

〈論 文〉

접선식 배치로내의 선회유동장에 관한 실험적 연구

윤순현* · 김경천** · 심재경*** · 김대성*** · 송홍복***

(1994년 11월 19일 접수)

An Experimental Study on the Swirling Flow Field in the Tangentially Fired Furnace

S. H. Yoon, K. C. Kim, J. K. Sim, D. S. Kim and H. B. Song

Key Words : Tangentially Fired Furnace(접선식 배치로), Turbulence Intensity(난류강도), Velocity Vector(속도벡터), Vorticity(와도), Reynolds Shear Stress(난류전단응력), Tripple Product of Turbulent Velocity(난류속도의 3중적), Skewness(비대칭도), Flatness(편평도)

Abstract

The characteristics of the flow field in the tangentially fired furnace are presented. Experiments are conducted in the simplified cold type isothermal flow model. In the measurement of flow field, a hot wire anemometer is used. The hot wire was calibrated by lookup table method. The mean velocity field and turbulence characteristics are showed with changing the nozzle angle. In the center of the model, the low speed, unstable flow region is formed. The size and position of these regions are varied with changing the nozzle angle. It can be used as fundamental data in the design of the large furnace. From the experimental results, various turbulent characteristics of swirling flow field is obtained. And the entrainment mechanism of the jet flow field is described from the distribution of the skewness and the flatness. It can be used the raw data of approximate calculation and turbulent modelling.

기 호 설 명

d : 노즐의 폭
 F : 편평도 (flatness factor)
 F_r : Froud수
 K : 난류운동에너지
 Pr : Prandtl수
 Re : 레이놀즈수
 S : 비대칭도 (skewness factor)
 Sc : Schmidt수
 U : X 방향의 평균속도

u' : X 방향의 속도의 섭동성분
 \overline{uv} : 레이놀즈 전단응력
 u_{rms} : u 성분의 r. m. s $\sqrt{\overline{u^2}}$
 V : Y 방향의 평균속도
 v_{rms} : v 성분의 r. m. s $\sqrt{\overline{v^2}}$
 X : 노변의 장축에 따른 좌표 (cm)
 Y : 노변의 단축에 따른 좌표 (cm)
 — : 시간평균의 의미

1. 서 론

*정회원, 부산대학교 기계설계공학과
 **정회원, 부산대학교 생산기계공학과
 ***부산대학교 대학원 기계설계공학과

대형 연소로의 설계, 제작을 위해서는 막대한 자금과 시간을 필요로 하므로 모델링을 통하여 설계

에 필요한 자료를 미리 확보하는 것은 필수적이다. 그러나 연소로는 복잡한 난류유동과 화염 등을 포함하고 있으므로 완벽하게 모델링하는 것은 불가능하다. 따라서 일반적인 연소로의 모델링에서는 연소의 효과를 배제한 냉형 모델을 통하여 유동장의 특성을 평가하고 이를 근거로하여 연소를 고려한 모델을 구성하게 된다. 특히 점선배치식 연소로는 내부에 적절한 스윙(swirl) 유동을 유발시켜서 연소시키는 것으로, 대형의 연소로에 많이 사용되고 있지만 그 유동형태에 대한 해석은 미흡하여 평균 유동장을 조사하는 수준에 그치고 있다.

Bianca 등은 점선식 배치로에서의 부식현상을 공기역학적 측면에서 실험과 시뮬레이션을 병행하여 연구하였다. 연소로의 모델링을 위하여 기하학적, 기구학적, 열적 상사를 고려하고 여러 가지 무차원수를 도입하였다.⁽²⁾ Anson은 보일러의 실물과 공기역학적으로 완벽한 상사를 이루는 모델의 구성은 불가능하다는 전제하에 모델링의 개선책을 여러 가지 측면에서 제시하였다.⁽³⁾ Davison는 노내의 유동장의 연구를 위하여 등온유동 모델링의 구성에서 특히 노즐의 축척(scale)에 대하여 고려해야 할 점을 언급하였다.⁽⁴⁾

Chigier는 실제의 연소로 대한 실험은 여러 가지의 제약이 있으므로 우선 수학적인 모델링을 하고 난 뒤 소규모 등온모델을 통하여 기초 정보를 수집한 다음 대규모 등온모델이나 소규모 연소 모델을 이용하여 실험을 한 후 최종적으로 실측의 실물에서 측정을 시행하는 것이 타당한 방법이라고 제시하였다.⁽⁵⁾ Beer는 모델링에 필요한 여러 인자들의 정의와 계산법 등을 제시하였다.⁽⁶⁾ Robertson은 스윙이 존재할 때의 모델링에 필요한 인자들을 제시한 바가 있으며, 상사조건으로부터 일반적으로 고려되는 것과는 달리 실제로는 레이놀즈 수 등의 변화에는 무관하여 유동의 특성과 유동의 양식을 따라 기하학적 형상과 무차원 수들을 고려하여야 한다고 하였다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 직사각형 단면을 가지는 연소로에서 각각의 코너에서 노의 중심을 향하여 연료와 공기를 분사하는 점선식 배치로를 차원해석을 통하여 축소형 노즐인 냉형(cold-type) 등온유동모델을 제작하고, 노내 유동장의 난류성분에 대한 실험적 규명을 시도한다. 이 모델은 기본적으로 4개의 슬릿형 제트로 구성되었으므로 제트유동에서 나타나는 유입과 재부착 그리고 혼합경계층 등의 상호작용이

선회유동장의 구조에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 특히 네개의 코너에서의 제트의 분사각도를 변화시켰을 때의 유동장의 형태를 살펴보고 각 경우의 운동량의 전달을 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 모델링 조건 및 기법

본 연구에서는 Combustion Engineering사의 C-type 연소로를 모델로 하였다. 연소로의 단면은 직사각형이며, 네 귀퉁이에 점선 배치 방식(tangentially fired type)으로 설치된 wind box로부터 유입된 미분탄과 연소용 공기가 난류혼합(turbulent mixing)을 발생시켜 연소를 촉진시키게 된다. 노즐이 설치된 실물의 크기는 총 높이가 12 m에 달하며 연소실의 단면적의 크기도 약 15 m~18 m이므로 규모가 상당히 크고, 분사속도는 27 m/s를 상회한다.⁽¹⁾

본 연구에서는 노내의 유동장의 해석을 위하여 등온유동모델을 구성하였으며 이를 위하여 여러 가지 무차원 수를 도입하여 기하학적, 기구학적, 열적 상사를 고려하였다.^(1~7) 기하학적인 상사를 위하여 1/30의 축척을 사용하여 모델을 구성하였다. 그리고, 선행연구에 의하면 유동장의 Re 수가 10,000 이상이면 질량, 운동량, 열의 전달과정에서 molecular process는 무시되고 주로 turbulent force에 의해서 지배된다.⁽²⁾ 본 연구에서는 모델의 Re 수의 범위가 $1.3 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^4$ 이므로 Re 수, Prandtl수, Schmidt수 등을 실제 연소로와 같게 할 필요가 없었다. 또한 Froud수가 크면 부력의 효과는 무시할 수 있다.⁽⁵⁾

운동학적 상사를 고려하기 위하여 실제의 노에서의 연료, 1차 공기, 2차 공기의 양을 근거로 하여 노내의 점선방향의 평균유속과 축방향의 평균유속의 비를 계산하면 점선방향의 속도가 축방향의 속도보다 약 20배정도 큰 값을 보이는 선회유동장이므로 모델에서도 위의 비가 실제의 노에서와 같은 값을 가지도록 제작하였다.

등온유동모델의 구성에서 가장 핵심이 되는 것은 노즐의 모델링이다. 실제 연소로의 wind box에는 여러 개의 연료노즐과 1차공기, 2차공기의 유입을 위한 노즐 등 다양한 원형노즐이 존재하지만 그 위치가 충분히 인접하게 배치되어 있으므로 본 연구에서는 각 코너의 모든 노즐들을 균일한 속도의 분

포를 가지는 단일 슬릿형 노즐로 대체하였다.⁽⁶⁾ 한편, 실제의 노에서는 노즐의 출구 주위에서는 항상 등은 조건을 만족하지 않기 때문에 등온유동모델을 구성하였을 때 오차발생의 원인이 된다. 이를 해결하기 위해서는 기하학적 상사를 어느 정도 왜곡시켜야 하며, Thring-Newby의 방법 또는 wire gauze기법이 대표적으로 사용된다. 본 연구에서는 노즐의 직경이 작고 버너 사이의 간격이 충분히 멀어 서로 간섭이 적으므로 전자의 방법에 따라 모델링하였다. Thring-Newby의 방법에서는 노즐의 기

하학적 모양을 운동량 보존의 원칙에 따라 변형시키며, 확장된 노즐의 직경을 버너의 등가직경(d_e)이라 한다.

$$d_e = d_o (T_s / T_o)^{\frac{1}{2}}$$

2.2 실험용 냉형 풍동

실험용 풍동은 4개의 노즐을 사용한 송출식 개방형 풍동으로 각 노즐의 최대유속은 60 m/s까지 조절 가능하도록 제작되었다. 유동의 규칙적인 진동

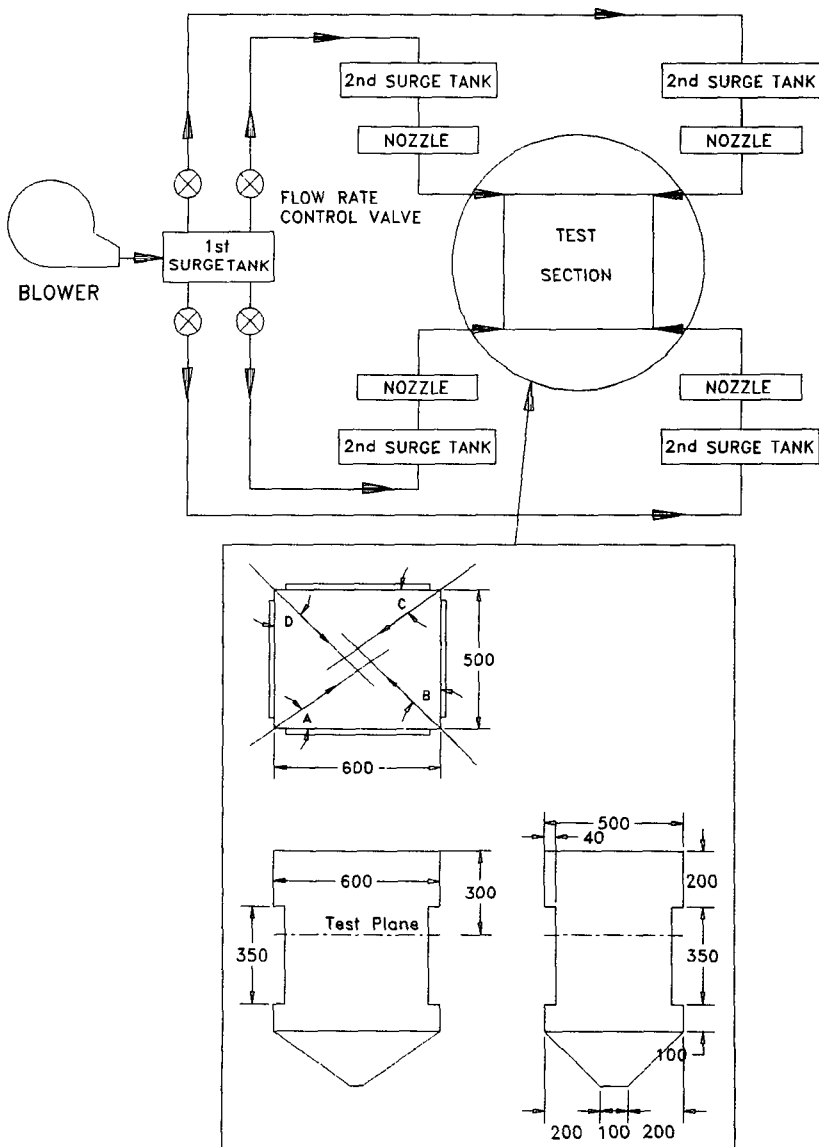


Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel and test section

을 제거하기 위하여 각 유로에 2개의 저장탱크를 설치하였으며, 각각의 노즐에 균일한 유량을 공급하기 위하여 유량조절 밸브를 설치하였다. 실험에 필요한 유량은 $0.3 \sim 0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 이므로 손실을 충분히 고려하여 정격유량이 $0.67 \text{ m}^3/\text{s}$ 인 5마력 짜리 원심형 송풍기를 사용하였다. 시험부는 투명아크릴로 제작하였으며 그 크기는 $0.6 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$ 이며 이는 일정한 축척에 따라 기하학적인 상사성을 고려한 결과이다. Fig. 1에서 본 실험을 위하여 제작된 풍동 및 시험부의 개략도를 나타내었다.

4개의 코너에 위치한 노즐은 해석의 편의성과 실험의 재현성을 위하여 2차원 슬릿형으로 제작하였으며, 노즐출구에서 균일한 속도분포를 얻기 위하여 Morel의 3차곡선식⁽⁹⁾을 사용하여 수축부의 형상을 결정하였다. 노즐의 설계치수는 wind box의 기하학적인 조건을 만족하도록 제작하였으며, 노즐의 폭(d)은 Thring-Newby의 방법에 따른 수정을 거쳐서 0.01 m 로 제작하였으며 길이(H)는 0.35 m 다. 또한 각도의 변화에 따른 효과를 보기 위하여 노즐 각도의 조절이 가능하도록 설계하였다. 노즐의 상·하 5 mm 를 제외한 영역에서의 평균속도는 균일한 2차원 흐름을 보였으며 노즐의 상·하 끝면에서의 불균일한 흐름은 박리로 인하여 국소적으로 5%이상으로 나타났으나, 노즐의 전체 단면적의 97%에서 난류강도는 4.5%이내로 균일한 흐름을 보이므로 실험에 적합한 속도장을 보였다.

2.3 열선의 교정

본 연구에서 관찰하고자 하는 유동장이 3차원 유동장이므로 측정용 센서도 그에 적합한 것을 선정하여야 한다. 그러나, 현재 상용되고 있는 3차원 측정용 열선식 센서는 매우 고가인데다 구조상 파손되기 쉬우면서도 만일의 파손시 수선이 어려우므로 본 과제에서 사용하기는 곤란했다. 그런데 X형 열선을 사용하게 되면 열선의 특성상 검출 가능한 유입각이 매우 좁아지므로 기존의 King의 법칙을 이용한 X형 열선교정방법 대신 look-up table 교정기법을 사용하여 검출 가능 유입각의 폭을 약 10° 가량 넓혔다.^(9,10,12)

교정실험에서는 TSI model 1125 교정기를 사용하였다. 교정실험시 측정된 실속도와 교정자료를 이용하여 분석한 산출속도를 비교하였을 때, 실속도가 10 m/s 에서 실속대비 3% 이내의 오차를 보이며 실속도가 2.9 m/s 에서는 실속대비 약 8% 내

외의 오차가 있다. 이는 절대속도 값으로 각각 0.3 m/s , 0.25 m/s 이내의 오차를 의미하므로 기존의 교정기법을 사용한 경우보다 월등히 뛰어난 결과를 나타낸다. 마찬가지로 실피치각과 산출피치각의 오차는 피치각이 음의 방향으로 30° 인 경우 실속도 5 m/s 정도까지 3 정도의 차이를 보이나 그 외의 경우는 실피치각과 1 이내의 차이만을 보인다. 특히 본 연구에서 제작된 풍동의 노즐출구속도에 해당하는 20 m/s 근처에서는 피치각의 대소에 관계없이 오차가 매우 적게 나타났다.

2.4 실험장치 및 실험조건

Fig. 2에서 실험자료의 측정장치에 대한 전체적인 개략도를 보였다. 열선센서는 직경 $4 \mu\text{m}$ 의 텅스텐 선으로 된 공기용 앤드플로우 X형 프로브(TSI model 1241-T1.5)이다. 센서의 이송에는 퍼스널 컴퓨터로 원격조정되는 3차원 자동이송장치와 최소눈금이 $1/20 \text{ mm}$ 이며 수동-기어구동식 2차원 이송장치를 사용하였다. 열선의 한계로 인해 상당 부분에 널링기법(nulling method)을 적용해야 했으므로 각도기가 달린 회전이송구를 지지대의 끝에 부착시켜 한 지점에 대하여 여러 가지 각도로 센서를 위치하여 다중 측정을 시행하고 자료 분석 과정에서 불확실한 자료를 제거하는 방법으로 각도 오차를 배제하였다.

정온 열선풍속계는 TSI사의 모델 1054A 두 세트를 사용하였는데 측정자료를 교정상수와 함께 오프라인 처리하게 되므로 비례선형기와 신호처리기는 사용하지 않았다. CTA에서의 두 브릿지 출력 신호는 5 kHz 의 저역통과필터를 거쳐서 범용파형 분석기인 D6000에서 A/D 변환이 이루어지고, 범용파형분석기는 GPIB 카드를 이용하여 원격조정이 된다.⁽¹¹⁾

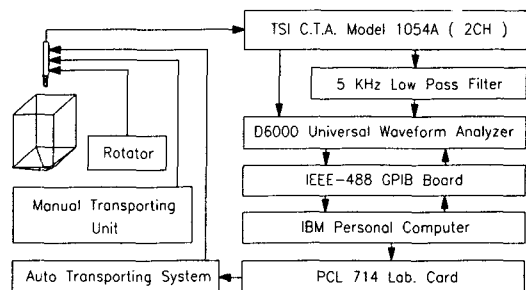


Fig. 2 Block diagram of measuring and data processing system

Table 1 Definition of nozzle angle

Case	Nozzle angle(°)			
	A	B	C	D
#A1	35	46	35	46
#A2	40	45	40	45
#A3	30	30	30	30

Fig. 1에서 보인 바와 같이, 각 노즐의 명칭은 장변을 아래로 두었을 때 좌하귀에 놓이는 노즐로부터 반시계방향으로 A, B, C, D순으로 정하였다. Table 1에서 각 측정경우에 대한 노즐의 설치각도를 나타내었다. 여기서 노즐의 각도는 해당하는 노즐의 오른쪽 벽면과 이루는 각을 의미한다. 또한 A-D 노즐간의 벽면을 따라 X축을 잡고 A-B 노즐간의 벽면을 따라 Y축을 잡았으며 모델에서 높이 방향을 Z축으로 하였다. 본 연구에 사용된 속도센서는 2차원용 X열선이므로 3차원의 유속을 동시에 측정하지 못하였습니다. 따라서 센서를 X-Y, Y-Z, X-Z 평면에 대하여 각각 측정하였다. 그러나 측정단면에서의 Z방향의 속도성분 W는 그 크기가 U, V에 비하여 1/10을 넘지 않으므로 나타내지 않았다.

본 연구에서는 세가지의 노즐 설치각도에 대하여 유동장을 측정하였으며, #A1은 C. E.사에서 제시하고 있는 연소로의 정상운전 상태에서의 설치각도이며, #A2는 #A1에 비하여 연소로의 중심으로 향하게 노즐을 설치한 경우이고, #A3은 #A1 벽쪽으로 향하게 설치한 경우이다. 이를 통하여 각각의 설치 각도에 대하여 유동장의 형성을 파악하여 비교분석하였다. 각 노즐의 분출유속은 유속조절용 밸브를 이용하여 네 노즐의 분출유속이 같아지도록 반복조절하였다.

한편 센서의 설치가 불가능한 노즐 인접 부분에 대하여서는 시험구간의 측면 일부를 절단하여 센서를 삽입하고 자동이송장치를 사용하여 센서를 정확한 곳에 위치시켜서 측정하였다. 모델에서 마주보는 노즐의 각도는 동일하며 이는 실제 연소로에서도 동일하다. 그리고 피토투브를 사용하여 nulling 기법으로 평균속도장을 측정한 결과 단면의 중심점을 축으로 대칭적인 구조를 보였고 이 결과는 tuft probe를 이용한 가시화를 통하여서도 확인되었다. 따라서 각 단면의 절반에 대하여 측정을 수행하였

으며 각각의 경우에서 90개의 측정지점에서 자료를 획득하였다. 이들 신호를 각 채널당 10 kHz의 추출 주파수로 2048개씩 10회 측정하여 평균을 취하였다. 실험결과 자료는 20 °C, 1기압을 기준으로 제시되었다.

3. 실험결과와 고찰

3.1 평균속도장

Fig. 3에서는 노즐의 설치각도의 변화에 따라 유

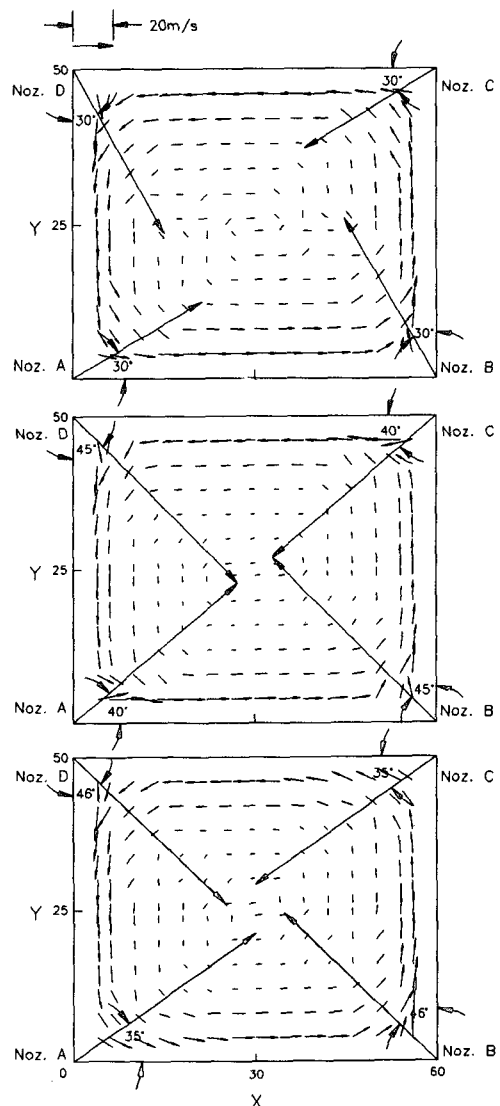


Fig. 3 Velocity vectors a. #A1 (A, C=35° B, D=46°), b. #A2 (A, C=40° B, C=45°), c. #A3 (A, B, C, D=30°)

동이 전개되는 형태를 속도벡터선도로 표시하였다. 중심부에서 벡터선이 부분적으로 엇갈리는 것으로 보아 선회류의 중심부근에서 유속이 낮고 불안정한 유동장이 형성되고 있음을 알 수 있었다. 노즐 출구부근에서 통상 나타나는 포텐셜 코어영역이 본 유동장에서는 보이지 않았다. 이는 노즐로부터 분출된 제트주류의 경계부분에서 강한 선회류와의 혼

합이 일어나면서 대부분의 운동모멘트가 소모되기 때문으로 판단된다.

#A1에 비해 #A2에서는 노즐의 출구유동이 선회류의 Y방향 운동량을 많이 상쇄하므로 모서리에서의 선회가 좀 더 빨리 일어난다. 또, #A3의 속도 벡터 선도를 보면 노즐의 벽에 대한 각도가 작아서 선회류가 벽에 가까이 형성되므로 중앙부의 버블에서의 불안정성이 증가하여 속도성분이 불균일해짐을 알 수 있다.

Fig. 4에서 노즐의 설치각도의 변화에 따른 와도의 분포를 보였다. 공통적으로 모서리 부근의 와도가 큰 값을 보이는 것은 이 부분에서 선회로 인하여 유속의 변화가 급격하게 발생함을 의미한다. 특히 B, D 노즐의 왼쪽 벽부근에서 와도가 음의 값을 가지는 것으로 보아 그 부근에서 역방향의 재순환 영역 혹은 유동의 정체현상이 발생하는 것으로 판단된다. 실제 설치각도인 #A1의 경우인 (a)에서 중심 버블의 한 가운데에 소규모 와가 존재하고 있으며 전체적으로 타원형의 모양을 보이고 있으며 실제 설치각도보다 노의 중심을 향하여 기울어진 (b)의 경우(#A2)에서는 전체 버블의 모양이 약간 기울어진 사각형의 형태를 보이고는 있으나 중앙의 소규모 와의 크기와 모양에는 큰 변화가 없다. 이는 앞서 속도벡터선도에서 보았듯이 노즐로부터의 제트흐름이 버블에 직접적으로 닿지 못하므로 버블의 특성에 큰 영향을 주지는 못하나 모서리부분에서의 유동을 더 급격히 선회시키면서 버블을 중심 쪽으로 약간 밀기 때문이다. 네 개의 노즐을 모두 실제로의 설치각도보다 작은 각도로 즉, 벽쪽에 가깝게 위치시킨 (#A3) (c)에서는 앞서의 두 경우와 상당히 다른 등와도 분포를 보이게 된다. 노즐의 설치각도가 중심에서 상대적으로 많이 이탈함에 따라 노즐에서 분출된 운동량이 중심버블에 충분히 전달되지 못함을 알 수 있다. 따라서 버블의 크기는 확대되고 중심부분에서 큰 와가 상하로 양분되면서 내부의 소규모 에디가 크게 발달하여 국소에디가 형성되는 것을 볼 수 있다.

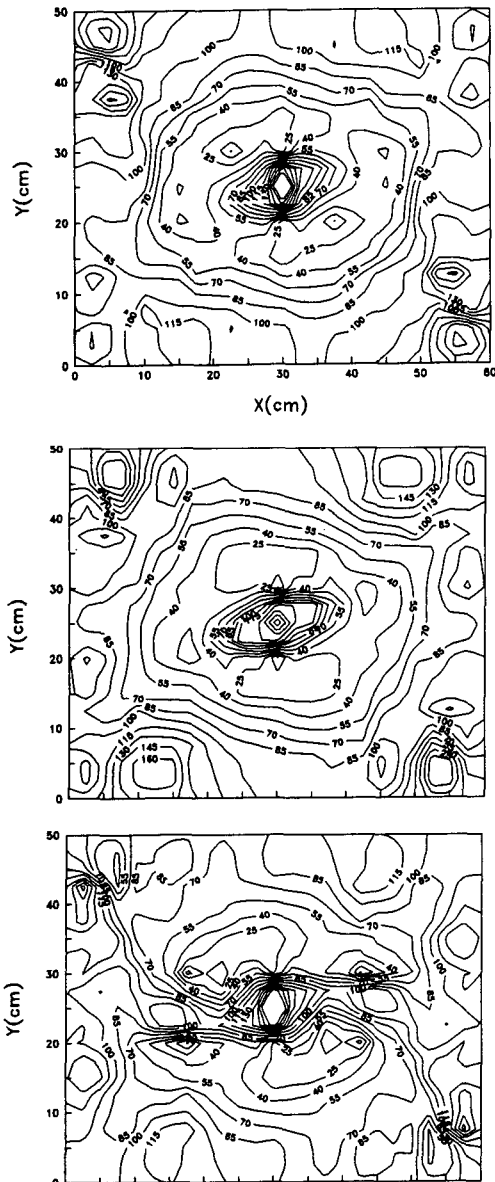


Fig. 4 Distribution of vortex a. #A1 (A, C=33° B, D=46°), b. #A2 (A, C=40° B, C=45°), c. #A3 (A, B, C, D=30°)

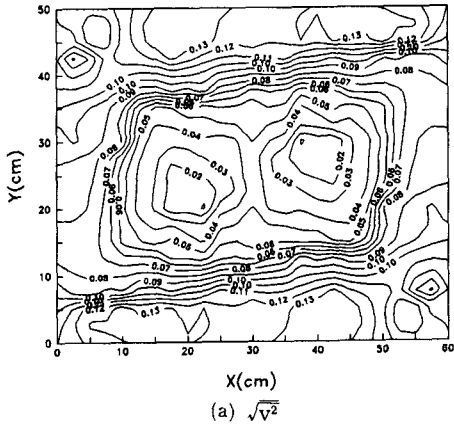
3.2 난류성분의 2차 상관관계

Fig. 5에서 X방향과 Y방향의 난류강도(turbulence intensity)를 나타내었다. 여기서 분출되는 제트의 양쪽 경계와 벽사이에 순환영역 혹은 정체구간이 존재함을 볼 수 있다. 그러한 정체현상의 영향으로 모서리에서 오른쪽 벽부근에 일관되게 난

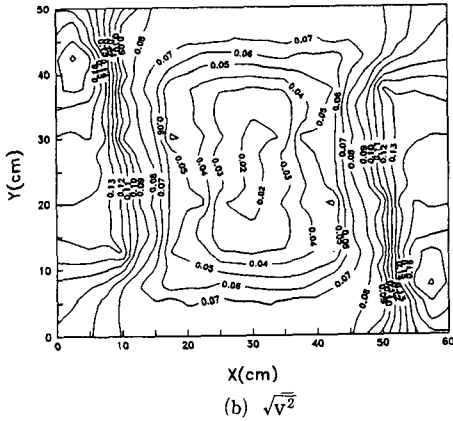
류도가 높은 영역을 형성하고 있다. 즉, 노즐을 향해 흘러오던 선회류가 제트류를 만난 직후부터 급격히 방향을 틀면서 혼합되고 있다는 의미이다. 이것은 그림에서 노즐 오른쪽 벽근처에서 난류도가 높게 나타나는 영역이 속도벡터선도에서 벽쪽을 향

해 부착되어 들어가는 부분과 일치하는 것으로도 확인할 수 있다.

\overline{uw} 는 레이놀즈 전단응력에 해당되는 값으로 난류운동에너지의 생성에 관계되는 양이다. Fig. 6에



(a) $\sqrt{v^2}$



(b) $\sqrt{v^2}$

Fig. 5 Distribution of turbulence intensity

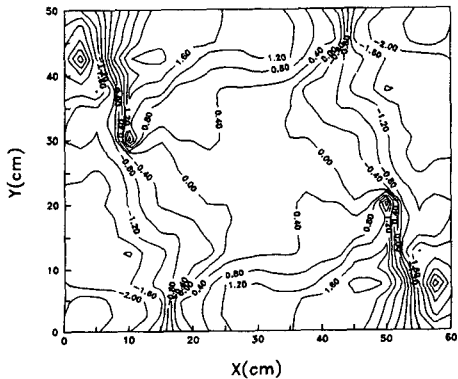
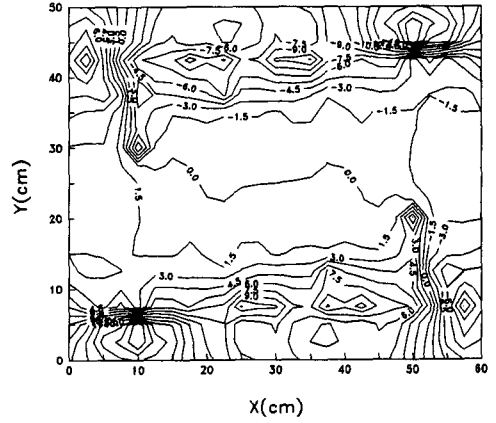
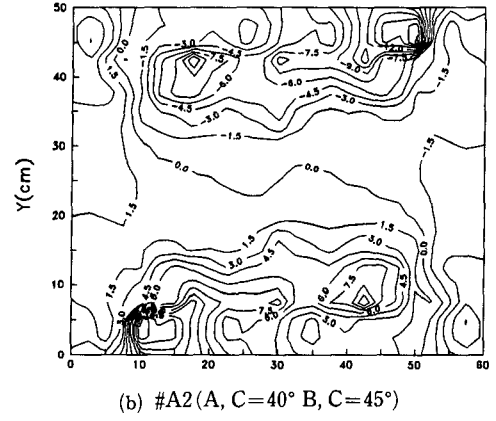


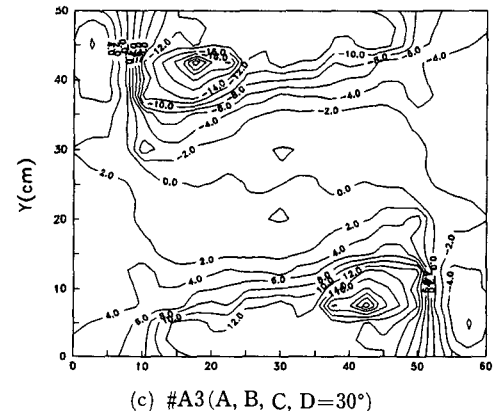
Fig. 6 Distribution of Reynolds stress (#A1(A, C=35°, B, D=46°))



(a) #A1(A, C=35° B, D=46°)



(b) #A2(A, C=40° B, C=45°)



(c) #A3(A, B, C, D=30°)

Fig. 7 Convective diffusion of turbulence kinetic energy in x-direction

서 레이놀즈 전단응력 분포를 나타내었다. 중심부 분과 벽면에서 \overline{uv} 의 값이 0에 가까운 부분에서는 선회류를 통한 유입이 거의 없는 유동의 정체영역으로 보이며 유속또한 매우 불안정한 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

3.3 난류운동에너지의 이동

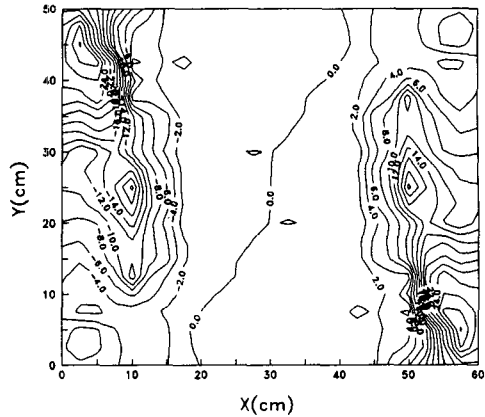
일반적으로 난류운동에너지는 식 (1)과 같이 정의한다. 여기서, 비압축성 유체에 대한 난류운동에너지의 보존관계식을 쓰면 식 (2)과 같다.

$$K = \frac{1}{2}(\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) = \frac{1}{2}\overline{u_i'u_i'} \quad (1)$$

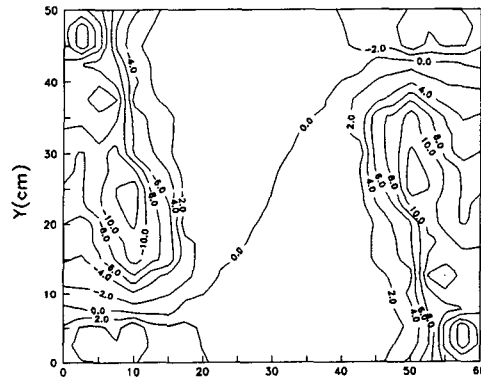
$$\begin{aligned} \frac{DK}{Dt} = & -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i' \left(\frac{1}{2} \overline{u_j'u_j'} + \frac{p'}{\rho} \right) \right] - \overline{u_i'u_j'} \frac{\partial \overline{u_j'}}{\partial x_i} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\nu u_j' \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j'} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) \right] \\ & - \nu \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j'} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, 식 (2) 좌변의 첫번째 항은 난류운동에너지의 유동에 의한 확산(convective diffusion)을 나타낸다. 이는 유속의 섭동성분의 3중적(triple product)으로 표시되며, 이를 통하여 운동에너지의 공간적인 이동을 파악할 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8에서 난류운동에너지의 X방향의 이동과 Y방향의 이동을 나타내었다. Fig. 8에서 난류운동에너지의 이동은 벽면의 주변에서 크게 나타나며 노즐로부터의 분출방향에 따라 C, D 노즐에서는 음의 값이 보인다. 그러나 중앙의 버블내부에서는 Fig. 3에서 나타난 바와 같이 낮은 속도성분이 불안정하게 존재하므로 유동에 의한 난류운동에너지 이동의 시간 평균 값은 거의 0에 가까운 값을 보인다. Fig. 9에서도 역시 벽면의 주변에서 난류운동에너지 이동이 매우 활발하게 나타나고 있으며, 선회류의 중심에 있는 버블의 형상이 매우 잘 드러나 있다.

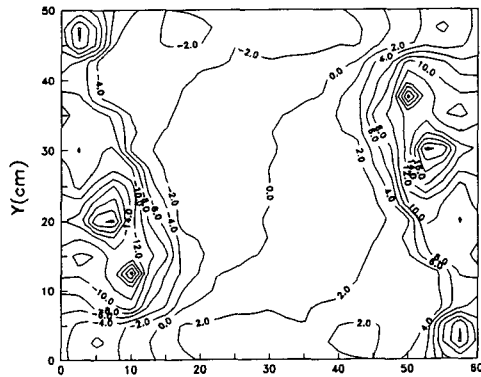
그런데 A, C 노즐의 각을 크게 준 #A2의 경우에는 노즐의 주위에서 u에 의한 난류운동에너지가 역방향으로 이동하고 있다. 즉, 작은 크기이지만 유동의 정체로 인한 재순환이 발생되는 것을 관찰할 수 있었다. #A3의 경우에는 벽근처에서의 유동의 정체가 거의 없는 것으로 나타났으며, X방향의 난류운동에너지의 전달은 원활하게 발생하지만 상대적으로 Y방향의 운동에너지의 전달이 부진하게 나타났다.



(a) #A1 (A, C=33° B, D=46°)



(b) #A2 (A, C=40° B, D=45°)



(c) #A3 (A, B, C, D=30°)

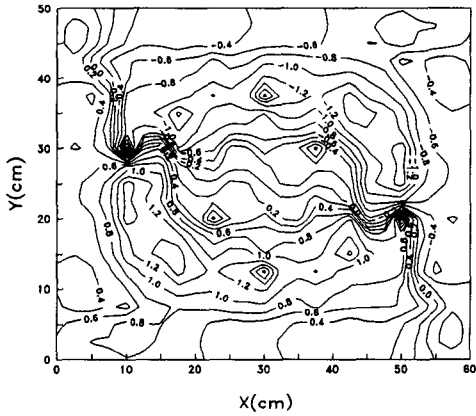
Fig. 8 Convective diffusion of turbulence kinetic energy in y-direction

3.5 난류섭동성분의 특성

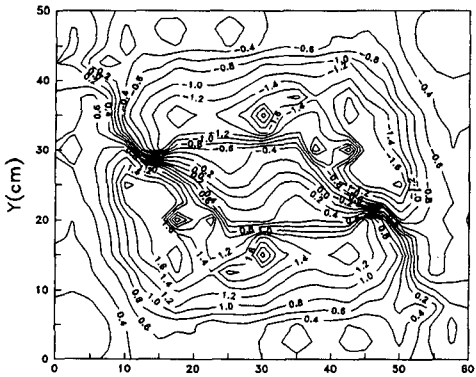
Fig. 9에서는 u의 비대칭도(skewness ; S)를 노즐의 설치각도의 변화에 따라 나타내었다. 전형적인 정규분포(Gaussian distribution)를 보이는 난류

장에서는 비대칭도는 0이다. 비대칭도가 0이 아닌 값을 가지는 것은 확률밀도함수가 원점을 기준으로 어느 한쪽으로 편향된 비대칭을 보임을 의미한다. Fig. 9에서 보면 앞의 Fig. 3, Fig. 7 그리고 Fig. 8에서 나타난 중심부분의 저속버블의 경계부분에서 매우 높은 비대칭도를 나타내고 있다. 이것은 주위

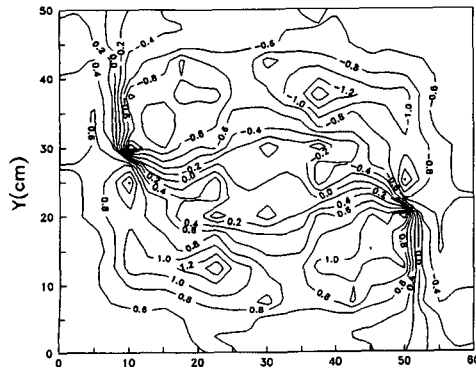
로부터 선회주류를 향하여 간헐적인 유입이 발생하고 있음을 보여준다. 그리고 노즐 근처 벽부근에서 비대칭도가 국소적으로 주변과는 다른 부호의 값을 보이는 것은 벽부착으로 인하여 발생된 재순환영역 때문에 나타난 것이며 이것은 Fig. 4에서 국소적인 폐곡선이 나타나는 사실과 잘 부합된다.



(a) #A1 (A, C = 33° B, D = 46°)

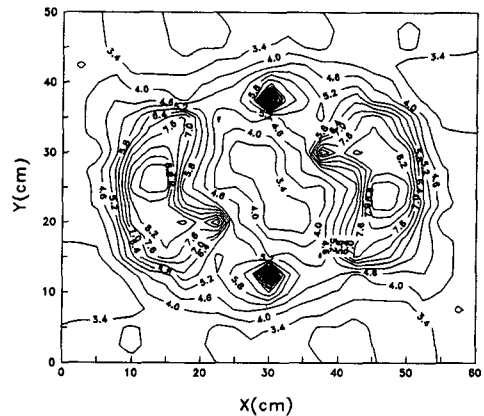


(b) #A2 (A, C = 40° B, C = 45°)

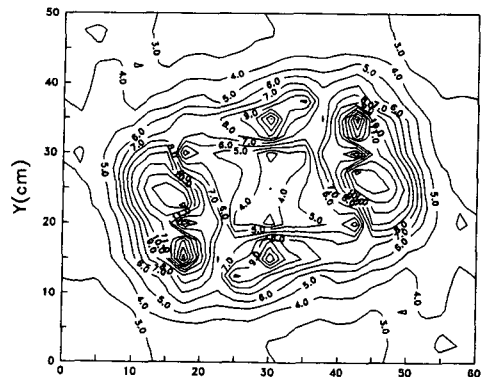


(c) #A3 (A, B, C, D = 30°)

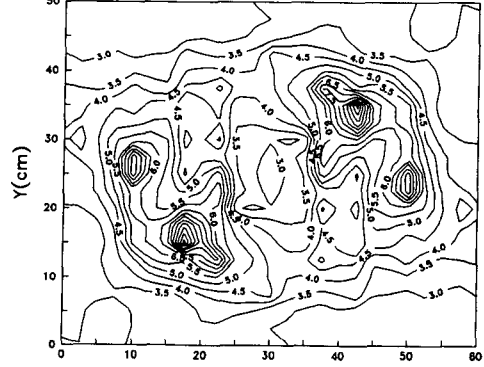
Fig. 9 Distribution of the skewness of u



(a) #A1 (A, C = 35° B, D = 46°)



(b) #A2 (A, C = 40° B, D = 45°)



(c) #A3 (A, B, C, D = 30°)

Fig. 10 Distribution of the flatness of u

한편 노즐의 설치각도의 변화에 따라 높은 비대칭도를 보이는 영역이 변화함을 볼 수 있으며 유입 및 재순환, 벽부착현상이 국소적으로 다르다는 것을 보여준다. 이 결과는 Fig. 3, Fig. 7 그리고 Fig. 8에서 고찰한 결과와 일치하는 결과를 보이고 있다.

편평도(flatness)는 유속의 섭동성분의 4승의 order를 가지는 factor이며 이를 통하여 유동장의 안정성을 평가할 수 있다. 정규분포를 보이는 난류장에서의 편평도는 3이고, 편평도가 높다는 것은 유동장의 불안정성의 증가로 인하여 높은 주파수를 가지면서 많은 피크값을 보이는 속도장이 형성됨을 의미한다. Fig. 10에서 u 의 편평도를 나타내었다. Fig. 9에서와 마찬가지로 중심부분의 저속버블의 경계부분에서 매우 높은 편평도를 보이고 있다. 따라서 각 노즐에서 분출되는 제트유동에 의하여 유동장의 중심부분에서 타원모양의 저속버블이 형성되며 이의 경계면에서 혼합경계층을 형성하여 강한 난류혼합이 발생하고 있다. 또한 여기서 발생하는 간헐적인 유입으로 인하여 높은 편평도를 보이는 것으로 판단된다. 또한 편평도가 최고값을 보이는 지점을 통하여 노즐에서 분출되는 제트의 전단층의 폭(shear layer width)을 추정할 수 있다.

3.6 실험결과의 활용성

본 연구에서는 접선배치식 연소로내의 선회유동장을 열선유속계를 사용하여 측정하였으며, 연소로 내부의 평균유동장 및 난류특성치에 대한 정보를 제공하고 있다. 이를 통하여 접선방향으로 분출되는 4개의 제트유동에 의하여 형성되는 선회유동장의 구조를 파악할 수 있으며, 연소로의 설계에 기본이 되는 유동장에 대한 개략적인 정보를 얻을 수 있다.

실험에 사용된 풍동은 냉형모델이므로 연소로 인한 효과는 고려되지 않았다. 그러나 대형 연소로에 대한 연구에서는 단계적인 모델링을 통하여 연구하는 것이 일반적이므로 본 실험에서 얻어진 유동장에 대한 정보를 통하여 차후 유동장의 구조가 화염의 형태에 미치는 영향을 조사하기 위한 기초자료로 활용 가능할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 접선식 배치로내의 유동장의 구조

를 분석하기 위한 유체역학적인 검토를 수행하였다. 접선배치식 연소로에 대한 각종 제원을 기초 자료로 삼아 차원 해석을 통하여 등온 냉형 모델을 구성하였다. 노즐 설치각도의 변화에 따른 선회유동장의 특성을 조사하였고 특히 난류특성을 분석하였다. 이러한 연구 과정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연소로내 유동장은 강력한 반시계방향의 선회류를 위주로 구성되며 선회류의 중심에는 버블이 존재한다. 이 영역은 유속이 낮고 흐름방향이 일정치 않은 불안정한 유동장으로 구성되어 있다. 선회 중심 버블은 대략 긴 노벽의 1/2, 짧은 노벽의 1/3 정도의 지름을 갖는 타원형이다.

(2) 와도, 난류강도 및 레이놀즈 전단응력의 분포를 통하여 벽면에서 유동의 정체 및 부착이 발생함을 알 수 있으며, 노즐의 설치각도에 따라서 벽면에서의 정체영역과 선회중심 버블의 형상이 변화한다.

(3) 유속의 섭동성분의 3중적을 통하여 난류운동 에너지의 유동에 의한 확산효과를 평가할 수 있었다. 이를 통하여 선회유동장 내에서의 운동량의 전달을 파악할 수 있으며, 노즐의 설치각도에 따라 그 분포가 변화한다.

(4) 노즐에서 분출되는 제트유동은 선회주류와 저속버블의 경계면에서 간헐적인 유입을 야기시키며, 비대칭도와 편평도의 분포를 통하여 그 위치를 파악할 수 있었다. 또한 노즐의 설치각도가 변화함에 따라 그 위치가 변화함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국전력공사의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 관계하신 분들께 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) 한국전력공사 삼천포화력발전소, “기본운전지침서”
- (2) Bianca, J. D., Bauver, W. P. and McGowan, J. G., “An Aerodynamic Study of An Operating Tangential Fired Furnace,” *J. of the Institute of Fuel*, pp. 51~63.
- (3) Anson, 1967, “Modelling Experience with Large

- Boilers," *J. of the Institute of Fuel*, pp. 20~25.
- (4) Davison, F. J., 1968, "Nozzle Scaling in Isothermal Furnace Models," *J. of the Institute of Fuel*, pp. 470~475
- (5) Chigier, N. A., 1973, "Application of Model Results To Design of Industrial Flame," *J. of the Institute of Fuel*, pp. 271~278
- (6) Beer, J. M., 1966, "The Significance of Modeling," *J. of the Institute of Fuel*, pp. 466~473
- (7) Robertson, A.D., 1966, "Scaling and Modelling Criteria for Burner Design with Swirl Addition," *J. of the Institute of Fuel*, pp. 335~342.
- (8) Morel, T., 1975, "Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions," *J. of Fluids Engineering*, pp. 225~233.
- (9) Perry, A. E., 1982, "Hot-Wire Anemometry," Clarendon press Oxford.
- (10) Lueptow, R.M., Breuer, K. S. and Haritonidis, J. H., 1988, "Computer Aided Calibration of X-Probes Using a Look-Up Table," *Experiments in Fluids*, Vol. 6, pp. 115~118.
- (11) Westphal R. V., and Metha, R. D., 1984, "Crossed Hot-Wire Data Acquisition and Reduction System," *NASA-TN-85871*.
- (12) 김경천, 윤순현, 김대성, 신영호, 1994, "컴퓨터원용 열선 및 열필름 프로브의 교정방법 개선에 대한 연구," 대한기계학회논문집, 제18권, 제4호, pp. 977~985.
- (13) C-E Co., 1976, *Combustion Engineering*, 2nd edition.