Proceedings of
The 5th National Congress on Fluids Engineering
March 26-28. 2008, Jeju, Korea

가스보일러 배기통 이탈에 의한 CO가스 누출확산 실험 및 수치해석

강승규*, 최경석**, 윤준용***

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL PREDICTION OF CONCENTRATION OF CARBON MONOXIDE GAS RELEASED FROM EXHAUST TUBE OF GAS BOILER

Seung-Kyu Kang*, Kyung-Suhk Choi**, Joon-Yong Yoon***

Key Words : *가스보일러(Gas Boiler), 일산화탄소 중독(Carbon Monoxide Poisoning), 가스누출 확산(Spread of Released Gas), 전산유동해석(CFD), 농도측정시험(Concentration Measuring Test)*

Abstract

In the last five years, 45 people died and 104 were wounded because of carbon monoxide poisoning accident. CO poisoning accident is higher than any other gas accident in the rate of deaths/incidents. Most of these CO poisoning accidents were caused by defective exhaust tube in the old gas boiler and multi-use facility. In this study, the spread of CO gas released from leakage hole of exhaust tube was analyzed by computational flow modeling and concentration measuring test. CO gas leaked form exhaust tube in a building was highest concentrated near the ceiling and formed the circular currents along the walls. Through these experiments and simulation, the reasonable installation location of CO alarm was made certain and suggested.

1. 서 론

최근 5년(2002년~2006년)간 가스보일러 사고는 전체사고의 7.5%를 점유하고 있으며, 2004년에는 증가세를 보이다 2005년 이후로 감소세로 반전되고 있다. 가스사고 중 전체 CO중독 사고는 45건이고, 이 중 보일러에 의한 CO중독사고가 34건으로 76%를 차지하여 CO중독 사고는 대부분 보일러에 의해 발생하고 있다. 가스사고에 의한 최근 5년간 사망자 수는 89명인데, 그 중 36명이 보일러 CO중독에 의한 사망으로 전체 사망자의 40%를 차지한다. 이는 사고건 수는 전체 가스사고에서 차지하는 비중이 크지 않지만 인명피해율(사망자수/사고건수)은 매우 높다는 것을 말해준다. 전체 가스사고에 대한 인명피해율은 0.16인데 반해, CO중독 사고에 의한 인명피해율은 1.01로 6.3배나 높은 사망률을 보이고 있어, 매우 중대한 가스사고로 분류되고 있다. 가스보일러 사고를 원인별로 분석하여 보면, 배기통 설치기준 미준수에 의한 사고가 35%, 배기통 연결부 이탈에 의한 사고가 30%, 그 밖의 제품불량 및 기타가 35%를 차지하고 있다. 결국 가스보일러 사고의 65%가 배기통 불량 설치 및 관리소홀로 인한 사고임을 확인할 수 있다.[1] 이와 같은 배기통에 의한 가스누출로 인해 CO중독 사고가 발생하고 있으며, 건축물 내부에 CO경보기를 설치하여 가스누출을 경고하여 준다면 치명적인 인명피해를 사전에 예방할 수 있다.

일본에서는 LP가스분야의 경우 '93년 이후 경보기 보급률이 90%를 넘어서면서 가스사고에 의한 인명피해율이 현저히 감소하였다. '81년부터 '92년 까지 LP가스 사고에 의한 연간 사망자 수가 50~30명 수준이었다가, 경보기 설치가 일반화 되면서 사망자 수는 10명 이내로 감소하게 된다. 2004년 기준으로 보면 사고건수는 105건 발생하였으나, 사망자수는 2명으로 인명피해율이 0.02로 매우 낮은 수준을 보이고 있다. 2004년 국내 상황과 비교하면 국내는 인명피해율 0.22로 일본에 비해 11배나 높은 인명피해율을 보이고 있다. 도시가스분야의 경우 2000년 이후 경보기 보급이 40%수준을 유지하고 있으며, 사망자 수는 한해 5명 이내 수준으로 발생하고 있다. 경보기 설치가 미진했던 '80~'90년대 한해 70~20명의 사망자 수를 보이던 것에서 인명피해가 급격히 감소하였다.[2]

국내에서는 CO중독 사고에 의한 피해가 매년 발생하고 있고, 이로 인해 상당한 인명피해가 발생하고 있으나 현재까지 불완전연소가스 경보기 설치에 대한 기준이 마련되어 있지 않은 상황이다. 고압가스안전관리기준통합고시[3]에서는 가연성가스와 독성가스에 대해서만 가스누출검지경보장치의 설치기준을 정하고 있다. 따라서 본 연구는 심각한 인명피해를 초래하는 CO중독 사고의 예방을 위하여, 연소기 설치건물 내부에 CO경보기를 설치하도록 하는 불완전연소가스 검지장치에 대한 설치기준을 마련하고자 한다. 가스누설 경보기는 누설가스의 특성에 따라서 적정한 설치위치를 결정해야 한다. 본 연구에서는 전산유동해석기법과 CO센서 및 경보기 설치실험을 통해서, 배기구에서 누출된 불완전연소가스(CO)의 누출확산 메커니즘을 해석하고 CO경보기의 적정설치 위치를 제안하고자 한다.

2. 연소이론

연료 중의 모든 탄소, 수소 및 그 외의 산화 가능한 원소를 완전연소 시키기에 충분한 산소를 공급하기 위해 필요한 최소 공기량을 이론 공기량이라고 한다. 이론 공기량으로 완전연소 시켰을 경우에 생성물에는 산소가 남아있지 않다. 따라서 탄화수소 연료와 공기의 일반적인 연소 반응식은 다음과 같다.

$$C_xH_y + \nu_{O_2}(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow \nu_{CO_2}CO_2 + \nu_{H_2O}H_2O + \nu_{N_2}N_2 \quad (1)$$

여기서 각 물질의 계수를 양론계수(stoichiometric coefficient)라하

* 한국가스안전공사 연소기연구팀, skkang@kgs.or.kr
** 한국가스안전공사 연소기연구팀, kschoi@kgs.or.kr
*** 한양대학교 기계공학과, joyoon@hanyang.ac.kr

고, 이론 공기량은 다음과 같은 원자 균형식으로 구한다.

C : $\nu_{CO_2} = x$

H : $2\nu_{H_2O} = y$

N_2 : $\nu_{N_2} = 3.76 \times \nu_{O_2}$

O_2 : $\nu_{O_2} = \nu_{CO_2} + \nu_{H_2O}/2 = x + y/4$

따라서 연료 1 mole 당 공기의 총 몰 수는 다음과 같다.

$$n_{air} = \nu_{O_2} \times 4.76 = 4.76(x + y/4) \quad (2)$$

이 공기량이 100% 이론 공기량이다. 실제로는 공급 공기량이 이론 공기량보다 얼마간 많지 않으면 완전 연소를 이루기 어렵다. 연료와 공기의 비를 나타내기 위해 사용되는 중요한 변수가 공기연료비(AF)이다. 이는 대개 질량기준으로 표현하지만 때로는 몰 비로 표현하는 경우도 있다.[4]

$$AF_{mass} = \frac{m_{air}}{m_{fuel}} \text{ 또는, } AF_{mole} = \frac{n_{air}}{n_{fuel}} \quad (3)$$

연료를 완전연소 시키기 위해서는 실제로 20~50% 정도의 과잉공기가 필요한데, 이는 이론 공기량만으로는 노즐로부터 분출하여 연소하기까지 공기와 가스가 완전히 혼합하지 않기 때문에 완전연소 시킬 수 없어, 불완전연소를 방지하기 위해 과잉공기를 공급하게 된다. 연소기에서 발생되는 배기가스 생성물 중 CO가 발생하는 원리와 요인은 많은 요소가 있으나 흔히 발생할 수 있는 경우는 다음과 같다.[5]

(1)화염형태에 따른 CO발생

Fig.1은 연소조건에 따른 불꽃의 형태를 나타낸 것이다. (a)는 각 부분의 명칭을 나타내며, 혼합연료의 분출속도와 연소속도가 균형을 이룰 때 (c)와 같이 안정된 형태가 나타나게 된다. 1차 공급 공기량의 변화로 인하여 이러한 균형이 깨지게 되면 불완전연소가 되어 다음과 같은 현상이 일어나고 CO가 발생하게 된다.

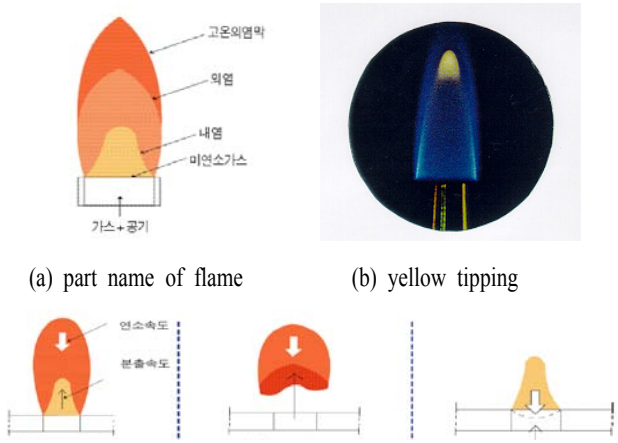
① 황염 (yellow tipping): 불꽃의 선단이 적황색인 상태를 황염이라 한다.[Fig.1(b)] 이는 연소반응 중에 탄화수소가 산화하면서 탄소입자가 발생하여 이것이 고온의 열에 의해 적열되어 황색화염을 내는 것으로 불완전 연소반응 조건이다. 이 현상은 1차 공기가 부족할 경우 유리탄소(free carbon)가 많아지고 황염의 불완전 연소상태가 된다.

② 비화염(lift flame): 비화 현상은 Fig.1(d)처럼 연소속도가 늦은 경우, 가스 또는 1차 공기 중 어느 것이든지 과다하게 되면 분출속도가 빨라져 염이 버너의 염공(SLIT)으로부터 불꽃의 날림 현상이 발생하게 되는데 이것을 비화염이라 한다. 이 경우 혼합가스(가스+1차공기)는 내염표면을 통과하여 외염 및 그 부근에서만 부분산화가 일어나므로 CO가 발생한다.

③ 역화(flash back): 분젠 버너형 연소기에서 불꽃이 안정적으로 노즐 말단에 붙어있는 경우는 연료의 노즐분출 속도와 화염의 연소속도가 균형을 이루고 있는 경우이다. 밸브를 조절함으로써 화력을 조절하는 것은 이 균형범위 내에서 가스분출속도를 변화시켜 적절한 화력조건을 맞추는 것이다. 역화현상은 전 1차식 연소기나 분젠식 연소기에서 발생될 수 있으며, Fig.1(e)에서 보여주는 바와 같이 연소속도가 가스 분출속도보다 빠른 경우로서 내염의 형태가 불안정하게 되어 CO가 발생하게 된다.

(2)연소실 구조에 의한 CO발생

연소실의 크기가 너무 크면 열손실이 많은 반면 너무 작은 연소실은 불꽃이 연소실 벽면이나 열교환기 등의 저온부에 접촉하여 불완전연소로 인한 CO발생과 동시에 그을음이 발생한다.



(a) part name of flame (b) yellow tipping

(c) stable flame (d) lift flame (e) flash back

Fig.1 Shape of flame with combustion condition

이 그을음은 연소실과 열교환기의 통풍력을 약화시키고 이 때문에 2차공기의 부족이 발생되어 그을음과 CO의 발생은 한층 더 증가하는 악순환이 지속된다. 또한 배기가스 성분 중에 포함된 수증기가 열교환기의 흡열판이나 흡열핀에 생성되어 배기 능력을 감소시키고 불완전연소를 촉진시켜 CO를 발생시키기도 한다. 이렇게 흡열판 내부의 유속이나 흡열핀의 구조가 적절하지 못하면 결로가 쉽게 발생할 수 있다.

3. 전산유동해석

3.1 CFD 계산조건

본 연구는 유동을 시간에 따라 변화하는 3차원 비정상상태(unsteady state)로 보고, 경과시간에 따른 일산화탄소의 확산경로를 해석하였다. 작동유체는 공기와 일산화탄소(CO)의 혼합기체로서 유속이 압축성(compressible)을 무시할 수 있을 정도로 낮으므로, 비압축성(incompressible) 유동이라 가정하여, 범용 전산 유동해석 프로그램인 FLUENT[6]을 사용하여 계산을 수행한다. 수치계산을 위한 공기와 일산화탄소의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of working fluid

Fluid	Density(kg/m^3)	Viscosity(×10^{-5} kg/m·s)
Air	1.225	1.789
CO	1.123	1.75

Fig.2는 전산유동해석을 위한 경계조건을 나타낸다. 연소기가 3m×2.2m×2m의 밀폐공간에 설치되고, 흡기부와 배기부를 모사하였다. 배기부는 75mm의 원통을 통하여 150mm×200mm의 덕트(배기통)로 연결되어 배기구로 방출된다. 연소기에서 배출되는 배기가스의 유속은 원통부에서 0.9m/s이고, 배기가스 중의 일산화탄소(CO) 농도는 1,000ppm이라고 가정하였다. 그리고 덕트 배기통의 중간부분에 누출구를 만들어 강제로 배기가스가 실내로 유입되도록 모델링하였다. 배기가스의 배출구는 대기 중으로 방출된다고 가정하여 대기압조건을 사용한다. 유동의 형태를 결정하는 레이놀즈수(Re)는 배기구 원통의 직경을 기준으로 한 입구부의 레이놀즈수는 약 4,622로 난류영역이다. 일반적으로 원관 내부의 유동에 있어서 레이놀즈수가 2000이상에서 난류가 발생하는 것으로 보고되고 있다.[7] 난류유동장 해석을 위한 난류모델은 공학해석에 일반적으로 사용되는 k-ε모델을 사용하였다.[8] 공기와 일산화탄소가 혼합된 이상유동(two-phase flow)을 해석하기

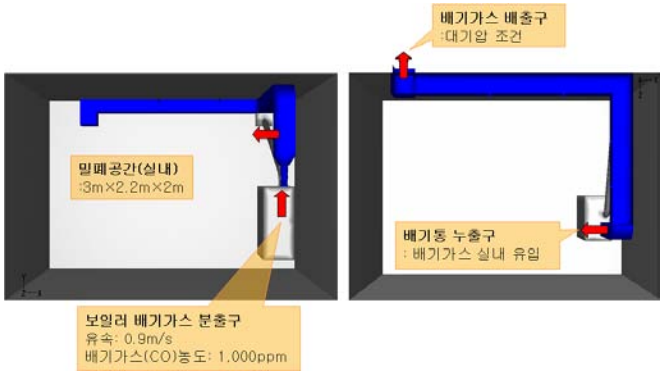


Fig.2 Boundary conditions for the computational flow simulation

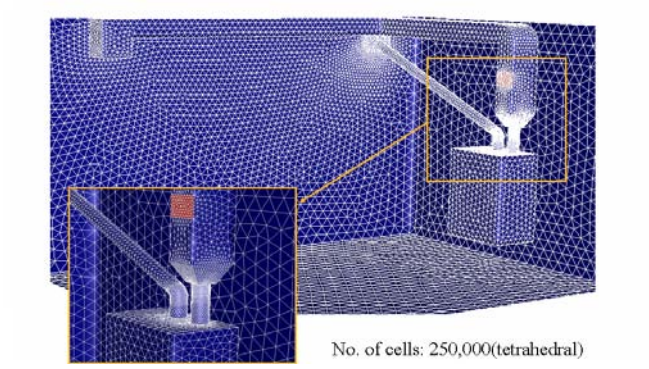


Fig.3 Grid configuration for the computational flow simulation

위해, FLUENT에서 제공하는 Multiphase module의 Mixture model을 적용하였다.[6] CFD 해석을 위한 3차원 격자망 구성은 Fig.3에 나타내었다. 흡기부 및 배기통 연결부의 복잡한 경계형상을 효과적으로 나타내기 위해 비정열 격자망(Tetrahedral mesh)을 사용하였으며, 원통 연결부 및 배기가스 누출구 주변에서의 불규칙적이고 복잡한 유동현상을 계산하기 위해 격자를 이 부분에 밀집시켜 주었다. 사용된 총 격자수는 약 250,000개가 사용되었다.

3.2 CFD 계산결과

본 연구는 건축물내의 가스보일러 등과 같은 가스연소기가 설치된 실내에서 배기가스 중의 일산화탄소가 누출되는 사고에 의한 인명피해를 예방하기 위해, 적정위치에 CO경보기를 설치하여 사고를 미연에 방지하고자 하는 목적에서 수행되었다. 가스누설 경보기는 누설가스의 특성에 따라서 적정한 설치위치를 결정해야 한다. 국내에서는 산업안전보건법(노동부고시 제2001-3호)[9]에 의거, 건축물내에 설치되는 가스누출검지기는 감지대상 가스의 비중이 공기보다 무거운 경우에는 건축물내의 하부에, 공기보다 가벼운 경우에는 건축물의 환기구 부근 또는 당해 건축물의 상부에 설치하도록 하고 있다. 일본의 경우는 LP가스의 경우는 공기보다 비중이 크기 때문에 바닥에서 30cm이내에 설치하도록 규정하고 있고, 천연가스의 경우는 공기보다 가볍기 때문에 천정면에서 30cm이내에 설치하도록 구체적으로 정하고 있다.[10] 본 연구에서는 전산유동해석기법과 CO센서 및 경보기 설치실험을 통해서, 배기구에서 누출된 불완전연소가스(CO)의 누출확산 메커니즘을 해석하고 CO경보기의 적정설치 위치를 제안하고자 한다. 이를 위해 상용 전산해석 프로그램을 이용하여 CO가스의 누출확산 과정을 수치 해석하였다.

배기가스가 누출구를 통해 실내로 누출된 지 1시간이 경과한 후 실내의 유동장 및 농도분포를 확인하기 위하여 속도 및 농도분포를 Fig.4~5에 나타내었다. Fig.4는 속도벡터 분포를 나타낸다.

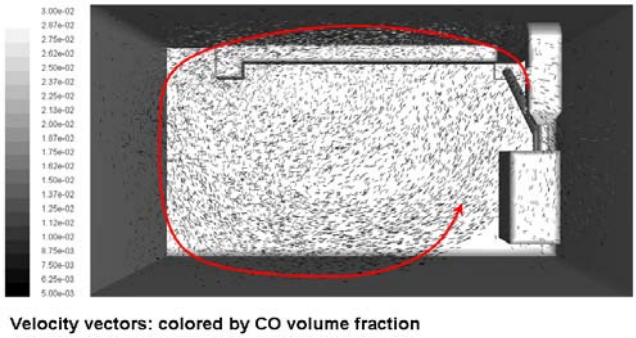


Fig.4 Calculated velocity vectors in the boiler room (after 60 min.)

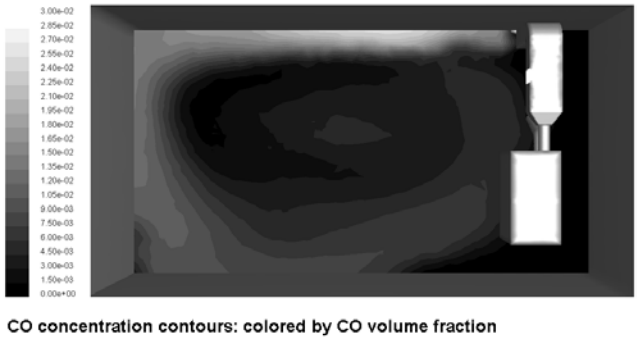


Fig.5 Calculated CO concentration contours (at the plane of z=0)

벡터의 색상(color)은 그 지점에서의 농도를 표시한다. 벡터 분포를 보게 되면 배기통의 누출구로부터 실내로 유입된 누출가스는 천정방향으로 이동하여 천정면과 벽면을 타고 회전하여 실내에서 큰 원을 그리며 순환(circulation)하는 유동장을 형성한다. 일산화탄소 농도를 표시하는 벡터의 색상을 보게 되면 천정부근에서는 150~250ppm, 바닥 및 실내 중앙부근에서는 50~100ppm의 농도분포를 보이고 있다. 이러한 농도분포는 Fig.5의 단면별 농도분포에서 더욱 명확히 확인할 수 있다. Fig.5는 z-평면 중심단면에서의 농도분포를 나타낸다. 천정부근에서 150~250ppm의 높은 농도분포를 보이며, 보일러 반대쪽 벽면에서 100~150ppm의 농도분포를 보이고 있다. 그리고 그 밖의 실내공간에서는 50~100ppm 미만의 농도분포를 보인다.

Fig.6은 z-방향 중앙 단면에서 x-방향으로 5지점을 선정하여 일산화탄소의 수직 농도분포를 도시하였다. x=0.5m 지점(보일러 반대쪽 벽면 부근)에서부터 x=2.5m(보일러 설치 부근)까지 등간격으로 5등분하여 누출된 일산화탄소 가스가 실내의 바닥에서부터 천정까지 수직분포를 확인하고자 하였다. 이전의 단면별 농도분포에서 확인하였듯이 천정부근에서 150~250ppm의 높은 농도분포를 보이고 있고, 바닥 쪽에서 50~100ppm의 농도분포를 보이고 있다. 천정에서 약 20~30cm 지점까지 높은 농도분포를 보이다가 그 아래 지점에서는 천정보다 현저히 낮은 농도분포를 확인할 수 있다.

4. CO센서 및 경보기 설치시험

4.1 시험장치 구성

건축물내의 가스 연소기 설치 공간에서 배기가스가 누출될 경우 실내 일산화탄소 분포 특성을 확인하기 위하여 Fig.7과 같은 실험 장치를 구성하였다. 3m×2.2m×2.0m의 내부 공간을 가지는 환경시험기 내부에 연소기를 설치하고, 24지점에 CO센서와 CO경보기를 설치하고 배기통의 누출구로부터 배기가스가 누설될 경우 CO농도 및 경보기 작동상황을 실험하였다. 연소기 설치 위치로부터 1m 및 2m 지점에 CO센서 및 경보기 설치대를 구성

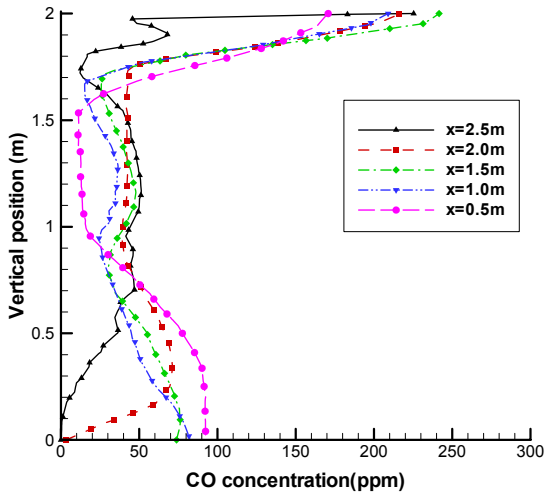


Fig.6 Vertical variations of CO concentration (after 60 min.)

하여, 6지점(A, B, C, D, E, F)에서 천정으로부터 30cm, 45cm, 그리고 바닥으로부터 30cm, 45cm 위치에 센서 및 경보기를 설치하였다. 센서 설치지점의 표시는 천정으로부터 차례로 1, 2, 3, 4를 붙여 센서 위치를 구별한다. 배기통에는 임의로 L1, L2, L3의 가스누출구를 만들어 누출구를 개방할 시 실내로 배기가스가 유입되도록 하였다.

4.2 실험결과

Fig.8은 13,000kcal/h 가정용 가스보일러를 가동하고, 누출구 L1을 개방하였을 때 실내의 CO가스 농도분포이다. 천정부근에서 270~360ppm의 높은 농도분포를 보이고 있으며, 바닥 및 중간지점에서는 100~150ppm의 농도분포를 보이고 있다. 전산해석 결과에서도 확인한 것처럼 CO측정 실험에서도 천정부근에서 상대적으로 다른 지점에 비해 2배 이상 높은 농도분포를 보이는 것을 확인 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 전산유동해석기법과 CO센서 및 경보기 설치 실험을 통해 배기구에서 누출된 불완전연소가스(CO)의 누출확산 메커니즘을 해석하고 CO경보기의 적정설치 위치를 제안하고자

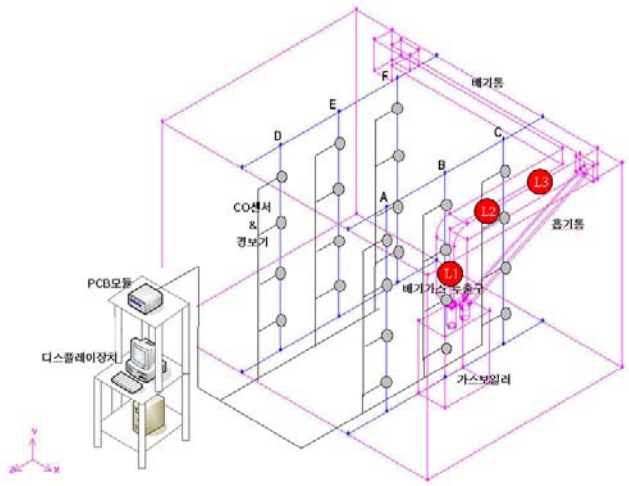


Fig.7 Experimental apparatus for concentration measuring test

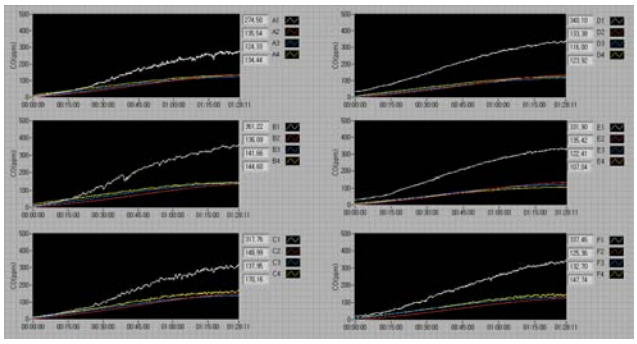


Fig.8 Measured CO concentration (when leak L1 open)

하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 전산 유동해석 프로그램을 이용해, 건축물 내에서 CO가스가 누출되었을 때, 가스의 확산과정을 시뮬레이션 하여 CO가스의 누출확산 메커니즘을 해석하였다. 배기통에서 누출된 CO가스는 건축물 내부의 천정부근에서 가장 높은 농도분포를 보였다. (연소기 배기구 CO농도 1,000ppm으로 1시간 경과 후, 천정부근에서 150~250ppm 그리고 바닥 및 중간지점에서는 50~100ppm)

2. 13,000kcal/h 가정용 가스보일러를 가동하고, 누출구 L1을 개방하였을 때 농도측정 값을 확인한 결과 천정부근에서의 CO 농도값이 바닥 및 그 밖의 지점에서 보다 2배 이상 높게 기록되었다.

이상의 전산해석 및 농도측정 실험 결과를 통해 볼 때 천정부근에서의 농도분포가 그 밖의 바닥 및 중간지점에 비해 매우 높은 농도분포를 보이는 것이 공통적으로 나타나고 있다. 따라서 천정부근에 CO경보기를 설치하는 것이 매우 합리적이며, 일본의 천정으로부터 30cm 이내에 CO경보기를 설치하도록 하고 있는 기준을 국내에 적용하는 것을 적극 권장하는 바이다. CO경보기의 보급이 확대된다면 연소기 배기가스 누출로 인한 치명적 인명피해는 현저히 감소할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] 2006년 가스사고연감, 한국가스안전공사(2007).
[2] LPガス使用の安全性を高めLPガス販売事業者の構造改善: 一体型CO報知機の実現可能性調査報告書, 일본고압가스보안협회(2007).
[3] 고압가스안전관리기준통합고시-가스누출경보장치의 설치기준, 한국가스안전공사(2007), pp.29-32.
[4] Stephen R. Turns, 노수영 외 공역, 연소공학, 교보문고(1999).
[5] 강영철, 가스보일러에 의한 CO중독사고의 메카니즘 고찰, 가스안전지 11월호(2001), pp.20-28.
[6] FLUENT 6.1 User's Guide, Fluent Inc.(2003).
[7] Hermann Schlichting, Boundary-Layer Theory, Seventh Edition, McGraw-Hill, Inc.(1979).
[8] David C. Wilcox, Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc., Second Edition(2000).
[9] 산업안전보건법-가스누출감지경보기 설치에 관한 기술상의 지침, 노동부고시 제2001-3호(2001).
[10] ガス警報器設置マニュアル, 일본가스경보기공업회(2006).