

CNG 충전시스템 충전특성해석 프로그램 개발

양판석, 강찬구, 권용호*

A Development of Simulation Program for CNG Refueling Station

Pan Seok Yang, Chan Goo Kang and Yong Ho Kwan*

Key Words: CNG Refueling System(CNG 충전시스템), quick filling(급속충전), flow rate calculation method(유량계산법), gas flow rate through valve-piping system(가스배관계의 유량)

Abstract

Theoretical approach was taken to the whole CNG refueling process. In particular, this study was focused on the prediction of flow rate at any given piping configuration of CNG system, in order that a simulation program for the CNG refueling system should be developed. The simulation result of refueling process was compared with experimental result obtained from various kinds of fueling configuration. The simulation results showed a satisfactory agreement within 10% errors in fueling time, fueling amount, and residual pressure. The developed program would be used a good engineering tools for estimating fueling performance for a any given CNG station.

1. 서 론

현재 심각해지고 있는 대기환경오염 문제를 극복하기 위하여 대체에너지 차량에 대한 연구 개발이 활발히 수행되고 있다. 천연가스차량은 현실적인 대안의 하나로 인정되고 있으며, 현재 전 세계적으로 약 100만대 이상이 보급되어 있다. 우리 나라의 경우 자동차 배출가스가 전체 대기 오염물질량의 41.15%를 차지하고 있으며, 특히 경유차의 비율이 29.3%로 선진국(미국3%, 독일 18%, 일본 19%, 프랑스34%)에 비하여 높아 전체 자동차 오염물질의 60.9%를 차지하고 있는 실정이다⁽¹⁾. 이에 정부에서는 자동차의 매연에 의한 도심의 오염을 해소하고자, 98년 1월부터 천연가스 승용차 9대를 시범운행하였으며, 98년 7월부터는 천연가스버스에 대한 시험운행을 실시하여 성공적으로 마쳤다. 이를 바탕으로 2000년 6월

부터 서울시를 비롯한 전국 주요도시에서 약 100대의 천연가스 시내버스를 도입하였고, 현재 운행 중에 있다.

천연가스 버스의 원활한 운영을 위하여 필수적으로 갖추어야하는 인프라에 해당하는 것이 압축 천연가스 (Compressed Natural Gas, CNG) 충전소이다. 천연가스는 액체연료와는 달리 압축성기체이므로, CNG 충전시스템은 저압의 가스를 250bar 정도의 고압 가스로 압축하여 저장용기에 일시저장을 하였다가 디스펜서를 통하여 천연가스자동차로 충전하는 설비이다. 이 시스템은 가스압축기, 저장용기, 디스펜서 그리고, 제어시스템으로 구성되어있다. 국내에서 운전되는 대부분의 천연가스자동차는 한번 충전으로 장거리를 운전해야하므로 대형 연료실린더를 갖고 있으며, 고속충전을 원하고 있다. 따라서 충전소가 적절한 성능을 발휘하는 것은 지속적인 천연가스버스의 보급에 필수적인 요소라 할 수 있다.

CNG 충전소의 성능은 충전소로의 자동차 진입 간격, 충전소 구성기기의 용량(압축기, 저장용기

* (주)효성 중공업 연구소

및 디스펜서 등), 자동차 일일 주행거리, 충전시간, 충전소 일일 운전시간 등 다양한 요소에 의해 결정된다. 이들 요소는 주어진 자동차 조건에 대해 CNG 충전소의 사양을 결정하는 중요한 요소이다. 특히, 고속충전은 복잡한 열역학적 과정이 포함되어있기 때문에 더욱 그렇다. 따라서 천연가스 충전소의 운전성능을 예측하는 시뮬레이션 프로그램이 요구된다고 할 수 있다. Kountz⁽²⁾는 충전시스템을 압축기, 디스펜서, 저장용기 등으로 단순화시켜 저장용기로의 충전을 수치적으로 구현하였고, Cullerier⁽³⁾은 경제성 평가를 이용한 수요처에 적합한 충전시스템을 설계하였다. 국내에서는 강찬구^{(4),(5),(6)}이 천연가스 저장용기내의 가스 물성변화 및 대기 온도에 따른 충전량 변화에 대한 해석적인 연구를 수행하였으나, 가장 핵심적인 요소라고 할 수 있는 충전유량에 대하여는 시험에 의한 경험적인 값을 사용하였다.

본 연구에서는 압축기에서 저장용기, 저장용기에서 자동차 연료용기, 압축기에서 자동차 연료용기에 이르는 압축기를 제외한 충전 시스템을 열역학적으로 해석하고, 특히 충전유량을 정량적으로 예측할 수 있는 모델을 제안하고, 실제 충전소 엔지니어링에 활용할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하는 것을 목적으로 하였다.

2. 충전시스템의 이론 해석

2.1 충전시스템의 모델링

Fig.1에는 천연가스 충전 계통도, 즉 충전 시스템에서 자동차 연료용기까지의 개략도를 나타내었다. 충전시스템으로부터 자동차로의 실시간 운전 성능 해석을 수행하기 위해서 Fig.2와 같이 천연가스 충전소를 압축기, 저장용기, 연료용기 및 오리피스로 모델링하였다. 여기서, 오리피스는 압축기 또는 저장용기에서 연료용기로 연료를 공급하는 배관계(자동차 배관 포함) 및 디스펜서를 등가로 모델링 한 것이다.

Fig.2에 나타나 있는 바와 같이 저장용기와 자동차에 탑재되어 있는 연료용기에서는 용기내부의 gas와 외기 사이에 용기벽을 통하여 열전달이 일어나고, 압축기에서는 저장용기, 연료용기의 상태와 제어 시퀀스에 따라서 저장용기 또는 연료용기로 연료가 공급되고, 저장용기에서는 연료용기로만 연료를 공급할 수 있도록 되어있다.

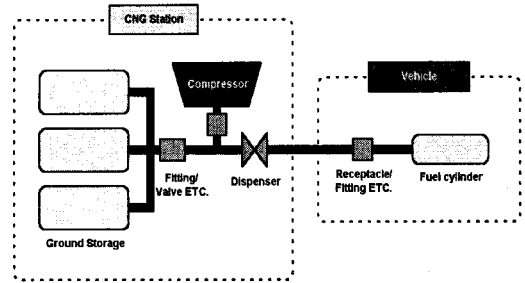


Fig.1 Schematics of CNG refueling system

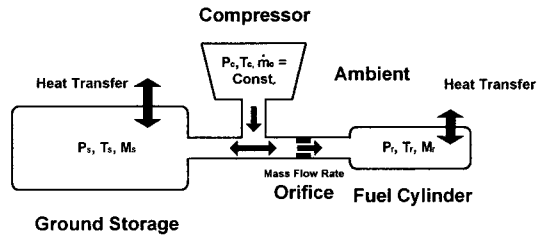


Fig.2 Modelling of a typical CNG system

2.2 지배방정식

충전소 시스템의 실시간 운전 성능의 해석을 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- ① 실린더 내 가스의 온도와 압력은 균일하다.
- ② 저장용기/연료용기로의 충전과정은 등엔탈피과정이다.
- ③ 저장용기/연료용기 벽의 온도는 균일하다.

2.2.1 질량 및 에너지 보존식

충전시스템에서 자동차에 탑재되어 있는 연료용기로 오리피스를 통하여 충전될 경우 가스의 운동 및 위치 에너지를 무시하면 용기내 가스에 대한 에너지 방정식 및 질량 보존식은 각각 다음과 같다.

$$m_r \frac{du_r}{dt} = \dot{m}_i [h_s(T_s, P_s) - u_r(T_r, P_r)] + \frac{dQ_r}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dm_r}{dt} = \dot{m}_i \quad (2)$$

식(1)에서 용기내 가스의 내부 에너지 변화율은 실제 기체(real gas)의 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{du_r}{dt} = c_v(T_r, v_r) \frac{dT_r}{dt} + [T_r \left(\frac{\partial P_r}{\partial T_r} \right)_{v_r} - P_r] \frac{dv_r}{dt} \quad (3)$$

식(1)에서 공급되는 가스의 엔탈피(h_s)나 용기로 저장되는 가스의 내부에너지(u_r)를 구하기 위하여 필요한 가스의 상태방정식으로는 탄화수소물의 열역학적 상태량을 잘 예측하는 것으로 알려진 Benedict-Webb-Rubin 상태방정식을 사용했다.⁽⁷⁾

2.2.2 주위로의 열전달

충전되는 가스와 용기벽, 용기벽과 외부와의 열교환은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dQ_r}{dt} = -H_{cyl} A_{cyl} (T_r - T_w) \quad (4a)$$

$$\frac{dQ_{amb}}{dt} = H_{amb} A_{cyl} (T_w - T_{amb}) \quad (4b)$$

또한, 용기벽의 온도 변화는 집중 열용량 모델에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{1}{M_w C_{p_r}(T_w)} \left(-\frac{dQ_r}{dt} - \frac{dQ_{amb}}{dt} \right) \quad (5)$$

2.2.3 충전유량 계산

전형적인 CNG 충전시스템의 배관계를 Fig.3에 나타내었다. Fig.3에서 ①, ②, ④ 및 ⑨는 볼밸브, ③은 필터, ⑤와 ⑥은 디스펜서 내에 있는 커넥터와 충전노즐, ⑦과 ⑧은 천연가스 차량 내에 있는 리셉터클 및 체크밸브이다. Fig.3과 같이 저장용기에서 연료용기까지 특성이 상이한 여러 개

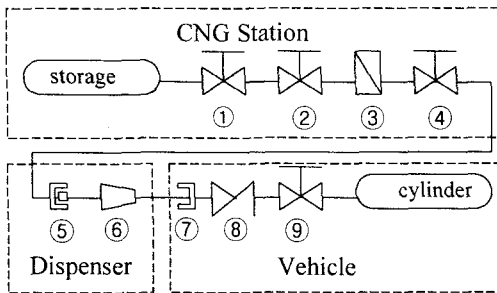


Fig.3 Typical piping of CNG system

의 밸브류를 통과하고, 다양한 직경을 가진 길이 10m이상의 배관을 고압의 압축성가스가 흐르기 때문에 순시 유량을 정량적으로 계산하는 것은 쉽지 않은 문제이다. 따라서, 이 유량을 예측 및 계측하는 것은 CNG 충전시스템의 충전해석시 가장 중요한 문제라고 할 수 있다.

(가) 유량계수에 의한 방법

충전유량의 계산은 크게 두 가지 방법으로 계산이 가능하다. 기존에는 충전 배관계를 등가의 오리피스로 간주하여 하나의 유량계수를 이용하여 다음과 같이 가스의 유량을 계산하였다.⁽⁶⁾

$$\begin{aligned} \dot{m}_i &= 16.05 \times C_v \times \rho \sqrt{\frac{(P_s^2 - P_r^2)}{T_s \times S_g}} & \text{if } \frac{P_s}{P_r} < 1.89 \\ &= 13.63 \times C_v \times P_s \times \rho \sqrt{\frac{1}{T_s \times S_g}} & \text{if } \frac{P_s}{P_r} > 1.89 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, C_v 는 유량계수, ρ 는 가스의 밀도, S_g 는 가스의 비중이다. 그러나, 위 방법의 경우 충전량, 충전시간 및 잔류압력에 대하여 10% 오차 내에서 결과를 얻을 수 있었으나, 유량계수 C_v 를 시험에 의해 결정해야 하는 어려움이 있었다. 따라서 시험을 거치지 않고 오차 범위 내에서 충전량, 충전시간 및 잔류압력, 그리고 더 나아가 충전유량 특성까지도 모사할 수 있는 방법을 연구하게 되었다.

(나) Darcy 방법

Darcy에 의하면, 밸브 및 관을 통한 유체의 유량에 관한 공식은 다음과 같다.⁽⁸⁾

$$Q = 678 Y d^2 \sqrt{\frac{\Delta P P_1}{K T_1 S_g}} \quad (7)$$

여기서, Y 는 정미 팽창계수, d 는 배관의 내경 [in.], ΔP 는 차압 [psig], P_1 는 공급 압력 [psig], K 는 시스템 저항계수이며 배관과 밸브에서의 압력손실을 나타낸다. T_1 은 외기온도 [$^{\circ} R$], S_g 는 공기에 대한 가스의 비중이다. 또한, 저항계수 K 는 밸브에 의한 저항과 직관에서 저항의 합으로 구성되며, 각각 식(8)과 식(9)에 의해 결정된다.

$$K_r = \sum \frac{891d^4}{C_v^2} \quad (8)$$

$$K_f = \sum \frac{fL}{D\beta^4} \quad (9)$$

여기서, f 는 마찰계수, L 은 각 배관의 길이, D 는 각 배관의 직경, 그리고 β 는 최대 배관과 각 배관의 비이다. Darcy법에 의해 순시 유량을 계산한 결과 시험값 기준으로 10%내로 일치하는 결과를 얻을 수 있었으나, 차량 충전시에는 충전 유량이 누적되기에 때문에 시뮬레이션결과 충전 시간으로 계산된 값에서 큰 오차가 발생하였다. 따라서, 전체적인 충전특성을 모사할 수 있는 모델을 개발하였다.

(다) 적합곡선/저항계수 혼합법

충전중 유량특성을 시간에 따라 기록하여 보면 전형적인 CNG 충전시스템인 Cascade 방식의 경우 Fig.4와 같은 유량 특성을 나타낸다. 첫 번째 하향 곡선은 저압용기에서의 충전되는 유량을, 두 번째 하향 곡선은 중압용기, 그리고 마지막 하향곡선은 고압용기에서의 유량을 나타낸다. 그리고 상승하는 곡선은 저장용기가 바뀌는 순간의 유량변화이다. 여기서, 용기간 유량 전환점이 좌우로 바뀌더라도 주어진 유량곡선을 따라서 점선의 방향을 이동할 것으로 문제가 되지 않는다. 각 저장용기에서 연료용기로 충전되는 유량은 절편 a 와 기울기 b 로 이루어진 압력(P)에 따른 곡선으로 표현이 가능하다. Fig.4의 오른쪽 그림은 왼쪽 세 개의 충전량 곡선중 하나를 나타낸 것이다. 여기서, 실선은 시험값, 그리고 점선은 시험값을 압력 기준으로 최적화한 곡선이다. 최적곡선의 형태가 직선이 아니라 곡선으로 나타난 것은 최적곡선 작성시 시간이 아니라 압력에 따라 작성을 하였기 때문이다.

CNG 충전시스템은 Fig.3과 같은 밸브 및 배관

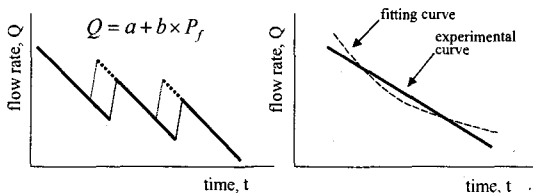


Fig.4 Fueling profile of cascade system

으로 구성되어있기 때문에 전형적인 시스템에 대한 압력 대 유량에 관한 특성곡선을 식(10)과 같이 구한다. 그 후에 각 충전시스템의 유량특성은 식(7)에서 배관 및 밸브에 따른 저항계수 K 와 최대밸브 직경 d 에 의해 결정되므로 식(11)에 의해 보정을 각 충전시스템에 모두 적용할 수 있다.

$$Q = (a_i + b_i \times P_f) \text{ for } i_m \text{ storage} \quad (10)$$

$$Q \propto \frac{d^2}{\sqrt{K}} \quad (11)$$

즉, 충전시스템이 변경되면 식 (11)로 대표되는 충전소 배관계의 특성을 계산함으로써 신규 충전 시스템에 대한 유량특성이 얻어질 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 여러 배관계 및 압력 조건에서의 유량 검토

상기의 식(7)을 이용하여 시험시 측정된 최대 유량값들과 비교해 보면 Table 1과 같다. 표에서 A1~A5는 당사 충전소에 설치된 충전능형시험장치에서 측정된 값이고, B1~B2는 E-상용 CNG충전소에 설치된 충전시스템에서 측정된 값이고, K 는 배관계 저항 계산값이다. 각 경우의 시험조건에 대한 주요 배관 사양은 Table 2와 같다. Table 1에 Darcy법에 의해 계산된 순시유량값(Cal.)은 시험값(Exp.)을 기준으로 $\pm 10\%$ 내의 오차범위 내에서 일치하는 값을 구할 수 있었다.

3.2 차량 충전시 유량 변화량 검토

3.2.1 Darcy 법에 의한 충전시뮬레이션

배관계의 복잡성에 비해 오차범위가 수용할 수

Table 1 Calculation of Flow Rate

Case	Exp. (kg/s)	Cal. (kg/s)	Error(%)	K
A1	28.2	31.0	+9.7	136
A2	24.6	23.2	-6.0	244
A3	22.8	22.0	-3.5	267
A4	18.6	19.9	+6.9	328
A5	12.6	12.0	-4.8	913
B1	27.9	25.2	-9.6	869
B2	21.2	23.1	+8.9	1006

Table 2 Major specification of piping system

Case	Pipe (Main)	Nozzle	check V/V	Pipe (Vehicle)
A1	3/4"	CT5000	3/4"	3/4"
A2	"	"	"	1/2"
A3	"	"	1/2"	"
A4	"	CT1000	"	"
A5	3/8"	"	"	"
B1	3/4", 1"	CT5000	3/4"	3/4"
B2	"	CT1000	1/2"	1/2"

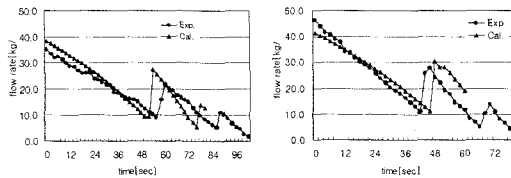
준으로 판단되어 Darcy법에 의한 충전시물레이션을 실시하였다.

Fig.5에서 좌·우측 그래프는 Table 2에서 각각 B1 및 B2를 나타낸 것이다. 여기서, 원은 시험값이고, 삼각형은 계산된 값이다. 초기 유량은 각각 -9.6%, +8.9%의 오차를 갖으나, 전체적으로 유량이 시험값에 비하여 크게 나타나서, 충전시간은 각각 -23%, -21.6%의 오차가 발생하였다. 기타의 경우에 대해서도 충전시간이 짧게 나타났다. 오차 범위를 줄이기 위해 여러 가지 방법을 고려하여 보았으나, Table 2의 각 경우에 대하여 계산결과가 시험값과 비교하여 볼 때 서로 다른 경향을 나타내어 적합곡선/저항계수 방법을 혼용한 시물레이션 방법을 도입하였다.

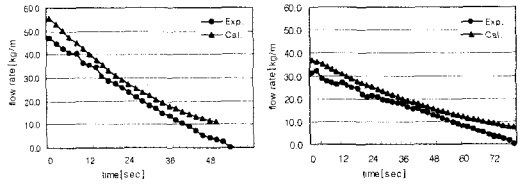
3.2.2 적합곡선/저항계수 혼합법에 의한 시물레이션

Fig.6에는 Table2의 Buffer식 저장용기에서 충전시험을 한 A1과 A4에 대한 시험값과 계산값을 각각 비교한 것이다. 순시 유량값이 전체적으로 약간 높게 나타나지만, 충전시간 관점에서 살펴보면 유사한 경향성을 나타내고 있다.

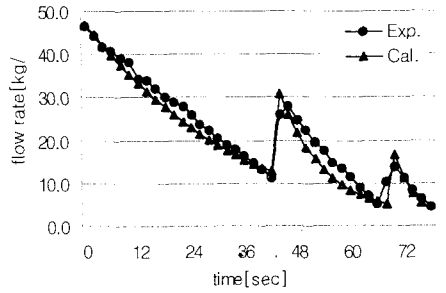
Fig.7에는 Table 2의 Cascade식 저장용기에서 충전시험을 한 B1과 B2에 대한 시험값과 계산값



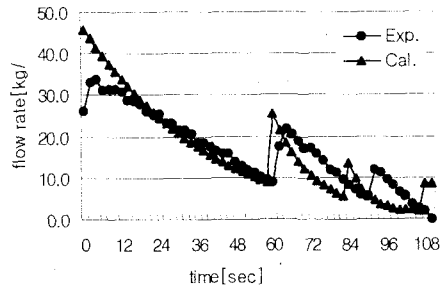
(b) for Case B2 (a) for Case B1
Fig.5 Simulation result from Darcy method



(a) for Case A1 (b) for Case A4
Fig.6 Simulation result from mixed Method



(a) flow rate for Case B1



(b) flow rate for Case B2

Fig.7 Simulation result by mixed method

을 각각 비교한 것이다. 위쪽(B1)은 기준이 되는 경우이므로 유량 특성이 거의 일치한다. 아래쪽(B2)는 저장용기 절체점이 수초씩 빠르게 나타나며, 따라서 마지막 4초는 압축기에서 충전이 이루어졌다.

3.3 차량 충전후의 열역학적 상태량 검토

상기 네 가지 경우에 대하여 충전량 및 충전시간을 각각 정리하면 다음 Table 3 ~ Table 5와 같다. 네 가지 경우에 대하여 충전시간, 충전량 및 잔류압력에 대하여 약 ± 10% 오차 범위 내에서 시험값과 일치함을 알 수 있다. 단, A4 경우에 대하여서는 계산값이 충전량에 비하여 월등하

Table 3 Fueling time by mixed method

Case	fueling time[sec]			Remark
	Exp.	Cal.	Error	
A1	54	49	+10.2%	buffer
A4	83	82	+1.2%	buffer
B1	78	78	+0.0%	cascade
B2	110	108	-2.3%	cascade

Table 4 Fueling amount by mixed method

Case	Fueling Amount(kg)			Remark
	Exp.	Cal.	Error	
A1	23.3	23.3	0.0%	buffer
A4	21.3	26.4	+23.9%	buffer
B1	28.2	25.9	-8.3%	cascade
B2	30.8	29.9	-2.9%	cascade

Table 5 Residual pressure by mixed method

Case	Residual Pressure(psig)			Remark
	Exp.	Cal.	Error	
A1	2788	2774	-0.5%	buffer
A4	2846	2801	-0.5%	buffer
B1	2800	2932	+4.7%	cascade
B2	2800	2919	+4.3%	cascade

게 큰 값이 나타났다.

이 방법은 정확한 유량특성을 추적하는 것은 어렵더라도, 충전 시물레이션에서 중요하게 여겨지는 충전시간, 충전량 및 저장용기 잔류압력에 대하여 시험을 거치지 않고도 약 ± 10% 오차 범위 내에서 유추할 수 있다는 특징이 있다. 이상의 결과를 통해 Darcy법과 적합곡선을 혼합하여 충전유량변화를 계산하는 방법은 주어진 배관계통에 있어서 충전유량을 예측하고, 나아가 충전소의 충전성능을 해석하는 엔지니어링 툴로써 사용이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결론

지금까지 충전시스템의 성능을 평가할 수 있는 충전시스템 실시간 시물레이션 프로그램을 개발에 관하여 논하였고, 특히 본 연구에서는 충전시간 및 충전량을 결정하는 충전유량의 계산에 초점을 맞추어 진행하였다.

그 결과 지금까지는 경험에 의하여 유량계수를 추정하는 방법에 의존하였으나, 배관의 직경, 배관의 길이 및 밸브의 특성자료를 이용하여 순시 충전유량을 10%이내에서 계산할 수 있는 방법을 개발하였고, 나아가 시험에 의존하지도 않고도 설치하게 될 충전시스템에 대한 충전성능을 예측할 수 있게 되었다. 본 연구를 통해 개발된 프로그램은 지속적인 시험 데이터를 통한 비교·검증을 통해서 CNG 충전시스템의 성능해석시 유용한 도구로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) 민만기, 2000, "도시지역 대기오염 문제와 개선방향," 자동차 공해에 의한 대기오염과 시민건강, pp.4~5.
- (2) K.J.Kountz, 1994, "Modeling the Fast Fill Process in Natural Gas Vehicle Storage Cylinder", AMCHEM. SOC. Div.Fuel Chem. p.462~469.
- (3) D. Cullerier, J. Schlienger, M. Heguy, 1996, "Optimization of NGV Station", The 5th Biennial IANGV international conference and exhibition on natural gas vehicles, Vol.1.
- (4) 오시덕, 강찬구, 차중환 등, 1998, "천연가스 충전소의 실시간 운전성능 해석 및 KOGAS 충전시스템의 증설방안," 한국천연가스차량협회 '98년도 제1차 기술강연회, pp.55~64.
- (5) 강찬구, 권용호, 윤승진, 오시덕, 김덕진, 곽호영, 1998, "천연가스 자동차 연료용기로의 고압가스 충전에 관한 연구," 대한기계학회 '98 춘계학술회의 논문집 B, pp. 686~690.
- (6) 강찬구, 오시덕, 권용호, 양판석, 1999, "주위 온도가 천연가스충전에 미치는 영향에 대한 연구," 대한기계학회 '99 추계학술대회 논문집 B, pp.291~296.
- (7) A.Bejan, 1988, "Advanced Engineering Thermodynamics".
- (8) Crane, 1997, "Flow of fluid through valves, fittings, and pipe".