

## 온도차 변동에 따른 전자밸브 작동모델 실험적 연구

†장갑만 · 엄석화 · 김인찬 · 김청균\*

한국가스안전공사 가스안전연구원, 홍익대학교\*

(2012년 9월 25일 투고, 2012년 12월 26일 수정, 2012년 12월 26일 채택)

### Experiment Study on Operation Model of Automatic Cylinder Valve by the Temperature Differences

† **Kap-man Jang, Seok Hwa Eom, In chan Kim, Chung Kyun Kim\***

*Korea Gas Safety Corporation, Hongik University\**

*(Received September 25, 2012; Revised December 26, 2012; Accepted December 26, 2012)*

#### 요약

현재 국내의 모든 CNG자동차에는 용기용 밸브로 수동밸브가 부착되어 있으며 가스누출 사고 시 운전자가 차량을 정지하고 수동밸브를 잠궜어야 하는 불편한 점이 있어 누출 사고 시에는 운전자 등이 가스누출사고를 대응하는데 어려운 부분이 있다. 유럽의 선진국에서는 가스누출 시 운전자가 시동을 끄면 자동으로 닫히는 구조를 가진 전자밸브의 장착을 의무화 하고 있어 우리나라에서도 기능성이 증가된 전자식 용기밸브를 적용하는 것이 CNG 버스의 안전성을 향상 시킬 수 있는 좋은 기회일 것이다. 본 논문에서는 개개의 전자밸브의 작동상태를 운전자가 파악하기 어려운 구조적인 문제를 보완하기 위해서 충전 중 압력의 상승에 따라서 온도가 상승하는 현상에 착안하여 문제에 접근하였다. 충전 중 온도상승이 압력차에 따라서 약 30°C 이상이 발생하는 것을 이용하여, 데이터 확인 시 온도상승이 발생하지 않는 용기는 밸브가 작동하지 않아 충전이 이루어지지 않는 것으로 판단할 수 있는 실험적 결론을 얻었다.

**Abstract** - Currently, all domestic CNG vehicles have manual cylinder valves installed. These are inconvenient for drivers in case of a gas leak accident, because drivers have to stop the vehicle operation and manually close the valve. It makes difficult condition for drivers to quickly and properly respond to such accidents. In advanced European countries, they require Automatic cylinder valve installation, which has a structure where the valve is automatically shut off when the driver turns off the ignition in case of a gas leak. If this electric valve system is introduced in Korea, the safety of CNG buses will be improved with better functionalities. In this paper, in order to solve the structural problem of difficulty for a driver to identify the operational status of individual Automatic cylinder valves, an approach was made regarding temperature increase with pressure increase during CNG filling. it was estimated that the temperature increased approximately more than 30°C due to pressure difference during the filling. Therefore, it was concluded from the experimental data that the valve of the container whose temperature did not increase did not operate, resulting in filling failure.

**Key words** : NGV, cylinders, Fast filling, Automatic cylinder valve

#### 1. 서론

지난 2010년 8월 9일 서울 행당동 CNG 버스사고는

버스 운행 중에 발생한 사고로서 대중교통을 이용하는 시민들에게 큰 충격을 주었다. 사고원인은 브라켓 고정불량으로 용기유동, 브라켓 볼트에 의한 용기손상 및 전자식 용기용 밸브의 고장이라고 국과수에서 발표하였다[9]. CNG버스의 운행환경은 승용차의 운행환경과는 많은 부분에서 다르다. 예를 들면, 일일 운행시간은 약10시간 이상이며, 주행거리는 250~300km

†Corresponding author:kapman1006@kgs.or.kr

Copyright © 2012 by The Korean Institute of Gas

이상으로 1일에 1회 또는 2회 충전을 하여 연료장치 부품에 가혹한 환경이 되고 있다[5]. 특히 많은 대중이 이용하는 시내버스는 접에서 가스의 누출이 발생하였을 경우 신속하게 대처할 수 있는 시스템을 구축해야 하는 필요성이 있다.

하지만 2002년 도입 당시 적용했던 전자밸브가 작동 불량 등 품질문제로 인해 수동밸브로 교체되었다. 그 당시 교체되지 않은 밸브중의 하나가 행당동 사고의 원인으로 지목되었다. 따라서 전자밸브가 수동밸브에 비해 기능성을 갖춘 밸브라 하더라도 정상작동 유무를 운전자 또는 안전 관리자가 알 수 있도록 품질문제를 보완하는 시스템 개발이 필요하다는 것을 알게 되었다. 본 논문에서는 충전 중 압력상승에 따른 온도상승 현상에 대한 수학적 모델을 제시하고, 유동해석을 통해 시뮬레이션을 수행하였으며, 운행 중인 CNG버스에 온도센서를 부착하여 CNG 전자밸브의 작동상태를 실시간 확인하였다.

## II. 본론

### 2.1. CNG 전자밸브 현황

CNG용기 밸브는 보통 CNG 용기부속품을 말하며, CNG용기에 저장된 천연가스의 흐름을 조절하는 밸브이다. 용기밸브에는 용기내부가 화재 등의 원인으로 이상고압 상태가 되었을 때 용기의 압력 상승으로 인한 파열을 방지하기 위해 내부의 가스를 대기 중으로 방출시키는 안전밸브인 압력방출장치(PSD)가 포함되어 있다. 또한 차량의 충돌 사고 시 배관의 손상 등에 의해 가스가 다량으로 한꺼번에 방출되는 것을 막기 위해 일정량 이상의 가스가 흐를 경우 자동으로 밸브를 차단시켜 주는 과류방지밸브가 내장되어 있다. 따라서 용기부속품인 용기밸브에는 압력방출장치(PSD)와 과류방지 밸브를 포함하여 구성된다[5].

용기밸브로서 전자식 밸브를 사용하는 경우에는 충돌사고 등에 의해 엔진이 정지하였을 경우, 배관 손상에 의해 가스가 방출되어 엔진이 정지될 경우 자동으로 차단되도록 되어 있다. 국내의 CNG 밸브는 거의 대부분이 수동밸브를 사용하고 있으며, 자동밸브 형식은 적용하고 있지 않아 자동으로 차단하는 기능은 과류방지밸브 이외에는 없다.

고압으로부터 안전성을 확보하기 위한 긴급 차단 기능 밸브는 자동차가 충돌사고 등과 같은 상황에서 고압의 연료가 일시에 다량 누출될 경우 가스를 긴급 차단하여 고압의 가스를 용기내부로부터 한정시킬 수 있는 안전장치이다. 북미 국가에서는 NFPA-52 (National Fire Protection Association) 규정에서 용기밸브 옆 최대한 거리에 운전자가 조정가능한 전자식 솔레노이드



Fig. 1. The valve type of CNG vehicle.

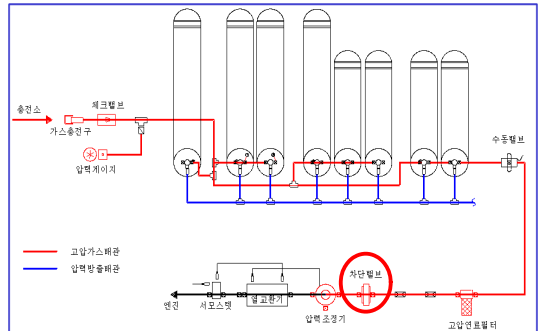


Fig. 2. CNG bus fuel system diagram.

밸브 설치를 제도적으로 의무화하고 있어 자동밸브 시스템을 구현하고 있다. 유럽의 경우에는, CNG자동차 연료장치 규정인 ECER-110에 CNG용기용 밸브로서 Automatic valve 설치를 의무화 하고 있다[7].

국내 CNG버스에서도 Fig. 2와 같이 CNG 고압필터 후단과 압력 조정기 전단에 고압차단밸브(HPLO, High Pressure Lock-off Valve)가 설치되어 있으며 CNG버스 완성검사 항목에 주밸브로 규정하고 있다. 하지만 CNG버스의 경우 용기 7개~8개의 수동밸브가 모두 개방되어 있는 상태에서 긴급상황 발생시 HPLO가 작동 하더라도, 엔진 측에 공급되는 가스만 차단하며 용기로부터 고압차단밸브까지의 배관 및 연료용기에 대해서는 항상 개방되어 있는 구조를 가지고 있다[5].

### 2.2. 이론적 배경

#### 2.2.1 CNG 급속 충전 수학적 모델

CNG버스의 충전은 Fig.3과 같이 도시가스 중압배관(공급배관압력: 0.2~0.5MPa)의 가스를 압축기를 이용하여 버스에 20.7MPa의 압력으로 충전하는 시스템이다 [13].

도시가스 배관에서 인입된 가스는 CNG압축기를 통해 고압(25MPa)의 압력으로 가압하여 저장용기 또는 디스펜서로 공급하며, 압축기 자체에 압축할 때 발생하는 열에 의한 온도상승을 감소시키기 위한 열교환

기와 이물질 및 수분을 제거하기 위한 필터 등이 있다.

보통의 CNG저장 실린더는 ASME설계의 내용적 1300리터 용기 6개로 구성되어 있으며, 고압용기 1개, 중압용기 2개, 저압용기 3개의 용기가 모두 25MPa의 압력을 저장할 수 있도록 설계되어 있다. 충전소의 연속운전 중에는 저압의 용기 3개에서 12MPa로 저장된 가스를 차량에 10MPa까지 충전하여 가장 많은 유량을 공급할 수 있다. 중압 저장용기에서는 18MPa로 저장된 가스를 차량에 16MPa까지 충전하고 이어서 고압의 용기에서 22MPa이상으로 저장된 가스를 차량에 20.7MPa까지 충전하게 된다. 버스의 연료 시스템은 리턴터클을 통과하여 용기를 거친 후 엔진으로 공급하게 된다.

### 2.2.2 수학적 모델링

CNG 충전시스템에서 버스에 충전하는 수학적 해석 모델은 다음과 같이 단순화 하였다. 압축기 저장탱크, 디스펜서 전단까지를 CNG refueling Station으로 단순화 하고 압축기의 노즐 및 리턴터클은 오리피스로 단순화 하였다. CNG 버스 용기는 총 7개로 구성되어 있지만 1개의 큰 용기로 충전된다고 가정하였다 [13].

### 2.2.3 급속충전 모델 해석

급속충전에 의한 온도상승 모델해석을 위해 다음

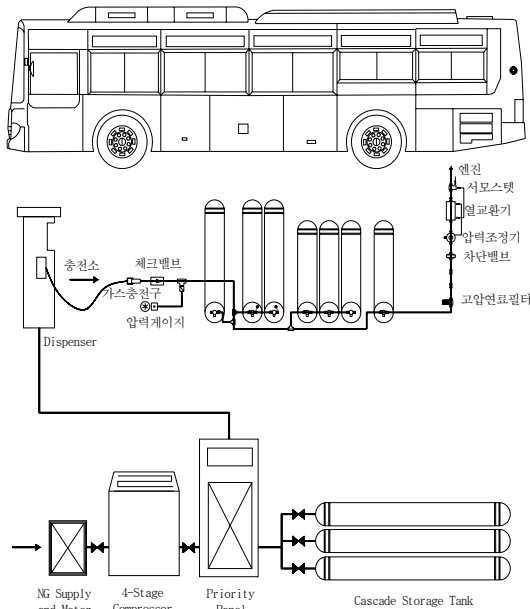


Fig. 3. CNG refueling system to bus.

과 같이 가정하였다[13].

- 초기조건을 부여하기 위한 충전소의 저장탱크 내의 온도와 압력은 일정하다.
- CNG버스의 용기의 체적은 일정하다. 이것은 충전소 저장탱크에서 용기로의 공급되는 위치에너지 변화를 무시할 수 있으며, 용기의 운동에너지 변화를 무시할 수 있다. 용기의 압력과 온도는 공간적으로 의존적이지 않다. 이것은 용기 내에서 준 정상상태로 완전히 혼합되는 것을 의미한다.
- 오리피스를 통과하는 질량유량은 등엔탈피 과정을 가진다.

충전소의 저장탱크로부터 디스펜스를 통과하여 버스에 탑재되어 있는 연료용기로 오리피스를 통하여 충전될 경우 가스의 운동 및 위치에너지를 무시하면 용기내의 질량 및 에너지 보존 지배방정식은 다음과 같다.

#### ① Energy conservation equation

$$\frac{dQ_2}{dt} + w_1 h_s = \frac{d}{dt} (M_2 u_2) \quad (1)$$

Q2 : Heat gain or loss to environment(kg · °K)

w1 : orifice flow rate (kg/s)

hs : specific enthalpy (J/kg)

M2 : CNG bus gas mass (kg)

u2 : specific internal energy (J/kg)

#### ② Conservation of Mass

$$\frac{dM_2}{dt} = w_1 \quad (2)$$

M2 : CNG bus cylinder gas mass (kg)

w1 : orifice flow rate (kg/s)

#### ③ Equation of State

$$PV_2 = ZM_2RT_2 \quad (3)$$

P : Pressure (MPa)

V2 : Volume (m<sup>3</sup>)

Z : Compressibility factor

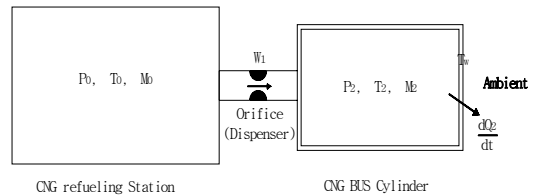


Fig. 4. Modeling of a fast filling CNG Bus.

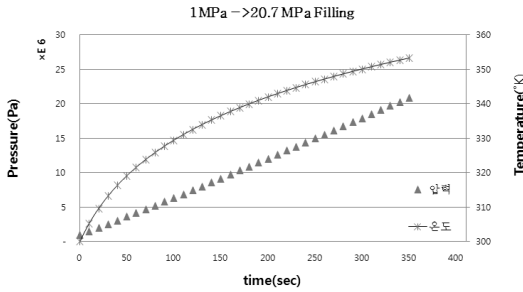


Fig. 5. Temperature and Pressure data of initial pressure 1MPa.

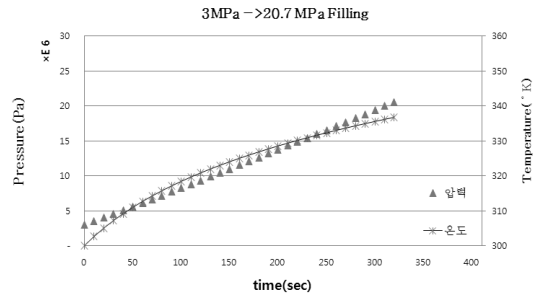


Fig. 6. Temperature and Pressure data of initial pressure 3MPa.

n : number of moles of gas present  
 R : the universal gas constant  
 T : Temperature(°K)

2.2.4 이론적 해석 결과

CNG버스의 용기 온도 및 압력을 알기 위해서는 ① ②③ 식의 미분 방정식을 동시에 풀어야 하므로 3개의 미분방정식을 Forward Euler Method를 이용하여 풀 수 있다. Euler Method는 미분항에 대해서 Taylor Series로 전개하여 미분 방정식을 푸는 방법으로,  $y' = y$  방정식을  $y(n+1) = Y(n) + dx * y(n)$ 로 표현하여 Matlab Program을 이용하여 해석하였다.

프로그래밍의 초기 조건은 다음과 같다.

w1은 충전소에서 충전하고 있는 실제 데이터값의 평균 질량 유량값인 0.32626 kg/sec을 이용하였고, 버스에 장착된 용기의 부피는  $164 \text{ l} \times 3EA + 128 \text{ l} \times 4EA = 1004 \text{ l} (1.004\text{m}^3)$ 의 값을 이용하였다. 온도조건은 서울의 여름 평균기온이 25.8°C 이므로 300°K의 온도를 적용하였다. 충전시작 압력은 1MPa, 3MPa, 5MPa, 7MPa, 9MPa의 경우로 바뀌가면서 프로그램을 실행하였다. 또한 메탄가스의 물성치는 미국 표준 연구소의 NIST1) 홈페이지에서 제공하는 물성값을 입력하였다. 온도조건과 압력조건을 바꾸가면서 여러 경우에 대해서 대입하여 풀어보면 수치해석에 의한 결과 값은 다음과 같다.

먼저 충전시작 온도가 300°K(27°C) 일 때 1MPa에서 20.7MPa까지 충전하면 총 충전시간은 343초(5분 43초)가 소요되었으며, 온도상승은 53.26°C 상승하였다.

3MPa에서 20.7MPa까지 충전하면 총 충전시간은 320초(5분 20초)가 소요되었으며, 온도상승은 36.7°C 상승하였다.

온도조건 273°K에서 압력이 1MPa일 때 압력의 증가에 따른 온도의 상승 그래프는 다음과 같다. 압력이

압력상승에 따른 온도변화

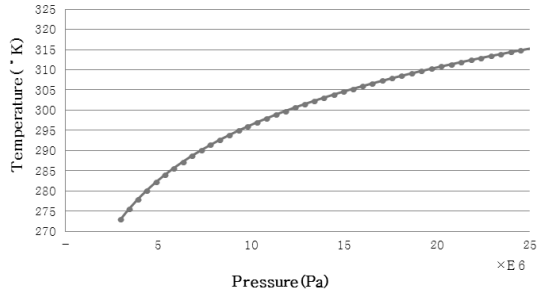


Fig. 7. Temperature rising by the pressure increase.

초기압력에 따른 충전시간 (온도 300°K)

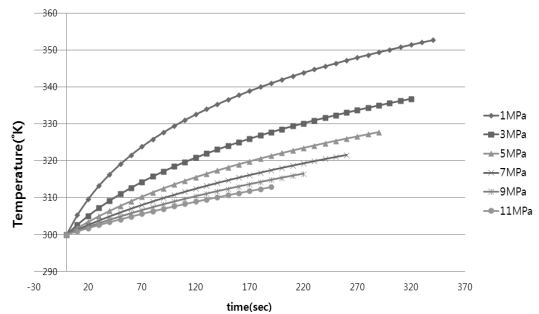


Fig. 8. Filling time and Temperature rising each pressure.

상승됨에 따라서 온도가 같이 증가한다. 총 온도 상승은 53.2°C 증가하며 지수 함수적으로 증가한다.

각 충전시작 압력에 따른 충전시간은 다음과 같다. 용기의 체적이 1.004m<sup>3</sup>의 버스인 경우에는 Fig. 8에서와 같은 특성을 나타낸다.

1) <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>

### 2.3. 실험에 의한 용기 온도데이터 측정

#### 2.3.1 실험 장치의 구성

측정된 온도 신호를 받기 위한 데이터 수집장치는 Fig. 9 에서와 같이 온도 센서부 8채널에서 온도를 측정하여 인터페이스 보드를 통해 전달된 데이터를 제어하는 제어부와 이곳에 전원을 공급하는 보조 배터리로 구성된다.

CNG버스가 운전 중일 경우에는 차량의 24V전원을 공급하며, 시동을 OFF시킬 경우에는 보조 배터리가 작동된다. 따라서 DAQ는 차량의 주 배터리를 차량이 정차 중일 때는 사용하지 않기 때문에 독립적으로 부착하여 차량의 배터리를 소모하지 않게 하였다. 데이터 수집시간은 10초 간격으로 수집하도록 세팅하였다. 데이터 저장 방법은 마이크로 SD카드를 이용하여 데이터를 저장하였으며, 10초에 한번 저장할 경우 1일 데이터의 양은 0.8Mbyte로 4G 메모리를 사용할 경우 약 4,000일의 데이터를 저장할 수 있는 공간이 된다. 또한 단말기의 동작 온도는 겨울철 및 여름철을 고려하여 -40 ~ 80℃ 의 온도범위에서 작동하도록 하였다

#### 2.3.2 데이터 수집 장치 설치

데이터 수집 장치는 운행중인 버스에 장착하였으며 수도권지역의 운수회사의 협조를 받아 부착하였다. 각 용기별로 돔부에 온도센서를 장착하고 센서 선을 정리하여 데이터 수집장치로 연결하였다.

#### 2.3.3 수치적 방법과의 비교 결과

데이터 수집장치에서 수집한 데이터와 수치적으로 계산한 데이터와 비교해본 결과는 다음과 같다. Fig.12 의 데이터는 -4℃에서 충전하기 시작하여 20.7MPa의 압력 도달에는 약 30℃의 온도 상승이 일어났다.

외부기온이 약 30℃일 경우에는 실제 온도 상승이 35℃이상 상승하는 것으로 데이터 수집 결과 나타났다. 온도 상승은 동일 충전량에서도 겨울철 보다

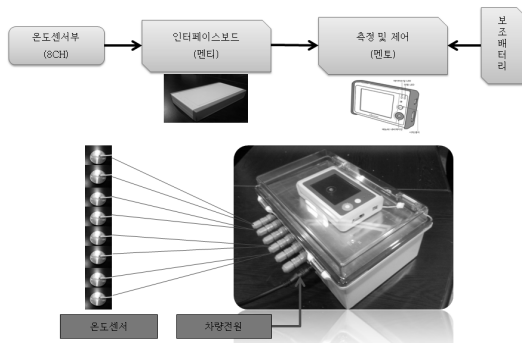


Fig. 9. DAQ System part configuration.

여름철이 외부 온도의 영향으로 더 높게 나타났다.

### III. 결론

지금까지 이론적인 해석 데이터와 실험데이터를 분석하고 고압 급속 충전에 의한 내부온도 상승이 전자밸브의 작동여부를 파악할 수 있는 기초 자료가 될

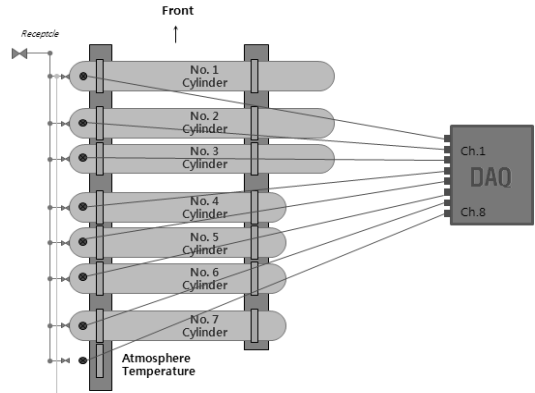


Fig. 10. DAQ and 8 Thermal sensor installment.

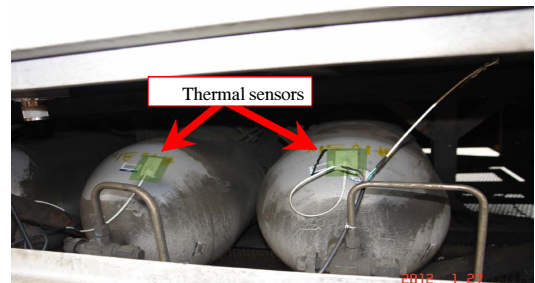


Fig. 11. Thermal sensors on CNG cylinders.

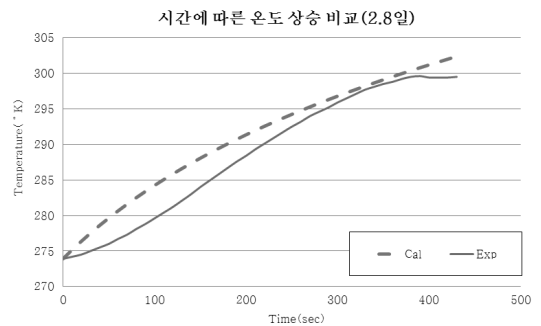


Fig. 12. Thermal data result <-4℃>.

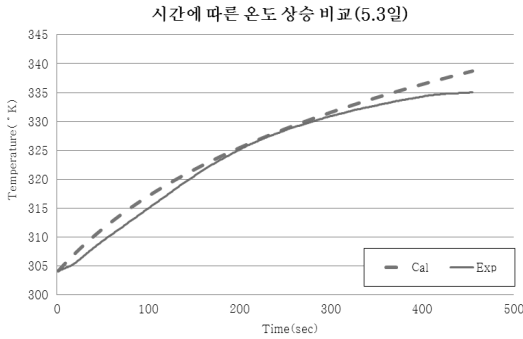


Fig. 13. Thermal data result <+30°C>.

수 있음을 확인 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다. 첫째, 운행 중인 개개의 전자밸브의 작동성능 확인 시나리오는 다음과 같다. Fig. 14의 경우 모든 센서의 채널에서 온도상승이 이루어졌으므로 모든 밸브가 정상 작동되었다고 판단할 수 있으며, Fig. 15의 경우 No. 1 채널에서 온도상승이 이루어지지 않았으므로 1번 용기밸브가 작동되지 않은 것으로 판단할 수 있다.

둘째, 급속충전에 소요되는 총시간은 초기 충전량에 가장 큰 영향을 받으며, 충전량이 많을수록 충전에 소요되는 시간 또한 많이 소요되었다.

150m<sup>3</sup>의 가스량을 충전 시에는 충전노즐과 리셉터클의 유량특성의 영향으로 약 5분~10분이 소요되었다. 그리고 용기위치에 따라 충전구에서 가장 먼곳의 용기가 압력상승이 먼저 일어나 온도상승이 먼저 발생하였다. 충전구의 위치가 3번과 4번 사이에 있으므로 1번용기와 3번 용기 충전 시 온도차이는 최대 4°C까지 발생하였다.

셋째, 수학적 모델의 계산 값과 온도센서 데이터 수집장치를 제작하여 부착한 후 입수한 데이터를 확인 해 본 결과 용기의 충전량이 150m<sup>3</sup> 일 경우 온도상승이 약 30°C 상승하였다. 충전초기온도가 겨울철 기준 0°C 일 경우에는 약 27~30°C 상승하였고, 여름철 기준 30°C인 경우에는 30~35°C 이상 상승하여 주변온도의 영향이 용기의 온도상승에 영향을 주었다. 사계절이 뚜렷한 우리나라의 경우 계절에 따라서 온도 상승량이 다를 수 있으나 최소 20°C 이상은 온도상승이 이루어지고 이러한 온도상승 데이터는 용기밸브의 작동여부를 확인 가능하다는 실험적 결론을 얻었다.

### 감사의 글

본 연구는 한국가스공사의 중소기업협력과제인 “CNG버스 모니터링 연구”를 통해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

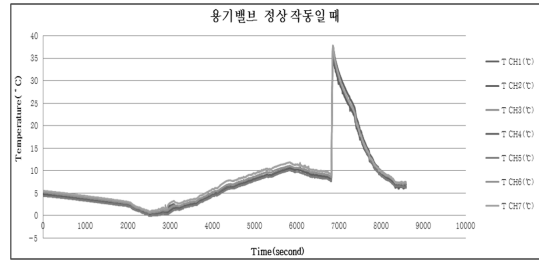


Fig. 14. Cylinder valve normal operation case.

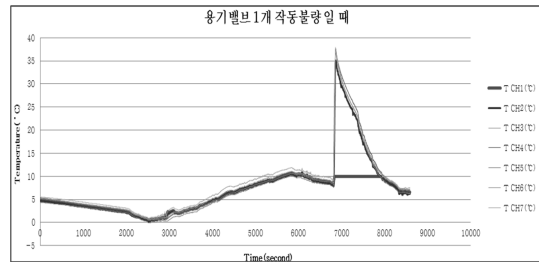


Fig. 15. Cylinder valve malfunction case.

### 참고문헌

- [1] Korea Gas Corporation, Study on the safety and Standardization of the Natural Gas vehicle cylinder and refueling station, 1995
- [2] Ministry of Commerce, Industry and Energy, CNG vehicle specification and on the System Improvement Plan final report, 1998
- [3] Pan Seok Yang, Chan Goo Kang and Yong Ho Kwan, 2001, A Development of Simulation for CNG Refueling Station, The Korean Society of Mechanical Engineers(KSME) 2001 Spring Symposium, pp. 331-336
- [4] Korea Gas Safety corporation, “KGS Code FU552 (Facility/Technical/Inspection Code for Fuel Devices for Compressed Urban Gas Vehicles”, 2010
- [5] Korea Gas Safety corporation, “A Study on the Safety Improvement of Compressed Natural Gas Vehicle(Short term)”, 2008.12
- [6] Jung Seong Lee, 2009, “A Study on the Safety Improvement of Compressed Natural Gas Vehicle(long term)(II-②) A Development of Safety management improvement and Safety improve-

- ment for CNG Refueling Station Research Report", pp. 3-18
- [7] UN ECE Regulation No. 110, 2006
- [8] NFPA 52 Vehicular Fuel Systems Code 2006 Edition
- [9] ANSI NGV 2-2002 American National Standard for Compressed Natural Gas Vehicle (NGV) Fuel Containers
- [10] The International Association for Natural Gas Vehicles(IANGV) homepage
- [11] Korea Gas Safety corporation, "A Study on the Realtime Monitoring for the CNG buses", 2010.12
- [12] Korea Gas Safety corporation, "City Gas business law", 2000.8
- [13] Kountz, K., 1994, Modeling The Fast Fill Process in Natural Gas Vehicle Storage Cylinders. American Chemical Society Paper at 207th National ACS Meeting, (March 1994)
- [14] D. Drew Diggins, CNG Fuel Cylinder Storage Efficiency and Economy in Fast Fill Operation, Internal Spring Fuels and Lubricants Meeting and Exposition Dearborn, Mschigan, May 4-6, 1998, SAE paper 981398
- [15] Newhouse, N.L. and W.E. Liss, 1999. Fast Filling of NGV Fuel Containers. SAE paper 1999-01-3739
- [16] Dicken, J. B, 2001 Temperature Distribution Within A Compressed Gas Cylinder During Filling, B.Eng. University Of Victoria, 2001 pp. 35-61
- [17] Shipley, E., 2002. Study of Natural Gas Vehicles (NGV) during the fast fills process. Thesis for Master of Science, 2002. College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University