가정용 보일러의 불완전연소가스 누출확산 메커니즘 해석

강승규†·최경석*·윤준용**

Analysis of Mechanism for Diffusion of Incomplete Combustion Gas Released from Domestic Gas Boiler

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

Key Words: Domestic Gas Boiler(가정용 가스보일러), Incomplete Combustion Gas(불완전연소가스), Carbon Monoxide Poisoning(일산화탄소 중독), Spread of Released Gas(가스누출확산)

Abstract

Carbon Monoxide(CO) poisoning accident is higher than any other gas accident in the rate of deaths/incidents. In the last five years, 36 people died and 104 were wounded because of carbon monoxide poisoning accident. 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 incomplete combustion gas(CO) 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 carbon monoxide 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 경

† 책임저자, 회원, 한국가스안전공사 연소기연구팀
E-mail : skkang@kgs.or.kr
TEL : (031)310-1455 FAX : (031)315-4361
* 한국가스안전공사 연소기연구팀
** 한양대학교 기계공학과

보기 보급률이 90%를 넘어서면서 가스사고에 의한 인명피해율이 현저히 감소하였다. ’81년부터 ‘92년 까지 LP가스 사고에 의한 연간 사망자수가 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. 가스누설경보기는 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. CO센서 및 경보기 설치시험

2.1 시험장치 구성

건축물내의 가스 연소기 설치 공간에서 배기가스가 누출될 경우 실내 일산화탄소 분포 특성을 확인하기 위하여 Fig.1과 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 경

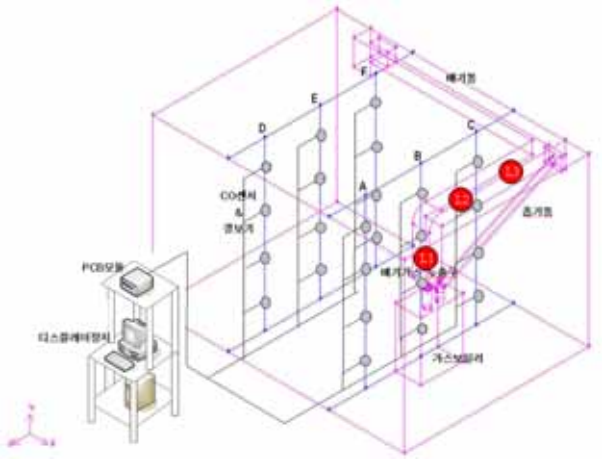

Fig.1 Experimental apparatus for concentration measuring test

보기 작동상황을 실험하였다. 연소기 설치위치로부터 1m 및 2m 지점에 CO센서 및 경보기 설치대를 구성하여, 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.

2.2 CO농도 측정결과

Fig.2는 13,000kcal/h 가정용 가스보일러를 가동하고, 누출구 L1을 개방하였을 때 실내의 CO가스 농도분포이다. 천정부근에서 270~360ppm의 높은 농도분포를 보이고 있으며, 바닥 및 중간 지점에서는 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.

Fig.3은 배기통의 가스누출구 L1, L2, L3을 모두 개방하여 실내로 유입되는 배기가스의 양을 증가시켜 실험을 수행한 결과이다. 13,000kcal/h 용량의 가스보일러를 작동한 결과로서 35분 정도 경과한 후에 천정부근에서는 580 860ppm의 CO 농도가 측정되었고, 그 밖의 지점에서는 220 280ppm의 CO가스가 측정되었다.

2.3 CO경보기 작동시험 결과

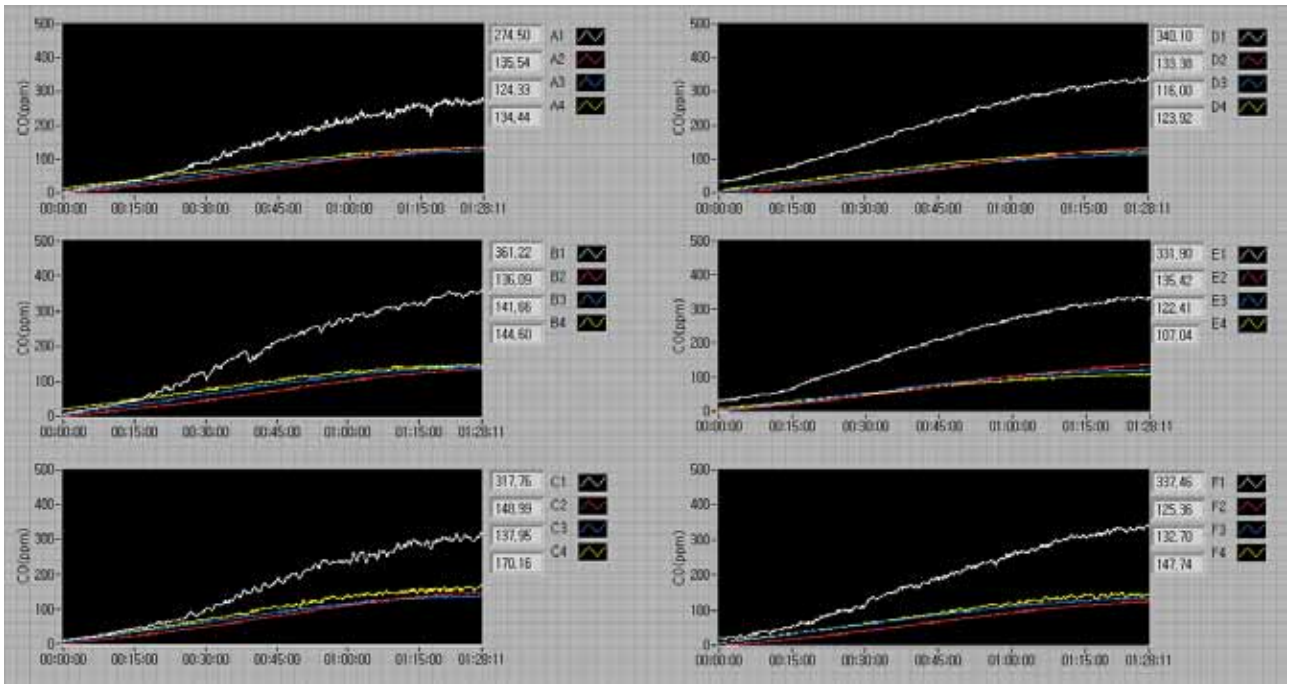

Fig.2 Measured CO concentration (when leak L1 open)

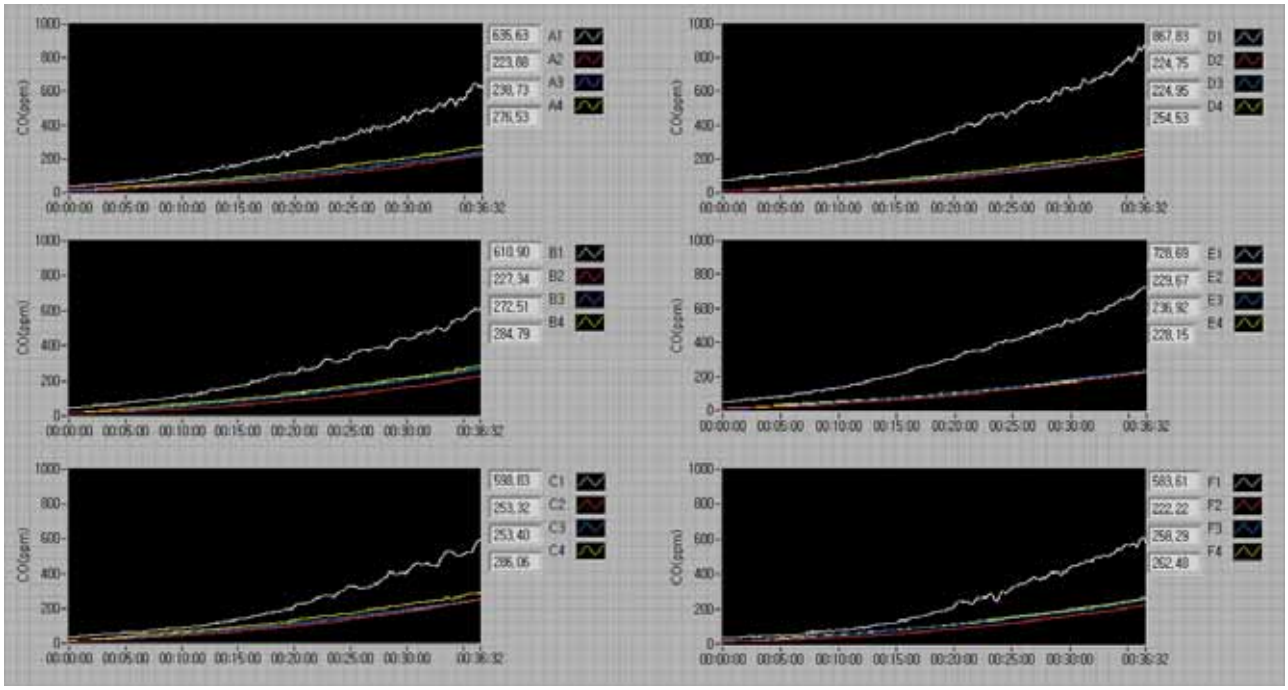

Fig.3 Measured CO concentration (when leak L1, L2, L3 open)

CO가스 농도측정 실험 결과를 확인하는 차원에서 국내 3사 및 해외 3사의 CO경보기를 설치하여, 경보기 작동실험을 수행한 결과는 Fig.4와 같다. 제조사 마다 센서 타입이나 작동방법에 있어 차이가 있다. 성능 면에서도 차이가 있을 수 있으나, 본 실험은 경보기의 작동성능을 평가하고자 한 것이 아니므로 이에 대한 평가는 하지 않았다. 다만 설치 위치에 따른 경보기의 작동상황을 살펴보았다. 24지점에 설치된 CO경보기는 천정으로부터 30cm 지점에 설치된 A1, B1, C1.

D1, E1, F1의 경보기가 가장 먼저 작동하고, 어느 정도 시간이 경과한 후(약 30 40분)에 바닥 및 중간지점의 경보기가 작동하였다. 이러한 결과는 이전의 농도측정 실험 결과와 부합하는 결과로서 CO경보기의 적정 설치 위치를 확인 시켜주는 것이다.

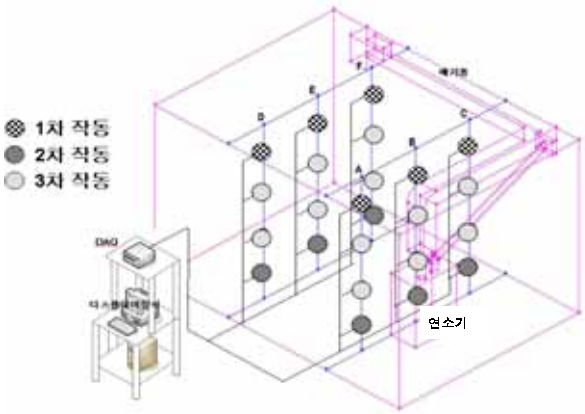

Fig. 4 Result of carbon monoxide alarms operation test.

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[4]을 사용하여 계산을 수행한다. 수치계산을 위한 공기와 일산화탄소의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of working fluid

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

Fig.5는 전산유동해석을 위한 경계조건을 나타낸다. 연소기가 3m×2.2m×2m의 밀폐공간에 설치되고, 흡기부와 배기부를 모사하였다. 배기부는 75mm의 원통을 통하여 150mm×200mm의 덕트(배

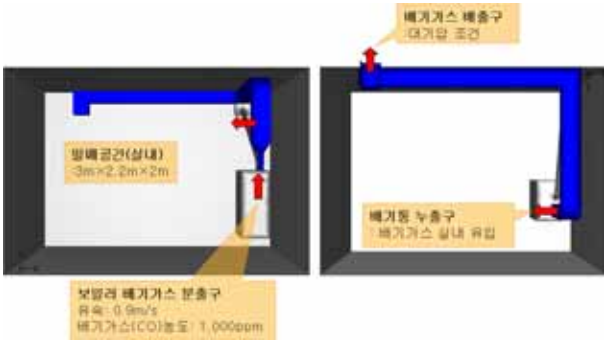

Fig.5 Boundary conditions for the computational flow simulation

기통)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.[5] 난류유동장 해석을 위한 난류모델은 공학해석에 일반적으로 사용되는 k-ε 모델을 사용하였다.[6] 공기와 일산화탄소가 혼합된 이상유동(two-phase flow)을 해석하기 위해, FLUENT에서 제공하는 Multiphase module의 Mixture model을 적용하였다.[4] CFD 해석을 위한 3차원 격자망 구성은 Fig.6에 나타내었다. 흡기부 및 배기통 연결부의 복잡한 경계형상을 효과적으로 나타내기 위해 비정열 격자망(Tetrahedral mesh)을 사용하였으며, 원통 연결부 및 배기가스

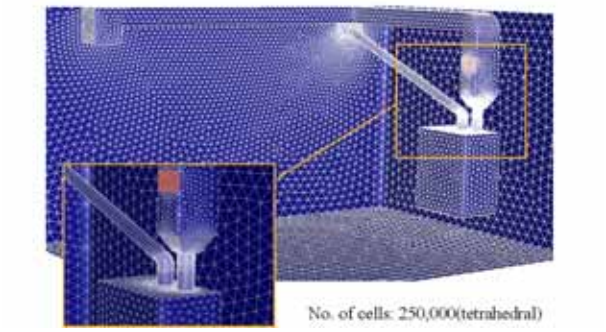

Fig.6 Grid configuration for the computational flow simulation

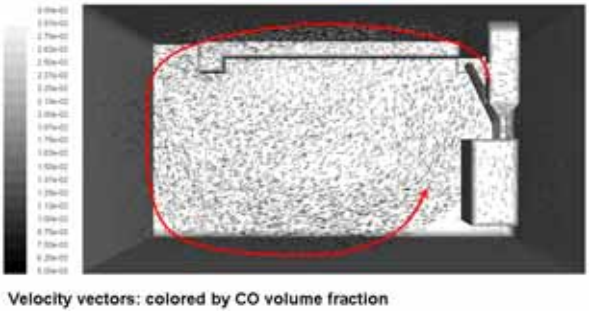

Fig.7 Calculated velocity vectors in the boiler room (after 60 min.)

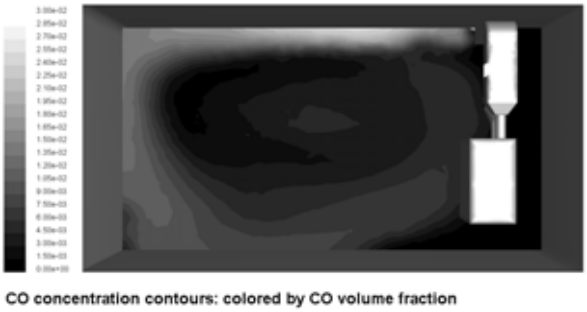

Fig.8 Calculated CO concentration contours (at the plane of z=0)

누출구 주변에서의 불규칙 적이고 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)[7]에 의거, 건축물내에 설치되는 가스누출검지기는 감지대상가스의 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.[8] 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 농도 분포를 Fig.7~8에 나타내었다. Fig.7은 속도벡터 분포를 나타낸다. 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.8의 단면별 농도분포에서 더욱 명확히 확인할 수 있다. Fig.8은 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.9는 z-방향 중앙 단면에서 x-방향으로 5지

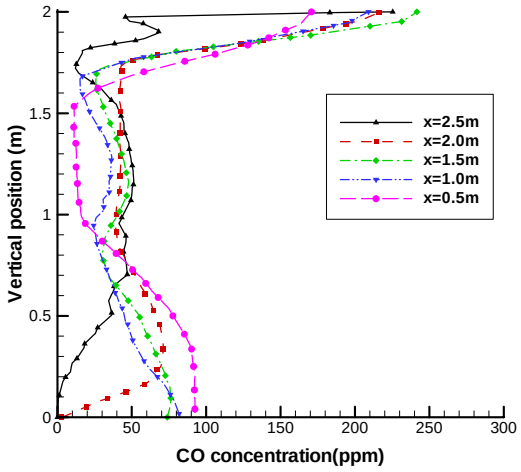

Fig.9 Vertical variations of CO concentration (after 60 min.)

점을 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. 결 론

본 연구에서는 전산유동해석기법과 CO센서 및 경보기 설치실험을 통해 배기구에서 누출된 불완전연소가스(CO)의 누출확산 메커니즘을 해석하고 CO경보기의 적정설치 위치를 제안하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 13,000kcal/h 가정용 가스보일러를 작동하고, 누출구 L1만을 개방하였을 때와 누출구 L1, L2, L3을 개방하였을 때 농도측정 값을 확인한 결과 천정부근에서의 CO농도값이 바닥 및 그 밖의 지점에서 보다 2배 이상 높게 기록되었다.

2. CO경보기 작동시험을 수행한 결과, 천정부근(30cm이내)의 경보기 6개가 작동하고 난후, 약 30 40분 후에 그 밖의 경보기가 작동함을 확인하였다.

3. 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)

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, 30cm 이내에 CO경보기를 설치하도록 하고 있는 기준을 적용하는 것을 적극 권장하는 바이다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 에너지 · 자원기술개발사업의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) 2007 *Gas Accident Yearbook*, 2008, Korea Gas Safety Co., Shihung City, Korea.

(2) *Inspection Report for the Feasibility of Application of an United CO Alarm*, 2007, The High Pressure Gas Safety Institute of Japan, Tokyo, Japan.

(3) "Establishment standard of Gas Leaking out Alarm Device," 2007, *The Integrated Notice of High Pressure Gas Safety Management Standards*, Korea Gas Safety Co., Shihung City, Korea, pp.29-32.

(4) *FLUENT User's Guide*, 2003, Fluent Inc.

(5) Hermann Schlichting, 1979, *Boundary-Layer Theory*, Seventh Edition, McGraw-Hill, Inc.

(6) David C. Wilcox, 2000, *Turbulence Modeling for CFD*, Second Edition, DCW Industries, Inc.

(7) Ministry of Labor Notice 2001-3, 2001, "Technical Guide for Installation of Gas Leakage Alarm," *Industrial Safety and Health Law*, Ministry of Labor, Korea.

(8) *Gas Alarm Installation Manual*, 2006, Japan Gas Alarm Manufacturers Association.