

전산유체역학을 이용한 용접흡농도 간접적 예측가능성 연구

박승욱[‡] · 김태형 · 서정윤 · 허영빈 · 임정호 · 강대웅 · 하현철¹

창원대학교 환경공학과, ¹(주)벤틱

A Study on Indirect Prediction of Welding Fume Concentrations Using Computational Fluid Dynamics

Cheng Xu Piao[‡] · Tae Hyeung Kim · Jeoung Yoon Seo · Rong Bin He · Jung Ho Lim
Dae Woong Kang · Hyun Chul Hal

Department of Environmental Engineering, Changwon National University,
¹Ventech Corp

There are various methods for welding fume control. These methods can be divided into local exhaust system, general ventilation system and integrated control system. With the general ventilation system, we should have a good prediction tool for testing various appropriate control options. But, until now there are not many studies about how to predict the welding fume concentrations. Especially, the prediction of welding fume concentration is not a very easy task because welding fume is the particulate matters.

In this study, we tried to measure CO₂ concentrations and welding fume concentrations in a small single room with a small ventilation opening. Using commercially available CFD (Computational Fluid Dynamics) software, we tried to predict CO₂ concentrations under the exactly same conditions. Then, we tried to compare the numerical CO₂ concentrations with the

experimental results to know whether we could predict CO₂ concentrations. Then we tried to compare CO₂ concentrations with experimental welding fume concentrations to know whether we can use the numerical CO₂ concentrations to predict the welding fume concentration indirectly.

Key Words : Welding Fume, CO₂ concentration, Indirect Prediction, CFD.

접수일: 2009년 8월 29일, 채택일: 2009년 11월 20일

‡ 교신저자: 박승욱(경남 창원시 사림동 창원대학교 환경공학과,
Tel: 055-213-3745, Fax: 055-287-8288, E-mail: chengxu718@hanmail.net)

I. 서론

용접기술은 선박, 플랜트, 교량, 철골건축물 등의 대형 구조물에서 자동차, 철도차량 등의 부품들에 이르기까지 거의 모든 산업분야와 기기제작 및 유지관리에 사용되고 있다. 하지만 이처럼 산업전반에서 행해지는 용접공정에는 인체에 유해한 용접흡이 다량 발생되는데, 이는 주로 인체의 호흡기계통을 통하여 흡입되어 작업자의 폐에 염증을 유발 시키거나 중금속 중독을 일으킬 수 있다.(최호춘, 김강운 등. 1999) 때문에 용접흡 저감방법의 연구와 개발은 예전부터 용접업계의 화제로 남아있는 상황이다. 하지만 용접과 용접 작업자의 건강을 보호하기 위한 노출농도 중심의 연구는 많이 수행되었으나 80여 가지 이상인 매개 공정에 대하여 일일이 그 저감방법을 연구하기에는 한계가 있는 실정이다.

현재 사용중인 용접흡 저감방법은 대체로 세 가지로 분류되는데 첫째는 용접흡토치(최찬기 등. 1999) 혹은 이동식 백필터 등을 이용한 용접흡을 발생원에서 제어할 수 있는 국소배기 장치이다. 이는 용접작업의 이동성이 강한 현장에서는 사실상 적용이 어려운 방법이다. 둘째는 방진마스크, 에어면사용, 흡차단토치 등의 방식을 이용하여 작업자 호흡구역 보호를 위주로 한 “단순수비 방식”으로서 이러한 방식은 용접작업자 보호에는 일정한 효과가 있지만 전체공간의 용접흡 확산에 의한 2차 오염에 대하여서는 적절한 대책이 없기 때문에 작업자들 사이의 교차오염을 유발한다.(Ke Qizhi. 2007) 때문에 현재 용접작업이 비교적 많은 작업장에서는 세 번째 방식 즉 위의 두 가지 대책에 전체환기를 병행하는 방식을 사용하고 있다. 이는 현장 작업자의 직접적인 용접흡 노출을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 작업자들 사이의 교차노출을 방지하는데 효과적인 방식이다.

용접작업장의 환기대책은 작업장마다 매우 다양하게 이루어지고 있는데 대부분 관리자나 작업자의 경험에 의하여 설치되고 있어 그 효과에 대하여 타당한 검증이 이루어지지 않고 있는 상황이다.(변상훈 등. 1995) 비록 일부회사에서는 그 효과에 대한 검증을 시도해보고는 있지만, 측정과정이 번거롭고 측정차수가 적기 때문에 측정데이터에 대한 신빙성이 떨어질 수밖에 없다.

이와 같은 문제점들을 감안하여 본 연구에서는 모의작업장에서 모종의 환기작업을 진행할 때의 용접흡 농도분포를 컴퓨터시뮬레이션 방법을 통하여(Tum-Suden KD. 1990) 용접흡농도를 사전에 예측하여 보고, 만일 예측가능성이 있다고 판단되면 모델링을 통해 특정작업장의 최적의 환기대책을 수립한 후 이를 현장에 결부시켜 환기시설을 설치함으로써 작업자의 용접흡 노출을 최대한 감소키는 것을 목적으로 하고 있다.

II. 연구방법

용접작업장은 그 크기와 형태, 용접자의 위치와 용접량 등이 일정하지 않기 때문에 상술한 모든 경우를 실험적인 방법과 컴퓨터 모델링을 통하여 연구를 진행하는 것은 다소 무리라고 판단하여, 본 연구에서는 Hole이 하나인 소형밀폐공간을 연구대상으로 선정하여 일정한 방식의 환기대책을 취하였을 때의 용접흡 분포와(곽연순, 백남원. 1997) 이산화탄소를 발생원으로 한 컴퓨터시뮬레이션 결과를 비교분석하는 과정을 통하여 상호간의 상관성 관계를 도출해내는 연구방식을 채용하였다.

본 연구의 구상 및 접근방식은 아래와 같다. 첫째는 용접흡농도의 측정은 힘들뿐만 아니라 측정오차도 크기 때문에 컴퓨터시뮬레이션 방식을 통하여 특정작업장의 이상적인 농도분포를 예측할 수 있을 것이다. 둘째는 Particle을 발생원으로 한 컴퓨터시뮬레이션은 어렵고 오차도 상대적으로 크다. 셋째는 현장에서 많이 사용하는 아크용접은 대부분 이산화탄소를 차폐가스로 사용하고 있는데 용접흡과 차폐가스로 사용되는 이산화탄소의 확산경로는 일정한 상관관계가 있을 것이다.(오광중 등 1998) 넷째는 용접흡과 이산화탄소의 확산경로가 비슷하다면 이산화탄소를 발생원으로 한 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 용접흡의 농도분포를 간접적으로 예측할 수 있을 것이다. 상술한 네 가지 구상 및 접근방식이 적절하다면 컴퓨터시뮬레이션 방식을 통하여 특정작업장의 용접흡 분포를 사전예측하며 더 나아가서는 복잡한 복합작업장의 용접흡 분포를 예측할 수 있을 것이다.

III. 실험장치, 조건 및 방법

1. 실험장치

본 연구의 실험장치는 주로 아래의 Fig. 1과 같이 용접기(⑥: HIC_500C)와 턴테이블(①: HWP-50), 모재(②: KS D 0062, L×W×H=400mm×400mm×18mm), 용접토치(③), 마네킹(④) 그리고 이산화탄소탱크(⑤)로 구성되었다. 용접조건은 Table 1에 기술하였다.

2. 실험장소 및 측정장비

1) 실험장소의 선정

실험장소는 Fig. 2와 같이 hole(크기: W×H= 600mm×800mm)이 하나인 소형룸(크기: L×W×H= 2900mm×2800mm×2200mm)을 선정하였고 용접기(모델명: His 500s)는

hole과 상반되는 위치 코너에 설치하였다. 소형룸에서의 전체환기 방식은 매우 다양한데 입구에 배기팬을 설치하여 배기할 때 입구로 유입된 공기는 배기팬을 통하여 다시 배기되는 입구에서의 순환현상이 생겨 배기효과가 떨어지며 반대로 입구에서 급기할 때에는 급기기류는 주로 용접흡을 룸내부에 확산시키는 작용을 할 뿐 실질적인 룸내부의 용접흡의 배출은 적다. (Xiaoyu Li. 2008) 또한 기류패턴이 복잡해져 측정하려고 하는 흡농도 분포에 변화가 심하기에 본 연구에서는 그나마 소형룸에서의 환기효과가 상대적으로 좋고 기류패턴의 변화가 안정적인 배기팬이 입구를 정조준한 배기방식을 사용하였다. 유량조절이 가능한 소형 배기팬(모델: MJVF-40, 최대유량: 40CMM)을 hole에서 1m 떨어진 거리에서 배기팬의 중심이 hole의 중심을 향하여 배기하면서 실험을 진행하였다. 그리고 측정값의 정확도를 높이려면 측정Point를 다수 확보해야 하지만 결과에 대한 분석과 실험의 어려움을 고려하여 상·하 각각 5Points로 총 10Points 선정하였다.

2) 측정장비 및 사용방법

본 연구에 사용한 측정장비는 크게 세 가지 이다. 첫째는 입자수 측정기(Particle counter, Model: 237B)로 용접작업이 진행되는 동안 용접흡의 입경을 측정하여 용접흡이 대기 중에 확산된 후의 거동이 기체의 유동성을 따를 수 있는지를 측정하였다.

둘째는 이산화탄소 농도측정기(Gray Wolf Sensing Solutions system. Trumbull, USA)로서 용접흡 측정위치에서 이산화탄소 농도를 측정하여 차폐가스인 이산화탄소의 농도분포와 용접흡 농도분포의 상관관계를 분석하였다.

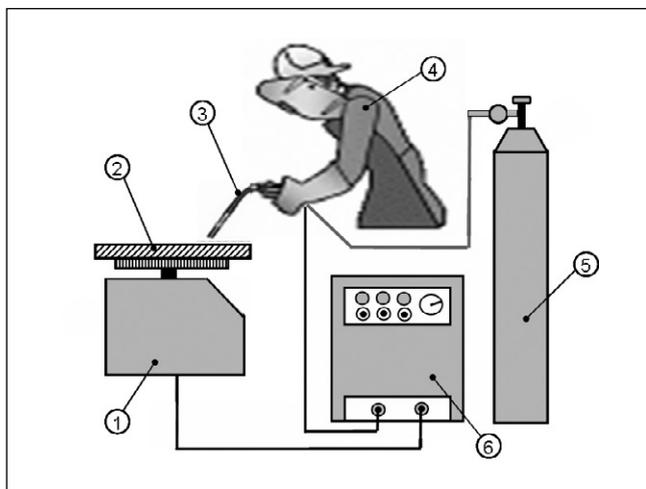
셋째는 용접흡 측정장치(Listed 124U SKC Inc. USA)로서 흡입유량을 2L/min로 설정하고 시료포집 전 여과지(Polyvinyl Chloride filter, pore size 5µm, diameter 37mm, SKC inc, USA)는 데시케이터에서 미리 24시간 건조시킨 후 여과지의 무게를 정밀 분석용 저울 (Electric balance, Sartorius R160)로 측정한다 다음 Personal Air Sampler (Gilliam, USA)에 고정시켜 용접흡을 포집하였다. 실험이 끝난 후 포집된 여과지는 다시 데시케이터에서 24시간 건조시킨 후 측정하여 용접흡 농도를 환산하였다.

3. 컴퓨터시뮬레이션 조건

본 연구에서는 용접실험조건을 최대한 활용하여 상용 소프트웨어인 FLUENT 6.3을 사용하였다. FLUENT는 난류방정식들의 이산화 방법으로 유한체적법(Finite-volume method)을 사용한다. 유한체적법은 적분 후에 이산화하기 때문에 항상 그 미소 영역내의 운동량 등의 출력을 고려하기 때문에 연속(mass), 운동량(momentum), 에너지(energy)보존 법칙을

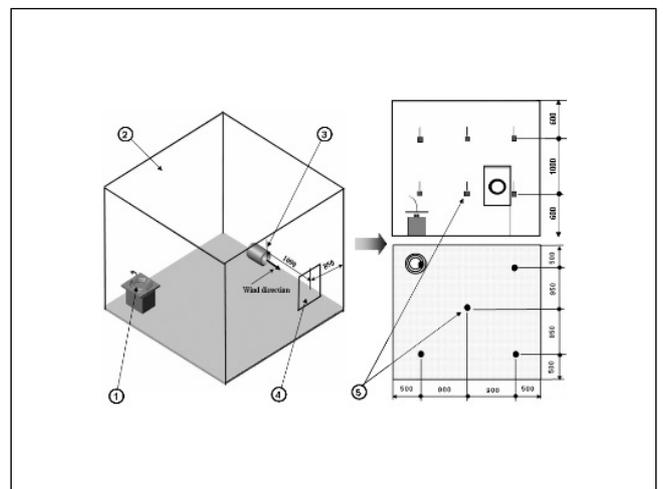
Table 1. Welding conditions

Arc voltage	Welding speed	Wire thickness	Wire speed	Welding current	Shield gas(CO ₂)
38V	0.6m/min	Ø1.2mm	70mm/sec	350A	30L/min



- ① Turn-table ③ Torch ⑤ CO₂ bottled gas
- ② Base metal ④ Manikin ⑥ Welding machine

Fig. 1. Schematic drawing of experimental set up



- ① Welding Machine ③ Exhaust Fan ⑤ Measurement points
- ② Experimental room ④ Exhaust hole

Fig. 2. Schematic drawing of experimental room and others

잘 만족시키는 이산식을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 표준 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였는데 난류운동에너지(k)와 난류에너지소산율(ϵ)은 현장에서 배기FAN 출구와 CO₂차폐가스 배출구에서 난류강도(Turbulence intensity) 경계면의 수리학적 직경을 측정하여 연산한 후(Table 2: k, ϵ 값) 사용하였다. 또한 본 연구는 열원(Table 2: 용접점에서 CO₂ temperature, CO₂ velocity, CO₂ flow)이 존재하고 환기시스템(배기FAN 유량: 20CMM)이 존재하기 때문에 온도차에 의한 부력이 기류흐름의 원동력이 되는 자연대류와 환기시스템에 의한 강제대류가 동시에 존재하는 복합대류가 조건이 형성되었다. 따라서 실험과정에서 상술한 조건들을 측정하여 Simulation 수치해석에 사용하였다. 자유표면(Free surface)이 배출구와 충분한 거리를 두는 것을 목적으로 출구방향으로 실험Room 2배의 크기로 경계조건을 주어(Fig.3) 실험Room과의 비교적 원활한 치환이 이루어지게 하였다. 제어체적 및 실험Room 형성에 사용된 격자수는 총 306,938개이고(Fig.3) 사면체(Tetrahedron)구조의 비정규 격자계를 채택하였다. 수치해석은 유체의 유동에 대한 물리학적 특성을 나타내는 기본법칙인 연속(mass) 방정식, 운동량(momentum) 방정식, 에너지(energy) 보존법칙 그리고 수송방정식(Species Transport Equation)을 기초로 하여 진행되었는데 경계면의 난류운동에너지 k 와 소산율 ϵ 은 아래의 식에 의하여 계산된다.

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) = \frac{3}{2} (IU_o)^2$$

여기에서 I는 난류강도(Turbulence intensity)이다.

$$\epsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{0.03H}$$

여기에서 H는 경계면의 수리학적 직경이다.

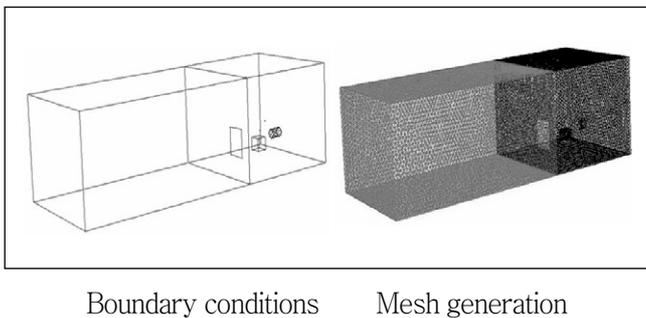


Fig. 3. Schematic drawing of boundary formation

Table 2. Simulation conditions

k	ϵ	CO ₂ flow	CO ₂ velocity	CO ₂ temperature
0.027	0.0021	0.03m ³ /min	0.33m/s	600℃

IV. 연구결과 및 고찰

1. 용접흡 입경분포 측정결과

용접흡 입경분포 측정결과(Table 3, Fig. 4)를 살펴보면 대부분 용접흡의 입경은 0.5 μ m이하로서 입경이 1.0 μ m이하가 99.5%이상이다. 이는 용접흡의 99.5%이상의 확산규율은 기체(CO₂를 포함)의 확산규율과 비슷하다는 것을 설명하여 주고 있다. 또한 위의 결과를 통하여 용접흡은 동일 지점에서 분사되는 차폐가스인 이산화탄소의 작업장에서의 확산과 비슷한 경향을 보일 가능성이 충분하다고 판단된다. 따라서 용접흡의 농도를 측정하는 동시에 동일지점에서의 이산화탄소의 농도를 측정하여 그들 사이의 상관관계를 비교분석할 필요성을 느낄 수 있다.

2. 용접흡 측정농도와 CO₂ 측정농도 비교결과

현장에서 측정된 용접흡 농도와 CO₂ 농도 측정결과(Table 4)의 상관관계를 비교한 결과(Fig 5) 그 기여율(R²)은 0.9709로서 CO₂농도의 변화는 97.1%가 용접흡 농도의 변화에 의하여 발생한다고 볼 수 있다. 이는 양자의 상관관계가 매우 높다는 것을 설명하는 것으로서 즉 용접흡의 대기중에서의 거동은 동일지점에서 발산되는 차폐가스인 CO₂의 거동과 매우 비슷함을 설명하는 것이다. 따라서 CO₂를 차폐가스로 사용하는 아크용접 작업장에서는 CO₂ 농도분포와 농도변화로 용접흡 농도분포와 농도변화를 충분히 예측할 수 있을 것이다.

3. CO₂ 측정농도와 Simulation 연산농도 비교결과

현장에서의 CO₂측정농도와 컴퓨터시뮬레이션을 통한 CO₂연산농도결과(Table 5)로 양자의 상관관계를 비교한 결과(Fig.6)를 살펴보면 기여율(R²)은 0.7776로서 이는 Simulation(Predicted) CO₂농도의 변화는 77.76%가 CO₂측정농도의 변화에 의하여 발생한다고 볼 수 있다. 또한 양자의 상관관계도 역시 비교적 높다는 것을 설명하는 것으로서 CO₂를 발생원으로 한 컴퓨터시뮬레이션의 결과로 차폐가스로 사용하는 아크용접 작업장에서는 CO₂ 농도분포와 농도변화를 예측할 수 있음을 설명한다.

Table 3. Measurement results of welding fume diameter

size(μm)	Distribution of fume diameter										
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	Rate(%)					
≤ 0.3	341466	347436	359749	374969	379979	371816	363108	360685	361033	361336	74.43
≤ 0.5	74476	75806	81182	89675	94312	92051	88201	88201	89980	89026	17.81
≤ 0.7	18986	22481	24071	26030	27443	27074	25938	25938	27171	26805	5.28
≤ 1	7406	9606	9974	10154	10511	10511	10228	10228	10665	10742	2.11
≤ 2	1455	1731	1763	1666	1496	1510	1637	1637	1677	1598	0.35
≤ 5	170	188	167	142	116	156	187	187	186	188	0.04

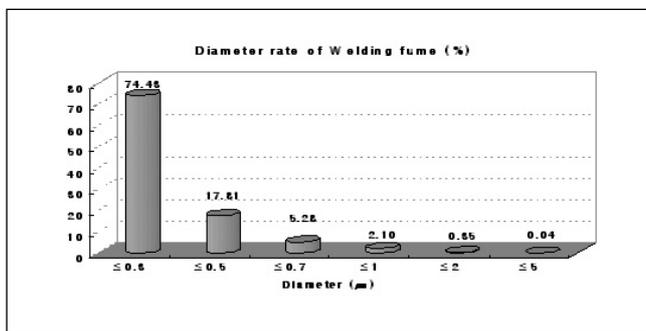


Fig. 4. Schematic drawing of Welding fume diameter rate

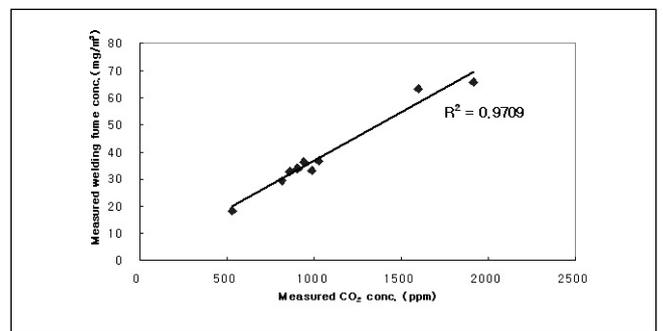


Fig.5. Correlation of Measured Fume and Measured CO₂

Table 4. Measurement results of Fume concentration and CO₂ concentration

	Lower1	Lower2	Lower3	Lower4	Lower5	Upper1	Upper2	Upper3	Upper4	Upper5
Measured CO ₂ (ppm)	1911.8	816.1	532.8	863.1	899.5	1595.8	1029.1	985.3	941.6	906.3
Measured Fume(mg/m ³)	65.8	29.4	18.3	33.0	33.8	63.1	36.8	33.1	36.3	33.9

4. 용접흡 측정농도와 Simulation 연산농도 비교결과

현장에서의 용접흡 농도와 컴퓨터시뮬레이션(Predicted)을 통한 CO₂연산농도결과(Table 6)를 비교한 결과(Fig 7)를 살펴 보면 기여율(R²)은 0.7823로서 비교적 높으며 이는 또한 Simulation농도의 변화의 78.2%가 용접흡농도 변화에 의하여 발생한다고 볼 수 있다. 이는 양자의 상관관계가 비교적 높으며 컴퓨터시뮬레이션을 통한 용접흡 농도의 간접적인 예측정확도는 적어도 78%이상이라는 것을 설명한다. 비록 100%의 정확도는 기대하기 어렵지만 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 용접흡 농도를 78%이상의 정확도 선에서 간접적인 예측이 가능하다고 판정된다.

더 나아가 단순한 원룸이 아니라 복잡한 작업현장에서의 용접흡의 농도분포를 부동한 환기대책에 따른 용접흡의 농도분포를 CO₂를 발생원으로 컴퓨터시뮬레이션을 통하여 사전예측을 진행하여 현장적용이 가능한 적절한 환기대책을

수립하여 작업환경을 개선할 수 있다.

5. 농도분포 비교결과

측정높이(하부:600mm, 상부:1600mm)별 용접흡과 CO₂농도 측정결과를 Sufer 8 소프트웨어를 사용하여 농도분포도를 작성한 결과와 동일한 높이에서의 Simulation 농도분포도(Fig. 8)를 살펴보면 각자의 계량단위는 같지 않지만(용접흡: mg/m³, CO₂, Simulation: ppm) 룸에서의 농도분포 형태는 비슷한 경향을 보이고 있다. 따라서 농도분포의 가시화 방식을 통하여 앞에서 서술한 내용들의 정확성을 검증할 수 있다.

V. 결론

본 연구의 연구결과를 종합하여 보면 용접흡의 입경은 대

Table 5. Results of CO₂ concentration and Simulation concentration

	Lower1	Lower2	Lower3	Lower4	Lower5	Upper1	Upper2	Upper3	Upper4	Upper5
Simulation CO ₂ (ppm)	802	220	213	269	491	656	257	233	249	418
Measured CO ₂ (ppm)	1911.8	816.1	532.8	863.1	899.5	1595.8	1029.1	985.3	941.6	906.3

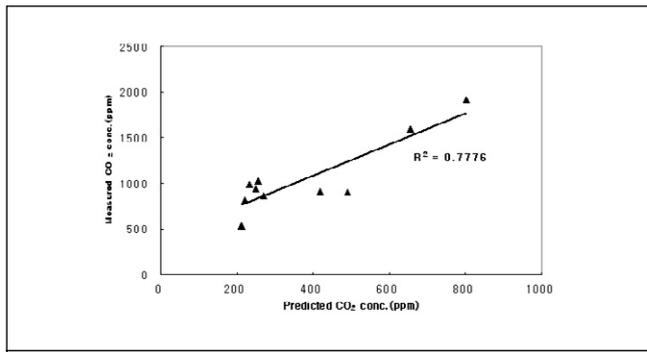


Fig.6. Correlations of Measured CO₂ and Simulation CO₂

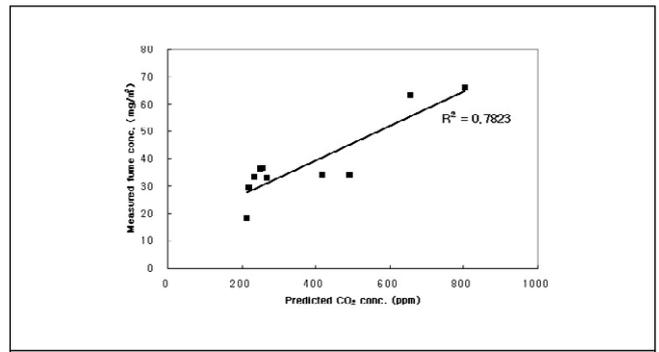


Fig.7. Correlations of Measured Fume and Simulation CO₂

Table 6. Results of Fume concentration and Simulation concentration

	Lower1	Lower2	Lower3	Lower4	Lower5	Upper1	Upper2	Upper3	Upper4	Upper5
Simulation CO ₂ (ppm)	802	220	213	269	491	656	257	233	249	418
Measured CO ₂ (ppm)	65.8	29.4	18.3	33.0	33.8	63.1	36.8	33.1	36.3	33.9

부분 0.5 μ m이하로서 입경이 1.0 μ m이하가 99.5%이상이다. 이는 용접흡의 99.5%이상의 확산규율은 기체(CO₂를 포함)의 확산규율과 비슷하다. 실험을 통하여 측정된 용접흡 농도와 CO₂ 농도의 상관관계를 비교하여 보면 그 기여율(R²)은 0.9709로서 이는 측정된CO₂농도의 변화는 97.1%가 용접흡 농도의 변화에 의하여 발생한다는 것을 설명한다. 측정된 CO₂농도와 컴퓨터시뮬레이션을 통한 CO₂연산농도의 상관 관계를 비교하여 보면 그 기여율(R²)은 0.7776로서 Simulation CO₂농도의 변화는 77.8%가 측정된 CO₂농도의 변화에 의하여 발생한다는 것을 설명한다. 용접흡 농도와 컴퓨터시뮬레이션을 통한 CO₂연산농도의 상관관계를 비교하였을 때 그 기여율(R²)은 0.7823로서 Simulation CO₂농도의 변화는 78.2%가 CO₂농도의 변화에 의하여 발생한다는 것을 설명한다. 또한 이는 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 용접흡 농도분포의 예측 정확도는 78.2%까지 접근한다는 것을 증명한다. 최종적으로 상술한 3자의 농도분포를 가시화하여 비교한 결과 3자는 비록 그 계량단위는 서로 다르지만 농도분포는 비슷한 추이를 보이고 있다. 이는 정량분석의 정확성을 검증하여 주고 있다. 위의 분석과 설명을 통하여 우리는 컴퓨터시뮬레이션 방식을 활용하여 용접작업장의 용접흡 농도를 간접적으로 예

측하여 작업환경개선 작업을 쉽고 빠르고 정확하게 할 수 있다고 사료된다.

VI. 감사의 글

이 논문은 2007-2008년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었으며 지원에 감사를 드립니다.

REFERENCES

- 최호춘, 김강운, 등. 용접사업자 근로자의 흡 및 금속 노출농도에 대한 평가와 혈중 금속 농도. 한국산업위생학회지 Vol.9, No.1. May, 1999
- 최찬기, 김태형, 하현철, 원정일. 흡토치 성능평가에 관한 연구. 한국산업위생학회지 Vol. 9, No. 2. November, 1999
- 변상훈, 박승현, 김창일, 등. 일부업종의 용접흡 분석 및 폭로 농도에 관한 연구. 한국산업위생학회지 Vol. 5, No. 2. November, 1995

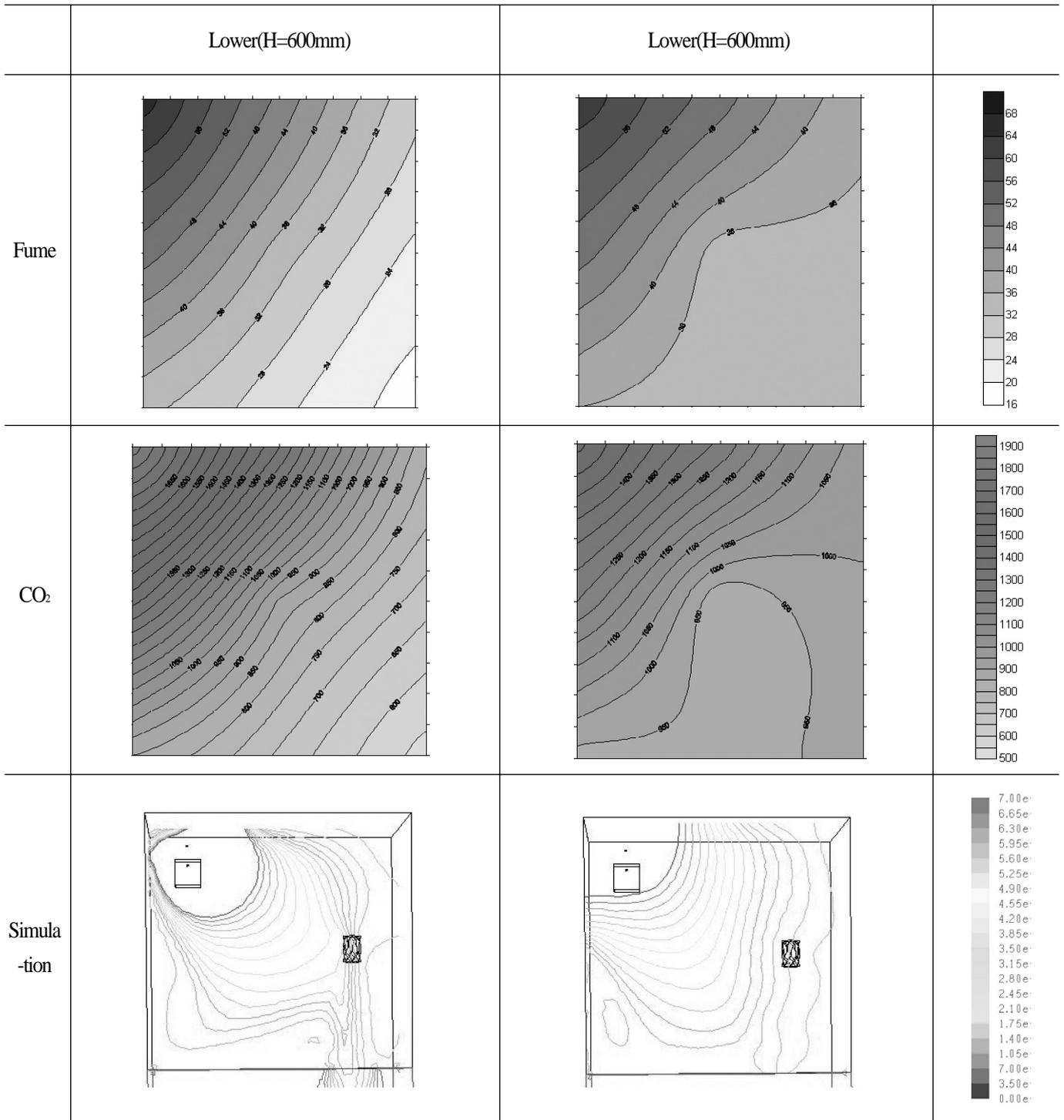


Fig. 8. Drawing of Fume-CO₂-Simulation concentration

곽연순, 백남원. 모조선소의 밀폐된 작업장에서의 공기중 용접흄 및 중금속 농도에 관한 조사연구. 한국산업위생학회지 Vol. 7, No. 1. November, 1997
 오광중, 김현수, 손병현, 지해성. CO₂ 용접에서 용접변수의 변화에 따른 용접흄 제어방법에 관한 연구. 한국산업위

생학회지 Vol.8, No. 1. November, 1998
 Tum-Suden KD, et al (1990): Computer simulation in the design of local exhaust hoods for shielded metal arc welding. Am Ind Hyg Assoc J 51, 115126.
 Ke Qizhi (2007): influence of architecture condition on natural

ventilation efficiency in welding workshop of shipyards. HV &AC, China, Volume37, Issue4, 113-116.

Xiaoyu Li (2008): The Evaluations for concentration of welding fume in an enclosed workspace with one small opening.