

## 제강 작업장내 삼차원 유동장 및 먼지농도의 수치 모사

### Numerical Simulation of 3-Dimensional Fluid Flow and Dust Concentrations in a Steel Foundry

조 현 호 · 홍 미 옥 · 조 석 연\*

인하대학교 환경공학과

(2005년 11월 21일 접수, 2006년 1월 4일 채택)

Hyun-ho Cho, Mi-ok Hong and Seog-yeon Cho\*

*Environmental Engineering, Inha University*

(Received 21 November 2005, accepted 4 January 2006)

#### Abstract

The steel foundries with electric arc furnaces handling metal scraps have recently gained an attention as a potential source of dusts. The present study focuses on the analysis of dust emissions and removals during furnace charging and melting processes by commercial CFD software named FLUENT.

A body fitted grid system consisting of 880,000 meshes was first generated by Gambit for the electric arc furnace with the capacity of 60 ton/cycle and then FLUENT was invoked to solve the corresponding Navier-Stokes equation for the momentum, temperature and dust concentration. The entire processes from metal charging to metal melting were simulated to investigate the unsteady behaviors of fluid flows and dust concentrations.

The model simulation results showed that as the top of the electric arc furnace opened for metal charging, hot plumes bursted out from the furnace rose strongly by buoyance and escaped mostly through the main hood. Therefore, the capacity of main hoods determined the vent efficiency in the metal charging process.

As the furnace was closed after the metal charging and the metal melting processes was followed, the hot flow stream stretching from the furnace to the main hood was dissipated fast and the flow from the inlet of the bottom of the left hand side to the main and monitoring hoods constituted the main stream. And there was only a slow flow in the right hand side of the furnace. Therefore, the dust concentrations were calculated higher in the left hand side of the furnace, which was consistent with observations.

**Key words :** Steel foundry, CFD, Dedusting system, Dust concentration

#### 1. 서 론

우리나라의 공업발전을 선도해온 중화학공업의 과거 과제는 우수한 품질의 제품을 저렴한 가격에 양

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)32-860-7190, E-mail : sycho@inha.ac.kr

산하는 것이었으나, 환경에 대한 관심이 높아진 근래에는 환경의 영향을 최소화하는 것이 주요 과제로 부상하고 있다. 특히 철 스크랩으로부터 철강을 생산하는 제강산업은 철 스크랩의 하역, 전기로 공정 등에서 먼지가 배출되어 작업장 환경과 주변지역의 대기질에 영향을 미친다고 알려져 있다.

철 스크랩 하역장에서 발생하는 먼지와 전기로 작업장의 최종 굴뚝에서 배출되는 먼지에 관해서는 많은 연구가 수행되었지만 (Barnard, 1990; Elliot and Freniere, 1962; Hemeon, 1960; Faist, 1953; Kane and Sloan, 1950), 전기로 작업장내 먼지의 발생 및 유동장 특성에 대한 연구는 매우 미진하다. 이는 전기로가 작업장내에 설치되어 있어 발생한 먼지를 대기로 배출하기 전에 방지시설로 제거함으로써 대기에 미치는 영향을 최소화할 수 있기 때문으로 사료된다. 그러나 전기로에서 발생한 먼지는 작업장 공기의 질을 크게 저하시키고, 일부가 출입문 및 환기구를 통해서 실외 혹은 타작업장으로 유출되어 주변 환경에 영향을 미친다. 따라서 전기로에서 먼지 발생을 최대한 억제하는 동시에 발생한 먼지를 신속히 방지시설로 보내어 제거하도록 하여 작업장내 먼지농도를 최소화하여야 한다.

본 연구에서는 상용 전산유체역학 (computational fluid dynamics, CFD) software인 FLUENT를 이용하여 전기로의 주요 공정인 철 스크랩 장입과 용해시 작업장내 3차원 유체 유동장 및 먼지거동을 모사하여 작업장내 먼지 제거 효율을 증대할 수 있는 환기 및 집진 시스템 개발에 기초자료를 제공함을 목적으로 한다.

CFD software란 유체를 포함한 시스템에 대하여 유체의 흐름, 열전달 그리고 화학적 반응 등과 같은 일련의 물리·화학적 현상들을 표현한 지배 방정식을 컴퓨터를 이용하여 풀어 수치해법을 구하는 분석도구이다. 본 연구에 사용된 FLUENT는 유체유동 해석에 있어 보편적으로 사용되는 수치해법인 유한체적법(FVM)을 사용하며, 이것은 공간과 시간을 이산화하고 격자상에서 지배 방정식을 풀어 해를 얻는 프로그램이다. FLUENT package는 크게 전처리 software와 solver로 구성되어 있다. 전처리는 prePDF, GAMBIT, TGrid이다. prePDF는 PDF combustion을 모델링하기 위한 것이고, GAMBIT은 기하학적 형상 및 격자를 생성하는 전처리기로 외부 모델링 soft-

ware로부터 파일을 읽어오는 것도 가능하다. 그 외의 전처리기로 boundary mesh로부터 volume mesh를 생성하고, mesh quality를 향상시키는 기능을 하는 TGrid가 있다. Package의 핵심이 되는 solver는 FLUENT이며 간단한 후처리(postprocess) 기능을 포함하고 있다.

## 2. 연구 및 방법

### 2.1 전기로

연구 대상인 제강공장 작업장내 발생하는 먼지의 대부분은 철 스크랩을 녹이는 전기로에서 발생하며, 본 연구대상 내에 존재하는 전기로는 아크를 이용하는 전기 아크로(electric arc furnace)로 다른 방식의 전기로에 비해 먼지 및 질소산화물 배출량이 많은 것으로 보고되고 있다(EPA, 1974). 전기로에서 작업장으로 먼지 배출이 가장 많은 시기는 철 스크랩이 전기로에 장입되면서 순간적으로 증발 및 팽창이 일어나 불기둥이 치솟을 때이다. 본 연구 대상 전기로는 1회 용량이 60톤으로 45분 동안 3~4회에 걸쳐 철 스크랩을 장입, 용해하여 제품을 생산한다.

### 2.2 제강 공장의 환기시설

제강 공장은 전기로에서 발생한 먼지와 기타 가스를 후드로 강제 배기시켜 집진 설비인 bag house로 보낸다. 배기 방법은 두 가지로 나뉜다. 철 스크랩 용해시 전기로 덮개가 닫힌 상태에서 발생하는 먼지는 전기로 덮개에 연결된 직인 후드에서 포집되어 bag house로 유입되며, 철 스크랩 장입시 발생하는 먼지는 건물 지붕에 위치한 건옥 후드(rooftop hood)에서 흡입되어 bag house로 유입된다. 본 연구 대상 작업장의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 건옥 후드는 전기로 직상부 건물 옥상에 위치한 1개의 주 후드(main hood)와 건물 외벽에 위치한 3개의 보조 후드(monitors hood, H1~3)로 구성되어 있으며, 이들 후드는 하나의 배관으로 연결되어 있다. 직인 후드와 건옥 후드 유량의 총합은 20,000 CCM(cubic meter per minute, m<sup>3</sup>/min)인데, 직인 후드의 유량이 약 0~6,000 CCM으로 변화하고 이에 따라서 건옥 후드의 유량이 20,000~14,000 CCM으로 변화한다.

2.3 유동장 및 먼지거동 모사 모델

본 연구에서는 상용 CFD 소프트웨어인 FLUENT 를 이용하여 제강 공장 내부의 기체와 입자의 거동을 모사하였다. 먼저 FLUENT의 전처리 프로그램인 Gambit version 2.2.30을 이용하여 모사구간의 설정 및 계산격자를 구축하고, solver인 FLUENT version 6.2.16을 이용하여 질량, 운동량, 에너지, 입자 거동 방정식의 해를 구하였다. 참고로 이번 버전은 FLUENT에서 먼지 유동 모델인 DPM (Discrete Phase Modeling)에 유체의 정상상태 유동에서도 입자의 유입시간과 시간간격을 조절하여 비정상상태의 먼지 유동을 볼 수 있는 기능을 추가하고, 모든 입자 주입방법에서 Rosin-Rammler distribution을 사용 가능하도록 하였다.

일반적으로 공정모사는 정상상태를 가정하여 전산 시간 및 용량을 최소화하지만, 본 연구에서는 전기로 공정의 동적현상을 연구하기 위해서 정상상태 가정 없이 비정상상태로 모사하였다. 난류모델은 일반적으로 널리 사용되는  $k-\epsilon$ 모델을 이용하였고, 수치적분은 분리해석법 (segregated solver)을 이용하고, 밀도는 2차 상향차분법을 그리고, 운동량, 난류에너지 (turbu-

lence kinetic energy), 소산율 (turbulence dissipation rate), 에너지는 1차 상향차분법을 사용하였으며, 압력-속도 연동 계산은 PISO 기법을 사용하였다.

본 연구에서 모사 영역은 그림 1과 같이 전기로가 있는 작업장 전체이며, 모사영역의 크기는 100 (W) × 22.9 (D) × 45.5 (H) m이다. 계산격자는 사면체 격자 (tetrahedral mesh)를 사용하였으며, 약 88만개의 격자가 소요되었다.

총 모사시간은 약 10분으로 전기로에 철 스크랩을 1회 장입 및 용해하는 현상을 모사하였다. 동기간동안 동적으로 변화하는 후드별 유출량 분포와 환기구의 유입량을 산출하기 위해서 경계조건은 속도 경계조건이 아닌 차압 경계조건을 부여하였는데, 구체적인 내용은 표 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유체 유동장/온도 분포

그림 2는 장입과 용해과정 중 주요 시간대에 온도 및 유동장을 보여주고 있다. 본 모사에서 장입은 0초부터 53초까지 진행되며, 용해는 53초에서 588초까지 진행되었다.

장입초기인 4.9초의 온도 분포 및 유체 유동장 그림은 전기로에서 뜨거운 공기가 분출되는 현상을 잘 보여주고 있다. 또한 32.2초일 때에 모사결과는 전기로부터 분출된 공기가 후드를 통하여 활발하게 유출됨을 보여주고 있는데, 이러한 온도 분포 및 유동장은 장입이 완료되는 53초까지 유지된다. 장입이 완료된 직후인 55.8초에는 전기로 덮개가 닫히면서 장입시에 형성되었던 전기로부터 후드까지 펼쳐져 있는 고온 부분이 많이 약화됨을 볼 수 있다. 시간이 경과하면서 장입시 발생하였던 고온 및 고속 부분이 사

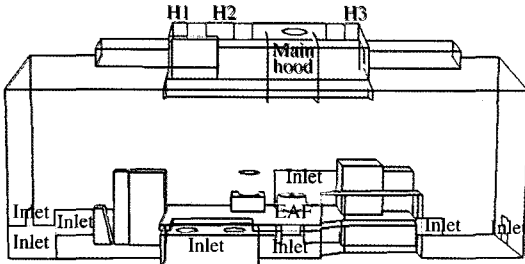


Fig. 1. The schematic diagram of the EAF (electric arc furnace) chamber.

Table 1. The boundary conditions given at EAF, hoods, and inlets.

		Charging 1	Charging 2	Melting 1	Melting 2	Melting 3
EAF* B.C#	Time (Sec)	9.8	53.0	56.5	150.5	587.5
	Temperature (K)	1400	1400	700	700	700
	Pressure (Pa)	-5	-5	0	0	0
	Rooftop hood B.C (Pa)	-8	-8	-8	-8	-8
	Inlet B.C (Pa)	0	0	0	0	0

\* EAF : Electric Arc Furnace, # B.C : Boundary Condition

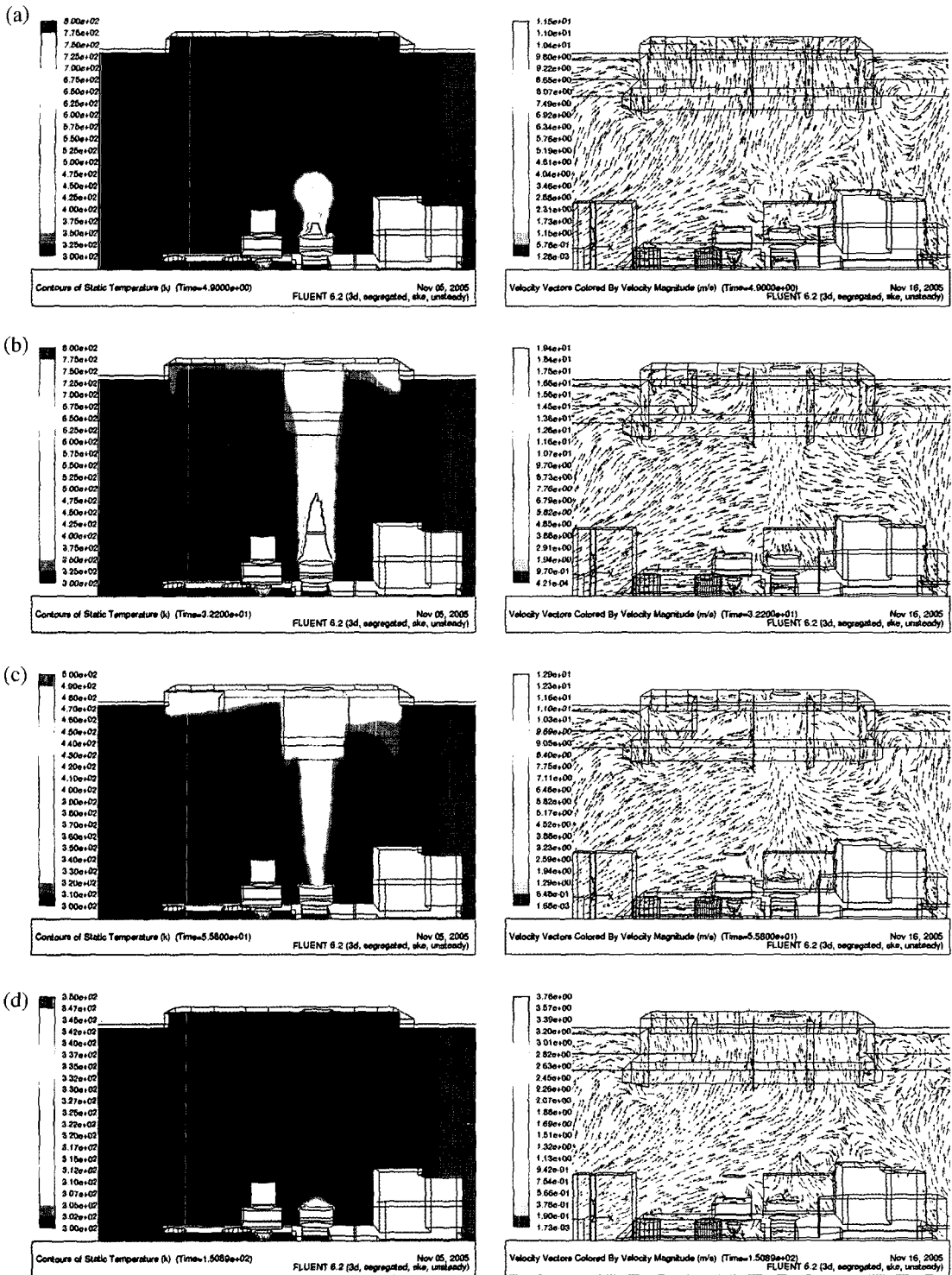


Fig. 2. Two dimensional profiles for temperatures and air flows; (a)  $t=4.9s$ , (b)  $t=32.2s$ , (c)  $t=55.8s$ , (d)  $t=150.0s$ .

라지게 된다. 즉 시간이 150초인 경우에 모사결과가 보여주는 바와 같이, 전기로에서의 상승 유속이 현격히 약화되고, 전기로 좌측 하단에서 유입되어 후드로 유출되는 기류가 주기류가 된다. 본 기류에 의하여 전기로 좌측부에 공기의 흐름이 활발하지만, 이와 대조적으로 전기로 우측부에는 공기의 흐름이 원활하지 않게 나타난다. 이러한 온도 분포 및 유체 유동장은 다음 장입이 시작되는 시점인 558초까지 지속된다.

**3. 2 공기 유입량 및 유출량**

앞 절에서 제시한 전기로 작업장의 3차원 유체 유동장은 작업장내 공기 소통의 상세한 정보를 제공한다. 본 절에서는 이로부터 후드의 유출량 및 유입구의 유입량을 산출하여 그림 3에 제시하였다. 장입시 기인 0초부터 53초까지는 전기로 덮개가 개방되고 철 스크랩이 주입되면서 순간적으로 증발 및 팽창이 일어나서 전기로에서 더운 공기가 빠른 속도로 분출된다. 분출된 더운 공기는 자연대류를 야기하여 작업장의 공기가 상승하고 더 나아가서 작업장 하부에 위치한 유입구에 공기유입이 가속화된다. 그 결과 그림 3에 나타난 바와 같이 전기로에서 공기 분출속도는 2,000 CCM인데, 유입구의 유량은 이의 4배에 달하는 8,000 CCM이 증가한다.

이렇게 유입된 공기는 작업장 상부에 위치한 건축 후드를 통하여 유출된다. 그림 3에 나타난 바와 같이 본 장입기간 중에 3개 보조 후드의 유량 변화는 적은 반면, 주 후드의 유량은 크게 증가한다. 즉 덮개가 열릴 0초에서 53초까지는 고온의 공기덩어리가 상승하면서 주 후드의 유출량은 3,930 CCM에서 12,152 CCM까지 점차 증가하여 전체 유출량의 60%를 차지한다. 보조 후드인 H1, H3는 약간만 증가하고 H2는 오히려 약간 감소하는데, 이는 주 후드로의 상승 기류가 강하여 옆에 위치한 보조 후드에 흡입이 원활하지 않기 때문이다.

장입시인 32.2초와 53초인 경우에 주 후드에서 공기 유출속도는 각각 12,081, 12,152 CCM으로 3개 보조 후드의 유출량인 1,927~3,076 CCM과 2,136~3,427 CCM을 3배 이상 초과한다. 반면에 주 후드의 단면적은 23.65 m<sup>2</sup>로 보조 후드 총단면적 53.94 m<sup>2</sup>보다 작으므로, 본 후드의 유출은 단순한 차압보다는 내부 유동장과 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

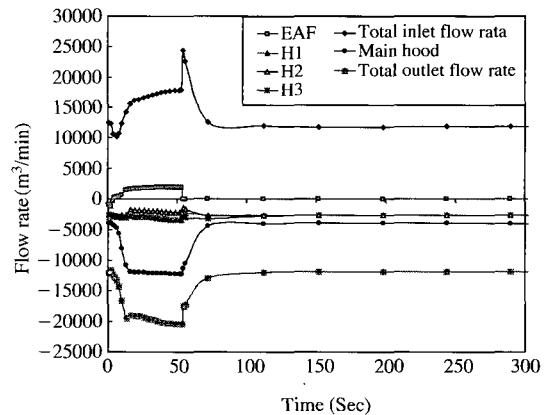
장입이 완료되고 덮개가 닫히는 순간인 53초에는 전기로로부터 공기 유입량은 급격히 감소하지만 환기구에서 총유입량은 오히려 급격히 증가한다. 이는 전기로에서 공기의 유입은 없어지지만, 이전에 유입된 공기의 상승은 지속되어 이를 보충하기 위해서 환기량이 증가하기 때문이다.

용해 중에 유출량 및 유입량은 큰 변화가 없이 일정하다. 본 기간 중에 주 후드의 유출량은 4,022 CCM이고, 보조 후드에 유출량은 2,567~2,659 CCM이다. 즉, 유출량 비는 약 1.5배로 주 후드와 보조 후드의 면적비인 1.3배와 유사한데, 이는 내부 유동장이 약화됨에 따라서 차압에 의하여 후드의 유출량이 결정되기 때문으로 사료된다.

이와 같이 주 후드와 보조 후드에 공기 유출량의 상대적 비는 장입시와 용해시에 다르게 나타난다. 그림 4는 주요 시간대에 주 후드와 보조 후드의 상대적 유출량을 보여주고 있는데, 장입시에는 주 후드의 기여도가 점차적으로 증가하여 50%를 초과한다. 장입시에 먼지가 가장 많이 발생하므로, 필요시 주 후드를 확장시켜서 상승하는 공기를 충분히 배출할 수 있도록 하여야 한다.

**3. 3 먼지 유동**

전기로에 철 스크랩이 투입되는 순간에 발생하는 먼지는 철 스크랩내 포함되어 있는 휘발분이 증발하여 발생한다. FLUENT는 단일 입경 입자는 물론 다 입경 입자의 거동을 모사할 수 있으나, 본 연구에서



**Fig. 3. Temporal variations of flow rates of inlets, hoods, and EAF.**

는 전기로에서 배출되는 거대 입자의 거동을 조사하기 위해서 입자 직경을 25 μm로 가정하였으며, 장입당 배출속도는 10 g/sec이고 먼지배출기간은 1초로 가정하였다. 본 배출속도는 상자모형을 이용하여 미국 EPA 배출계수를 보정한 값이다.

그림 5는 장입과 용해공정에서 주요 시간대별 먼지 농도를 보여주고 있다. 7.7초 때에는 장입초기에

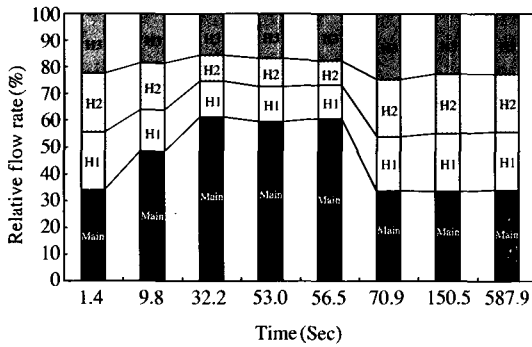


Fig. 4. Temporal variations of flow distributions among hoods.

발생된 먼지 플룸(plume)이 구형 형태로 상승함을 잘 보여주고 있다. 시간이 30.6초 때에 먼지 플룸이 주 후드에 도착하였으나, 주 후드가 먼지 플룸을 모두 흡입하지 못함에 따라 먼지 플룸이 인근 지역으로 산개함을 보여준다.

장입이 완료되고 시간이 100.5초와 150.5초로 경과하면서 주 후드 주변에 정체된 먼지가 해소됨을 보여주고 있다. 특히 본 시간대에는 일부 먼지가 하강하여 작업장의 중간부분에도 먼지농도가 나타나고 있다. 또한, 먼지 농도는 전기로의 좌측보다는 우측에서 높게 모사되었다.

#### 4. 결 론

본 연구는 CFD 프로그램을 이용하여 제강 공장의 유동장과 먼지 거동을 파악하여 추후 공장 개선시 기초자료로 이용하는 데 그 목적이 있다. 모사 결과를 분석해 두 가지 사항을 알 수 있었다.

첫째, 유동장 분석 결과 전기로 덮개가 닫힌 후 공

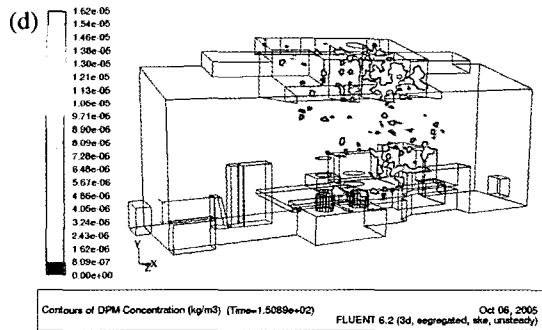
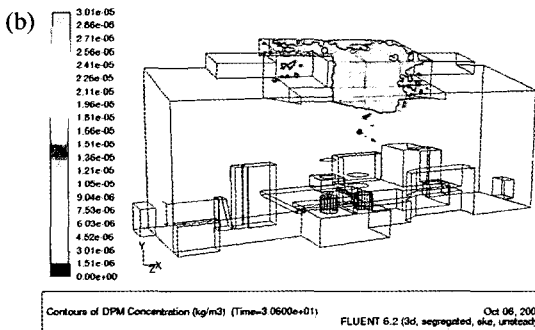
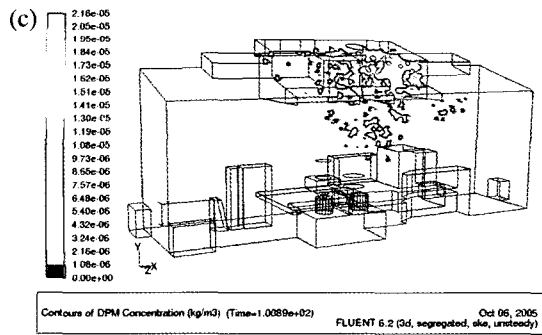
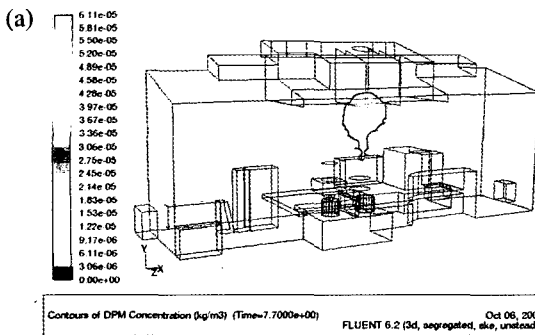


Fig. 5. Three dimensional dust concentration distributions; (a) t=7.7s, (b) t=30.6s, (c) t=100.5s, (d) t=150.5s.

기 유동이 점차 안정화되어 가면서 전기로 좌측과 우측의 유동이 상이하였다. 즉, 작업장 좌측부 하단에서 유입된 공기는 우측에 비해 유입량이 많아 건욕 후드까지 대각선으로 상승하면서 작업장 좌측에 강한 기류를 형성한 반면, 우측부 하단에서 유입된 공기는 유입량도 좌측에 비해 적고 장애물에 의해 후드까지 원활한 기류가 형성되지 않았다. 결과적으로 작업장 좌측이 우측에 비해 먼지 농도가 낮은 상태가 되었다.

둘째, 후드의 공기 유출량을 확인해서 후드별 환기 기여도를 얻을 수 있었다. 전기로 덮개가 열리면서 후드의 유출량은 점차 증가하였지만, 주로 주 후드에서 크게 증가하였고 보조 후드의 증가는 크지 않아서 주 후드의 유출량이 전체의 60%까지 증가했다.

이상의 모델 분석결과 bag house의 주 송풍기 용량 증가와 건욕 후드의 형상 변경이 필요한 것으로 확인됐다. 하지만 본 연구에서는 실험을 통한 모델의 적합성 검증이 이루어지지 않았다. 따라서 작업장 공기 유입부에서 유속 측정과 공장 내부 및 건욕후드에서 먼지 농도를 실시간으로 측정하여 모델결과와 비교·검토하고 차후 모사를 진행할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 인하대학교의 연구비 지원을 받아 수행

되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

Barnard, W.R. (1990) Emission Factors For Iron And Steel Sources-Criteria And Toxic Pollutants, E.H. Panchan and Associates, Inc., EPA-600/2-50-024.

Elliot, A.C. and A.J. Friere (1962) Metallurgical Dust Collection In Open Hearth And Sinter Plant, Canadian Mining And Metallurgical Bulletin, 55(606), 724-732.

EPA (1974) Background Report AP-42 Section 12.13 Steel Foundries, Research Triangle Park, NC 27711

Faist, C.A. (1953) Electric Furnace Steel, Proceedings Of The American Institute Of Mining And Metallurgical Engineers, 11, 160-161.

Gittler, P., R. Kickinger, S. Pirker, E. Fuhrmann, J. Lehner, and J. Steins (2000) Application of computational fluid dynamics in the development and improvement of steelmaking processes. Scandinavian Journal of Metallurgy, 29, 166-176.

Hemeon, C.L. (1960) Air pollution problems of the steel industry, JAPCA, 10(3), 208-218.

Kane, J.M. and R.V. Sloan (1950) Fume control electric melting furnaces, American Foundryman, 18, 33-34.