

천연가스 충전소의 최적설계 방안에 관한 연구

강 찬 구, 권 용 호, 윤 승 진, 오 시 덕, 우 재 학, 이 현 찬*, 신 동 현**, 방 효 선**
효성중공업(주), 에너지자원기술개발지원센터*, 한국가스공사 연구개발원**

A Study on the Optimum Design of CNG Stations

C.G. Kang, Y.H. Kwon, S.J. Yun, S.D. Oh, J.H. Woo*, H.C. Lee**, D.H. Shin**, H.S. Pang**
HICO, RaCER*, KOGAS**

1. 서론

모든 설비와 마찬가지로 CNG 충전시스템의 경우에도 수요처의 부하에 최적인 용량의 산정은 설비 도입의 경제성 확보에 중요한 요건이 된다. 즉, 수요처의 수요 보다 적은 용량을 설치하여 운전하는 경우에는 수요자의 불편을 초래하게 되고, 수요보다 큰 용량을 설치하여 운전하는 경우에는 충전소의 가동률이 떨어져서 충전 사업자에 경제적인 손실을 입히게 된다. 우리 나라와 같이 천연가스 자동차를 도입하려고 계획중인 경우에는 수요의 예측이 불확실한 상태에서 투자를 실행하게 되는 경우가 있기 때문에 운전중에 수요의 변화에 따라서 긴급히 신·증설을 추진하는 경우가 빈번하리라는 것은 충분히 예상할 수 있다. 특히 천연가스 충전소의 용량은 압축기 및 저장용기의 용량은 물론 충전 방법등에 따라서 다양하게 변하고, 천연가스는 이상기체와는 달리 주어진 조건에 따라서 열역학적 성질이 변하기 때문에 이들 다양한 변수를 고려한 천연가스 충전소의 최적 설계는 충전소의 도입 계획시는 물론 용량 증설시의 경제적인 증설 안의 수립을 위하여도 중요한 과제가 된다. 본 고에서는 충전소 최적설계를 위한 도구로 개발중인 “천연가스 충전소 실시간 운전 성능 해석 모델”의 개요 및 타당성, 이를 활용한 천연가스 충전소의 최적설계 방안에 대하여 간단히 서술해 보고자한다.

2. 충전시스템의 모델 및 지배방정식

2.1 충전시스템의 모델

충전 시스템은 압축기, 저장용기, 디스펜서 및 제어반으로 구성되게 되며 그 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 충전시스템의 최적 용량을 산정하기 위하여는 실시간 운전 성능 해석을 수행하여야 하는 데, 이를 위하여는 우선 Fig. 1에 나타나 있는 시스템을 열역학적으로 모델링하여야 한다. 운전 성능의 해석을 위하여 모델링한 결과는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다[1].

즉 아래의 Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이 Fig. 1과 같이 나타내지는 천연가스 충전소를 압축기, 저장용기, 연료용기 및 오리피스로 단순화하여 모델링하였다. 여기서 오리피스는 압축기 또는 저장용기에서 연료용기로 연료를 공급하는 배관계 및 디스펜서를 등가로 모델링한다.

Fig. 1에 나타나 있는 바와 같이 저장용기와 자동차에 탑재되어 있는 연료용기에서는 용기내부의 가스와 주위간에는 용기벽을 통하여 열전달이 일어나고, 압축기는 저장용기, 연료용기의 상태와 제어스퀀스에 따라서 저장용기 또는 연료용기로 연료를 공급할 수 있고, 저장용기에서는 연료용기뿐만 연료를 공급할 수 있도록 되어 있다.

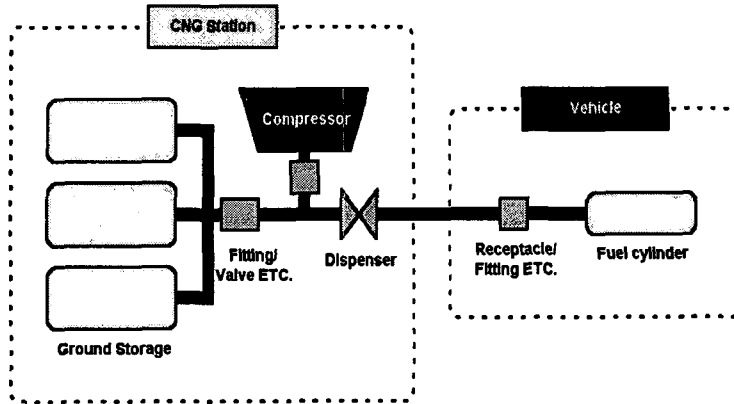


Fig. 1 Schematic diagram of CNG refuelling system

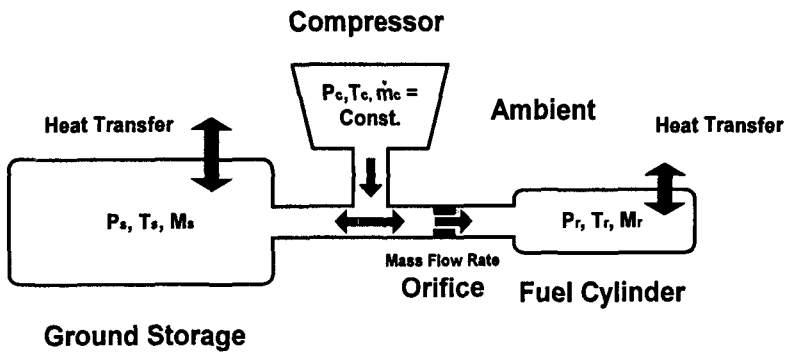


Fig. 2 Modelling of CNG refuelling system

2.2 지배 방정식[2]

충전소 시스템의 실시간 운전 성능의 해석을 위하여 다음의 가정을 사용하였다.

- ㉠ 주어진 시간에서 실린더 내 가스의 온도와 압력은 균일하다(Uniform State).
- ㉡ 오리피스를 통하여 가스가 연료 용기로 들어가는 과정은 등엔탈피과정이다.
- ㉢ 연료용기 및 저장용기 벽의 온도는 균일하다(Lumped Model).

충전시스템에서 자동차에 탑재되어 있는 연료용기로 오리피스를 통하여 충전될 경우 가스의 운동 및 위치 에너지를 무시하면 용기내 가스에 대한 에너지 방정식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

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

또한 질량보존식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

식(1)에서 용기내 가스의 내부 에너지 변화율은 비이상기체의 경우 다음과 같이 쓸 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 8개의 변수를 사용하는 Benedict-Webb-Rubin 상태 방정식을 사용하였다.

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

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

또한, 용기벽의 온도 변화는 lumped model에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

오리피스를 통과하는 가스의 유량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 C_V 는 유량계수, ρ 는 가스의 밀도, S_g 는 가스의 비중이다.

2.3 해석 결과의 검증

충전소에서 자동차에 탑재된 연료 용기로 가스를 충전하는 경우의 운전 성능은 전 절에서 유도된 지배방정식, 즉 식(1), (2), (5)를 충전소를 구성하는 각각의 구성요소에 적용하고, Runge-Kutta 수치 계산 방법을 이용하여 저장용기 또는 연료용기내의 압력이 설정 기준에 도달할 때까지 계산을 수행하면 된다. 저자 등은 이미 개발된 모델의 신뢰성 및 효용성의 검증을 위하여 몇 가지 실예에 대하여 적용하고 그 결과를 발표한 바 있다[1,2]. 본 고에서는 먼저의 연구에서 미진하게 다루었던 부분을 보완하는 수준에서 설명하고자 한다. 즉, 먼저의 연구[2]에서 일본의 Honda R&D의 M. Tsuchiya가 수행한 기초적인 실험 결과[3]와의 비교에서 연료용기의 입구부의 밸브단에 열전대를 설치하여 측정된 온도, 연료용기 후단에 설치한 열전대로 측정된 온도와 본 모델에서 계산된 온도와의 차이를 명확히 설명하지 못하였는데, 본 고에서는 교축작용이 일어난 직후의 가스의 온도를 계산하고, 계산된 값과 측정값과의 비교를 통하여 개발된 모델의 신뢰성을 간접적으로 설명하고자 하였다. 수치 해석 결과인 시간에 따른 연료용기내의 압력

변화를 Fig. 3에, 가스 충전시 시간에 따른 연료 용기내의 가스의 온도 변화를 Fig.4에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 계산 결과 및 측정 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 연료용기내의 시간에 따른 가스압력의 변화를 정확히 예측할 수 있다는 것은 연료용기로서의 충전이 압력에 의해서 제어되기 때문에 대단히 중요한 의미를 가진다. Fig. 4에서 ■ 표시로 나타낸 온도는 연료용기의 밸브내에 열전대를 설치하여 충전과정중에 실측한 값으로 충전을 시작한 직후에 가스의 온도가 -78°C 정도로 급격히 하락하였다가 시간이 경과함에 따라 서서히 증가함을 나타내고 있다. 이와 같이 가스의 온도가 급격히 하락하는 현상은 앞에서 설명한 교축작용 때문이다. 또 ● 표시로 나타낸 온도는 연료용기의 끝단에 설치한 열전대를 이용하여 충전시간에 따른 가스의 온도 변화를 실측한 결과이다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 연료용기의 말단에서는 연료용기의 입구에 설치된 밸브내에서 온도를 계측하였을 때 나타나는 교축작용에 의한 급격한 온도 저하 현상이 없다. 이는 연료용기의 말단에 설치된 열전대에서는 연료용기내에 남아있던 잔류가스의 온도를 계측하기 때문으로 판단된다. Fig. 4에서 실선은 밸브 단에서 교축작용이 일어난 직후의 온도 변화의 계산값을 나타내고, 점선은 연료용기내의 평균온도의 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 충전이 시작된 직후에는 실측치(■)와 계산값 사이에 다소의 오차가 있으나 충전을 시작한 후 약간의 시간이 경과한 후 부터는 실측치와 잘 일치함을 알 수 있다. 충전 초기에 실측치와 계산치의 차이는 열전대의 반응속도와도 관계가 있을 수 있음을 고려할 때 계산치와 실측치는 대체적으로 잘 일치한다고 할 수 있다. 또한 연료용기내의 온도 분포가 균일하다는 가정을 사용하여 계산하여 점선으로 나타낸 온도의 변화는 밸브내에서 계측된 값과 절대적인 값에는 차이가 있으나 전체적으로 경향은 유사하고, 충전시간이 상당히 경과되면 연료용기의 말단에 계측된 값에 가까움을 알 수 있다.

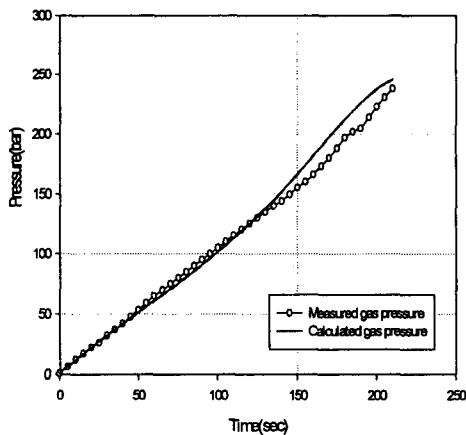


Fig. 3 Gas pressure in the empty cylinder during charge

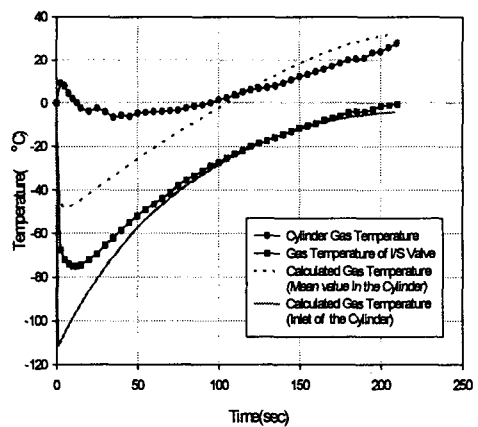


Fig. 4 Gas temperature in the empty cylinder during charge

K사에서는 승용차의 시범운행을 위하여 토출압력이 3,675psig, 유량이 29scfm인 압축기와 외경이 0.216m, 길이가 1.295m인 DOT 저장용기 10개, 노즐경이 4.85mm인 단일 호스 디스펜서로 구성된 천연가스 충전소를 운전중에 있다. 따라서 본 연구에서 개발하고 있는 해석 모델의 타당성을 검증하기 위한 방안으로 충전소의 성능을 나타내는 변수중에서 중요하다고 판단되는 저장 용기의 압력, 연료용기의 압력, 충전량 및 충전시간에 대하여 K사에서 설치하여 운전하고 있는 천연가스 충전소의 실측값과 개발중인 해석모델을 적용한 해석값을 비교하여 보았다. 해석

시 저장용기 또는 압축기와 연료용기 사이에 설치되어있는 배관계와 디스펜서의 등가 모델에 해당하는 오리피스의 직경은 주유기의 노즐 직경을, 유량계수의 값은 시행착오법을 사용하여 실제 승용차의 충전에 소요되는 시간의 실측값과 해석값의 비교를 통하여 추정된 값을 활용하였다. Table 1에 나타나 있는 바와 같이 변수에 따라서 다소의 차이는 있으나 해석값 및 실측값은 저압용기의 압력은 약 5%, 연료용기의 압력은 약 3.5%, 충전량 및 충전시간은 약 6%의 범위내에서 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 동일 차종의 경우에도 저장 용기 및 연료 용기의 상태, 충전량등에 따라서 충전 시간에 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of performance data between experiments and numerical calculations

구 분		저압용기(Psig)			연료 용기 압력(Psig)	충전량 (kg)	충전시간 (분)	비 고
		저압	중압	고압				
차종 I	실측	2,600	3,000	3,200	2,900	5.90	2분 3초	
	해석	2,604	2,856	3,089	2,998	5.94	2분 1초	
	Err(%)	0.2	-4.8	-3.5	3.4	0.7	-1.6	
차종 II	실측	2,800	3,200	3,300	3,100	6.50	2분 15초	
	해석	2,831	3,085	3,244	3,192	6.83	2분 7초	
	Err(%)	1.1	-3.6	-1.7	3.0	5.1	-5.9	
차종 II	실측	3,000	3,200	3,400	3,200	6.60	1분 58초	
	해석	2,935	3,185	3,315	3,250	6.23	1분 52초	
	Err(%)	-2.2	-5	-2.5	-2.5	-5.6	-5.6	

이들 해석 결과에서 현재 당사에서 개발되고 있는 천연가스 충전소의 실시간 운전성능 해석 모델은 약간의 미비점을 보완한다면 충전소의 최적 설계의 도구로서 유용함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 개발한 모델을 K사에서 운전하고 있는 천연가스 충전소의 경제적인 증설 방안의 수립에 적용하고, 그 결과의 검토 과정을 통하여 천연가스 충전소의 최적 설계 방안에 대하여 간단히 설명해 보고자 한다.

3. 천연가스 충전소의 최적설계 방안

천연가스 충전소의 최적 설계라 함은 최저의 비용으로 수요처의 요구를 충족시킬 수 있도록 충전소 구성기기의 조합, 구성기기의 사양, 운전방법등을 결정하는 것을 의미한다고 할 수 있다. 따라서 최적설계의 수행은 수요처의 요건이 정의되어야 설명되어질 수 있다. K사에서 버스의 시범사업을 추진하면서 승용차 충전용으로 도입되어 운전되고 있는 충전설비를 버스 충전용으로 사용하기에는 부적합하다고 판단하여 설비 증설을 계획하게 되었다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 설명한 천연가스 충전소의 실시간 운전성능 해석 모델을 K사의 기존의 설비 및 증설 방안의 수립에 적용하여 해석하고, 그 결과의 검토를 통하여 천연가스 충전소의 최적설계 방안에 대하여 간단히 기술해 보고자 한다.

기존 설비의 증설을 검토하는 경우에는 증설되는 충전소의 향후 운영 계획, 운행차량의 종류

와 운영 형태 및 수요자의 만족도등 수요처의 부하와 여건에 따라서 충분한 사전 검토가 선행되어야 할 것으로 여겨진다. 특히 충전소를 사용하는 이용자의 만족도를 평가하는 대표적인 지수인 충전시간은 충전소의 설계시에 중요하게 다루어야 할 사항이다. 따라서 본 연구에서는 기존 충전설비의 저장용기, 압축기 및 디스펜서의 용량을 각각 증설하는 경우 경비 증가에 대한 충전시간의 감소효과와 저장용기의 이용 형태에 따른 충전시간의 감소효과등을 검토해 보고자 한다.

3.1 저장용기의 증설 및 전환 효과

K사에 설치되어 운영되고 있는 충전소를 버스 사업자용으로 이용하고자 하는 경우에는 압축기 및 저장용기의 용량, 디스펜서 및 배관계의 규격등에 대한 전면적인 검토가 필요하나 버스의 시범사업에 한하여 활용하게 될 것으로 예상되므로 가장 경제적인 증설방안의 하나가 저장용기의 증설일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 저장용기의 증설에 따른 충전소 운전 특성 해석을 통하여 가장 경제적인 증설 방안을 검토하여 보았다. 버스에 탑재되어 있는 연료용기의 용량을 584liter라하고, 디스펜서로 연료를 보내는 저장용기가 저압용기에서 중압용기로 바뀌는 질량유량은 1.35kg/min, 중압용기에서 고압용기로 바뀌는 질량유량은 0.76kg/min이고, 고압용기의 압력이 3200psig가 되면 압축기가 작동하는 경우에 증설되는 저장용기에 따른 충전시간을 정리하면 Table 2와 같다. Table 2에 나타나 있는 바와 같이 현재 설치되어 있는 충전소의 제원하에서 저장용기의 증설만으로는 버스의 급속 충전은 불가능함을 알 수 있었다. 기존의 설비용량을 기준으로 최초 10개의 DOT 용기를 증설하는 경우에는 충전시간이 31분이 줄어들고, 10개를 추가하여 20개를 증설하는 경우에는 약 18분이 더 줄고, 다시 10개를 추가하여 30개를 증설하는 경우에는 충전시간이 약 13분 정도가 줄어들고, 40개를 증설하는 경우에는 12분이 줄어으나 50개를 증설하는 경우에는 충전시간이 거의 줄어들지 않음을 알 수 있다. 또 증설에 따른 시설 투자비 1000US\$당 감소되는 충전시간은 DOT 10개를 증설하는 경우가 2.2, DOT 20개의 경우 2.0이고 DOT 50개를 증설하는 경우에는 1.1로 DOT 용기의 개수가 증가할수록 효과가 적어짐을 알 수 있다. 이들 해석 결과에서 충전시간만을 고려하는 경우 DOT 40개를 증설하는 것이 가장 바람직하다고 여겨지나 DOT 용기의 증설에 따른 설치 면적이나 현장 제약 요건등에 따라서 추가되는 시설비를 고려하는 경우 DOT 20개~40개의 범위에서 증설을 결정하는 것이 바람직하다고 여겨진다. K사의 경우 DOT 20개 이상을 증설하는 경우 대대적인 저장실의 증개축이 불가피한 현장여건을 가지고 있으므로 버스 운전자가 불편을 감수한다는 전제하에서 DOT 20개를 증설하는 것이 가장 경제적인 방안이라고 판단되었다. 이런 경우 첫 번째 버스를 충전하는 경우 증설전에는 96분이 소요되던 것이 증설후에는 47분으로 약 49분이 단축됨을 알 수 있다.

Table 2 Refuelling time of various storage capacities

구 분	저장 용기 용량(개)		버스당 충전시간(분)		감소 시간(분)	감소 효과 (분/1000US\$)
	설비 용량	증설 용량	1	2		
현 재	10 DOT	-	96*	148*	-	-
증설 1	20 DOT	10 DOT	65*	148*	31/ -	2.2/ -
증설 2	30 DOT	20 DOT	47*	148*	49/18	2.0/1.30
증설 3	40 DOT	30 DOT	34*	148*	62/13	1.8/0.94
증설 4	50 DOT	40 DOT	22	60*	74/12	1.3/0.86
증설 5	60 DOT	50 DOT	21	47*	75/ 1	1.1/0.07

주) 1) * : Compressor turn on, 2) 1 DOT : 41.8 liter(Water Volume)

Table 3에는 승용차를 충전하는 경우의 K사가 계획하고 있는 증설 충전소의 성능을 증설 전과 비교하여 나타내었다. Table에서 알 수 있는 바와 같이 충전전의 설비로는 승용차의 경우 첫 번째 차량은 2.8분만에 충전이 가능하나 두 번째 차량의 충전을 위하여는 5.3분이 소요되어 제한된 시간에 충전이 불가능함을 알 수 있다. 그러나 DOT 20개를 증설하면 네 번째 차량까지는 제한된 시간내에 충전이 가능하고, 다섯 번째 차량의 경우에도 3.5분내에 충전이 가능한 것으로 나타나 증설의 효과가 큼을 알 수 있다.

Table 3 Performance of refuelling stations after increase of storages

구분	차량수	1	2	3	4	5	6	7	8
		승용차	증설전	2.8	5.3*	18.8*			
	증설후	2.2	2.5	2.6	3	3.5	3.7	4.3*	18.8*

주) 1) * : Compressor turn on

Cascade 저장용기의 저압, 중압 및 고압간의 전환 변수값과 단일용기로 사용하는 경우의 저장용기의 용량 증설전후의 충전시간의 변화를 정리하면 다음의 Table 4와 같다. Table에 나타나 있는 바와 같이 저장 용기간의 전환 설정값의 변화에 따라서 충전시간도 변화함을 알 수 있다. 저장용기 모두를 동일용기로 묶고 압축기의 운전 설정값을 0.76kg/min으로 설정하는 경우 현재의 설비를 그대로 가용하여도 현재의 운전 방법보다 4.5분 정도 시간을 감소시킬 수 있고, 특히 현재 상태에서 저압→중압→고압용기로의 전환 설정값 및 고압용기에서 압축기 운전의 설정값을 0.76kg/min으로 설정하면 8.7분 정도의 감소효과를 거둘수 있음을 알 수 있다. 또한 DOT 용기를 증설하고, 저압→중압→고압용기로의 전환 설정값 및 고압용기에서 압축기 운전의 설정값을 0.76kg/min으로 설정하면 현재 상태의 충전시간보다 55.5분 정도의 충전시간이 절약됨을 알 수 있다. 이와 같은 결과에서 동일한 사양의 충전소의 경우에도 제어방법에 따라서 다양한 결과를 얻을 수 있기 때문에 수요처의 요건에 부합하는 최적 제어방법의 설계도 충전소의 설계에 대단히 중요한 요소임을 확인할 수 있다.

Table 4 Refuelling time of bus for various operating conditions

구분	저장용기 용량(개)	저장용기간의 전환값 (질량유량,압력)			충전시간(분)	감 소 시간(분)	비 고
		저압→중압	중압→고압	고압			
현재	10 DOT	-	-	3200psig	141.7*	-46.4	Buffer
		-	-	0.76kg/min	90.8*	4.5	상동
		1.35kg/min	0.76kg/min	3200psig	<u>95.3*</u>		Cascade
		0.76kg/min	0.76kg/min	3200psig	94.9*	0.4	상동
		0.76kg/min	0.76kg/min	0.76kg/min	86.6*	8.7	상동
증설	30 DOT	-	-	3200psig	126.3*	-79.1	Buffer
		-	-	0.76kg/min	51.2*	-4.0	상동
		1.35kg/min	0.76kg/min	3200psig	<u>47.2*</u>		Cascade
		0.76kg/min	0.76kg/min	3200psig	46.8*	0.4	상동
		0.76kg/min	0.76kg/min	0.76kg/min	39.8*	7.4	상동

주) 1) * : Compressor turn on, 2) 1 DOT : 41.8 liter(Water Volume)
 3) 감소시간은 현재의 상태(밀출된 시간)을 기준으로 계산한 값임
 4) Cascade : 용기의 체적비가 3(저압) : 2(중압) : 1(고압)임

K사의 충전소로 버스를 충전하는 경우 Table 4에 나타나 있는 바와 같이 저압→중압→고압 용기로의 전환 설정값 및 고압용기에서 압축기 운전의 설정값을 0.76kg/min으로 설정하는 경우가 충전시간이 가장 짧았다. 동일 조건에서 승용차를 충전하는 경우의 성능을 계산하여 다음의 Table 5에 나타내었다. Table 3과 Table 5를 비교하여 보면 저장용기의 용량이 적은 경우에는 전환값을 0.76kg/min으로 바꾸는 경우의 저장용기의 체적효율의 증가로 약간 짧아지나 뚜렷한 차이는 확인할 수 없으나, 저장용기의 용량이 커지면 저장용기만으로 채울수 있는 차량의 수는 7대에서 8대로 1대 증가하나 계획된 시간내에 충전할 수 있는 차량의 수는 오히려 4대에서 3대로 1대 감소함을 확인할 수 있었다. 이들 결과에서 충전소의 제어방법을 설계할 때 충전하고자 하는 차량의 종류 및 차량의 운전 형태등도 충분히 고려할 필요가 있음을 알 수 있다.

Table 5 Refuelling time of passenger car with storage change at 0.76kg/min

구분		차량수									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
현재	DOT 10	2.6	4.2*	18.8*							
증설	DOT 30	2.2	2.7	3.0	3.2	3.8	3.8	4.0	4.1	5.5*	18.8*

주) 1) * Compressor turn on

3.2 압축기의 증설

압축기만을 증설하여 K사의 충전설비 용량을 증가시키는 경우에 대하여 해석을 수행하여 정리하면 다음의 Table 6과 같다. 압축기의 증설은 현재 설치되어 있는 동일 용량의 압축기를 병렬로 설치하는 것으로 하였다. Table에 나타나 있는 바와 같이 압축기를 1대 추가하는 경우에는 45분이 감소하고, 2대를 추가하는 경우에는 59분이 감소하며, 1000US\$당 감소효과는 압축기 수가 증가할 수록 적어지고, 저장용기의 증설에 비하여 상당히 작음을 알 수 있다.

Table 6 Refuelling time for various compressor capacities

구분	압축기 용량		버스당 충전시간(분)		감소 시간(분)	감소 효과 (분/1000US\$)
	설비 용량	증설 용량	1	2		
현재	29scfm×1	-	96*	148*	-	-
증설 1	29scfm×2	29scfm×1	51*	72*	45/-	0.8/-
증설 2	29scfm×3	29scfm×2	37*	47*	59/14	0.5/0.25

주) 1) * : Compressor turn on

3.3 디스펜서의 증설

충전소를 증설하는 방안중에 하나로 대유량 디스펜서의 설치이다. 대유량 디스펜서를 설치하는 경우 Table 7에 나타나 있는 바와 같이 기존의 디스펜서를 이용하는 경우보다 약 11분 정도 감소하는 효과를 거둘 수 있어 압축기나 저장용기의 증설에 비하여 절대적인 시간의 감소효과는 물론 금액대비 효과도 압축기 또는 저장용기의 증설안 보다는 낮음을 알 수 있다. 즉 1000US\$당 충전시간의 감소효과가 0.33으로 저장용기 2.0, 압축기 0.8보다 작다.

Table 7 Refuelling time for changing of dispenser

구 분	디스펜서 사양(허용유량)	버스당 충전시간(분)		감소 시간(분)	감소 효과 (분/1000US\$)
		1	2		
현 재	4.85mm, (Cv=0.12)	96*	148*	-	-
증설 1	10.3mm, (Cv=1.12)	85*	148*	11/ -	0.33/ -

주) 1) * : Compressor turn on

3.4 검토 결과 및 실시간 운전 특성

K사의 충전소를 버스 시범사업용으로의 증설 방안을 찾기 위하여 저장용기, 압축기 및 디스펜서를 증설하는 방안에 대하여 검토하여 보았다. 경제적인 투자방안을 검토하기 위하여 각각의 경우에 대하여 투자비당 감소되는 충전시간을 계산하여 비교한 결과 저장용기를 증설하는 방안이 가장 바람직함을 확인할 수 있었다. 즉, DOT 20개를 증설하는 경우 2.0분/1000US\$, 29scfm의 압축기를 증설하는 경우 0.8분/1000US\$, 대유량 디스펜서를 증설하는 경우 0.33분/1000US\$의 효과를 얻을 수 있다는 결과를 얻었다. 이 결과에서 압축기나 디스펜서를 도입하는 경우에 비하여 DOT 20개를 증설하는 방안이 금액대비 도입 효과가 상대적으로 큼을 알 수 있다. 또한 증설 전후의 충전소 운전방법을 변경시켜 가면서 해석을 수행하고 그 결과의 검토를 통하여 차량의 종류나 운전 형태등에 따라서 최적의 제어방법이 있음을 정량적으로 확인하였다. 즉 저장용기는 buffer로 사용하는 것 보다는 Cascade로 사용하는 것이 바람직하고, K사의 현재의 충전소 사양하에서 저압→중압→고압 용기로의 전환 설정값 및 고압용기에서 압축기 운전으로의 전환 설정값을 0.76kg/min으로 바꾸는 경우 승용차는 충전에는 큰 변화가 없으나 버스 충전시에는 8.7분 정도의 충전시간을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 또 DOT 20개를 증설하고 저압→중압→고압 용기로의 전환 설정값 및 고압용기에서 압축기 운전으로의 전환 설정값을 0.76kg/min으로 바꾸면 승용차의 경우 계획 시간내에 충전되는 차량의 수가 4대에서 3대로 주는 반면 버스 충전시에는 7.4분 정도의 충전시간 감소 효과를 얻었다. 이들 결과에서 충전소의 제어 방법은 충전소의 용량, 차량의 종류 및 운영 형태등에 따라 어떻게 선정할 것인가도 충전소의 최적 설계에 중요한 요소가 될 수 있음을 정량적으로 설명할 수 있었다.

충전소의 운전 특성을 각각의 용기의 압력변화, 압축기의 운전상태 및 연료용기의 압력변화 등으로 다음의 Fig. 5 및 Fig. 6와 같이 나타내 보았다.

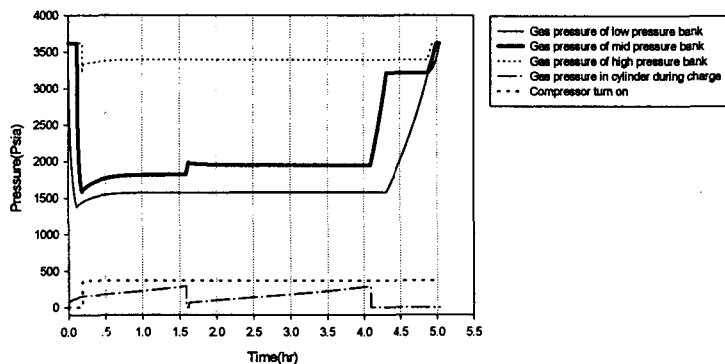


Fig. 5 Performance of refuelling stations at present status(10 DOT)

Fig. 5는 증설전, Fig. 6은 증설후의 운전특성을 각각 나타낸 것이다. Fig. 5 및 Fig. 6에 나타나 있는 바와 같이 K사 충전소의 경우 증설전에는 연료용기가 584liter인 버스를 충전하는 데 약 96분 정도의 시간이 소요되나 증설후에는 약 47분 정도로 충전시간이 단축됨을 알 수 있다.

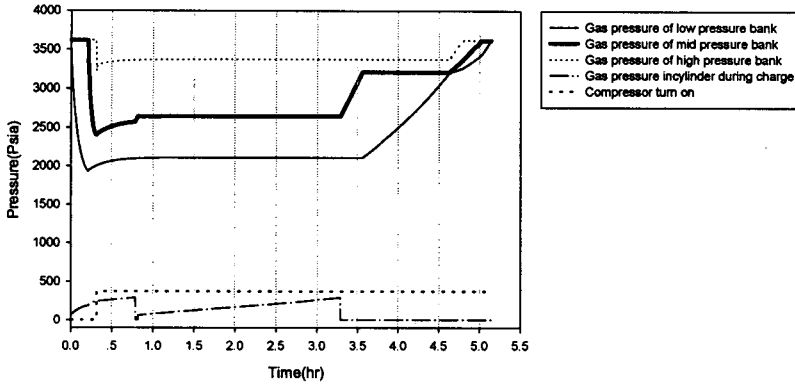


Fig. 6 Performance of refuelling stations after increase of storages(30 DOT)

4. 결론 및 향후 계획

CNG 충전시스템에 대하여 열역학적 모델링을 수행하여 충전소 운전특성 해석용 모델을 개발하고, 해석 결과를 외국 연구자의 실험 결과 및 K사에 설치되어 운전중인 충전소의 운전자료의 비교를 통하여 개발된 모델의 유용성을 확인하였다.

개발된 모델을 K사의 충전소 증설 계획안 수립에 적용하여 DOT 20~30개 정도의 저장 용기를 증설하는 방안이 시설투자비 대비 효과가 좋으나 현장 여건을 고려할 때 DOT 20개 정도가 바람직함을 확인하였다. 또 저장 용기간의 전환 설정값을 변화시켜 가면서 증설 전후에 대하여 승용차 및 버스 충전시의 운전특성 해석을 통하여 차량의 종류, 운전 형태등에 따라서 제어 방법을 달라져야 함을 정량적으로 확인하였다.

참고 문헌

- 1) 오시덕, 강찬구, 차중환, 윤승진, 이현찬, 신동현, 방효선, 우재학, "천연가스 충전소의 실시간 운전성능 해석 및 KOGAS 충전시스템의 증설방안," 한국천연가스차량협회 '98년도 제1차 기술강연회, pp.55~64.
- 2) 강찬구, 권용호, 윤승진, 오시덕, 김덕진, 박호영, "천연가스자동차 연료용기로의 고압가스 충전에 관한 연구," 대한기계학회 '98 춘계학술회의 논문집 B, pp. 686~690.
- 3) Masayuki Tsuchiya, "Thermodynamic Behavior of Natural Gas in Vehicle Fuel Fill Line During CNG Fast Fill," Proceedings of the 5th Biennial IANGV International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, Vol.4, PS:70.

후 기

본 논문은 산업자원부에서 지원하는 에너지기술개발사업인 "패키지형 CNG 충전시스템 개발 (과제번호 : 96-P-12-06)" 과제의 일부로 수행되었습니다. 이에 관계자 제위께 감사드립니다.