



CNG 용기용밸브의 압력방출장치 성능에 관한 연구

†김영섭 · 김래현 · 이재훈*

서울산업대학교에너지환경대학원, 한국가스안전공사가스안전연구원*
(2009년 5월 13일 접수, 2009년 8월 5일 수정, 2009년 8월 19일 채택)

A Study on Performance of Pressure Relief Devices of CNG Cylinder Valves

†Young Seob Kim · Lae Hyun Kim · Jae Hun Lee*

Seoul National University of Technology, Korea Gas Safety Corporation*
(Received 13. May. 2009, Revised 5. August. 2009, Accepted 19. August. 2009)

요 약

이 연구는 천연가스버스에 장착된 용기가 국부화염에 집중적으로 노출되었을 때나 외기온도가 높은 여름철 충전과정에서 과 충전되었을 때 용기파열을 방지하기 위한 방안으로 압력방출장치의 성능을 확인하고 확대 적용할 목적으로 의도되었다. 열사이클링 실험결과, -40℃~82℃ 인증기준에서 가스누출요건을 모두 충족하였지만 -45℃~135℃의 가속조건에서는 3개사 시험편중 2개사 시험편의 오링이 손상되었다. 또한 온도감응형 PRD의 평균작동시간은 액체봉입식이 1분 39초가 걸렸고, 가용합금식이 2분 31초가 소요되어 액체봉입식이 가용합금식보다 약 1분 정도 빠름을 나타내었다. 또한 압력감응형 PRD의 작동압력은 가속조건에서 약 32.1 MPa를 나타내었고 인증기준에서의 압력감응형 PRD의 파열압력은 30.7~32.1 MPa를 기록하였다. 이상의 실험을 통해서 압력방출장치의 성능은 온도감응형 PRD의 경우, 액체봉입식이 가용합금식보다 화염에 더 효과적이며, 압력감응형 PRD의 파열압력은 외부온도 및 반복가압이 파열판의 작동압력에 크게 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

Abstract - This study is intended to experiment performance of pressure relief device and to extend the effective ways to prevent cylinders of NGV from bursting when they are exposed to local fire intensively or when they are overcharged under ambient temperature at fueling stations in summer. In the results of thermal cycling experiments, all products of three companies met the requirements for gas leakage in the qualification criteria between 82℃ and -40℃. But the o-rings of two companies' specimens among the three companies' specimens got damaged under the accelerated conditions between 135℃ and -45℃. It took one minute and thirty nine seconds for a glass bulb type of a thermal sensitive type PRD to activate and it took two minutes and thirty one seconds for a fusible plug type of a thermal sensitive type PRD to activate. These results indicated that a glass bulb type of a thermal sensitive type PRD was one minute faster than a fusible plug type of a thermal sensitive type PRD. Under the accelerated condition 135℃, the activation pressure of a pressure sensitive type PRD burst at 32.1 MPa and, under the condition of qualification criteria, it burst from 30.7 MPa to 32.1 MPa. As a result of the experiment for performance of pressure relief device, in the case of the thermal sensitive type PRD, a glass bulb type is more effective to flame than a fusible plug type. we confirmed that the rupture pressure of a pressure sensitive type PRD could not be affected by temperature and pressure cycling.

Key words : thermal cycling, thermal sensitive type PRD, accelerated condition, combination relief device

*주저자:yskim@kgs.or.kr

I. 서론

고압가스를 저장하는 용기는 가스의 특성에 따라 용도에 부합하는 안전장치를 용기용 밸브에 부착하고 있다. 압축천연가스를 저장하는 용기용 밸브에도 온도감응형 또는 압력감응형 압력방출장치 (PRD, Pressure Relief Device)를 부착하고 있다. 각각의 차이는 용기가 화염 등에 노출되었을 때 용기 내부의 이상 과압을 어떤 방법으로 해소할 것이냐에 따라 온도감응형 또는 압력감응형 PRD를 구분하여 설치한다. 온도감응형은 가용합금식(Fusible Metal Type)과 액체봉입식(Glass Bulb Type)으로 나누고 압력감응형은 파열판식(Rupture Disk Type)과 스프링식(Spring Type)으로 구분하는데 스프링식은 가연성 고압가스에는 적합하지 않아 사용하지 않고 있다. 구미 선진국에서는 온도감응형 PRD를 주로 부착하고 있는 반면에 적도 근방의 남미와 중동국가들은 온도감응형 PRD 뿐만 아니라 압력감응형 PRD도 부착하고 있다. 온도감응형 PRD는 Type I, II, III, IV 모든 용기에 유효하지만 특별히 라이너가 강재로서 열전달 특성이 양호한 Type I, II 용기가 비철금속이나 플라스틱 라이너를 사용하는 Type III, IV 용기보다 작동성능에서 더 효과적일 수 있다[1].

본 연구는 압력방출장치의 특성을 연구하여 천연가스버스에 부착된 용기가 국부화염에 집중적으로 노출되었을 때나 외기온도가 높은 여름철에 CNG용기가 과충전되었을 때에 용기의 파열을 방지하기 위한 방안을 모색하고자 실험을 수행하였다. 현행 KGS AC412-2008 부록B(압축천연가스 자동차용용기 기준)[2]에는 용기에 부착된 압력방출장치가 ANSI/IAS PRD 1b(천연가스자동차 연료용기용 압력방출장치 기준)의 기준[3]에 적합하게 제조·작동하도록 규정되어 있다. 따라서 ANSI/IAS PRD 1b에서 정하고 있는 기본적인 시험요건을 수행함으로써 PRD의 성능을 평가하였다.

CGA S-1.1_2003(압력방출장치 표준 Part 1 압축가스용 용기)에서는 압력방출장치의 유형을 크게

10가지로 분류하고 있다. 가스분류를 위한 FTSC (Fire potential, Toxicity, State of gas, Corrosiveness), 즉, 화재잠재성, 독성, 가스상태, 부식성을 분류한 수치코드에 의하면, 메탄은 2160으로서 대기 중에서 가연성이고 독성이 없으며 사용압력에서 가스 상태이다. 또한 부식을 유발하지 않는 물질로 분류하고 있다. 국내 CNG 용기용밸브에 사용하는 압력방출장치는 CG-9에 해당하며 97.8℃ 이상 106.7℃ 이하에서 작동하는 가용플러그를 부착하고 41.4MPa를 초과하지 않는 실린더 표시 사용압력까지 사용하도록 제한하고 있다.[4]

압력방출장치 실험은 ANSI/IAS PRD 1b에서 정하고 있는 설계인증시험 12가지 항목 중 파열판 파열압력, 열사이클링, Benchtop Activation의 열작동 압력방출장치 항목을 각각 가속조건, 인증기준에 대한 평가를 실시하였다. 여기서 Benchtop Activation 시험은 압력방출장치가 수명전체를 통해서 일관되게 작동한다는 것을 보여주기 위한 시험이다.

II. 실험 장치 및 방법

실험장치는 크게 고압발생장치, PRD 반복가압장치, 그리고 환경시험장치 3부분으로 구성하였다. 고압발생장치는 질소용기, 가압장치, 고압저장설비 및 압력조정시스템을 모듈로 구성하였고 PRD 반복가압장치에는 고·저온용 환경챔버, 전기로,

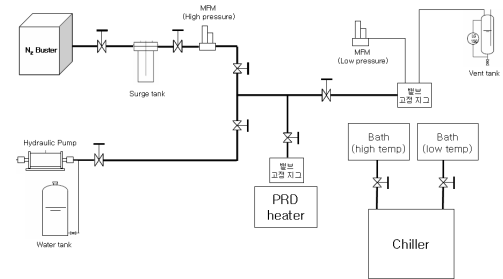


Fig. 1. Schematics of PRD experiment.

Table 1. Test requirements for PRD design and design change.

7.2 가용재료 항복온도	7.8 가스용축부식 내성
7.3 파열판 파열압력(적용 가능한 경우)	7.9 용력부식균열 내성
7.4 압력사이클링	7.10 진동
7.5 가속수명	7.11 누출
7.6 열 사이클링	7.12 Benchtop Activation
7.7 내염 부식성	7.13 유량

Table 2. Experimental conditions of thermal and pressure sensitive type PRD.

실험 구분		실험 조건	시 험 편
열사이클링	가속조건	-45℃~135℃, 194시간	3개 시험편(제조사 × 3개)
	인증기준	-40℃~82℃, 60시간	3개 시험편(제조사 × 3개)
온도감응형 PRD 작동시간		1,000℃ 전기로, 582℃~604℃ 온도조건에서 2분이상 유지, 사용압력의 25%로 PRD 가압	액체봉입식 PRD 10개 가용합금식 PRD 10개
압력감응형 PRD의 작동압력	가속조건	-40℃ 액조 내에 2시간 침적, PRD를 사용압력 의 10%이하에서 100%이상의 압력으로 100 사이클 반복 후 파열시까지 가압	14개 시험편(2제조사 × 7개)
	인증기준	사용압력의 85%까지 가압, 30초 이상 유지, 파열시까지 가압	6개 시험편(2제조사 × 3개)

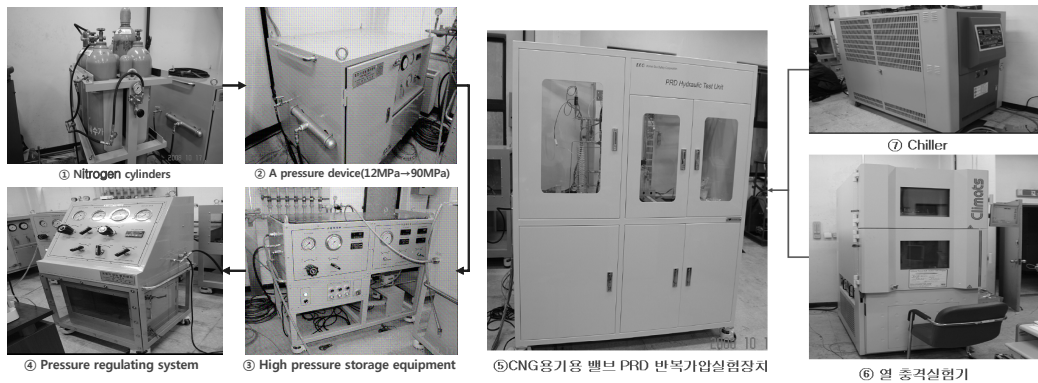


Fig. 2. Experimental apparatus of PRD.

수압가압장치를 포함하였으며 환경시험장치는 열충격시험기를 갖추고 있다. 압력방출장치 실험방법은 질소용기에 충전된 12 MPa의 질소를 부스터(Buster)가 내장된 가압장치를 이용하여 90 MPa로 가압하고 가압된 질소를 고압저장설비에 저장한다. 계속해서 저장된 질소를 압력조정시스템에서 원하는 압력으로 조정하여 PRD 반복가압 실험장치로 공급한다. PRD 반복가압장치에서는 이미 환경챔버에서 열충격을 가한 시험편을 고정하고 PRD의 가스누출량, 파열판의 파열압력, PRD의 작동온도, 작동시간 등을 DAQ시스템을 이용하여 실시간으로 측정한다.

III. 실험결과 및 고찰

3.1 열사이클링 실험

열사이클링 실험은 독일산 WEISS TECHNIK사의 CLIMATS를 이용하였고 가속 열사이클링 조건에서 3개사 제품을 비교한 결과는 R사와 V사 제품

의 밸브품체 오링은 Fig. 3과 같이 부스러져 본래의 모습을 상실하였고 Y사의 밸브품체 오링은 비교적 정상적인 모습을 보여주고 있다. 외관상 Y사 용기밸브의 오링이 다른 2개사 제품보다 극한 온도조건에서 내구성이 더 좋은 것으로 확인되었다. 그러나 인증기준 열사이클링 실험에서 오링의 모습은 3사 모두 정상제품과 실험 전·후 외관에서 큰 차이가 없었다. 가스누출 실험결과는 인증기준에 따라 실험한 용기밸브의 경우, -40℃, 15MPa의 압력으로 4시간을 유지한 후 측정했을 때 0.02~0.28 cm³/h의 누출을 기록하여 인증기준에서 정하고 있는 2cm³/h를 초과하지 않았다. 또한 온도감응형 PRD의 열사이클링 결과는 가속조건에서 R사와 V사 제품 PRD의 가용합금이 용기밸브의 방출구 외부로 흘러나오지 않은 반면에, Y사 제품은 Fig. 4와 같이 용융물질이 용기밸브의 방출구로 흘러나옴으로써 화재 등에 따른 압력방출 시 용융물질이 방출유로에 지장을 초래할 수 있음을 확인하였다.

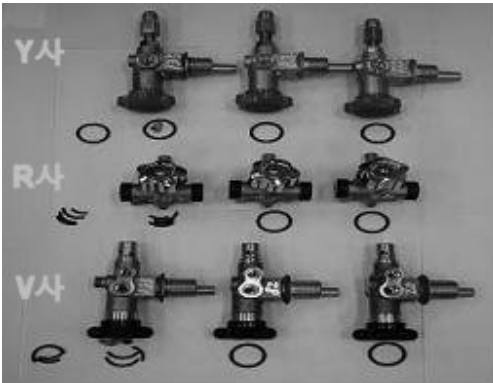


Fig. 3. Appearances of valves after thermal cycling.

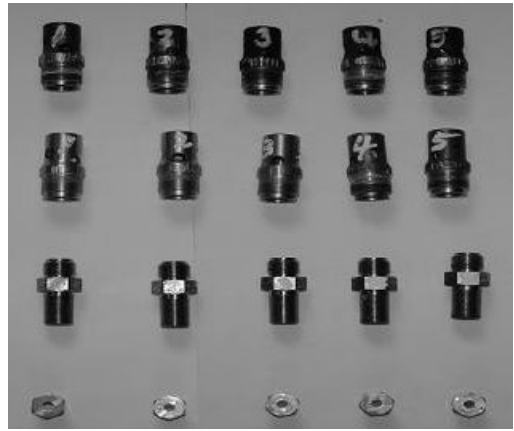


Fig. 5. Specimens of thermal sensitive type PRD.



Fig. 4. Melted Fusible Metal(Y Company).

3.2 온도감응형 PRD의 작동시간

이 실험은 CNG용기가 화재에 노출되었을 때 에틸글리콜 등의 부동액체가 봉입된 온도감응형 PRD와 납합금 등의 가용합금이 내장된 온도감응형 PRD의 특성을 평가할 목적으로 수행하였다. Fig. 5는 액체봉입식과 가용합금식 온도감응형 PRD의 시험편을 나타낸 것이다. 상부 시험편 10개는 액체봉입식 온도감응형 PRD이고 하부 시험편 10개는 가용합금식 온도감응형 PRD를 보여주고 있다. Fig. 6은 Benchtop Activation 시험 중 온도작동 방출장치 시험을 위한 설정온도범위를 도시한 것이다. 전기로 내부온도는 최저 582.4℃~최고 598.7℃로서 인증기준의 593℃±11℃ 범위 내에 있음을 확인할 수

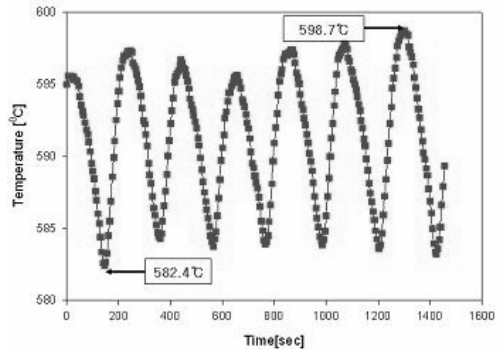


Fig. 6. Range of temperatures of thermal sensitive type PRD for qualification.

있다.

Fig. 7은 액체봉입식과 가용합금식 온도감응형 PRD의 작동시간을 도시한 것이고 Fig. 8은 온도감응형 PRD의 작동시간을 하나의 그림으로 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 액체봉입식 온도감응형 PRD의 평균작동시간은 1분 39초를 기록하였고 가용합금식 온도감응형 PRD의 평균작동시간은 2분 31초로 액체봉입식 온도감응형 PRD의 평균작동시간이 약 1분 정도 빠름을 보여주고 있다. 또한 내부압력 해소과정도 액체봉입식 온도감응형 PRD가 작동 즉시 해소되는 반면에 가용합금식 온도감응형 PRD는 완만한 곡선을 그리고 있어 압력 해소에 약간의 시간이 소요됨을 나타내 주고 있다. 이는 용기가 화재에 노출되어 설정온도(110℃±10)에 이르면 불과 1~3분 내에 안전밸브가 작동하며

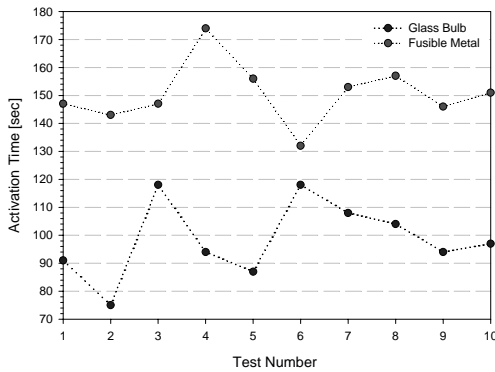


Fig. 7. Distribution of activation time of thermal sensitive type PRD.

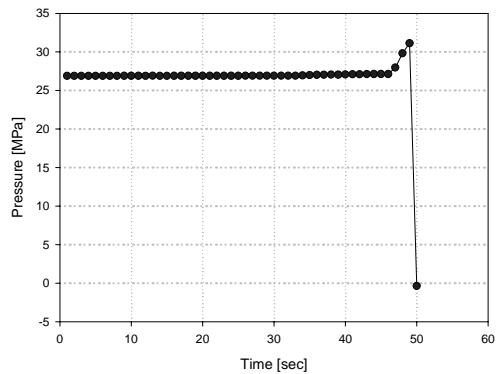


Fig. 9. Measurement of Rupture pressure of rupture disk (Qualification requirement).

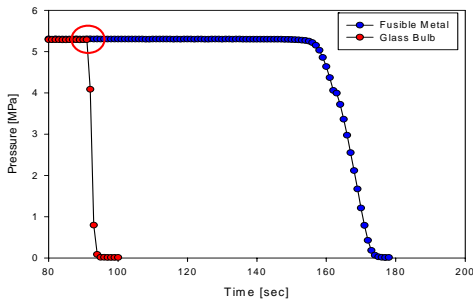


Fig. 8. Comparison of activation time of PRD (Glass bulb and Fusible metal type).

만약 온도감응형 PRD가 정상 작동되지 않아 용기가 지속적으로 화염에 노출된다면 온도감응형이 아닌 압력감응형과 같은 PRD의 설치로 용기파열을 방지하는 조치가 필요하다고 하겠다. 열에 의해 작동하는 PRD는 PRD가 화염으로부터 떨어져 있거나 용기가 국부적으로 가열된다면 작동하지 않을 수 있다고 기록하고 있다.[5]

3.3 압력감응형 PRD의 작동압력

압력감응형 PRD의 작동압력은 정상상태에서 압력감응형 PRD의 작동압력을 파악함으로써 용기가 과압충전되거나 화재에 노출되었을 시 파열에 이르지 않도록 용기를 설계하는데 중요한 기준이 된다. 이외에도 가스충전 시마다 받게 되는 맥동과 주행 중 차량에 부착된 용기가 받는 진동 등 압력감응형 PRD의 작동압력에 영향을 주는 요소가 많이 있다. 이 실험은 ANSI/IAS PRD-1 9.4절의 파열판의 파열압력 측정방법에 따라 수행하였다. 먼저 사용

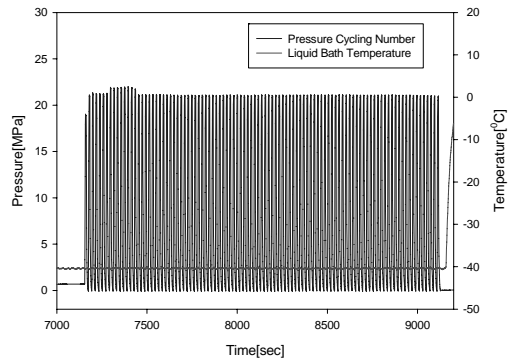


Fig. 10. Pressure cycling test of rupture disk (Accelerated condition).

압력의 85%까지 급속하게 가압하고 가압한 상태에서 30초 이상을 유지한 후 재차 파열판이 파열할 때까지 압력을 가하였다. Fig. 9는 열충격을 가하지 않은 대기조건에서 파열판의 파열압력을 도시험한 것으로 실험결과, 파열판 파열에 소요된 시간은 49초이고 파열압력은 31.12 MPa를 나타냄으로써 인증기준을 충족하고 있다. Table 3은 가속 및 인증기준 열충격시험편의 파열압력 측정결과를 나타낸 것이다. Table 3에 나타난 A사의 평균 파열압력은 32.174 MPa로서 인증기준을 상회하고 있음을 알 수 있다. 또한 가속조건인 압력감응형 PRD 실험은 -40°C 액조에 시험편을 2시간동안 유지한 후 사용압력의 10% 이하에서 100% 이상의 압력으로 100회를 반복 가압한다. 그런 다음 인증기준에 따라 파열판이 파열될 때까지 가압한다. 가속조건에서 압력감응형 PRD의 파열압력은 약 32.1 MPa를 나타

Table 3. Measurement of rupture pressures of rupture disks under the conditions of acceleration and qualification.

시편 번호	A사		B사	
	135℃	82℃	135℃	82℃
1	32.0180	32.0927	32.2651	30.3282
2	32.6349	31.9988	31.7517	31.4413
3	32.7747	32.4299	32.7249	30.4010
4	32.1827	-	33.0583	-
5	32.0122	-	31.3532	-
6	31.2536	-	31.6176	-
7	32.2536	-	32.2421	-
평균압력 (MPa)	32.1610	32.1740	32.1450	30.7240

내었고 인증기준에서의 압력감응형 PRD의 파열압력은 30.7~32.1 MPa로 나타나 가속조건과 큰 차이를 보이지 않았다. 이 결과로 볼 때, 압력감응형 PRD의 파열압력은 온도의 영향을 크게 받지 않고 있으며 또한 저온에서의 반복가압도 파열압력에 영향이 미미함을 확인할 수 있다. Fig. 10은 가속조건에서 액조 내의 파열판에 작용하는 압력과 온도 및 유지시간을 나타내었고 Fig. 11은 가속 및 인증 기준에서 파열판의 파열압력분포를 도시한 것이다.

3.4 조합식방출장치의 적용성

구미 선진국에서는 일반적으로 용기밸브에 가용합금식 PRD를 부착하고 있을뿐더러 용기밸브는 수동 및 자동 용기밸브를 사용하고 있다. 하지만 아시아 국가들은 수동밸브와 가용합금식 PRD만을 부착하고 있어서 비용효율적인 측면은 있으나 ECE R110규격에서 정한 CNG밸브에 필요한 많은 안전상의 요건을 갖추고 있지 못하다.[6]

ANSI/IAS PRD 1b(천연가스자동차 연료용기용 압력방출장치 기준)에서 조합식방출장치의 실험 조건은 조합식방출장치를 가용합금의 최대항복온도보다 11℃이상의 온도로 가열된 오븐에 놓고 파열판이 파열될 때까지 압력을 가하도록 규정하고 있다. 그리고 허용할 수 있는 결과는 압력사이클링, 열사이클링, 내염 부식성, 가스충족부식내성, 그리고 진동시험을 받아야 하는 조합식방출장치가 작동압력의 최소 75%에서 작동해야하지만 설계인증 시험을 받지 않은 PRD는 작동압력의 105%를 초과

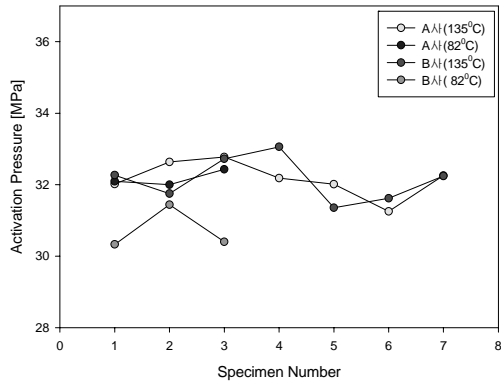


Fig. 11. Distribution of rupture pressures of rupture disks(Accelerated and Qualification requirements).

하지 못하도록 규정하고 있다. 가용합금식과 파열판식은 PRD 설계 시 부품의 분리 및 분리실험을 허용하면 온도감응형과 압력감응형 PRD 실험을 분리하여 수행할 수 있다. 조합식방출장치의 적용성은 온도감응형과 압력감응형 PRD 각각의 실험 결과를 토대로 고찰하였을 때는 큰 문제가 없다. 하지만 압력감응형 PRD를 용기밸브에 부착하여 사용 중인 국가에서 최근 파열판식 PRD를 가용합금식 PRD로 바꾸고 있어 단순히 국부화염에 의한 용기강도의 감소와 용기내부 압력상승에 의한 용기파열만 고려할 수는 없다[7]. 이는 ANSI/IAS PRD-1의 도입부 경고문에서 이미 용기에 전달된 열이 국부적이고, 집중적일 때, 그리고 방출장치와 떨어져 있을 때나, 화염이 폭발적으로 극히 빨리 형성된 곳에서는 압력방출장치가 용기의 파열을 방지하지 못할 수도 있다고 언급하고 있기 때문이다. 그러므로 조합식방출장치의 파열판이 정격파열압력의 90% 이상과 정격파열압력 사이에서 작동한다면 11,250회 이상의 주기압력 반복시험과 화염 시험에 의한 PRD의 유효성을 추가로 확인하는 절차가 필요하다고 하겠다.

IV. 결론

지금까지 CNG용기밸브에 부착되는 압력방출장치에 대하여 ANSI/IAS PRD 1-1998에서 정한 기준을 적용하여 실험한 결과, 다음과 같은 몇 가지 결론에 이를 수 있었다.

- (1) 열사이클링 실험결과, -40℃~82℃의 인증기

준에서는 3개사 제품 모두 가스누출요건을 충족하였고, 가속조건에서는 3개사 시험편 중 2개사 시험편의 오링이 손상됨으로써 겨울철 혹한기 충전 시나 외부화재 등 주변 환경요인에 따라 압력방출장치가 영향을 받을 수 있음을 확인하였다.

(2) 온도감응형 PRD의 작동시간은 액체봉입식 온도감응형 PRD의 평균작동시간은 1분 39초를 기록하였고 가용합금식 온도감응형 PRD의 평균작동시간은 2분 31초로 액체봉입식 온도감응형 PRD의 평균작동시간이 약 1분 정도 빠름을 나타내었다.

(3) 압력감응형 PRD의 작동압력은 가속조건에서, 압력감응형 PRD의 과열압력이 약 32.1 MPa를 나타내었고 인증기준에서는 과열압력이 30.7~32.1 MPa로 나타나 가속조건과 큰 차이를 보이지 않았다. 이것은 온도 및 저온에서의 반복가압 등이 과열판의 과열압력에 영향을 주지 않음을 확인할 수 있었다.

(4) 위의 실험결과를 고찰하면, 압력방출장치의 성능은 온도감응형 PRD의 경우, 액체봉입식이 가용합금식보다 화염에 더 효과적이며, 압력감응형 PRD의 과열압력은 외부온도 및 반복가압이 과열판의 작동압력에 크게 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다. 그러나 조합식방출장치(온도·압력감응형 PRD)의 사용여부에 대해서는 이번 실험 외에도 화염실험[8,9]에 의한 유효성 확인, PRD의 반복충전에 의한 가스막동 영향 등 추가실험이 있을 후 적용여부를 결정하는 것이 바람직할 것으로 생각되었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부, 환경부의 정책연구용역인 “압축천연가스자동차 안전성향상 연구”를 통해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Samuel C. Nelson, Overview of the Safety Issues Associated with the Compressed Natural Gas Fuel System and Electric Drive System in a Heavy Hybrid Electric Vehicle, (2002)
- [2] 압축천연가스 자동차용 용기기준, KGS AC412 (2008)
- [3] American National Standard for Pressure Relief Devices for Natural Gas Vehicle(NGV) Fuel Containers, ANSI/IAS PRD 1-1998~2007
- [4] Pressure Relief Device Standards Part 1_Cylinders for Compressed Gases, CGA S-1.1_2003 Eleventh Edition, Compressed Gas Association, (2003)
- [5] Vehicular Fuel Systems Code, NFPA 52-2006 Edition, (2006)
- [6] M J Lawday and David Myers, Implementation of Safety Standards in the Design and Development of a Lightweight CNG Fuel Storage System for Buses, 11th IANGV Conference and Exhibition (2008)
- [7] Lennart Erlandsson and Christopher Weaver, Safety of CNG Buses in Delhi, Centre for Science and Environment, (2002)
- [8] Mark Trudgeon, An Overview of NGV Cylinder Safety Standards, Production and In-Service Requirements, (2005)
- [9] Gambone, L.R. and Wong.J.Y., Fire Protection Strategy for Compressed Hydrogen-Powered Vehicles, ICHS 2, (2007)