

# CNG버스 복합재 압력용기 파열사고에 관한 법공학적 연구

김의수<sup>†</sup> · 김진표 · 박남규 · 김윤희

국립과학수사연구소

(2008. 4. 16. 접수 / 2008. 8. 26. 채택)

## A Forensic Engineering Study on Bursting Accident of Composite Pressure Vessel in CNG Bus

Eui-Soo Kim<sup>†</sup> · Jin-Pyo Kim · Nam-Kyu Park · Youn-Hoi Kim

Physical Analysis Division, National Institute of Scientific Investigation

(Received April 16, 2008 / Accepted August 26, 2008)

**Abstract :** The bus using compressed natural gas(CNG) trend to be extended in use internationally as optimal counter-plan for reducing discharge gas of light oil due to high concern about environment. But, Composit pressure vessels (CPV) to be equipped with CNG bus is always involved in the point that safety accidents happen due to having compressed natural gas. In this report, we analysis the cause of CPV bursting accident by reviewing design and manufacture factor and suggest preventive measure through this case.

**Key Words :** compressed natural gas bus, composite pressure vessel, VTI valve, chevron mark

### 1. 서론

천연가스 자동차는 연료의 사용 형태에 따라 압축된 천연가스를 연료원으로 사용하는 압축천연가스(CNG) 자동차와 액화 상태의 천연가스를 사용하는 액화천연가스(LNG) 자동차, 천연가스를 연료 용기에 흡착·저장하였다가 사용하는 흡착천연가스(ANG) 자동차 등이 있다. 천연가스버스는 이 중에서 주로 압축천연가스를 사용하기 때문에 CNG버스(Compressed Natural Gas Bus)라고도 한다. 기체 상태인 압축천연가스를 원료로 하기 때문에, 기존의 경유 차량과 비교했을 때 매연이나 미세먼지가 전혀 없고 소음 발생도 절반 수준으로 대기오염 발생량이 10분의 1 수준밖에 되지 않는다. 특히 대기오염 등 환경에 대한 관심이 높아지면서 경유차 배출 가스 저감을 위한 최적의 대안으로 최근 세계적으로 천연가스차의 보급이 크게 확대되고 있는 추세이다. 한국에서도 1991년부터 1997년까지 천연가스를 연료로 사용하는 자동차 개발을 완료하였고 2007년을 기준으로 전국 주요 도시의 시내버스 2만 대를 천연가스버스로 대체하였다. 이러한 추세

에도 불구하고 그 안전성에 대해서는 많은 논란을 불러일으키고 있으며 최근 그 이용에 따른 안전사고 또한 빈번하게 발생하고 있다. 가장 최근에 경기도 구리시에서 발생한 천연가스버스 화재 및 압력용기 파열 사고(2007.12.20)는 다행히 그 피해정도가 경미하였으나 대중들이 많이 이용한다는 점에서 대형참사로 이어질 수 있다는 큰 문제를 안고 있으며 또한 유사 사고가 다시 발생할 수 있는 점이 내재되어 있어 그 심각성은 매우 크다고 할 수 있다. 이러한 안전사고를 예방하기 위해서는 법공학(Forensic Engineering)적인 측면에서 좀 더 전문화되고 체계적인 사고조사와 원인 규명을 통해서 사전에 예방대책을 마련함으로써 유사 및 동종 재해의 발생을 최소화해야 한다. 이에 본 연구에서는 천연가스버스 압력용기 파열 사고에 대한 원인을 재조명하고 이 사고를 통하여 얻을 수 있는 교훈을 다시 음미하여 동일 형태의 안전사고 예방 및 천연가스버스 안정성 확보를 위한 방안을 제시하고자 한다.

### 2. 사고개요

- 일시 : 2007. 12. 20(목) 05:30경
- 장소 : 구리시 ○○구 ○○동 내부순환도로상

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
es92kim@nisi.go.kr



Fig. 1. Photograph of fired CNG bus.

- 피해현황 : 1명 화상, 천연가스버스 1대 전소
- 사건내용 : 주행중이던 ○○번 천연가스버스에서 화재가 발생하여 차량이 전소되고 운전자 ○○○(38세, 남)이 화상을 입은 사고임.

### 3. 천연가스버스 구조

#### 3.1. 연료 계통 구조

천연가스버스의 기본 구조는 경유 버스 등 종래의 차와 같고, 연료 계통만이 다르다. 연료인 천연가스는 고압(200kg/cm<sup>2</sup>)으로 압축되어 가스 용기에 저장되며, 압축된 가스는 용기로부터 연료 배관을 거쳐 감압밸브에서 사용압력으로 감압된 후, 공기와 혼합되어 엔진 내부로 공급된다. Fig. 2에 천연가스 버스 연료 계통도를 간략하게 나타내었다.

#### 3.2. 복합재 압력용기 구조

신소재로 각광 받고 있는 복합재료(FRP)는 무게에 비하여 비강도와 비강성이 높고 내식성과 내피로성 등이 우수하기 때문에 경량화 및 파괴시 안전성이 요구되는 분야에 다양하게 이용되고 있고 최근에는 차량용 CNG압력용기의 제작에도 널리 이용되고 있다. 또한 고압가스 용기 제작방법으로 가장 보편화 되어 있는 이음새 없는 튜브(Seamless tube)를 사용한 생산방식은 고가의 재료비와 보관상의 문제점 때문에 최근에는 행정인 긴 대용량의 수평

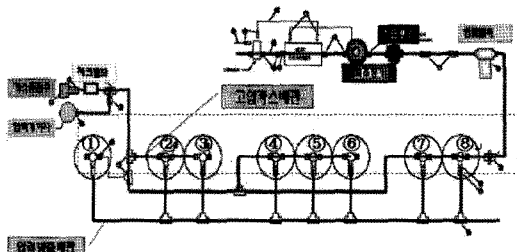


Fig. 2. Diagram of fuel supply system.

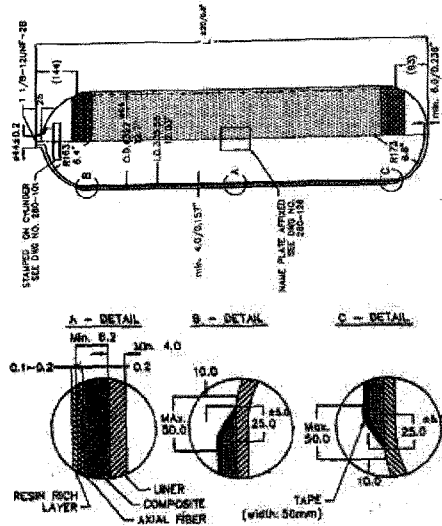


Fig. 3. Structure of composite pressure vessel.

식 프레스가 개발되어 D.D.I(Deep drawing & ironing) 공정을 이용하여 고압가스 용기를 제조하는 방법에 관한 연구가 진행되고 있다. 본 화재차량 내 CNG 복합재 압력용기는 Fig. 3과 같이 D.D.I공정을 이용하여 제작된 34CrMo4재질의 금속 라이너(Liner)에 라이너의 실린더 부분에 대해서만 에폭시(Epoxy) 수지와 글라스파이버(Glass fiber)를 함침시킨 복합재료를 후후와인딩(Hoop winding)하여 원주방향의 응력만을 보강시킨 복합재 압력용기이다<sup>4,7)</sup>.

### 4. 사고 원인 규명

#### 4.1. 현장 조사

1) Fig. 4와 같이 사고차량에는 CNG복합재 압력용기 총 8점이 병렬로 연결되어 장착되고 총8점 중 운전석부터 4점(①~④)은 직경 306mm, 길이 1800mm의 12liter 압력용기이고, 이후의 4점(⑤~⑧)은

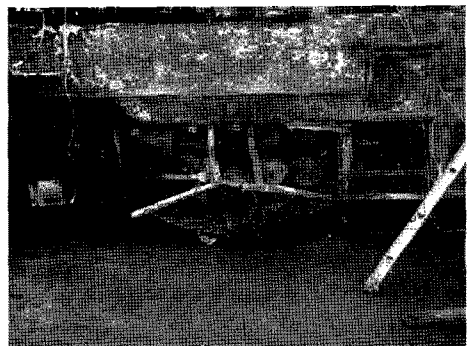


Fig. 4. Arrangement of CNG vessel in bus.

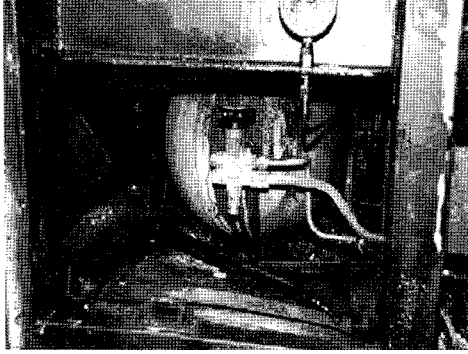


Fig. 5. Connection of valves with vessel.

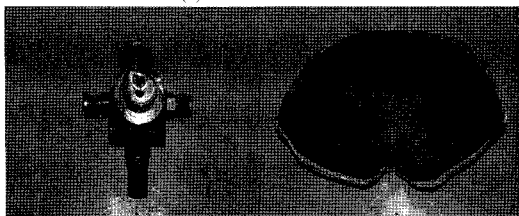
직경 306mm, 길이 1620mm의 108liter 압력용기로서 파열 용기는 운전석부터 4번째에 해당하는 121liter 용량의 압력용기이다.

2) Fig. 5에 나타낸 바와 같이 CNG복합재 압력용기의 상부돔(Dome) 부분에는 화재가 발생할 때 용기내 압력상승에 대비하여 온도로 제어되는 독일 VTI사에서 제작한 VTI안전밸브가 내장된 연료공급밸브가 장착되고 또한 연료공급 밸브내에는 연료충전 및 차량 운행시 연료를 공급하기 위한 연료공급배관과 VTI밸브가 작동할 때 압력을 방출하기 위한 압력방출배관이 장착되어 있다.

3) 파열된 용기는 Fig. 4의 4번 용기로서 Fig. 6(a)에서 보듯 파열시 압력에 의해 차량의 원장착 위치에서 용기 상부 방향으로 약 800mm 정도 도출되어 있고 Fig. 6(b)과 같이 2차 폭발지점에서 하부 돔 부분의 절반에 해당하는 체적의 파편과 4번 용기의 VTI밸브를 포함한 연료공급 밸브만이 수거되었다.



(a) Extruded vessel



(b) Collected debris

Fig. 6. Bursting vessel and debris.

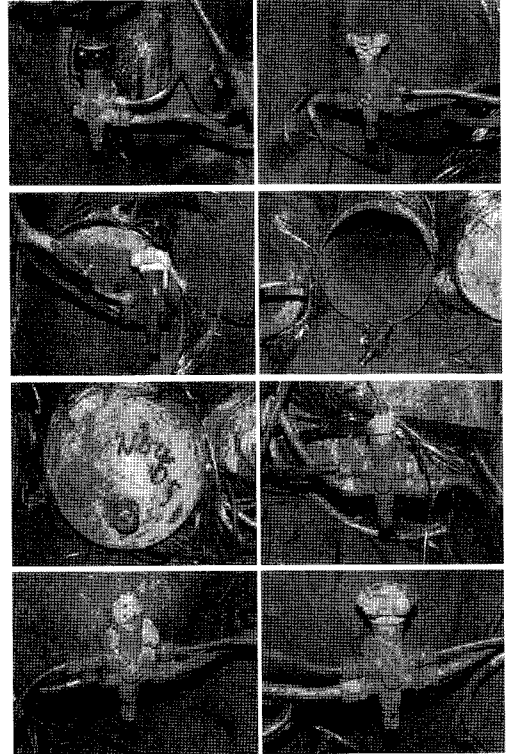


Fig. 7. Condition of the valves and vessel.

4) Fig. 7에서 보듯 4번 용기와 5번 용기 외에 6점의 용기에는 VTI밸브를 포함한 연료공급밸브가 용기 상부돔 부분에 장착되어 있고 5번 용기의 연료공급밸브는 수거되지 않았으며 6, 7번 용기의 연료공급 밸브가 심하게 용융된 상태이고 양쪽 주변으로 용기 및 연료공급 밸브에 화염흔과 용융된 형상이 식별되나 1번 용기의 연료공급 밸브에는 화염흔과 용융 형상이 식별되지 않는다.

#### 4.2. 안전밸브 및 파열용기 검사

1) Fig. 8에 나타낸 압력용기에 장착된 안전밸브는 튜브관내에 글리세린이 함유되어 이상 상태에서 용기 내 압력상승에 의한 파열을 대비하여 안전밸브 주변의 온도가 약110도 이상되면 팽창하면 압력을 방출시키는 구조를 가지는 VTI사에서 제작한 안전밸브이다.

2) 안전밸브 작동여부는 표준품과 비교시 안전밸브 튜브관내 글리세린의 존재여부와 관 터짐 현상으로 파악할 수 있으며 Fig. 9에서처럼 사고당시 각 용기별 안전밸브 작동여부를 살펴보면 1번 용기와 4번용기의 경우 안전밸브가 작동되지 않았으며 그 외 용기는 안전밸브가 작동하였음을 확인하였다.

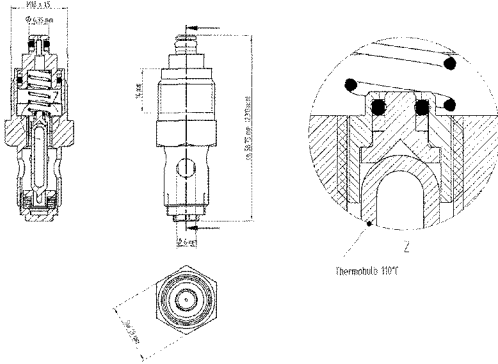


Fig. 8. Structure of VTI valve.

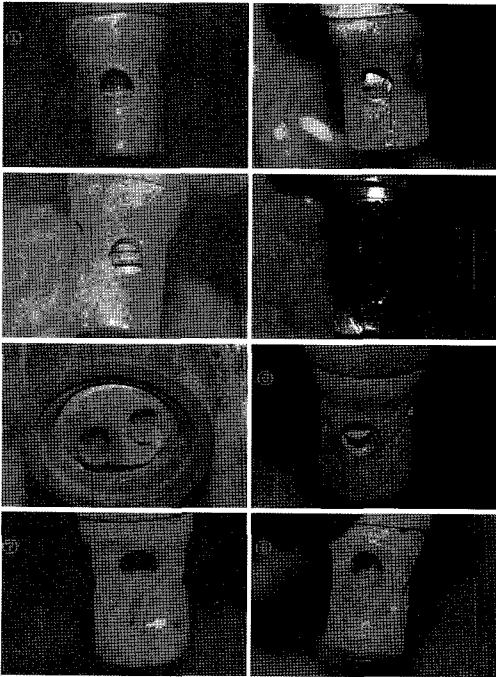


Fig. 9. Operation of VTI valve each vessel.

3) 4번 용기 안전밸브의 연료공급 밸브는 유실되고 Fig. 10에서 보듯 나사부는 용기 파열시 압력에 의해 지면등과 충돌하여 국부적으로 소성변형이 심한 상태임 파열된 4번 용기의 안전밸브의 정상여부를 확인하기 위해 안전밸브 작동시험을 수행하였고 그 결과 약 108도에서 정상 작동함을 확인하였다.

4) Fig. 11에서 나타낸 바와 같이 4번 압력용기의 거시적 파열형상은 역학적으로 가장 약한 부위인 상하부 돔과 원통형 용기의 몸체가 연결되는 반경부분 즉, 상부돔의 연료공급밸브 연결부 끝단에서 약 150mm, 하부돔의 끝단에서 약 80mm 지점이

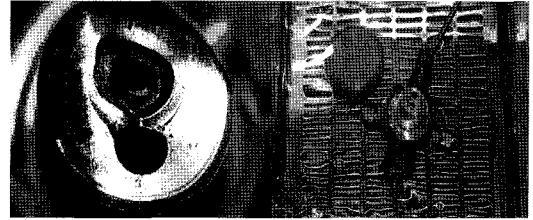


Fig. 10. Deformation and Operation test of VTI valve 4.



(a) outer liner body (b) Upper dome

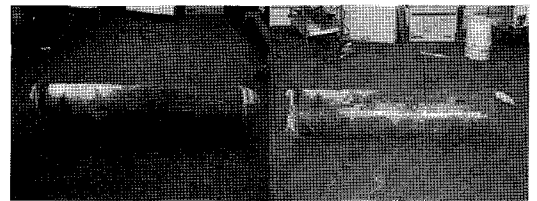


(c) Bottom dome (d) Inner liner body

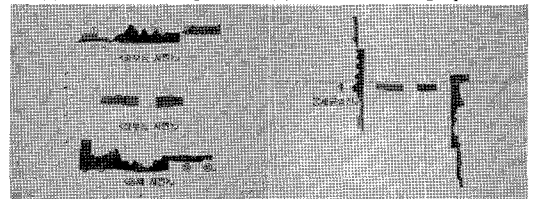
Fig. 11. Configuration of macroscopic bursting.

파열되었고 복합재내 라이너의 몸체부분에는 길이 방향으로 파열된 상태이다.

5) 균열시작부 및 전파방향을 추정하기 위해 Fig. 12(a), (b)와 같이 복합재 제거 후 용기의 균열부위를 따라 시편을 채취하였으며 채취부위 및 채취된 시편은 Fig. 12(c), (d)와 같다.



(a) After removing FRP (b) After collecting specimens



(c) Collected specimens (d) Arrangement to crack line

Fig. 12. Collection of specimen.

Table 1. Crack spread direction of fracture surface in Fig. 13

순번	그림번호	파단면 내용	균열전파방향
1	(a)	시편①의 돔 방향	←
2	(b)	시편②의 돔 방향	→
3	(c)	시편③의 돔 방향	←
4	(d)	시편③의 몸체 방향	←
5	(e)	시편④의 돔 방향	→
6	(f)	시편⑤의 돔 방향	→
7	(g)	시편⑥의 돔 방향	→
8	(h)	시편⑦의 돔 방향	←
9	(i)	시편⑧의 몸체 방향	←
10	(j)	시편⑨의 몸체 방향	→
11	(k)	시편⑩의 몸체 방향	→
12	(l)	시편⑪의 몸체 방향	→
13	(m)	시편⑪의 돔 방향	←
14	(n)	시편⑪의 몸체 방향	→
15	(o)	시편⑫의 돔 방향	←
16	(p)	시편⑫의 몸체 방향	←
17	(q)	시편⑬의 돔 방향	→
18	(r)	시편⑭의 돔 방향	→

6) Fig. 13, Table 1과 같이 각 시편에 대해 파단면 형상과 파단면의 변형 형태를 살펴본 결과 균열전파 방향을 추정할 수 있는 세브론 마크(Chevron mark)가 관찰되고 상하부 돔과 원통형 용기의 몸체가 연결되는 반경부분에서 원주방향으로 균열이 시작되어 몸체의 축방향으로 균열이 전파된 형태이다.

### 4.3. 원인 검토

1) 용기 내에 잔여가스 상존, 용기의 화염혼 및 연료공급밸브의 용융상태, 안전밸브의 작동 상태로 보아 1번 용기에는 화염이 크게 전파되지 않아 안전밸브도 작동하지 않은 것으로 판단된다.

2) 파열된 4번 용기의 경우는 주변용기의 화염혼 및 연료공급밸브의 용융상태등으로 보아 화재시 용기본체에는 화염이 전파되었으나 안전밸브는 작동온도에 도달하지 않았을 것으로 사료된다.

3) 상온(20도)에서 내압 207bar인 용기가 화재로 인해 안전밸브 작동온도인 110도까지 상승하게 되면 내압은 약 271bar까지 상승하게 되고 내압시험 압력인 311bar에 도달하는 온도는 166도로 화재 분위기 온도는 그 이상일 것으로 추정되고, 화재로 인해 용기본체에는 화염이 전파되어 용기의 내압이 파열 압력까지 상승하였으나 바람 등의 영향으로 주변의 온도만으로 제어되는 안전밸브는 작동온도

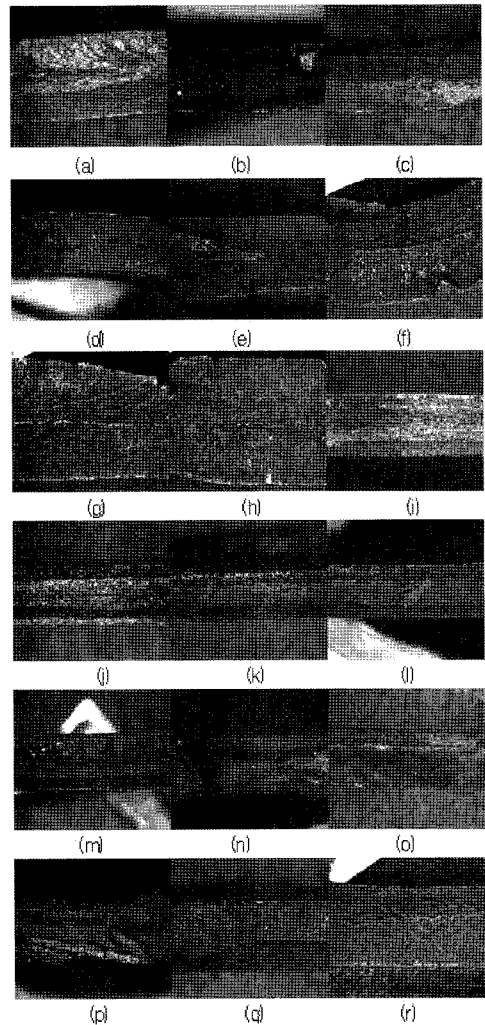


Fig. 13. Fracture surface each specimen.

에 미치지 못해 압력이 방출되지 않아 파열압력 이상에서 용기가 먼저 파열된 것으로 판단된다.

4) 4번 용기의 파단면 검사 결과 Fig. 14와 같이 상하부 돔과 원통형 용기의 몸체가 연결되는 반경부분에서 파괴가 시작되어 몸체 축방향으로 균열이

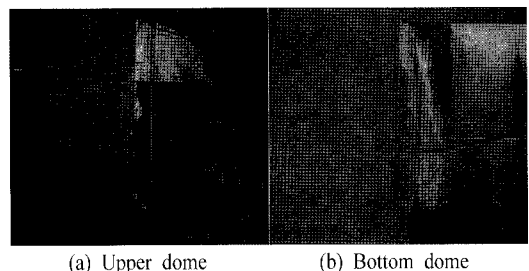


Fig. 14. Crack spread direction of fracture.

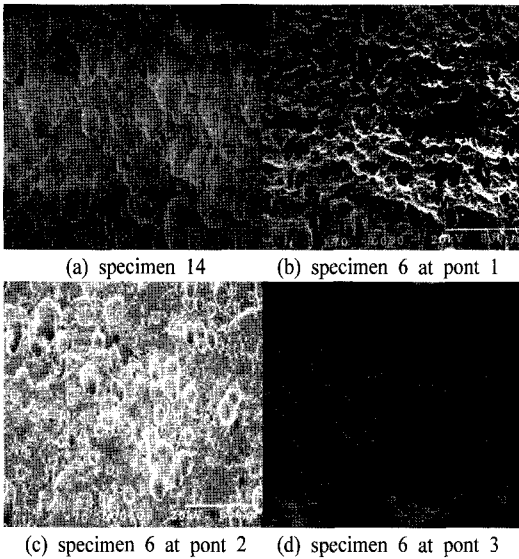


Fig. 15. Fractography of fracture starting point.

전파된 형태로, Fig. 15에서처럼 상부돔 파괴 기점으로 추정되는 시편⑭와 하부돔 파괴 기점으로 추정되는 시편⑥의 파단면을 SEM을 이용하여 관찰한 결과 내압에 의한 섬유상의 파괴형태만 관찰되며 결함이나 부식등의 특이점은 식별되지 않는다<sup>1-3)</sup>.

5) 용기 몸체의 파열형상은 일반적으로 용기 내부 압력이 상승할 때 원주방향의 응력에 대한 소성변형 후 연성파단 형태와는 구별되며 용기 몸체에 소성변형 형태가 없고 균열 전파 방향등을 고려하면 내압에 의해 상하부돔이 동시에 파열된 후 그 충격에 의해 몸체가 파열된 것으로 판단된다.

### 5. 결론 및 대책

본 연구는 CNG버스 복합재 압력용기의 파열 원인을 규명하기 위해 공학, 이학적 검사 방법이 적용되었다. CNG 용기의 파손원인은 균열 전파 방향 및 변형형태 등을 보아 이상상태에서 복합재 압력용기의 내압이 파열압력 이상으로 상승하여 가장 약한 부위인 상하부돔과 원통형 용기의 몸체를 연결되는 반경부분이 동시에 파열된 후 그 충격에 의해 몸체가 파열된 형태이다. 화재로 인해 용기의 내압이 파열 압력까지 상승하였으나 바람등의 영향으로 주변의 온도만으로 제어되는 안전밸브가 작동온도에 미치지 못해 압력이 방출되지 않아 파열 압력 이상에서 용기가 파열된 것으로 판단된다. 1번 용기와 4번용기의 경우 안전밸브가 작동되지 않았으며 그 외 용기는 안전밸브가 작동하였음을 확인

하였고 1번 용기에는 화염이 크게 전파되지 않은 양상으로 이로 인해 안전밸브도 작동하지 않은 것으로 추정되고 파열된 4번 용기의 안전밸브는 정상여부를 시험한 결과 정상 작동함을 확인하였다.

이번 사건사례를 통하여 화재에 의한 CNG버스 압력용기의 파열사고를 예방하기 위해서는 다음과 같은 대책을 제시하고자 한다.

1) 본 사고는 용기가 아닌 차량 연료필터에서의 가스누출이 원인을 제공하였고 이는 누출가스가 실내에서 폭발 조건을 이룰 때까지 이를 탐지할 수 있는 시스템이 없는 것이 문제이다. 이를 예방하기 위해서는 차량 내의 안전 상황을 모니터링 할 수 있는 단말기를 설치하고 배관계의 가스누출상태, 각 부분의 건전성, 온도, 압력 및 차량상태 등을 실시간 모니터링하는 시스템의 도입을 고려해야 한다.

2) 또한 사고 이후 가스안전공사 조사 결과, 운행중인 차량의 약 30%가 충전구, 배관연결부, 체크밸브, 가스필터 연결부 및 안전밸브 등에서 가스가 누출되고 있었다. 누출에 의한 안전사고를 예방하기 위해서는 연료 계통의 연결부에 대한 정기검사가 이루어 질 수 있도록 검사주기 및 항목에 있어서 좀 더 세분화된 검사 의무 규정의 제정이 필요하다고 사료되어진다.

3) 사고 차량에 장착되어 있는 가용전 안전밸브는 화재 발생시 바람 등의 영향으로 밸브 주변에 화염이 직접 닿지 않을 경우는 작동이 되지 않는 문제점을 가지고 있으므로 안전성 확보를 위해서는 온도로 제어되는 가용전 안전밸브와 압력으로 제어되는 파열판식 안전밸브를 이중구조로 장착하는 것이 바람직하다.

4) 파열판식 안전밸브의 경우 오랜 기간 사용시 피로누적에 의해 판의 변형 및 파단을 가져올 수 있으므로 그 신뢰성을 높이기 위한 연구가 필요하다.

5) 충전 및 정비시 작업자 등에게 CNG차량의 화재 및 폭발에 대한 안전교육을 강화할 필요가 있으며 정기적, 상시적 교육이수율을 의무화하여 이용자 과실 및 부주의에 의한 사고를 최소화하여야 한다.

### 참고문헌

- 1) 김현주, "Fractography적 방법에 의한 파단면 해석", 열처리공학회지, 제17권, 제4호, pp. 254~262, 2004.
- 2) 한창석, "Fractography의 기초 및 기술", 열처리공학회지, 제20권, 제2호, pp. 98~104, 2007.
- 3) 김학민, "금속손상진단", 진영사, pp. 49~107, 1989.

- 4) 김의수, 김지훈, 박윤소, 김철, 최재찬, “D.D.I 공정으로 제조된 금속라이너를 이용한 CNG복합재 압력용기의 설계 자동화 시스템 개발”, 한국정밀공학회, 제20권, 제1호, pp. 205~213, 2003.
- 5) 김지훈, 김의수, 김철, 최재찬, “강재(34CrMo4)를 사용한 대형 고압가스 용기의 설계 자동화 시스템 개발”, 한국정밀공학회, Vol. 20, No. 8, pp. 21~29, 2003.
- 6) 김철, 김의수, 김지훈, 최재찬, 박윤소, “CNG복합용기의 필라멘트 와인딩 공정에 관한 연구”, 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp. 656~660, 2002.
- 7) 김의수, 김지훈, 박윤소, 김철, 최재찬, “필라멘트 와인딩 압력용기의 최적설계와 CNG자동차 연료 충전용기 개발”, 한국정밀공학회 추계학술대회, pp. 933~937, 2002.