

CNG 버스용 연료용기의 내구안전성 평가

박 용 환

호서대학교 환경안전공학부
(2003. 8. 18. 접수 / 2004. 1. 5. 채택)

The Evaluation on the Durability and Safety of Fuel Cylinders for CNG Buses

Yong-Hwan Park

Division of Environment & Safety Engineering, Hoseo University
(Received August 18, 2003 / Accepted January 5, 2004)

Abstract : CNG buses were introduced in 2000 to reduce air pollution of the big cities. The durability and safety evaluation were performed for the NGV-2 type cylinders taken from two buses after 30 months of running. No external damage and no internal corrosion was observed on the container surfaces. Defect exceeding the allowable limit was not found in the UT test. Permanent volume expansion was about 1.2% which is much smaller than the required design limit. Cycling test showed no failure after 11,250cycles and burst pressures were still above the maximum design pressure. Both the longitudinal and circumferential failure mode were observed, where both the fracture strengths were far above the design limit. This study showed the present CNG fuel cylinders were safe enough for further usage.

Key Words : CNG bus, fuel cylinder, durability, safety, burst pressure, design pressure

1. 서 론

최근 대도시 대기오염이 심화되고 있는 가운데, 이 중 자동차가 차지하는 대도시 오염비중은 60% 이상이며, 그 중 경유자동차에서 주로 배출되는 질소산화물과 매연 등은 오존층의 파괴와 폐질환을 유발하는 원인으로 지구환경과 국민건강에 큰 위협이 되고 있다. 경유 시내버스 1대는 승용차 37~81 대분의 오염물질을 배출하고 있으며, 미세먼지의 57%가 대형 경유차에 기인하는 것으로 보고 되고 있다. 이를 개선하기 위하여 우리나라도 저공해자동차 보급의 일환으로 2000년부터 천연가스시내버스 보급이 진행되어 오고 있다. 2003년 5월 3000대 보급을 넘어섰으며 2007년까지 약 2만대의 보급을 목표로 하고 있다.

그러나 천연가스버스는 20기압 이상의 고압가스를 사용해야 함에 따라 운행 역사가 3년이 채 안 되는 국내에서는 현재 운행되고 있는 천연가스 버

스 차량의 연료용기 및 충전소 등 주요설비에 대한 내구성 및 안전성에 대한 막연한 불안감이 상존하고 있으며, 이는 천연가스버스 보급 확대의 중요 장애 요인이 되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 현재 운행 중에 있는 고압의 천연가스버스 연료용기에 대한 내구안전성 평가를 실시하여, 지속적인 사용 가능성의 여부를 확인하는 한편, 사용 초기에 나타날 수 있는 제반 문제점을 파악하고 대책을 강구하여 천연가스버스의 보급 활성화에 기여하고자 한다¹⁻³⁾.

2. 연료용기 개요

천연가스자동차용 연료용기는 Table 1과 같이 크게 4종류로 분류되며^{4,5)}, 현재 국내에서 사용되고 있는 것은 NGV-2 타입으로 강제 라이너(Cr-Mo강 4130)에 유리섬유(E-Glass)에폭시 복합재료로 용기의 몸통부분만 보강한 것이다. 금속 라이너가 있어 안전성이 높고, 제조가격이 상대적으로 저렴하여 초기 보급 모델로서 적합하다는 평이다. 초기에 보급

yhpark@office.hoseo.ac.kr

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%

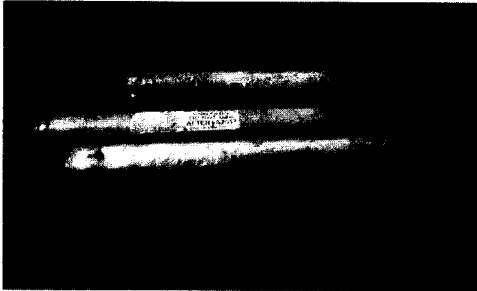


Fig. 1. NGV-2 type fuel cylinders

되어 있는 용기는 전량 수입된 것으로 크기 및 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.

3. 평가 기준 및 샘플 수거

3.1. 시험 평가 기준

국내의 CNG 차량용 연료 용기에 대한 기술기준으로는 고압가스안전관리기준 통합 고시 제 12-19-31 조의 규정에 의한 압축천연가스 자동차용 철강제 라이너 복합재료 용기 제조 및 검사기준에 따르는데⁶⁾, 최초 설계·제조된 용기에 대하여 실시하는 정밀검사 기준과 통상적인 제조 조건하에서 제조되

Table 2. Test items for CNG fuel cylinders

Test	Test Item
Precision test	Cycling pressure test, Environment test, Burst test, Fire test, Composite defect test, Drop test, Impact test, Accelerated stress burst test,
Product test	Mat'l test, Coating test, Burst test, Liner defect test, Hydrostatic test, Leak test

고 표시사항을 명시한 대표적인 용기 또는 모든 용기에 대하여 실시하는 제품검사 기준이 있다. Table 2는 CNG 용기의 정밀검사 및 제품검사 시험항목을 나타낸 것이다.

3.2. 샘플 수거

국내 CNG 버스 제작사는 현대자동차와 대우자동차 2곳으로, 보급 초기에 사용된 용기는 모두 이태리 Farber사로부터 수입하여 공급된 것이다. 따라서 동일 용량에 대한 용기의 제원 및 특성은 근본적으로 동일하다고 할 수 있으나, 다만 차량 운행 후에는 차량종류 및 운행조건에 따라 혹 용기에 미치는 영향이 다를 수 있음을 가정하였다.

따라서 본 연구에서는 현재 운행 중인 CNG 버스 중 제작사별로 가장 오래되고 많이 운행된 버스 2대에 장착되어 있는 연료용기 중 가장 용량이 큰 3기의 연료용기(내용적 121L) 샘플을 수거하였다. Table 3은 수거된 용기의 제원 및 이력을 나타낸 표이며, Fig. 2는 버스에서 탈착된 연료 용기의 사진을 나타내고 있다.

Table 3. Specification of bus fuel cylinders

Type	NGV-2	
Spec.	φ12.7" x L 72"	
Capacity	121L	
Manufacturer	Farber(Italy)	
Bus Maker	A	B
Operation Period	2000. 12.	2000. 11.
Mileage	279000km	215746km

* NGV-2 : Steel 용기 + composite winding

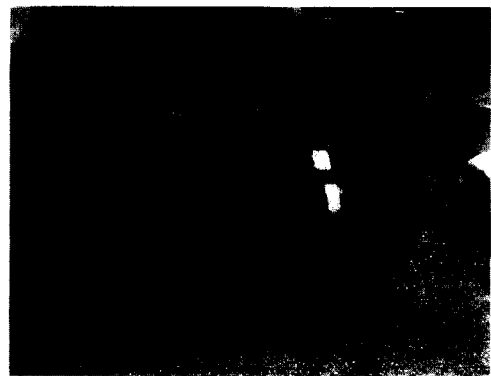


Fig. 2. CNG bus cylinder samples

4. 실험 및 고찰

사용 중인 용기에 대한 재검사의 경우 재사용을 위해 통상 육안검사에 그치고 있으나, 사용 중인 용기에 대한 안전성 평가를 위해서 용기 안전성과 밀접한 6가지 핵심 시험항목을 선정하여 관련 시험기준에 따라 실험을 실시하였다⁶⁽¹⁰⁾.

4.1. 누설검사

Fig. 3의 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(Swagelok 사의 Snoop® 제품)을 사용하여 2차 누설 검사를 실시하였으며 전 배관라인에서 누설부위는 검지되지 않았다.

4.2. 육안검사

통상 CNG 연료 용기는 최초 제조 시, 최초 검사를 받은 후 매 36 개월 도래 시 그리고 자동차에 재설치 하는 경우에는 용기의 외부 손상 및 열화에 대한 육안검사를 실시하여야 한다. 이 때 별도로 규정되어 있지 않는 한 가능하면 용기 보호 장치를 제거하고 노출된 용기 표면에 대하여 검사하여야 하며, 필요하다고 인정될 경우 보호 장치로 둘러싸인 부분도 검사하여야 하고 다만, 용기의 노출된 표면에 열화 또는 눈에 보이는 손상이 발견되지 않는 경우에는 검사를 위하여 용기를 차량으로부터 분리하지 않아도 된다.(분리하는 대신 육안검사 이외의 비파괴검사 방법으로 설치된 상태에서 검사 가능)



Fig. 3. Valve and pipelines near fuel cylinder

Table 4. Results of bare eye test

Samples	External damage	Corrosion	Marking damage
A-1	No	No	No
A-2	No	No	No
A-3	No	No	No
B-1	No	No	No
B-2	No	No	No
B-3	No	No	No

표시사항이 없는 용기 또는 표시사항이 훼손되어 읽을 수 없게 된 용기는 사용할 수 없으나 용기 제조자가 그가 표시한 제조번호 등을 분명하게 식별할 수 있어 표시사항을 보증할 수 있다면 용기를 계속 사용할 수 있으며, 이 경우 제조자는 표시사항을 재 부착하여야 한다.

상기 검사 기준에 따라 본 연구에서 수거된 6개의 용기 샘플에 대한 탈착 후 육안검사를 실시하였고 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 장착 차량에 관계없이 용기 모두 외부 손상이나 열화의 흔적이 발견되지 않았으며, 용기의 표시사항도 선명하게 식별가능 하였다.

4.3. 비파괴검사

수집된 연료용기 6기 모두에 대하여, 장기간 반복 가압 사용에 따른 용기 두께치수의 변형 여부 및 강 재료 내부에서의 균열 발생이나 진전 여부 등을 검사하기 위하여 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.

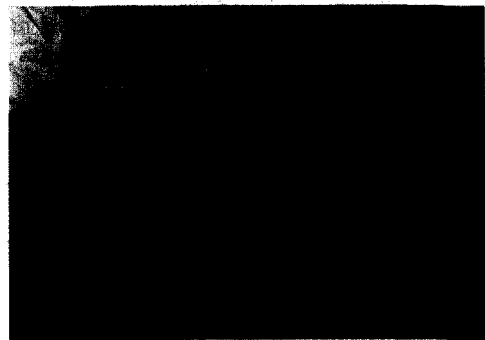


Fig. 4. A photo showing non-destructive ultrasonic test

검사 결과 용기의 벽두께는 모두 설계 기준치인 4mm를 초과하는 것으로 나타났는데, 이는 반복가압에 따른 열화로 인해 발생할 수 있는 용기 벽두께의 치수 변화가 지금까지 거의 일어나지 않았음을 말한다. 또한 허용결함 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 균열성장이 일어나지 않았음을 나타내었다.

4.4. 내압시험

각각의 용기에 대하여 사용압력(20.7MPa)의 1.5 배의 압력으로 내압시험을 실시하였으며, 용기의 팽창을 검증하기에 충분한 시간동안 유지하기 위해 압력을 30 초간 유지한 후 압력과 팽창 측정 장치를 이용하여 측정하였다. 어떠한 경우에도 시험압력에 대한 영구부피 팽창량이 전체 부피 팽창량의 5%가 초과되지 않아야 한다. Fig. 5는 내압시험을 위해 기름조에 들어가기 전의 모습을 나타낸 사진이고 Table 5는 내압시험 결과를 정리한 것이다.

Table 5에서 보는 바와 같이 전체 부피 팽창량이 약간의 차이를 보이고 있지만, 영구 부피 팽창량이 같은 값을 나타내고 있다. 유리섬유 복합재료의 탄성한계가 강재의 탄성한계보다 훨씬 크므로, 시험압력이 제거된 후의 영구 부피 팽창량은 강재 라이너



Fig. 5. Set-up for hydrostatic test

Table 5. Results of hydrostatic test

	A	B
Water capacity	121L	121L
Total volumetric expansion	1038cc	965cc
Permanent volumetric expansion	12cc	12cc
Permanent Increase	1.16%	1.24%
Limit	< 5%	< 5%

의 순수 소성변형으로 볼 수 있다. 따라서 두 샘플 용기의 강재 라이너의 재질 상태는 아주 흡사하다고 볼 수 있다. 두 샘플 모두 영구 부피 팽창률이 한계치인 5%에 훨씬 못 미치고 있어 수거 용기의 내압특성은 여전히 양호한 것으로 판단된다.

4.5. 반복가압시험

반복가압시험은 반복되는 용기의 고압 충전압력에 의해 강제용기 내에 피로 균열이 발생하거나 미세 균열이 성장함으로써 피로파괴가 발생할 수 있는지의 여부를 평가하는 것으로, 최고시험압력은 충전압력의 1.25배, 최저충전압력은 충전압력의 10% 이하의 압력으로 하여 반복가압하였을 때, 최소 11,250사이클(설계 수명 연수 15년×750회) 이전에 파손이 일어나서는 안 된다. 수집된 용기 중 차량별로 각 1기를 선정하고 Fig. 6의 시험장치와 작동유를 사용하여 반복가압시험을 실시하였다. 충전압력 20.7MPa에 대한 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. 절단시험

절단 시험은 가스내 수분으로 인하여 예상되는



Fig. 6. Set-up for cycling pressure test

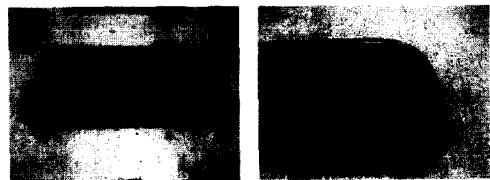


Fig. 7. Sample cylinder after half cutting

강제 용기 내부의 부식 발생 정도를 확인하기 위한 것으로, 띠톱을 이용하여 용기 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) 고압 증기 상태로 가스와 함께 연료 배관라인을 따라 용기내로 전이되며, 전이된 오일 증기는 용기와 접촉한 후 냉각되면서 라이닝 표면에 달라붙게 되는데 이것이 방청유의 역할을 하기 때문으로 분석된다.

4.7. 파열시험

파열시험은 용기가 파열될 때까지 가압하여 그때의 압력을 측정하는 것으로 수거된 용기 중 차량별로 각 1기를 선택하여 압력 파열시험을 실시하였다.

이 때 최소파열압력은 충전압력의 2.25배(46.6 MPa) 이상이어야 하고, 유리섬유 응력비 (2.65배 (54.9MPa), E-GLASS)를 확인하기 위하여 충전압력의 2.5배(51.8MPa)의 압력에서 1분간 유지하여 이상이 없어야 한다. 최소파열압력 80%를 초과하는 압력에서부터는 가압속도가 초당 1.4MPa를 넘지 않아야 한다.

두 용기 모두 충전압력의 2.25배인 최소 파열압력에서나, 충전압력의 2.5배 압력에서는 파열이 발생하지 않았다. Table 6에서 보는 바와 같이 최종 파열압력은 각각 60.2, 61.4MPa로서 설계 최대압력 (51.8MPa)을 상회하였으며, 제조 후 제품검사 시의 파열압력 값(57~64MPa)과도 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 약 3년 동안의 사용에도 불구하고 제조 시의 초기상태에 비해 용기의 열화나 손상이 거의 발생하지 않았음을 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 약 300mm 가량 길이로 발생한 것으로 나타났다. Fig. 8은 시험용기의 길이방향 파괴모드를 나타내고 있는 그림이다.

내압시험에서 보았다시피 용기의 강제 라이닝이 매우 균일하게 제조되었다고 가정할 때, 파열모드가 다르게 나타난 것은 복합재료에 의한 보강 정도가 다르기 때문으로 추정되었다. 즉, 균일 두께의 용기

Table 6. Results of burst test

시험용기	파열압력 (MPa)	파열모드	설계기준압력
A1	60.2	원주 방향	51.8MPa
B1	61.4	길이 방향	



Fig. 8. Longitudinal failure mode of the tested cylinder

에서는 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, 충분한 안전 방호장치가 필요한 파괴모드라고 할 수 있다. 따라서 향후 국산화 시에는 보다 정밀한 해석을 통하여 길이방향 파열을 의도적으로 유도할 수 있는 복합재료의 최적 보강력에 대한 도출이 필요하다고 본다.

5. 결 론

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

- 1) 용기 외부의 손상이나 강제 라이닝 내부 부식은 관찰되지 않았으며, 내부 부식의 미 관찰은 압축 가스에 포함되어 전이된 압축기 윤활유가 방청제 역할을 하였기 때문인 것으로 확인되었다.
- 2) 용기 내 허용결함 크기를 초과하는 결함이나 용기 두께의 변화는 없는 것으로 나타났다. 11,250 반복 가압 사이클에서도 파손이나 균열 발생이 없었으며, 내압시험에 따른 용기의 부피 변화도 규정치보다 훨씬 이하인 것으로 나타났다. 따라서 반복 가압 사용에 따른 피로현상이 거의 없었던 것으로 추정되었다.

3) 파손 모드는 후프응력에 의한 길이방향 파손과 축응력에 의한 돔 방향 파손 모두 관찰되었으나, 파열압력은 기준압력을 훨씬 상회하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) 김우식, 김철만, 홍성호, “국내 가스사고 사례분석 및 가스배관 건전성 확보방안”, 산업안전학회지, 제12권, 제3호, pp. 192~199, 1997.
- 2) GRI, “NGV 용기의 안전성 - CNG용기의 적절한 취급의 중요성”, GRI 보고서, Trans. of the ASME, 제119권, 제10호, 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.
- 7) CGA C-6.4, “Methods for External Visual Inspection of Natural Gas Vehicle(NGV) Fuel Containers and Their Installation”, Compressed Gas Association, Inc-1998 First Edition.
- 8) 일본가스협회, “압축 천연가스자동차 연료장치용 용기 및 부속품 재검사 지침, 平成 11년 10월, (사)일본가스협회 천연가스자동차 프로젝트부.
- 9) 일본가스협회, “압축 천연가스자동차 구조 취급기준 및 해설, 平成 10년 개정, (사)일본가스협회.
- 10) GRI, “Fracture Performance of Cylinders for NGVs”, GRI Report 97-0313, 1997.