



## 밀폐공간 및 강제환기공간에의 천연가스 고압분출 시 농도 확산분포 거동해석 (I)

†하태웅 · 하종만\* · 김은자\*\*

가천대학교 기계 · 자동차공학과, \*한국가스공사 연구개발원, \*\*가천대학교 기계공학과 대학원  
(2012년 4월 3일 투고, 2012년 8월 6일 수정, 2012년 8월 6일 채택)

### The Diffusion Behavior Analysis Caused by High Pressure Natural Gas Leak in Enclosure with and without Ventilation System (I)

†Tae Woong Ha · Jong Man Ha\* · Eun-Ja Kim\*\*

*Dept. of Mechanical-Automotive Engineering, Gachon University, Sung Nam, Korea*

*\*Korea Gas Cooperation R&D Division, An San, Korea*

*\*\*Dept. of Mechanical Engineering, Gachon Univ. Graduation School, Sung Nam, Korea*

*(Received April 3, 2012; Revised August 6, 2012; Accepted August 6, 2012)*

#### 요약

밀폐 공간 내의 천연가스 공급 시스템에서 가스 누설에 따른 재난을 방지하고 보다 안전한 설계를 하기 위해서는 누출된 천연가스의 확산거동을 이해하고 예측할 수 있는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 CFD를 사용한 해석법을 제시하고, 기 수행된 British Gas Technology Co.의 실험결과와 비교하여 타당성을 제시하였다. 노즐에서의 분출유량 2D 해석 결과는 실험결과와 2.6% 이내로 잘 일치함을 보였다. 또한, 다양한 강제 환기 조건에 따른 가스 확산 특성을 비정상상태 3차원 CFD 해석을 수행한 결과 실험결과와 정성적인 경향이 잘 일치됨을 보였다.

**Abstract** - The basic understanding of gas diffusion and technology to predict the diffusion phenomena are needed to prepare against a disaster of leakage of natural gas and to design better consistent and reliable gas supply system in enclosure. The experimental results of British Gas Technology Co. are used in present study as a reference of theoretical study using CFD. The present results of 2D CFD analysis for mass flow rate of nozzle release show good agreement with experimental results within 2.6 % error. 3D CFD analysis for the characteristics of natural gas diffusion in enclosure with various ventilation patterns also gives reasonable agreement with experimental results.

**Key words** : diffusion, natural gas leak, enclosure, ventilation, CFD

#### I. 서론

최근 기후환경 문제와 에너지 자원 고갈에 따른 청정 대체 에너지의 관심이 커짐에 따라서 천연가스와 수소 등 가스의 사용이 크게 증가하고 있다. 특히 천

연가스는 공해물질을 거의 발생 시키지 않는 청정연료로 발열량이 높고, 무독성이며, 비중이 공기보다 낮아 대기 중으로 잘 확산됨으로 폭발의 위험이 적은 특징이 있어 그 수요가 날로 커지고 있으며 천연가스 공급시설 또한 크게 증대되고 있다. 그러나 천연가스는 높은 압력으로 공급되기 때문에 지하에 설치된 공급관리소와 같은 밀폐공간에서 누출 또는 고

†주저자:twaha@gachon.ac.kr

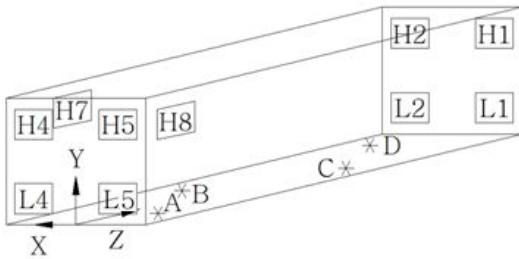


Fig. 1. Schematic diagram of test enclosure [7].

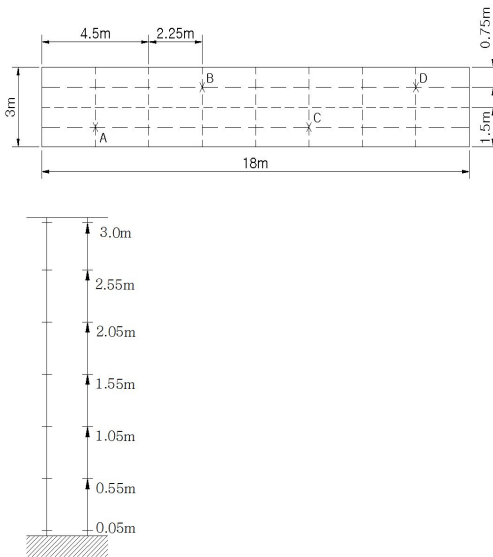


Fig. 2. Horizontal position of mobil stands and vertical array of gas detector [7].

압분출이 일어날 경우 빠른 시간 내에 처리되지 않으면, 상부에 누적되고 폭발의 위험성이 있어 적절한 환기 설비 및 가스탐지기 설치 등 안전성 확보가 매우 중요한 문제로 인식되고 있다.

가연성 가스나 독성 가스의 누출 또는 고압분출이 발생할 경우 큰 사고의 위험이 따르기 때문에 이들 가스의 누출 시 확산 거동 특성 규명을 위한 많은 이론적 연구와 실험적 연구가 진행되어 왔다. Gogan[1]은 고밀도 가스확산 예측을 위해 부력효과를 고려한 입자 모델을 제시하였으며, Gopalakrishnan etc.[2]은 기존의 Gaussian 방법보다 더 정교한 Lagrangian particle model을 제안하였다. 최근 대체 에너지로 각광을 받고 있는 수소에 대하여 Takeno etc.[3]은 고압 수소저장용기에서 수소 누설 시 수소 확

산에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, Liu etc.[4]은 수소확산에 대한 수치해석 모델을 제시하고 Takeno etc.[3]의 실험결과와의 비교를 통해 타당성을 입증하였다. Mukai etc.[5]은 터널, 지하주차장, 다층식 주차장에서 수소연료 자동차의 수소연료 누설 시 수소 확산 특성에 의한 위험도를 분석하였으며, Ahn etc.[6]은 터널 내부공간에서 수소 누설로 인한 수소 확산분포를 이론적으로 예측하였다. 청정 연료로 수요가 커지고 있는 천연가스에 대하여 Darbr etc.[7]은 실험 규모 실험공간에서 고압가스 분출 시 환기형태와 가스의 분출조건에 따른 천연가스 농도 분포를 측정된 실험 결과를 제공 하였다. 또한, Ha etc.[8]는 지하 공급관리소 내에서 고압의 천연가스가 분출되었을 때 확산분포를 전산해석으로 예측하고 환기시스템의 효율성을 검증하였다.

본 연구에서는 밀폐공간과 환기공간에서 천연가스가 고압분출될 때 안전성 확보를 위해 필요한 정보인 천연가스의 확산거동 특성을 이론적으로 규명하기 위해서 CFD 상용패키지인 FLUENT[9]를 사용하여 해석법을 제안하고 기 발표된 Darbr etc.[7]의 실험결과와 비교 분석을 통해 해석의 타당성을 제시 하고자 한다.

## II. 실험장치와 실험방법

본 연구는 1997년에 한국가스공사, 일본의 오사카 가스, 동경가스와 영국의 British Gas Technology Co. (이하 BG)가 공동으로 참여하여 수행된 3개국 국제 공동연구[7] 결과에 기초하는 데, 실험 규모 공간 내에 천연가스가 고압으로 분출될 때, 천연가스가 확산되는 거동을 추적하는 실험이었다. 천연가스는 공기대비 밀도가 0.5 정도로써 가벼운 기체이므로 천연가스 확산 거동에서는 부력의 영향이 크게 미친다. 따라서, 실제규모의 large scale 에서 실험이 이루어져야만 확산거동을 제대로 파악할 수 있으므로, 넓은 공간이 필요하고 폭발물질을 다루므로 실험을 수행하기가 쉽지 않다. 따라서 BG 실험에서 얻어진 데이터는 그 희소성에서 가치가 크다.

Fig. 1. 에 나타난 것처럼 3 m × 3.05 m × 18 m의 직육면체 실험 규모 공간에 완전밀폐 경우와 강제환기가 주어지는 경우에 대하여 다양한 인자의 조합 (가스분출압력, 분출 높이, 분출방향, 환기구의 위치, 강제환기의 세기 등)에 변화를 주면서, 천연가스의 확산거동에 어떤 인자가 어떻게 영향을 미치는지를 찾아보는 것이 실험의 목적이었다. 한 쪽 면에 위치한 4개의 환풍구 L1, L2, H1과 H2 에 부착된 환풍구로부터 공기가 인입되며, 반대편에 위치한 4개의 환풍구

**Table 1.** Cases of analysis for unventilated conditions

Case	Release Pressure(bar)	Release Height(Y) (m)
GBR001	35	2.745
GBR002	7	2.745
GBR005	7	1.525

**Table 2.** Cases of analysis for ventilated conditions

Case	Ventilation Condition		
	Pattern	Inlet	Outlet
GBR030	Up ward	L1,L2	H4,H5
GBR031	Lower Crossflow	L1,L2	L4,L5
GBR047	Down ward	H1,H2	L4,L5
GBR049	Upper Crossflow	H1,H2	H4,H5

L4, L5, H4 와 H5 는 배출구로 작용한다. 환기구는 모두 0.2 m × 0.25 m 크기로써, 모서리로부터 0.1 m, 천장과 바닥으로 부터는 0.15 m 떨어져 위치한다. 천연가스는 200 bar 까지의 압력으로 노즐로 분출될 수 있는데, 9.5 mm 직경의 flexible hose를 통하여 공급된다. 공간의 내부 정 가운데 지점에 노즐이 위치하며, 분출높이는 조절이 될 수 있고, 가스농도는 4개의 이동 가능한 A, B, C와 D stand 에서 측정되며, Signal Instruments Model 3000 Series Total Hydrocarbons Analyzer를 사용했다. Fig. 2.에 나타낸 것처럼 각 stand 에는 7개의 농도감지기가 수직방향으로 차례로 부착되어 있어서 모두 28개 (4 × 7)에서 측정 이루어진다.

BG에서 수행한 여러 조합의 수백 개 case 중에서, 강제환기가 없는 완전밀폐공간에서의 가스확산 실험에 대하여서는 본 논문에서 Table 1에 나타낸 3가지 경우를 해석대상으로 하였다. 이 3가지 경우는 노즐 직경이 0.73 mm, 분출방향이 윗방향(up right)으로 같으며, 분출압력, 분출높이(release pressure, release height)에 따른 가스 확산 특성을 잘 이해할 수 있는데 3차원 CFD 해석을 수행하고 실험결과와 비교하고자 한다. 또한 BG 에서 수행한 강제환기 조건에서의 실험으로는 Table 2에 나타낸 4가지 경우를

해석대상으로 하였다. 이는 GBR001의 실험조건과 동일한 천연가스 분출조건에서 환풍구 인입 유속은 1 m/s로 4가지 환기방식(upward ventilation, downward ventilation, upper crossflow ventilation and lower crossflow)에 따른 가스 확산 특성을 잘 이해할 수 있으며, 3차원 CFD 해석과 실험결과를 비교하고자 한다.

BG 의 실험은 쉽게 구현할 수 없는 실험환경에서 이루어진 가치 있는 자료를 제공하지만, 가스검지기 로 측정된 다수의 점에 대한 정보만 주어진다. 경향을 파악하는 데는 어느 정도 도움을 주지만, 전체적 거동에 대한 3차원적의 연속적 정보는 제공하지 못하는 한계가 있다. 따라서 전체적 거동을 연속적으로 파악하기 위한 CFD 해석이 유용하고, 실험결과와의 비교검증이 필요하게 된다.

### III. 전산해석 및 결과

#### 3.1 노즐 부근 영역에서의 유동장해석

BG 실험에서 노즐을 공간의 중앙에 설치하고 고압의 천연가스를 공급하여 일정한 유량을 분출시켰는데 Fig. 3과 같은 형상의 노즐을 사용하였다. 본 절에서는 공급압력에 따른 누출 유량을 이론적으로 예측하기 위해서 FLUENT를 사용한 2차원 CFD 해석을 먼저 수행하고 그 결과를 실험결과와 비교 하였으며, 이는 다음 절에서 수행할 천연가스 확산 해석 시 노즐을 통한 분출유량의 경계조건으로 활용하는데 있어 필수적이다.

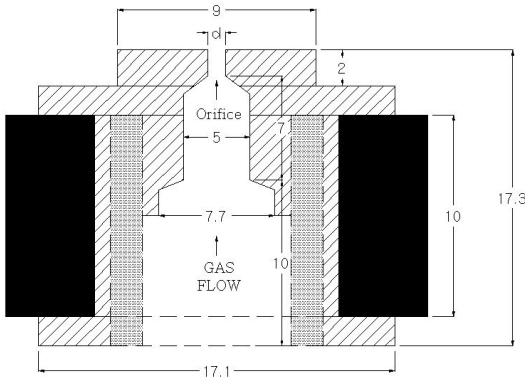
노즐의 직경 d는 0.73 mm 이고, 상온의 천연가스가 7 bar와 35 bar로 공급되었는데, 천연가스 성분조성은 메탄 CH<sub>4</sub> 90 %, 에탄 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 7 %, 프로판 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 3 %으로 가정하였다. 노즐유동은 axi symmetric 조건을 만족하므로 2차원 해석으로 충분하고, 노즐 내부와 노즐 출구부의 반쪽만을 계산 영역으로 설정하였다. 노즐 출구 부는 반경방향 40 mm × 길이방향 300 mm를 계산영역으로 설정하였으며 grid 수에 따른 수렴성(convergence test)을 검토하여 21,404개의 격자를 만들었으며, 노즐 중심부에는 GAMBIT[9]을 사용하여 보다 더 조밀하게 생성하였다.

노즐유동은 실험 중에 계속적으로 일정량이 분출되므로 정상상태(steady state)로 취급될 수 있어, FLUENT V6.3[9]를 사용한 정상상태 해석을 수행하였고 k-ε 난류모델을 사용하였다. 해석을 위한 초기 경계조건으로 노즐내부 압력은 7 bar 또는 35 bar, 노즐 외부 압력은 대기압, 노즐 내부 온도는 295 K, 노즐 외부 온도는 290 K로 설정하였다.

Table 3는 공급압력이 7 bar와 35 bar일 경우의

**Table 3.** Comparison of mass flow rate of nozzle between 2D CFD analysis and experiment

d mm	P <sub>m</sub> bar	Mass flow rate ×10 <sup>-3</sup> kg/s		Error %
		Exp.	CFD	
0.73	7	.509	.497	2.3
	35	2.29	2.23	2.6



**Fig. 3.** Section of natural gas release nozzle (unit : mm)[7].



**Fig. 4.** Velocity profile with 35 bar supply pressure at the nozzle exit(unit : m/s).

노즐 분출 유량에 대한 실험결과와의 비교를 나타내고 있다. 2D CFD 해석결과는 분출유량에 있어, BG 실험결과와 2.6 %이내의 오차로 잘 예측되고 있음을 보여주었다. Fig. 4는 공급압력이 35 bar일 경우의 속도분포 해석 결과이며, 노즐출구 부근에서 급격한 속도변화를 보여주고 있다.

### 3.2. 밀폐공간에서의 확산분포 3차원 해석

노즐로부터 계속 분출되는 천연가스의 시간에 따른 확산 현상에 대한 수치해석에서는 유체유동 및 가스의 농도거동을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 유체 유동 및 가스의 거동을 고려하기 위하여 FLUENT V6.3[9]을 이용하여 비정상상태의 질량보존식 (Eq.(1)), 운동량 보존식 (Eq.(2)) 및 에너지 보존식(Eq.(3))을 사용하였다. 또한 천연가스의 거동을 모사하기 위하여 종보존식 (Eq(4))을 사용하고, 부력효과를 고려하기 위하여 Boussinesq모델을 적용하였다. 천연가스를 이상기체로 가정하고 난류 유동 해석을 위해서 Realizable k-ε 모델을 사용하였으며 Intel Xeon 3.2GHz × 2 CPU, 8 GB RAM의 Microsoft Windows Server PC를 사용하여 계산을 수행하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = S_m \quad (1)$$

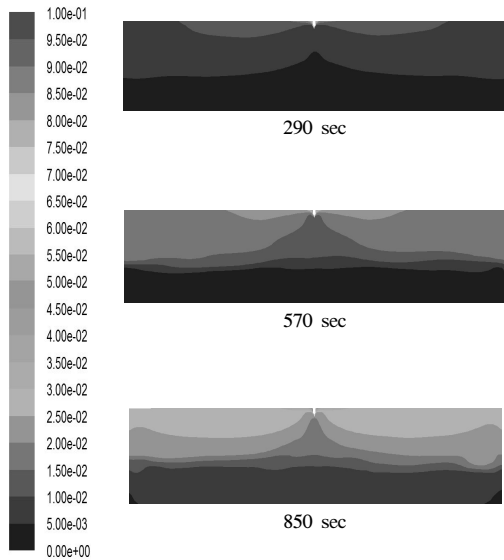
$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j h)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_h \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho m)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j m)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma \frac{\partial m}{\partial x_j} \right) + S_m \quad (4)$$

여기서 사용된 기호는 각각, F<sub>i</sub>는 외력(force), g<sub>i</sub>는 가속도, h는 엔탈피(enthalpy), k는 열전도율(coefficient of thermal conductivity), m은 mass fraction, S<sub>m</sub>은 mass source term, S<sub>h</sub>는 enthalpy source term, t는 시간, u<sub>j</sub>는 j성분 속도(velocity of j direction), x<sub>j</sub>는 좌표계(coordinate), ρ는 밀도(fluid density), μ는 점성계수(fluid viscosity), Γ는 확산계수(diffusion coefficient)를 나타낸다.

3 m × 3.05 m × 18 m의 공간에 Table 1과 Table 2에 제시된 조건에 따라 노즐 위치와 방향을 설정하고 해석을 위한 격자를 생성하였다. 이 때, 노즐의 단면(d=0.73 mm)은 공간의 최장변인 18m와 비교할 때 무척 작고 또한 본 해석에서는 노즐로부터 분출된 천연가스가 공간에 어떻게 확산되는지가 관심 사항임으로 노즐의 형상은 크게 중요하지 않고 노즐 분출 유량이 중요하다고 볼 수 있다. 따라서 노즐 위치에 편의상 노즐 단면 크기의 가상 실린더를 형성하고 노즐 단면에 형성된 격자에 3.1절에서 계산한

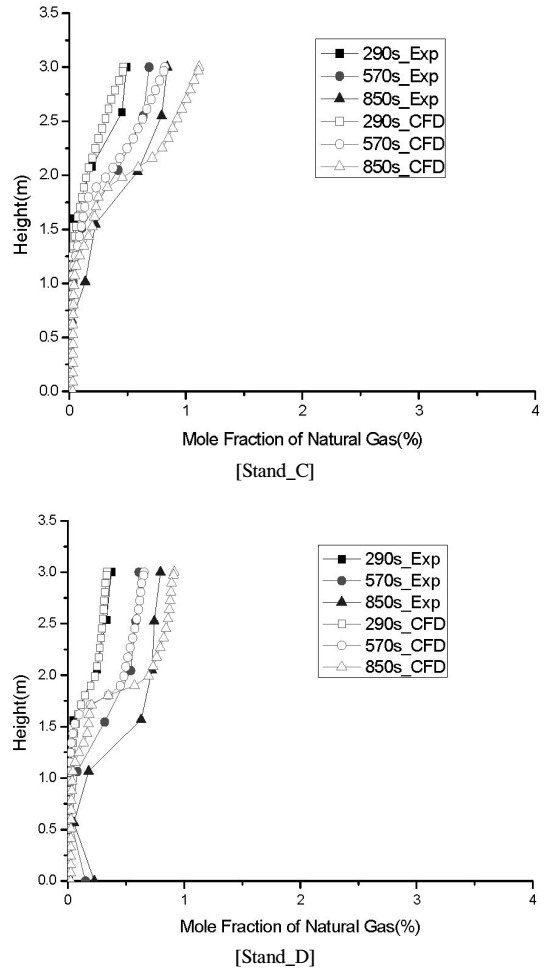


**Fig. 5.** 3D CFD results of natural gas concentration for GBR001 case.

분출 유량을 갖도록 속도를 경계조건으로 부여하였다. grid수에 따른 수렴성(convergence test)을 검토하여 239,181개의 hexahedral grid를 생성하였다. 환기구는 모두 닫아놓음으로 완전밀폐공간의 경계조건을 만들었다. 시간 경과에 따라 확산 거동을 보기 위하여 비정상상태 실험의 CFD 해석을 수행하여, 천연가스의 분출이 시작된 후 290 초, 570 초와 850 초 시점에서 각 농도측정 위치에서의 천연가스 농도를 계산하였다. 공간에서의 천연가스 농도는 메탄 CH<sub>4</sub>, 에탄 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, 프로판 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>의 mole fraction 합을 퍼센트로 나타내었다.

Fig. 5는 강제 환기가 없고 노즐이 공간의 중간 위치에서 천정 부근인 2.745 m 높이에 설치되며 천장을 향해 0.00223 kg/s의 유량으로 누출되는 GBR001 경우에 대하여 시간 경과에 따른 농도분포의 3D CFD 결과이다. 3D 해석 결과의 표현상 어려움 때문에 Fig. 5는 X=0에서 Y-Z 단면의 농도 분포를 보이고 있다. 천연가스는 공기에 의한 부력에 의해 상승하는 특성을 가짐으로써 상층부로부터 점차 층을 이루며 아래쪽으로 농도가 짙어지는 과정을 잘 보여주고 있다. 또한 밀폐 공간의 중앙에 노즐이 위치함으로 농도가 노즐을 중심으로 대칭을 나타내고 있다.

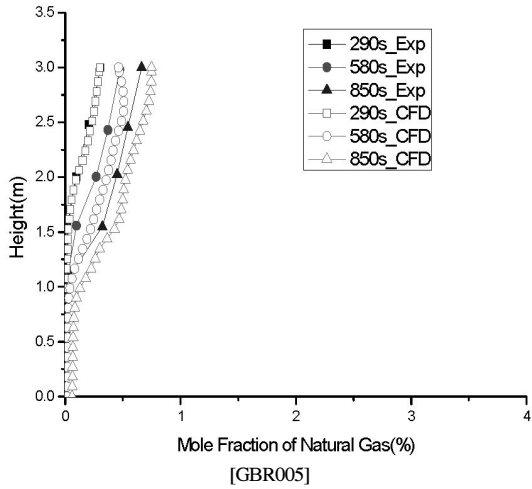
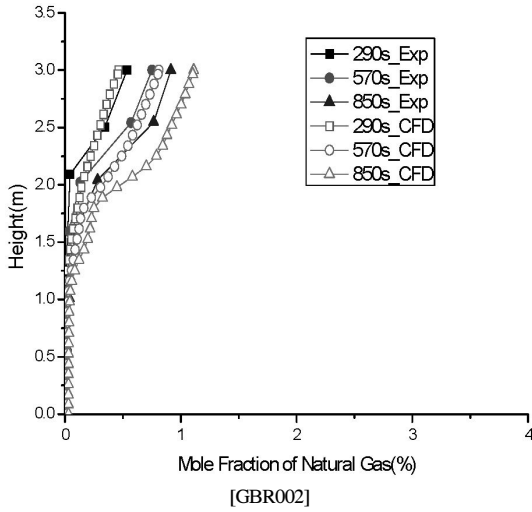
Fig. 6은 GBR001의 경우와 노즐 설치 조건이 동일하나 노즐의 누출 유량이 0.000497 kg/s인 GBR002 경우에 대하여 stand\_C와 stand\_D에서 농도분포의



**Fig. 6.** Comparisons of natural gas concentration between 3D CFD results and experimental results for GBR002.

3D CFD 결과와 BG의 실험결과를 비교하고 있다. CFD 해석결과는 실험결과와 정성적인 경향이 잘 일치됨을 보여주고 있으며 시간이 경과됨에 따라서 실험결과와의 오차가 커짐을 보였다. 시간이 경과됨에 따라서 상층부부터 농도가 짙어짐을 보여주고 있으며, 누출된 천연가스가 천정벽에 부딪혀 내려오므로 노즐에서 가까운 위치에 있는 stand\_C에서 보다 모서리의 2개의 벽 가까이 위치 한 stand\_D에서 농도가 더 빨리 아래로 확산됨을 보여주고 있다.

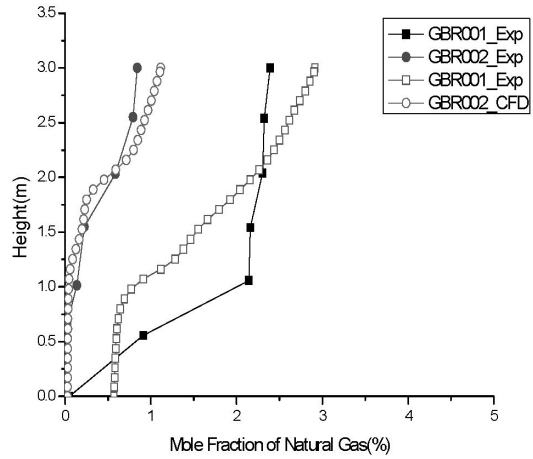
Fig. 7은 GBR002와 GBR005 경우에 대하여 stand\_B에서 천연가스 농도분포의 3D CFD 결과와 BG의 실험결과를 비교하고 있다. GBR002는 노즐 설치 높이가



**Fig. 7.** Comparisons of natural gas concentration between 3D CFD results and experimental results for nozzle height.

2.745 m로 GBR005의 1.525 m 보다 높기 때문에 시간이 경과됨에 따라서 상층부의 농도는 GBR002의 경우가 더 짙게 확산되며, 하층부로의 확산은 GBR005의 경우가 빠르게 진행됨을 보여주고 있다. 3D CFD 결과는 비교적 실험결과와 정성적인 경향이 잘 일치됨을 보여주고 있으며, 실험 측정에 의한 몇 개의 점에서의 농도로는 파악할 수 없는 전체 공간상에서의 농도분포를 가시적으로 잘 보여주고 있다.

Fig. 8은 GBR001과 GBR002 경우에 대하여 stand\_C에서 850 second 경과 후 천연가스 농도분포의 3D CFD



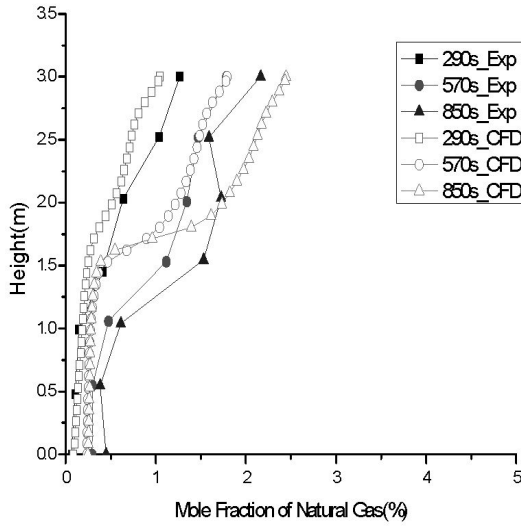
**Fig. 8.** Comparisons of natural gas concentration between 3D CFD results and experimental results for different nozzle supply pressure.

결과와 BG의 실험결과를 비교하고 있다. GBR001은 노즐 공급압력이 35 bar로 누출 유량이 0.00223 kg/s 이고 GBR002는 노즐 공급압력이 7 bar로 GBR001 보다 낮아 누출 유량이 0.000497 kg/s 이다. GBR001의 경우에 대하여 3D CFD 결과는 850 second 후 천연가스가 바닥 부분 뿐 만 아니라 전체 높이에 대하여 확산됨을 보여주고 있으며, GBR002의 경우는 해석결과와 실험결과가 정성적으로 잘 일치되고 있음을 보였다. 가스 누출 압력이 높을수록 가스 농도가 더 짙어지며 하층부까지 빨리 확산됨을 알 수 있다.

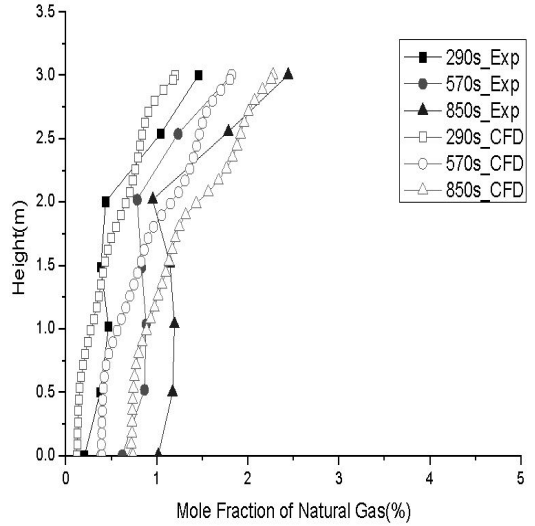
### 3.3. 환기가 주어지는 경우의 농도거동 3차원 해석

환기조건은 inlet 환기구에 1 m/s의 속도로 공기가 유입되고, outlet 환기구는 단순히 대기로 열려있는 것으로 경계조건을 부여하였다.

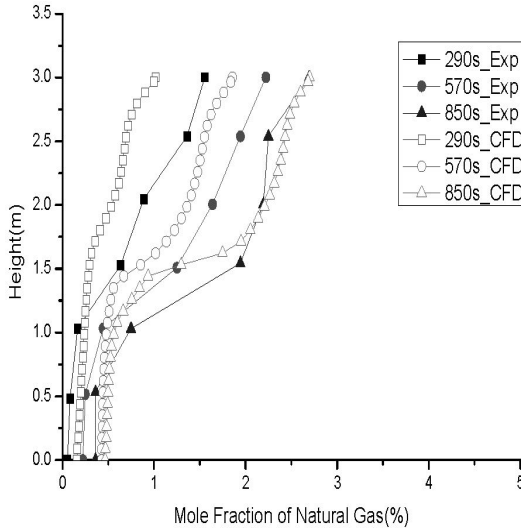
Fig. 9~Fig. 12는 Table 2에 제시된 4가지의 환기 패턴, upward(GBR030), lower crossflow(GBR031), downward(GBR047) and upper crossflow(GBR049)에 대하여 stand\_C에서 시간이 경과됨에 따른 천연가스 농도분포의 3차원 CFD 결과와 BG의 실험결과를 비교하고 있다. 3차원 CFD 해석 결과는 일부 실험결과와 차이를 보이긴 하지만, 시간 경과에 따라 천연가스 농도가 증가하며 환기방식에 따른 높이방향의 천연가스 농도 분포의 경향을 비교적 잘 예측하고 있음을 보여주고 있다. Upward(Fig. 9)와 lower crossflow(Fig. 10) 환기 패턴의 경우에는 하층부의 천연가스 농도가 낮게 되는 특성을 보였으며, downward(Fig. 11)와 upper crossflow(Fig. 12) 환기 패턴의



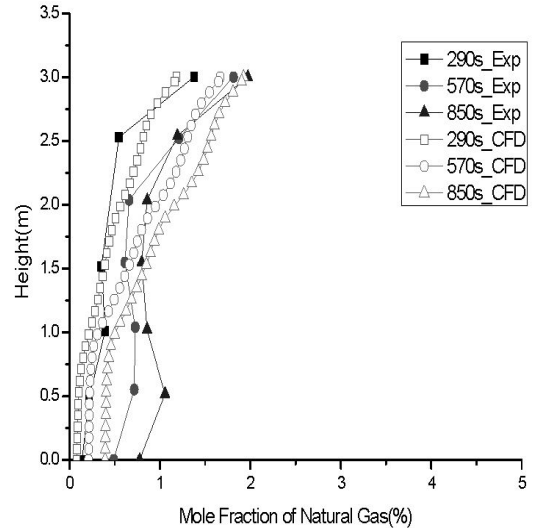
**Fig. 9.** Comparisons of natural gas concentration between 3D CFD results and experimental results for GBR030.



**Fig. 11.** Comparisons of natural gas concentration between 3D CFD results and experimental results for GBR047.



**Fig. 10.** Comparisons of natural gas concentration between 3D CFD results and experimental results for GBR031.

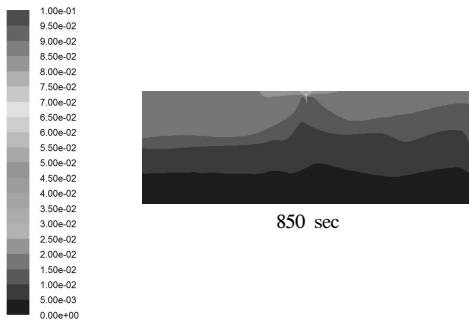


**Fig. 12.** Comparisons of natural gas concentration between 3D CFD results and experimental results for GBR049.

경우에는 층간 농도차가 적어지는 경향을 보였다.

가스 누출 후 850 second 경과 시 upper cross-flow 환기 패턴(Fig. 12)에서 최대 천연가스농도가 2% 이하로 떨어져 가장 환기 효율이 좋은 것을 알 수

있었으며, 천연가스의 특성상 모든 환기 패턴에 대하여 천정부근에서 최대의 농도 분포를 보이기 때문에 안전상 설치되는 가스 검출기의 위치는 천정부근이 바람직함을 확인시켜 주고 있다. Fig. 13은 upper



**Fig. 13.** 3D CFD results of natural gas concentration for upper crossflow ventilation pattern of GBR049.

crossflow 환기 패턴(GBR049)의 경우 가스 누출 후 850 second 경과 후 농도 분포의 3차원 CFD 결과를 보여주고 있다. 3D 해석 결과의 표현상 어려움 때문에 Fig. 13은 X=0에서 Y-Z 단면의 농도 분포를 보이고 있다. 오른쪽 상부에 위치한 inlet 환기구에서 1 m/s의 속도로 공기가 유입되어 왼쪽 상부에 위치한 outlet 환기구로 배출됨으로 상부에 축적된 천연가스가 효과적으로 배출되어 2% 이하의 농도로 열어지며 공기가 유입되는 오른쪽의 농도가 더 열게 되는 특성을 보여주고 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 실규모 공간에서 천연가스가 분출될 때 안전성 확보를 위해 필요한 정보인 천연가스의 확산 거동 특성을 이론적으로 규명하기 위해서 상용 CFD 패키지인 FLUENT[9]를 사용하여 해석법을 제안하고 기 발표된 British Gas Technology Co.[7]의 실험결과와 비교 분석을 통해 해석의 타당성을 제시하고자 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 공급압력에 따른 노즐의 분출 유량을 해석하기 위하여 정상상태(steady-state)의 2차원 CFD 해석을 수행한 결과 누출 유량은 2.6 % 이내로 실험결과와 잘 일치함을 보였다.
2. 강제환기가 없는 밀폐공간에서 노즐의 분출압력, 분출높이에 따른 가스 확산 특성을 비정상상태(unsteady-state)의 3차원 CFD 해석을 수행한 결과 실험결과와 정성적인 경향이 잘 일치함을 보였다. 그러나 밀폐공간에서의 자연대류에 의한 농도분포는 가스분출 유량이 많아지고, 경과시간이 길어지면 실험결과와의 오차가 커질 수 있다.

3. 4가지 강제환기 조건(upward ventilation, downward ventilation, upper crossflow ventilation and lower crossflow)에 따른 가스 확산 특성을 비정상상태(unsteady-state)의 3차원 CFD 해석을 수행한 결과 일부에서 실험결과와 오차를 보이지만, 시간 경과에 따라 천연가스 농도가 증가하며 환기방식에 따른 높이방향의 천연가스 농도 분포의 경향이 정성적으로 잘 예측됨을 보여주었다.

4. 천연가스의 특성상 upper crossflow 환기 패턴이 공간내의 천연가스농도를 가장 낮게 떨어뜨려 환기 효율이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 천정부근에서 최대의 농도 분포를 보이기 때문에 안전상 설치되는 가스 검출기의 위치는 어떤 환기 패턴에 대하여도 천정부근에 설치함이 바람직함을 보여주었다.

본 연구에서 제시한 FLUENT를 사용한 천연가스 누출에 따른 확산 예측은 실험결과와 대체적으로 정성적인 경향이 잘 일치됨을 보여 천연가스를 취급하는 다양한 공간에서의 안전성 확보를 위한 설비 설계 시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2011년도 가천대학교 교내연구비 지원에 의한 결과임.(GCU-2012-R040).

#### 참고문헌

- [1] Gogan, J. L., 1985, "Monte Carlo Simulation of Buoyant Dispersion," Atmospheric Environment, Vol. 19, pp. 867-878.
- [2] Gopalakrishnan, S. G. and Sharan, M., 1997, "A Lagrangian Particle Model for Marginally Heavy Gas Dispersion," Atmospheric Environment, Vol. 30, pp. 3369-3382.
- [3] Takeno, K., Okabayashi, K., Kouchi, A., Nonaka, T., Hashiguchi, K. and Chitose, K., 2007, "Dispersion and Explosion Field Tests for 40 MPa Pressurized Hydrogen," International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, Issue 13, pp. 2144-2153.
- [4] Liu, Y. L., Zeng, J. Y., Xu, P., Zhao, Y. Z., Bei, H. Y., Chen, H. G. and Dryver, H., 2009, "Numerical Simulation on the Diffusion of Hydrogen due to High Pressured Storage Tanks Failure," Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 22, pp. 265-270.
- [5] Mukai, S., Sujuki, J., Mitsuishi, H., Oyagawa,



- K. and Watanabe, S., 2005, "CFD Simulation of Diffusion of Hydrogen Leakage Caused by Fuel Cell Vehicle Accident in Tunnel, Underground Parking Lot and Multistory Parking Garage," The 19th Int'l Technical Conference on The Enhanced Safety of Vehicles(ESV), Paper No. 05-0293.
- [6] Ahn, H. J., Jung, J. H., Hur, N., Lee, M. K. and Yong, G., 2010, "The Numerical Simulation of Hydrogen Diffusion for The Hydrogen leakage in Tunnel," Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 47-54.
- [7] Darbr, S. and Pool, G, 1997, "An Experimental Study of Natural Gas Accumulation Following High and Low Pressures Releases Under Ventilated and Unventilated Condition," BG plc Gas Research & Technology Centre, GRTC R 1811.
- [8] Ha, J. M., Lee, J. W. and Sung, W. M., 2002, "Investigation of Ventilation Efficiency for the Natural Gas High Pressure Release in an Underground Valve Station', Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 6, No. 1, pp. 74-80.
- [9] FLUENT User Guide v6.3, GAMBIT User Guide v2.3.