferential	60.2	51.8	57~64
B2	Longitudinal	61.4		



Fig. 6 Longitudinal fracture mode

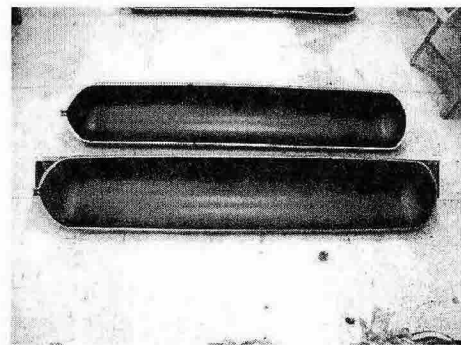


Fig. 7 Cylinder liner surface after half cutting

오일 증기는 용기와 접촉한 후 냉각되면서 라이닝 표면에 달라붙게 되는데 이것이 방청유의 역할을 하기 때문으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 CNG 버스 보급 초기에 장착된 NGV-2 연료용기에 대하여 약 3년이 경과한 후의 내구안전성 평가를 위해 6가지 주요 시험항목에 대하여 살펴보았으며, 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 용기 외부 및 강제 라이닝 내부의 손상이나 부식 등은 관찰되지 않았으며, 내부 부식의 미 관찰은 CNG 가스에 포함되어 전이된 압축기 윤활유가 방청제 역할을 하였기 때문인 것으로 분석되었다.

(2) 용기 내 허용결함 크기를 초과하는 결함이나 용기 두께의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 11,250 반복 가압 사이클에서도 용기의 파손이나 균열 발생이 없었으며, 내압시험에 따른 용기의 파괴 변화도 규정치보다 훨씬 이하인 것으로 나타났다. 따라서 사용 현재까지는 반복가압 사용에 따른 피로파괴 현상이 거의 없는 것으로 추정되었다.

(3) 파열압력은 설계기준압력을 훨씬 상회하는 것으로 나타나 여전히 충분한 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 다만, 파괴 모드는 후프응력에 의한 길이방향 파괴와 축응력에 의한 돔 방향 파괴 모두 관찰되었다.

참고문헌

- 1) 김우식, 김철만, 홍성호, "국내 가스사고 사례분석 및 가스배관 건전성 확보방안", 산업안전학회지, Vol. 12, No. 3, pp. 192~199, 1997.
- 2) GRI, "NGV 용기의 안전성 - CNG용기의 적절한 취급의 중요성," GRI 보고서, Trans. of the ASME, Vol. 119, No. 10, pp. 799~806, 1997.
- 3) GRI, "압축 천연가스 용기의 적절한 취급과 주의," GRI Report 96-0419, 1996.
- 4) GRI, "NGV용 강제(鋼製) Type 1 및 2 용기," GRI Report, 1997.
- 5) ANSI/IAS NGV 2, American National Standard for Basic Requirements for Compressed Natural Gas Vehicle(NGV) Fuel Containers, 1998.
- 6) 한국가스안전공사, "압축천연가스자동차용 철강제 라이너 복합재료용기 제조 및 검사기준," 한국가스안전공사, 2000.