

〈論 文〉

## 소각로의 형상설계를 위한 냉간유동실험

류창국\* · 김승기\* · 최상민\*\*

(1994년 2월 3일 접수)

### A Cold Flow Experiment for the Incinerator Shape Design

Chang Kook Ryu, Soong Kee Kim and Sangmin Choi

**Key Words :** Incinerator(소각로), Combustion Chamber(연소실), Water-Table Model(수상모형), Flow visualization(유동 가시화)

#### Abstract

A flow visualization experiment using water-table models was performed. The water-table models simulated the two-dimensional cold flow fields inside the combustion chambers of incinerators. The flow fields were visualized by small but neutrally buoyant particles photographed by an overhead camera. The experimentally simulated flow fields apparently showed distinct features of two combustion chamber shapes; counter and parallel flow types. The significance of the secondary air injection on the mixing of combustion gases were clearly observed. The effects of the recirculation zones, which were present in the secondary chamber, were discussed by considering the importance of them for optimal combustion.

#### 기 호 설 명

*m* : 모형 (model)

*d* : 2차 공기제트 노즐의 직경

*Fr* : 프라우드수(Froude number, =  $V/(gy)^{1/2}$ )

*g* : 중력 가속도

*L* : 특성적인 길이

*Re* : 레이놀즈수(Reynolds number, =  $VL/\nu$ )

*s* : 2차 공기제트 노즐간의 간격

*V* : 특성적인 평균속도

*y* : 자유표면이 있는 유동의 수심

#### 그리스문자

$\nu$  : 유체의 동점성(kinematic viscosity)

$\theta$  : 2차 공기 주입각도

#### 하첨자

*p* : 원형 (prototype)

#### 1. 서 론

도시 폐기물 소각로의 1차적인 목적은 가연성 폐기물을 연소시켜 체적과 중량을 감량화하는 데에 있다. 그러나, 이러한 과정에서 원치않는 2차 공해물질의 발생은 불가피하다. 100여년의 역사를 갖고 있는 소각로 선진국들은 여러 가지 규정을 통하여 공해물질의 규제치를 정해 놓고 있다. 미국 EPA(환경보호국)의 우수연소방안(1989), 독일 환경성의 TA-Luft(1986), 그리고 일본 후생성의 가이드라인(1990) 등이 그 예들이다.<sup>(1)</sup> 소각로에서 발생하는 공해물질의 억제는 사전방지법, 소각로내의 최적연소, 후처리법 등의 3단계로 이루어 질 수 있다.<sup>(2)</sup> 이 가운데에 이 연구는 소각로내의 최적연소에 관심의 초점을 두고 있다. 최적연소란 폐기물을

\*한국과학기술원 기계공학과

\*\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

최대만으로 감량화할 뿐만 아니라 공해물질의 생성 억제와 파괴를 연소조절의 방법으로 극대화하는 것을 의미한다.

최근에 많은 선진 기업들은 소각로에서 폐기물의 연소가 일어나고 있는 연소실에 지대한 관심을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 캐나다의 Quebec사, 독일의 DBA, 일본의 Mitsubishi중공업과 Kawasaki중공업 등은 연소실의 형상을 변경하여 좋은 효과를 본 것으로 알려져 있다. 더불어 연소공기의 주입방식도 최적연소를 구현하기 위하여 매우 중요하며, 미국의 Commerce사, 독일의 Martin사, 일본의 Kobe철강 등의 예를 볼 수 있다.<sup>(8)</sup> 한편, 연소실의 형상과 연소공기 주입방식의 결정을 위해서는 연소실내에서 일어나는 복잡한 열유동현상을 이해하는 것이 필수적이다. 선진 기업들은 이러한 현상들을 분석하기 위하여 실제의 소각로에서 확인하는 방법뿐만 아니라 단순화 또는 모형화를 통하여 이론적, 실험적으로 접근하는 방법을 널리 사용하였다. 열유동을 해석하기 위한 범용 수치계산 프로그램을 사용하는 것이 손쉬운 방법으로 채택될 수 있다. Ravichandran과 Gouldin<sup>(9)</sup>은 PHOENICS와 FIDAP을 사용하여 연소실의 유동장을 해석하여 2차 연소공기 주입의 효과를 관찰하였으며, Nasserzadeh<sup>(6,8)</sup> 등은 FLUENT를 사용하였다. 최근에 Shin<sup>(7)</sup>은 FLUENT를 사용한 열간 수치해석에서 적절한 혼합인자를 도입하여 연소실의 형상과 연소공기 주입의 효과를 분석하였다. EPA의 보고서<sup>(6)</sup>를 살펴보면, 선진 기업들에서 기존시설의 개선을 할 때 냉간유동(cold flow) 모형실험이 가장 흔히 사용하는 방법임을 알 수 있다. 독일의 DBA사와 Steinmueller사는 냉간유동 모형실험과 노내 측정법을 함께 사용하였으며, 덴마크의 Volund사는 수상유동 모형실험(water-table flow modeling)을, 독일의 Martin사는 냉간공기유동 모형실험을 수행하였다. 냉간유동의 실험으로는 연소가스를 공기로 상사한 풍동실험(예를 들면, 독일 Essen 대학의 실험<sup>(9)</sup>)이 많이 수행되었으며, 유동의 가시화를 용이하게 하기 위하여 물을 유동물질로 사용한 Cohan<sup>(10)</sup>과 Fehr와 Vaclavinek<sup>(11)</sup> 등의 수동실험이 유용한 방법으로 사용되었다.

소각로의 설계에 있어서 폐기물의 주입과 연소공기의 배급 등 입력조건을 기준으로 연소환경을 유지시켜 주는 온도 및 열전달조건을 제공하도록 연소실 부분의 설계가 이루어져야 한다. 설계 변수들

의 정량적인 평가는 설계개념의 확인 및 설계인자의 검토를 위한 연소, 유동, 열전달의 실험실 규모와 실험과 열유동의 전산해석기법을 통한 설계변수의 최적화를 필요로 한다. 또한 이들 단위실험과 설계계산은 실제 장치 또는 파일롯트 플랜트에서 실증되어야 한다.<sup>(1)</sup> 이 논문에서 소개하는 것은 소각로 설계를 지원하기 위한 단위실험의 하나로써 연소실의 냉간유동장을 실험적으로 관찰하는 방법과 결과이다. 실험장치는 Cohan<sup>(10)</sup>이 사용한 바 있는 2차원 수상모형(water table model)과 유사한 방법으로 제작하였다. Cohan<sup>(10)</sup>의 논문에는 수상모형에 대한 이론적인 설명이 없으므로, 이 논문의 앞부분에는 수상모형실험의 기본적인 가정과 이론적인 근거, 실험시 부딪히게 되는 문제들에 대한 구체적인 대책을 제시한다. 이 논문의 뒤부분에는 선정한 연소실의 두가지 형상, 즉, 역류형(counter flow type)과 병류형(parallel flow type)에 대하여 1차, 2차 연소공기의 주입방식에 따른 연소실내부의 유동형태를 가시화하고 해석하여 설계에 필요한 기본적인 정보를 정리한다.

## 2. 실험장치와 실험방법

### 2.1 소각로의 연소실

이 연구에서 대상으로 하고 있는 소각로는 화격자식(grate 또는 stoker식) 소각로이다. 이 소각로는 소각로내에 가동화격자를 설치해 이 화격자위에 피소각물을 올려서 태우는 방식으로, 연소공기는 화격자의 아래쪽에서 피소각물을 통해서 위쪽으로 통과하여 피소각물의 소각을 촉진시키며, 화격자 부위에서 불완전 연소된 상태로 연소가스에 포함되어 있는 성분의 완전연소를 위하여 연소실의 중간 부위에 2차 연소공기를 주입한다. 1차 연소공기(primary air 또는 underfire air)는 건조부, 주연소부, 후연소부에 각각 하나 또는 그 이상의 부위로 나뉘어져 적절한 유량으로 주입되며, 2차 공기(secondary air 또는 overfire air)는 연소실의 전벽(front wall)과 후벽(rear wall)의 적당한 곳에 여러개의 노즐형태로 설치되며 속도가 빠른 제트로 주입되어 연소공기와 혼합된다. 연소실은 일반적으로 주연소실과 2차 연소실로 나눌 수 있는데, 2차 연소실에는 수관벽을 설치하여 보일러의 역할을 수행하도록 한다. 소각로의 전시스템은 소각 연소실과 함께 폐기물의 전처리부와 연소가스의 후처리

부, 잔재의 처리부, 발전설비 등의 부대시설을 포함한다.

이 연구의 시험대상으로는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 일당 처리용량이 300톤(ton)인 소각로 연소실의 두가지 형상으로 선정하였다. Fig. 1(a)와 (b)는 폐기물의 이송방향(Fig. 1(a)에 참고로 나타냄)과 연소가스의 흐름방향에 따라 각각 역류형과 병류형으로 부를 수 있다. Fig. 1(a)는 역류형으로 폐기물의 이송방향과 연소가스의 주된 흐름방향이 반대이며, Fig. 1(b)는 병류형으로 주연소부의 상부에 복사패널(radiation panel)을 설치하여 폐기물의 이송방향과 연소가스의 주흐름방향이 평행하도록 한 것이다. 이 두 형상은 대조적인 내부 유동 특성을 갖기 때문에 시험결과로부터 연소실 형상의 효과를 명확하게 관찰할 수 있다.

2.2 연소실 모형실험장치

2.2.1 실험의 가정

연소실에서는 질량, 운동량과 에너지의 전달현상이 난류, 화학반응, 복사열전달과 다상효과 등 다양한 분야의 현상들과 결합되어 일어나고 있는 매우 복잡한 열유동장이 형성되어 있다. 이러한 복잡한 열유동장을 해석하기 위해서는 단순화의 과정을 통하여 모형화하는 것이 필요하며, 이 단순화의 정도에 따라서 다양한 수준의 실험이 가능하다. 이 실험에서는 열전달과 연소를 고려하지 않은 2차원 냉간 유동장을 관찰하기 때문에 실제 연소실에서 일어나는 현상과의 상사성을 밝혀내는 것은 매우

중요하다. 실제의 연소실에서 일어나는 복잡한 열유동 및 반응과정에서 유동은 가장 주된 부분이며, 다른 효과들, 즉, 연소와 열전달에 의해 상대적으로 큰 영향을 받지 않는다. 따라서 정량적인 엄밀성은 부족하지만 냉간유동의 이해로부터 정성적인 특성을 관찰하여 설계의 기초적인 아이디어를 창출해 낼 수 있다.

이 연구에서는 폭에 비해 높이가 매우 작고 자유표면이 존재하는 2차원 모형을 테이블 위에 올려놓고 실험하였다. 이러한 2차원 실험방법은 형상과 주입조건외의 변경, 가시화 등 여러가지 측면에서 큰 장점이 있다. 연소실내의 3차원 난류유동장을 2차원적으로 본다는 단순화 또한 많은 정보를 잃게 할 수 있다. 그러나, Nasserzadeh 등<sup>(5,6)</sup>은 소각로의 전산 수치해석으로부터 강한 2차원성을 확인한 바 있으며, Ravichandran과 Gouldin<sup>(4)</sup>은 소각로 연소실 형상을 특징짓는 특성은 2차원이고, 제트와 교류(cross flow)와의 혼합특성에 2차원성이 강하기 때문에 2차원적인 해석이 첫 단계로 의미가 있다고 하였다. 제트와 교류의 혼합특성을 정리한 Niessen<sup>(12)</sup>의 자료로부터 제트 노즐간의 간격(s)과 노즐의 직경(d)의 비(s/d)가 8이하이면 제트의 체적이 크게 변하지 않고 평면제트와 유사해지는 것을 볼 수 있다. 소각로 연소실에서는 그 비가 대략 4~6이므로 2차원으로 가정할 수 있다.

2.2.2 삼사법칙

유동장의 상사모형을 위해서는 원형(prototype)과 모형(model)의 특성적인 무차원수를 일치시켜야 한다. 냉간유동시험, 즉, 속도장을 고려할 때에는 레이놀즈수(Reynolds number)를 무차원수로 사용한다. 원형과 모형의 레이놀즈수를 일치시키려면

$$Re_M = Re_P \tag{1}$$

이므로

$$\frac{V_M}{V_P} = \frac{\nu_M}{\nu_P} \frac{L_P}{L_M} \tag{2}$$

이다. 여기에서 하첨자 P와 M은 각각 원형과 모형을 의미한다. 원형과 모형의 특성길이와 점성을 비교하면 Table 1과 같다. 1/20 규모의 축소모형이라면  $L_P/L_M=20$ ,  $\nu_M/\nu_P=153$ 이므로  $V_M=0.13V_P$ 가 된다. 2차 연소실에서의 유속을 기준으로 하면 원형의 유속을 5m/sec로 볼 때 모형은

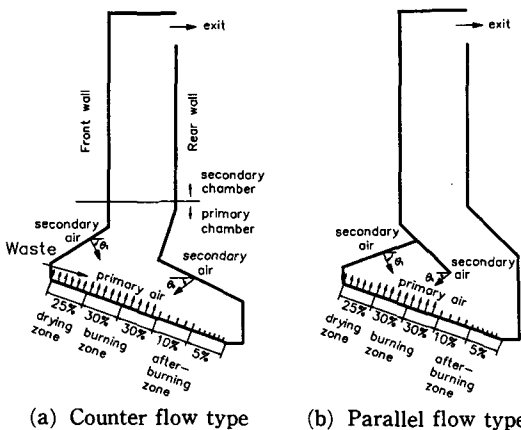


Fig. 1 Model geometry for visualization experiments

**Table 1** Comparison of conditions between prototype and model

	Prototype	Model
Main flow media	Air	Water
Mean temperature(°C)	900	20
Viscosity, $\nu$ (m <sup>2</sup> /sec)	$159 \times 10^{-6}$	$1.042 \times 10^{-6}$
Length scale*, L(m)	4.0	0.20
Velocity scale*, V(m/sec)	5.0	0.13

\*Values in the secondary combustion chamber

0.65 m/sec의 유속을 갖게 된다. 2차 연소실에서 이 유속을 얻기 위해서는 평균수심을 30 mm로 했을 때 약 240 l/min의 유량이 필요하며, 2차 주입구에서의 유속은 약 4 m/sec가 된다. 일반적으로 레이놀즈수가  $10^4$  이상이면 레이놀즈수에 따른 난류유동장의 변화가 없다는 사실은 레이놀즈 상사성(Reynolds similarity)이라는 이름으로 잘 알려져 있다.<sup>(13)</sup> 따라서, 모형실험장치에 필요한 펌프의 용량을 줄일 수 있다. 원형 소각로에서의 레이놀즈수는 약  $10^5$ 이므로 모형의 레이놀즈수를 원형의 레이놀즈수의 1/5로 하여 모형을 설계하였다. 결과적으로, 모형의 2차 연소실에서의 속도는 약 0.13 m/sec가 되고 총유량은 약 48 l/min가 되어 실험적으로 적당한 크기가 된다.

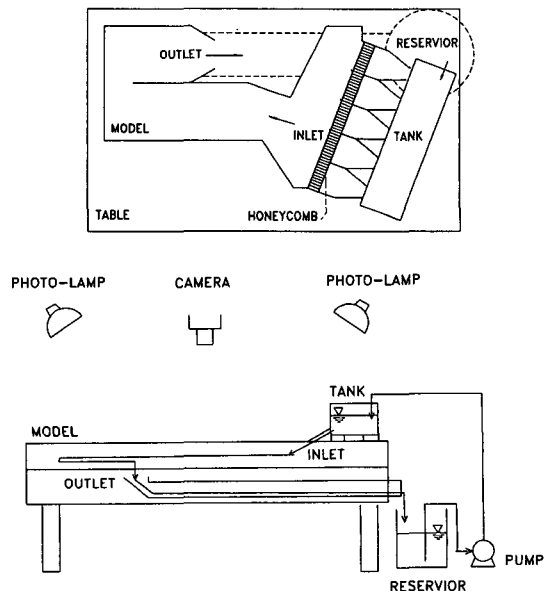
그러나, 실제 연소실내에서는 온도가 균일하지 않고, 2차 공기는 상온 또는 약간 예열된 공기로서 내부가스보다 매우 낮은 온도를 갖고 있으므로 완전한 상사는 얻을 수 없다. Fehr와 Vaclavinek<sup>(11)</sup>는 수동실험에서 온도의 차이를 고려하여 각 부위별로 축소비를 달리한 모형을 제작하였다. 이 방법은 냉간유동실험에서 온도 불균일을 보상할 수 있는 방법일 수 있지만, 1차와 2차 공기의 심각한 온도차에 의한 혼합상황을 상사할 수는 없다. 이 연구에서는 실험으로 연소실내의 냉간유동장만을 관찰하여 정성적인 결과를 얻는 것이 주목적이며, 또한 이 결과를 수치해석의 모형검증에 사용할 수 있으므로 수치해석적인 방법으로 보다 정밀한 해석, 즉, 열간유동해석 등을 수행하는 데에 기초자료를 제공할 목적으로 단순 축소모형을 사용하였다.

2.2.3 실험장치

Fig. 2에 모형의 개략도를 나타내었다. 전체 시

스템은 책상위에 놓여지게 되며, 유동순환은 유량 50 l/min, 양정 5 m용량의 마그네틱 펌프에 의해 이루어지고 각 주입구에서의 유량은 수조에 설치된 주입구의 넓이를 변화시켜서 조절하였다. 1차 주입구는 쓰레기가 있을 경우 쓰레기를 통과하면서 유동이 균일해질 것이라고 가정하여 실제 소각로에서 주로 사용하는 노즐형태와는 달리 주입구의 각 구간별로 균일한 속도분포를 가지도록 하였고, 2차 주입구의 경우에는 쓰레기의 방해받지 않으므로 원형제트로 하여 빠른 속도를 갖도록 하였다. 2차 주입구 각도의 변화는 원형제트 주입구의 방향을 단순히 변화시키면 가능하고, 모형내부에 새로운 형상의 벽을 집어넣거나 제거하여 형상의 변화가 용이하도록 설계하였다. 유동의 가시화를 위하여 물과 비중이 유사한 실리콘 고무로 만든 부유입자들을 연소실내에 투입한 후 모형의 위쪽에서 카메라를 사용하여 유동장을 촬영하였다.

이 연구에서 제작한 2차원 수상모형의 가장 큰 목표는 2차원 유동장을 만들어 내는 것이다. 그러나, 이 장치는 수로(water channel)의 일종이므로 여러가지 문제들을 야기한다. 우선 벽근처에서는 경계층(boundary layer)이 형성되는데, 난류 경계층 실험식<sup>(14)</sup>을 적용하면 이 모형에서의 2차 연소실부에서는 약 20 mm 두께의 경계층이 형성되어



**Fig. 2** Schematic diagram of the two-dimensional water-table model

30 mm 정도의 깊이를 갖는 이 실험장치에서는 깊이 방향으로 약 10 mm의 균일유동영역이 존재하며 이 영역이 2차원성이 유지될 수 있는 영역이다. 그러나, 수로의 단면적이 변하므로 수심의 변화가 발생한다. 따라서, 수심이 급격하게 변하는 부위—예를 들면, 목부위(질량보존에 의해 약 10 mm의 수심변화가 있다.)—에서는 유동이 속도에 의한 관성력(inertia)과 함께 원치 않는 중력(gravity)의 영향을 받게 된다. 이 힘들의 비인 프라우드수(Froude number =  $V/(gy)^{1/2}$ , 여기에서  $g$ 와  $y$ 는 각각 중력 가속도와 수심의 차를 의미한다.)를 계산해 보면 약 2.5로 중력의 영향이 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 마지막으로, 이 수로형 모형은 측면벽에서 표면장력(surface tension)에 의해 2차원성이 손상받을 수 있는데, 이를 최소화하기 위하여 매끈한 표면을 갖는 아크릴로 제작하였다.

부유입자를 사용하는 유동가시화에서는 입자가 유동을 따라 가도록 하는 것이 가장 중요하다. 유체의 운동은 Navier-Stokes 방정식에 의해 지배되지만 부유입자는 다양한 외부의 힘(부력, 중력 등)에 의해 움직이질 수 있다. 입자의 밀도는 부력의 효과를 최소화하기 위하여 유체의 밀도와 같도록 해야 한다. 여기에서 사용한 입자는 비중이 약 1.05이므로 물에 소금을 용해하여 밀도를 조정하였다. 입자의 크기는 유동에 영향을 주지 않고, 가시화의 대상이 되는 유동의 최소 길이척도보다 1차이상 작아야 한다.<sup>(15)</sup> 이 실험장치의 유동은 난류유동이므로 난류의 길이척도를 고려하면 입자의 크기는 매우 작아야 하지만(직경이 약  $1\ \mu\text{m}$  이하), 평균유동에 관심을 가질 경우 여기에서 사용한 직경 1 mm의 크기는 적당하며, 유동을 방해하지 않고 가시화하는 데에 적절한 크기이다.

물의 깊이방향으로 속도의 구배(shear)가 형성되므로 부유하는 입자는 입자 위면과 아래면의 압력 차에 의해 양력(lift force)을 받게 된다.<sup>(15)</sup> 물론 입자가 작을수록 양력은 작아지겠지만, 경계층 외부의 균일유동영역에서는 이 양력이 무시될 수 있다. 또한, 자유표면(free surface)에 떠있는 입자는 표면장력의 영향을 크게 받으므로 속도가 작아진다.<sup>(16)</sup> 이 실험에서는 물의 밀도가 입자와 거의 같도록 조절되었고 경계층에서는 입자가 속도구배에 의해 양력을 받으므로 대부분의 입자가 균일유동영역에 잠겨 있었으며, 표면에 떠있는 입자는 매우 느리게 움직이며 유동과는 다른 거동을 보였다.

일례로 Fig. 6을 보면 2차 주입구 앞의 유선이 교차하고 있다.

Merzkirch<sup>(15)</sup>의 1차원 입자 운동방정식에 의한 정지하고 있던 입자가 유체의 속도와 같게 되는 데에는 시간이 요구된다. 유체와 입자의 속도차가 작은 Stokes 유동을 가정하면 이 실험의 입자는 정지로부터 유속의 99%까지 도달하는 데에 약 10초의 시간이 소요되지만, 속도차가 매우 커서 Stokes 유동이라고 볼 수 없을 때부터를 고려하면 더 빠른 시간안에 입자와 유체의 속도는 같아질 것이다.<sup>(17)</sup> 이 실험에서는 펌프가 정상상태에 도달하는 시간까지 고려하여 펌프를 가동시킨 후 5분이상의 시간이 지나 유동과 입자의 운동이 정상상태(steady state)에 도달된 후에 가시화 실험을 수행하였다.

#### 2.2.4 실험조건 선정

소각로 연소실의 형상과 연소공기 주입방식은 연소실내에서의 연소상황에 직접적으로 영향을 미치는 매우 중요한 인자들이며, 이들이 연소실내의 유동장에 미치는 효과를 면밀히 관찰하고 분석하는 것은 소각로 설계에 있어서 매우 중요하다. 이 연구에서 고려한 형상은 Fig. 1에 나타낸 두 종류의 대조적인 형상이며, 각 형상에 대하여 1차와 2차 연소공기의 배분, 2차 연소공기 주입각도의 효과를 관찰하였다. 1차 주입구는 같은 깊이를 갖는 5단의 부위로 구분되고 각 부위에는 실제의 소각로와 유

Table 2 Test conditions

Case	C1	C2	C3	P1	P2	
Gemetry	Counter	Counter	Counter	Parallel	Parallel	
Flowrate of primary air(%)	100	70	70	100	70	
Flowrate of secondary air(%)	0	30	30	0	30	
Front	Flowrate (%)	0	15	15	0	15
	Injection angle ( $\theta_1$ )	-	45°	0°	-	45°
Back	Flowrate (%)	0	15	15	0	15
	Injection angle ( $\theta_2$ )	-	20°	45°	-	45°

사한 유량이 주어진다. 2차 주입구의 위치 또한 Fig. 1에서 볼 수 있다. 시험조건은 역류형 모형에 대하여 3가지, 병류형 모형에 대하여 2가지로 하여 형상을 따라 C1, C2, C3와 P1, P2로 명명하였다. 각각의 형상에 대하여 2차 공기주입에 의한 유동변화를 관찰할 수 있도록 하였고, 역류형 모형에 대하여 2차 공기주입 각도의 변화를 볼 수 있도록 선정하였다. C1, P1은 2차 공기주입이 없는 경우이고 C2, P2는 2차 공기를 주입한 경우이며 C3는 C2와 2차 공기의 주입각도를 달리한 경우이다. 실험조건에 대한 자세한 값을 Table 2에 나타내었다. 각 시험 경우의 결과를 비교하면 연소공기 주입방식에 따른 차이를 관찰할 수 있다.

### 3. 실험결과의 분석

#### 3.1 속도벡터와 유선

유동가시화의 과정에서 카메라의 노출시간을 조절하여 유동의 다양한 정보를 얻을 수 있다. Fig. 3에는 경우 P1의 가시화결과를 나타낸 것인데, (a)와 (b)는 각각 속도벡터(velocity vector)와 도선(pathline)의 분포를 보여주고 있다. 주어진 순간에서의 속도벡터는 노출시간을 짧게 하여 얻을 수 있다. Fig. 3(a)는 노출시간을 1/8초를 하여 얻어진 결과이며, 각선의 길이와 방향으로부터 속도의 크기와 방향을 알 수 있다. Fig. 3(b)는 노출시간을 1초로 하여 얻은 결과이며, 유동에 부유하는 입자의 궤적으로부터 유동형태를 관찰할 수 있다. 이 실험에서 유동의 가시화는 정상상태에서 행해졌기 때문에 도선은 유선과 같다. 이 논문의 뒤부분에서는 유선(streamline)의 분포만을 사용하여 결과를 해석한다.

#### 3.2 연소실 형상에 의한 유동형태의 변화

서론에서 언급했듯이 선진 소각로 제작업체들의 연소실 형상은 매우 다양하며 각 기업체들은 지금도 폐기물 성상의 변화에 대처하고 유해물질의 방출을 억제하기 위한 연소실의 개발에 많은 연구를 진행하고 있다. 연소실의 형상은 최적 연소조건을 창출할 수 있는 열유동장을 형성하도록 하는 1차적인 중요성을 가지며, 이미 설치된 소각로에서 그 형상을 변경하는 것은 매우 어렵기 때문에 제작 이전에 신중한 고려가 선행되어야 한다.

Fig. 4에는 형상이 역류형이고 2차 공기주입이



(a)



(b)

Fig. 3 Visualization of particle trajectories for a parallel flow type incinerator (case P1)

없는 경우(C1)에 대한 결과를 나타내었는데, 이를 형상이 병류형이고 2차 공기주입이 없는 경우(P1)인 Fig. 3(b)와 비교하면 두 형상의 차이에 의한 유동형태의 변화를 관찰할 수 있다. 우선 주연소실에 주목하면 그 차이가 극명하게 보여진다. 병류형(Fig. 3(b))은 전조부에서 나온 연소가스가 긴 체류시간(residence time)을 갖는 반면에 역류형(Fig. 4)은 후연소부에서 발생한 가스가 오랫동안 체류한다. 그러므로, 병류형은 상대적으로 저온인 전조부 가스가 주화염대를 통과하도록 하여 저온가스가 그대로 방출되는 것을 방지할 수 있으며, 역류형은 후연소부 가스가 충분한 복사열을 받아 폐기물의 후연소를 촉진할 수 있다.

미국 EPA의 보고서<sup>(8)</sup>에서는 완전혼합높이(fully mixed height)라는 개념을 강조하고 있다. 완전혼합 높이는 대략 주연소실의 출구부를 의미하며, 이곳에서는 하부에서 올라오는 모든 연소가스가 충분히 혼합되어야 한다는 것이다. 유동가시화의 그림 들로는 혼합의 상황을 정확하게 파악할 수 없지만 병류형의 경우에는 유동이 복사패널을 돌아나가면



Fig. 4 Streamlines for a counter flow type incinerator(case C1)

서 혼합이 활발하며, 역류형에서는 주연소실의 출구부에서 유로가 작아지면서 혼합이 증진되는 것을 볼 수 있다.

2차 연소실의 유동형태에서는 재순환영역(recirculation zone)의 고찰이 매우 중요하다. Nasserzadeh 등<sup>(6)</sup>은 소각로의 전산수치해석을 통하여 2차 연소실에 발생하는 큰 재순환 영역은 온도가 매우 낮은 부분임을 밝혀내고, 이를 해소하기 위해 2차 연소실의 중간부위에 경사진 장애물(baffle)을 설치할 것을 제안하였다. 2차 연소실은 일반적으로 보일러의 수관벽으로 이루어져 있으므로 이와 같은 저온부는 보일러의 효율에 심각한 영향을 준다. 캐나다의 Quebec시 소각로의 형상 변경사례<sup>(9)</sup>에서도 2차 연소실의 재순환영역을 제거하기 위한 굴곡(bull noze)의 설치를 볼 수 있다. 또한 벽면에 접한 재순환 영역은 유속이 매우 작으므로 상대적 인 고속부를 만들기 때문에 연소실에 존재하는 미분입자(particulate matter)가 미연소된 상태로 연소실 외부로 방출될 수 있다.<sup>(4)</sup> 이러한 미분입자는 그 자체로 대기오염에 심각한 영향을 미칠 뿐만 아니라 독성이 매우 강한 다이옥신류(dioxin/furan)의 전구물질(precursor)을 함유하고 있어 소각로 플랜트의 후처리부에서의 저온화 과정에서 다이옥신류의 발생을 초래할 수 있다.<sup>(2)</sup> Fehr와 Vaclavinek<sup>(11)</sup>은 그들의 수동실험에서 재순환 영역을 최소화하는 2차 공기의 주입비를 찾아내었다 Fig. 3(b)와 Fig. 4로부터 병류형은 2차 연소실의 상단과 2차 연소실 후벽의 근처에 커다란 재순환 영역이 존재하고, 역류형에서는 전벽 근처에 재순환 영역이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 재순환 영역의 발생은 2차 공기 주입방식에 의해 일부 조절될 수 있지만 형상의 영향을 가장 크게 받으므로 형상설계에 심각하게 고려해야 한다.

### 3.3 2차 공기주입의 효과

1차 연소공기는 화격자상의 연소과정에는 직접적으로 영향을 주지만 연소실 내부의 유동장에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다.<sup>(3,11)</sup> 반면에 2차 연소공기는 불완전 연소물질이 2차 연소실에서의 연소를 촉진시키는 역할뿐만 아니라 연소실내부의 유동형태를 크게 변화시키므로 미분입자의 이월 방지, 화염높이의 적정유지, 연소가스 농도의 균일화 등 연소실내부의 연소상황을 제어(control)하는 역할을 수행한다.<sup>(7)</sup>

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 경우 C2와 P2의 가시화 결과를 보여 주는데, 이들을 앞의 Fig. 4, Fig. 3(b)와 비교하면 2차공기 주입의 효과를 관찰할 수 있다. 2차 공기가 주입되는 경우인 C2(Fig. 5)를 C1(Fig. 4)과 비교하여 볼 때, 2차공기의 주입에 의해 연소실 목부근에서 유동이 교차하므로 난류의 세기가 증가하여 혼합이 활발해진 것으로 볼 수 있다. 병류형에서 2차 공기가 주입되는 경우인 P2(Fig. 6)는 P1(Fig. 3(b))에 비해 건조부와 주연소부의 위부분에서 강한 혼합상태가 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 한편, 경우 C2에서는 2차 공기 주입에 의해 2차 연소실에 존재하는 재순환 영역의 크기가 경우 C1보다 증대된 것을 볼 수 있다. 이것은 2차 공기 주입이 혼합을 증진시키는 효과를 갖지만 바람직하지 않은 재순환영역에도 영향을 미치므로 주입방식의 적절한 조절이 필요하다는 것을 의미한다. Fig. 7에는 경우 C2(Fig. 5)와 2차 공기의 주입각도를 달리한 경우 C3의 결과를 나타낸 것이다. 전벽에 설치된 2차 공기노즐의 주입각도의 변화로 공기제트의 침투거리가 감소되는 현상을 볼 수 있으며, 후벽노즐의 주입각도는 유동장을 크게

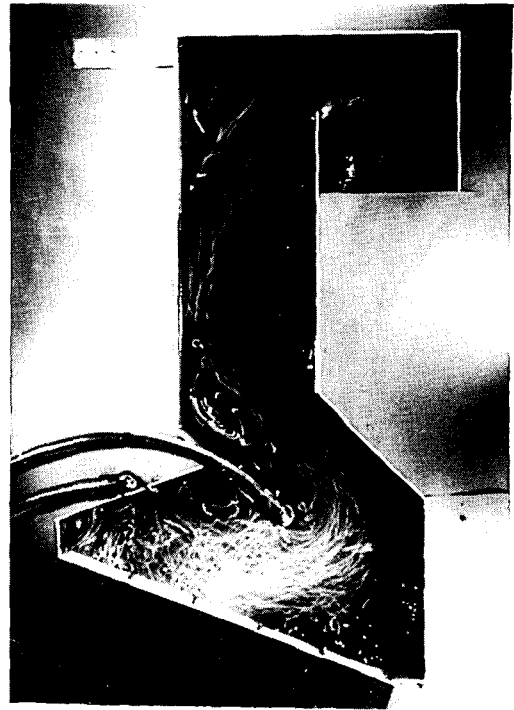


Fig. 6 Streamlines for a parallel flow type incinerator (case P2)

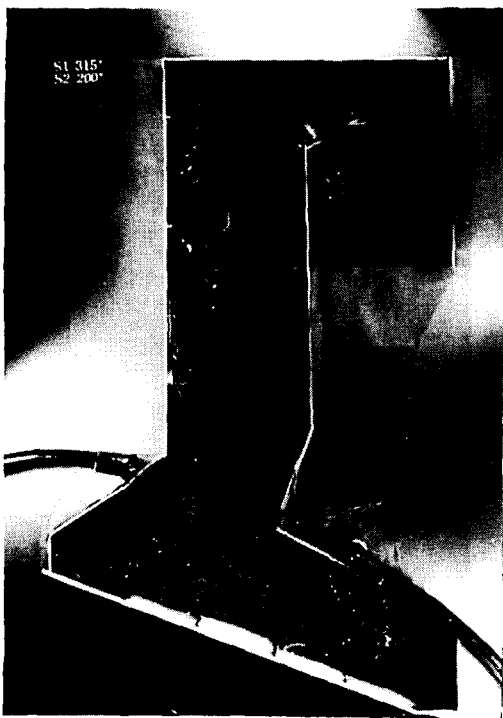


Fig. 5 Streamlines for a counter flow type incinerator (case C2)



Fig. 7 Streamlines for a counter flow type incinerator (case C3)



변화시키지 않는다.

#### 4. 결 론

도시 폐기물 소각 플랜트에서 소각이 일어나고 있는 연소실의 형상과 연소공기의 주입방식은 최적 연소의 구현을 위해 매우 중요하다. 연소실 설계에서는 연소실내부의 열유동현상에 대한 충분한 이해를 바탕으로 최적 연소상황을 창출할 수 있는 조건을 찾아내는 작업이 선행되어야 한다. 연소실을 단순화한 모형을 사용하는 실험은 이러한 작업을 위해 널리 사용되는 방법이다. 이 연구에서는 연소와 열전달을 고려하지 않은 냉간유동실험으로 물을 작동유체로 사용하여 2차원 유동형태를 관찰하기 위한 수상모형실험을 수행하였다.

실험장치는 일당 300톤 규모의 소각로 연소실의 1/20 축소모형과 물의 순환장치로 구성되며 물의 주입량과 주입각도의 조절이 가능하도록 제작되었고 물과 비중이 같은 부유입자를 사용하여 유동을 가시화하였다. 연소실의 형상으로는 역류형과 병류형의 두 경우를 선정하였다. 이 실험장치는 간단하게 제작할 수 있고, 형상변경이 용이하며, 카메라 노출시간을 조절하여 속도벡터와 유선을 관찰함으로써 연소실내의 특징적인 2차원적 유동형태를 밝혀 내는 데에 적당하다.

실험결과로부터 역류형은 후연소부에서 발생하는 가스의 체류시간이 길어 폐기물의 후연소를 촉진시키는 반면에 병류형은 건조부에서 발생하는 가스가 주화염대를 거치게 되므로 저온가스의 방출을 억제할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 2차 공기는 연소가스의 혼합을 증진시키며, 2차 연소실 재순환 영역의 세기에도 영향을 미치는 것을 관찰하였다. 이 재순환 영역은 열전달과 유해물질의 방출에 부정적인 효과를 미치는 것으로 판단되기 때문에 2차 공기의 주입방식을 결정할 때 주의를 기울여야 할 것이다. 2차 연소공기의 주입방식, 즉, 주입구의 위치, 유량, 주입속도와 각도 등은 연소실내의 유동형태를 크게 변화시킬 수 있기 때문에 연소상황을 제어할 수 있는 도구로 사용될 수 있다. 2차 공기의 주입구는 내부유동의 제어, 즉, 혼합의 증진과 과열부위의 조정 등이 가능한 위치에 배치되어야 하며, 유량, 주입속도와 각도는 적절한 침투거리(폭의 90% 이상<sup>(6)</sup>)를 확보하여 충분한 혼합을 유도할 수 있도록 설계해야 한다. 그러므로, 연소

실의 형상설계를 위해서는 형상 자체와 더불어 연소공기 주입방식을 주된 인자로 하여 연소가스의 혼합과 체류시간, 2차 연소실에서의 재순환 영역의 효과 등에 대한 실험적, 이론적인 고찰이 필요하다.

이 연구에서 사용한 2차원 수상모형의 실험결과를 실제의 연소실 설계에 적용하는 데에는 이 실험의 가정들, 즉, 냉간유동, 2차원 등에 대한 충분한 이해가 뒷받침되어야 한다. 이러한 이해를 바탕으로 이 실험으로부터 많은 유용한 정보를 얻어낼 수 있다. 이 실험의 결과를 수치해석에 사용하는 물리적 모형들(난류모형 등)의 개선에 이용하고, 수치해석적인 방법으로 열간유동 등 좀더 복잡한 현상까지를 포함하는 수치적 실험을 한다면 설계에 필요한 더 많은 정보를 얻어낼 수 있을 것이다.

#### 후 기

이 연구는 정부가 주도하는 선도기술 개발사업(G-7 프로젝트)의 하나인 '대도시형 저공해 소각시스템 개발'의 일환으로 계획되고 수행되었습니다. 환경처와 환경연구원, 저공해 소각로 기술개발 연구조합, 그리고 (주)대우, 대우조선(주), 삼성중공업(주) 등 세 기업에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) 김성중, 최상민, 1993, "소각로 설계의 고려사항," 폐기물처리기술 Workshop, 대한기계학회 '93년도 추계학술대회논문집(II), pp. 515~521.
- (2) 유영돈, 1993, "소각로내 공해물질의 생성과 제어," 폐기물처리기술 Workshop, 대한기계학회 '93년도 추계학술대회논문집(II), pp. 551~555.
- (3) 김승기, 1993, "소각로 영유동의 계산과 실험," 폐기물 처리기술 Workshop, 대한기계학회 '93년도 추계학술대회 논문집(II), pp. 527~532.
- (4) Ravichandran, M. and Gouldin, F. C., 1992, "Numerical Simulation of Incinerator Overfire Mixing," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 85, pp. 165~185.
- (5) Nasserzadeh, V., Swithenbank, J. and Jones, B., 1991, "Three-Dimensional Modelling of a Municipal Solid-Waste Incinerator," *Journal of*

- the Institute of Energy*. Vol. 64, pp. 166~175.
- (6) Nasserzadeh, V., Swithenbank, J., Scott, D. and Jones, B., 1991, "Design Optimization of a Large Municipal Solid Waste Incinerator," *Waste Management*. Vol. 11, pp. 249~261.
- (7) Shin, D. H., 1994, *A Numerical Study on the Flow Performance of Municipal Solid Waste Incinerators*, M. S., Thesis, KAIST.
- (8) Seeker, W. R. and Lanier, W. S., 1987, *Municipal Waste Combustion Assessment : Combustion Control of Organic Emission*, EPA.
- (9) Bohn, T. J., 1991, "Strömungsuntersuchungen am Modell der MVA-Hamm Nach Vorhabe von MAB-LENTJES," am 15.05. 1991, Essen University, Germany.
- (10) Cohan, L. J., 1975, "Flow Studies by Water Table Technique for Incinerator Furnaces," in *Incinerator and Solid Waste Technology*, ASME, pp. 75~83.
- (11) Fehr, M. and Vaclavinek, 1992, "A Cold Model Analysis of Solid Waste Incineration," *International Journal of Energy Research*, Vol. 16, pp. 277~283.
- (12) Niessen, W. R., 1978, *Combustion and Incinerator Processes*, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, pp. 129~178.
- (13) Obata, M., Miyao, S., Kurata, K. and Kusakari, K., 1977, "Visualization of Gas Flow in Natural Circulation Boilers," in *Flow Visualization, Proceedings of the International Symposium on Flow Visualization*, Edited by T. Asanuma, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, USA, pp. 189~194.
- (14) Cebeci, T. and Bradshaw, P., 1977, *Momentum Transfer in Boundary Layers*, Hemisphere Publication Corporation, Washington, USA, p. 187.
- (15) Merzkirch, W., 1974, *Flow Visualization*, Academic Press, New York, USA, pp. 20~33.
- (16) Douglas, H. a., Mason, P.J. and Hinch, E. J., 1972, "Motion Due to a Moving Internal Heat Source," *J. Fluid Mech.*, Vol. 54, pp. 469~480.
- (17) Chen, C. J. and Emrich, R. J., 1963, "Investigation of the Shock-Tube Boundary Layer by a Tracer Method," *Phys. Fluids*, Vol. 6, pp. 1~9.