

<論 文>

# 확대유로내의 Bluff-Body 후류확산화염의 구조 및 특성(1)

최병륜\* · 이중성\*\*

(1994년 2월 14일 접수)

## Structure and Characteristics of Diffusion Flame behind a Bluff-Body in a Divergent Flow ( I )

Byeong-Ryun Choi and Joong-Sung Lee

**Key Words :** Turbulent Diffusion Flame(난류확산화염), Recirculation Zone(재순환영역), Bluff-Body(비유선형물체), Flame Stability Limit(화염안정한계), Divergent Flow(확대흐름), Distributed Reaction Flame(분산반응화염)

### Abstract

An experimental study is carried out on turbulent diffusion flames stabilized by a circular cylinder in a divergent duct flow. A commercial grade gaseous propane is injected from two slits on the rod as fuel. Flame stability limits, as well as size and temperature of recirculation zone, are measured by direct and schlieren photographs to clarify the characteristics and structure of diffusion flames and to assess the effect of various divergent angle of duct. The results of the present study are as follows. Temperature in the recirculation zone decreases with increasing divergent angle. The blow-off velocity in parallel duct is higher than that in divergent duct. Critical blow-off velocity is expected to be about 8~12 degree through blow-off velocity pattern. Regardless of divergent angles, the length of recirculation zone is nearly constant, and this length becomes longer with rod diameter. Pressure gradient has an effect on the eddy structure in shear layer behind the rod. With the increase of divergent angle, large scale eddies by dissipated energy in shear layer are split into small scale eddies, and the flame becomes a typical distributed-reacting flame.

### 1. 서 론

효율적인 연소기를 설계하는 한 방법으로 연소기 내로 유입되는 공기유로를 확대하여 공기속도를 가능한 한 작게 하는 방법<sup>(1)</sup>을 사용하면, 혼합기의 체류시간(residence time)이 길어져서 연소효율을 높일 수 있다. 그러나 열원으로 작용해 화염을 안

정화시키고, 원주후류에서 형성되는 고온의 재순환 영역은 유로의 확대에 인하여 변하며, 그로 인해 화염구조 및 안정성에 영향을 미친다. 그런데 이 확대유동장에 대해서 Ackeret와 Sprenger 등<sup>(2)</sup>은 확대관내의 압력회복률은 입구의 난류경계층 두께에 의해 좌우되고, 그 최대회복률을 낼 수 있는 각도는 3°~8°라는 것을 실험적으로 밝혔다. 그리고 Lefebvre 등<sup>(1)</sup>은 많은 항공기 엔진에서 압축기 출구에서 나오는 연소용 공기유속을 떨어뜨리기 위해 확대관을 사용하였으며, 스톨손실(stall loss)과 접촉저항손실

\*정회원, 부산대학교 기계공학과 및 기계기술연구소

\*\*부산대학교 대학원

(friction loss)의 상관관계를 통해 최적 확대각은 7°~12° 사이라는 것을 밝혔다. 그 후 Kanemoto와 Toyokura<sup>(3)</sup>는 확대유동장내에 원주가 있을 때와 없을 때에 대하여 실험 및 이론적 해석을 통해 내부유동과 경계층의 특성을 연구했으며, 최근에는 Yamaguchi 등<sup>(4)</sup>이 비연소 확대유동장에서 원주후류와(渦) 구조의 거동에 관하여 실험을 하였다. 그리고 이 확대각 변화에 의한 연소장을 취급한 연구는 Yamaguchi 등<sup>(5)</sup>의 슈리렌 촬영에 의한 보염특성과 후류와 구조와의 관계에 관한 연구가 있을 뿐이다. 따라서 본 연구에서는 연료의 분출을 동반하는 원주형 보염기 후류에 형성시킨 난류확산화염을 대상으로 확대각이 변하는 이차원 유로 내에서 그 확대각의 변화에 따른 화염안정범위의 측정, 직접사진 및 슈리렌사진 촬영, 온도 및 이온전류 등의 측정을 통하여 이 화염의 구조와 특성에 대한 압력구배의 영향 등을 해명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 1에, 원주형보염기 설치위치, 좌표축 및 측정부 상세도는 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 송풍기로부터 공급된 공기는 확대부로 흐르면서 정류부에서 허니-콤(honey-comb) 및 철망(40 mesh)을 통해 정류된 후 단면 축소비가 6이고, 단면적이 50×100 mm인 노즐을 통해서 측정부로 들어간다. 노즐부는 균일한 속도를 얻기 위해 Morel<sup>(6)</sup>의 제안에 따른 형상<sup>(7)</sup>을 채용하였다. 측정부의 입구 단면형상

은 50×100 mm인 직사각형이고, 연소실은 원주형 보염기 설치 단면의 유로높이를 H=100 mm로 일정하게 유지시키면서 확대각(2a)을 -4°~+20° 범위로 조절할 수 있는 상하 제약 벽으로 되어 있고, 그것들을 평행하게 끼우고 있는 좌우 두 개의 바이플 유리(300 mm×100 mm×5 mm)로 가시화 창이나 있는 철판(두께 12 mm)으로 구성되어 있다. 그리고 원주형 보염기는 좌우 벽면에 뚫어진 구멍에 의해서 지지된다.

실험에 사용한 원주형 보염기로는 직경 d=25, 35 및 45 mm의 3종류를 사용하여 폐쇄비(blockage ratio) BR(d/H)를 0.25, 0.35, 0.45로 변화시켰다. 확대 원점으로부터 상류 75 mm에서 피토판을 이용하여 주류속도를 측정하였으며, 측정부 입구에서 열선풍속계로 측정한 흐름방향의 상대 난류강도는 주류속도(U)가 8.8 m/s일 때 약 5%이다.

주류공기가 보염기의 위치를 통과할 때의 평균속도(U\*)는 다음과 같이하여

$$U^* = \frac{H}{H-d} U \tag{1}$$

폐쇄비를 고려하여 주류속도를 수정하였다. 여기서, H는 연소실 유로높이, d는 실린더 직경 그리고 U는 주류속도이다.

보염기의 구조와 치수는, 공급 연료유량(Q<sub>f</sub>)를 일정하게 유지시키고 슬릿 폭을 변화시켜 분출연료가 갖는 운동량이 최대 3배 정도 달라도, 이 슬릿 폭의 변화가 보염특성<sup>(8)</sup>에 거의 영향을 미치지 않기 때문에, 본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 슬릿길이가 15 mm, 폭이 0.8 mm로 일정하게

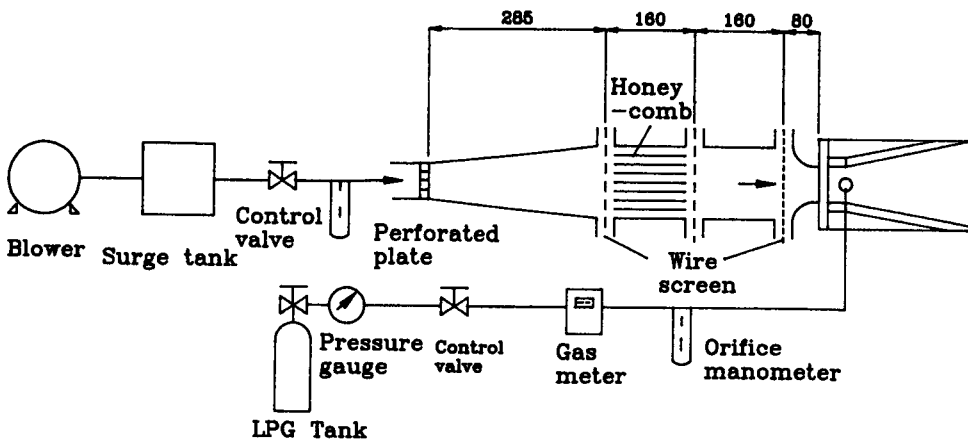


Fig. 1 Flow diagram of combustion system

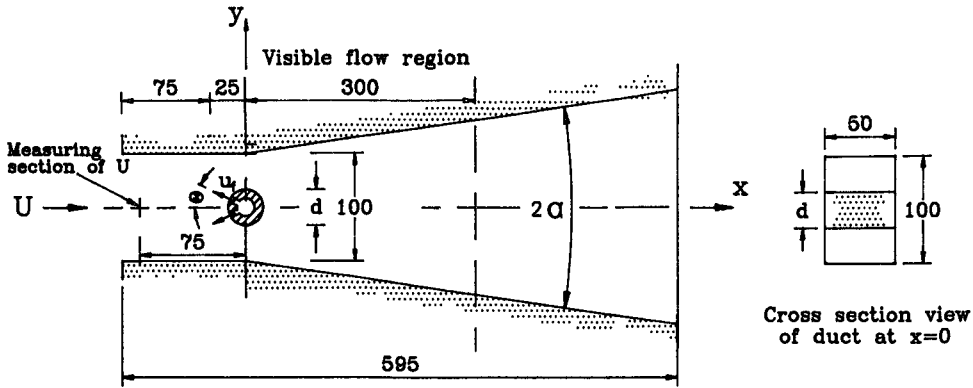


Fig. 2 Detail diagram of measurement part

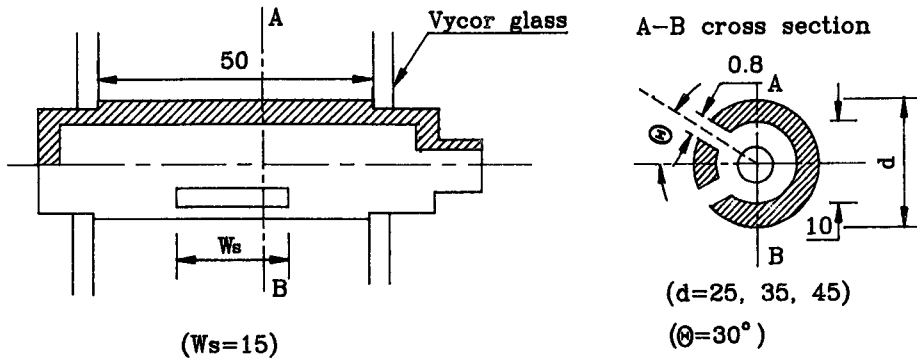


Fig. 3 The Shape of flame holder

하였다. 원주의 길이는 모두 유로 폭과 똑같은 50 mm이다. 연료는 상용 프로판가스( $C_3H_8$ )를 사용하였고, 주류에 대해서  $\theta = \pm 30^\circ$ 로 두 개의 슬릿을 통하여 분출시켰다.

화염의 블로오프(blow-off) 속도 측정은 연료의 평균분출속도  $u_f$ (또는 분출연료량  $Q_f$ )와 확대각  $2\alpha$ 를 각각 일정하게 유지시킨 후 공기유속을 증가시키면서 실험을 하였다. 화염이 완전히 사라지는 조건을 블로오프로 하였으며, 그 때의 속도를  $U_{bo}$ 로 표시하였다.

연료 분출각도의 변화가 블로오프속도에 미치는 영향은 그 분출각이 흐름방향에 대해  $20^\circ \sim 135^\circ$  사이에서는 블로오프속도<sup>(6)</sup>에 거의 영향을 미치지 않고,  $105^\circ$  이상이 되면 보염기 측방향의 반응면의 폭은 하류로 갈수록 좁게 되어 이차원성을 잃게 되므로 이와 같은 각도로 연료를 분출시켰다.

압력구배에 의한 난류전단층에 대한 난류의 모양과 거기서 형성되는 화염구조는 슈리렌사진 촬영을

통해 관찰하였고, 그 전단층에서 존재하는 와(渦)의 특성들은 이온전류 및 변동온도의 동시측정을 통해 검토하였다.

슈리렌사진 촬영<sup>(6)</sup>에는 2개의 오목거울( $\phi 300$ )로 형성되는 Z-형 광학계를 채택했으며, 통상의 나이프에취 혹은 미세한 밀도변화를 관찰할 수 있는 원형의 나이프에취를 이용하였다.

화염의 이온전류 측정에는 0.1 mm Pt/Rh 13% 이온 프로브가 이용되었고, 온도분포 측정에는 평균온도는 소선경 0.1 mm의 Pt-Pt/Rh 13%의 R-형 열전대, 변동온도는 직경 25  $\mu$ m의 Pt/Pt-Rh 13% 열전대를 사용하여 측정하였다.

맥동온도 신호는 보상기와 증폭기 그리고 2 kHz 저역(low-pass)필터를 거쳐 테이터레코더(TEAC사의 Model XR-5000)나, A/D 변환기를 통해 컴퓨터 하드디스크에 기록된다. 측정된 신호에 대해서는 신호분석기(Iwatsu사의 Model SM-2100B)나 오프라인 프로그램을 통하여 분석을 수행하였다. A/

D 변환기에서 자료의 추출간격은  $500 \mu\text{s}$ 이고, 2048개씩의 자료를 취하였다. 단 화염의 복사에 의한 영향을 보정하지 않았다.

### 3. 실험결과 및 고찰

원주형 보염기 후류 난류확산화염의 구조 및 특성을 논의함에 있어 보염특성을 명확히 할 필요가 있다. 확대유동장 중에 화염을 안정적으로 유지시킬 경우 보염특성에 영향을 미치는 각각의 인자를 고려해 보면 주류 유동속도, 연료분출량 혹은 분출속도, 확대각, 보염기의 형상 및 폐쇄비 등을 들 수 있다.

확대유동장에서 확산화염의 연소과정은 유동장의 압력구배로 인하여 연료와 연소용 공기와의 혼합 과정이 보염특성에 크게 영향을 미친다고 생각되므로 확대각 및 폐쇄비에 따른 블로오프속도, 재순환영역 길이, 화염구조, 이온전류 및 온도분포 등을 측정하였다.

#### 3.1 화염형상

원주형 보염기를 사용한 경우의 안정화염의 한 예를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 화염은 보염기의 박리점이라고 생각되는 위치로부터 시작하여 하류에 생기며, 청색을 띤다. 보염기 배후(背後)의 후류역에서는 화염이 관찰되지 않는 부분이 있다. 이 형태로부터 확대각( $2\alpha$ )을 증대시켰을 때 형성된 화염은 Fig. 4(b)와 (c)이다. 단면의 확대에 관계없이 청색반응면의 길이나 폭은 거의 같다는 것을 알 수 있으나, 보염기 배후의 후류역과 화염선단안쪽 중심부근에서 화염이 관찰되지 않는 부분이 확대각이 증대될수록 커져  $2\alpha=16^\circ$ 일 경우에는 두 부분이 만나 보염기 후류역에서 화염 후미까지 중심부근에서 나타났다.

후류역에서 화염형태만을 고려한다면, 화염이 블로오프될 때도  $2\alpha=16^\circ$ 일 때와 같은 화염형태<sup>(6)</sup>를 나타내나, 일반적으로 화염이 블로오프될 때는 위와 같은 화염형태 외에도 동시에 청색반응면이 짧고, 폭도 좁다.

#### 3.2 화염안정범위

Fig. 5(a), (b) 및 (c)는 각각  $d=25$ ( $BR=0.25$ ), 35(0.35) 및 45 mm(0.45) 원주를 사용한 경우의 블로오프속도( $U_{\text{bl}}$ )의 변화를 확대각( $2\alpha$ )을 파라미터

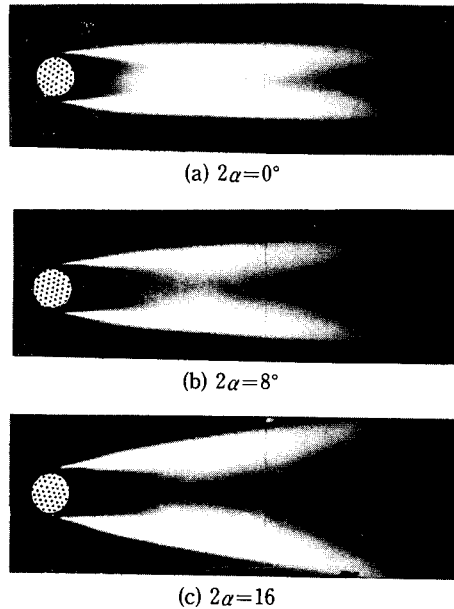


Fig. 4 Flame photographs for different divergent angle( $U^*=11.7 \text{ m/s}$ ,  $u_f=2.6 \text{ m/s}$ )

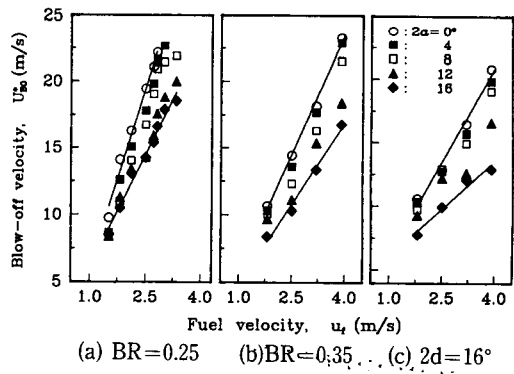


Fig. 5 Stability limits for fuel mean velocity vs. blockage ratio

로 하여 나타내었다. 횡축은 연료의 분출속도( $u_f$ )를 나타낸다. Fig. 5에 의하면, 어느 원주에 대해서도 연료유량의 증가에 따라 블로오프 속도는 증가한다.

다음으로, 연료유량을 일정하게 유지시키고 확대각을 변화시켰을 때의  $U_{\text{bl}}$  변화의 한 예로, 원주 직경( $d$ )이 25 mm( $BR=0.25$ )의 경우를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서  $Q_f$ =일정인 조건에서의 블로오프속도는 확대각 증대에 따라서 감소하고, 그 감소 비율은 확대각  $2\alpha=10^\circ$  전후에서 불연속적으로 변하고 있다는 것을 알 수 있다. 전술(前述)한 화

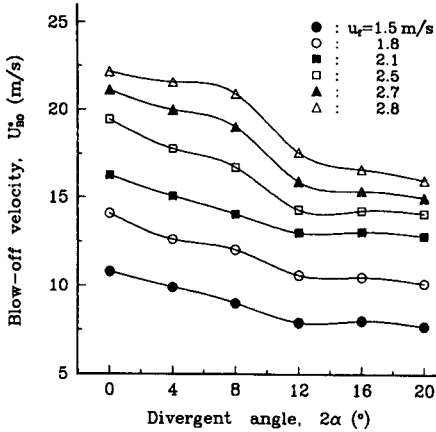


Fig. 6 Stability limits for divergent angles(BR=0.25)

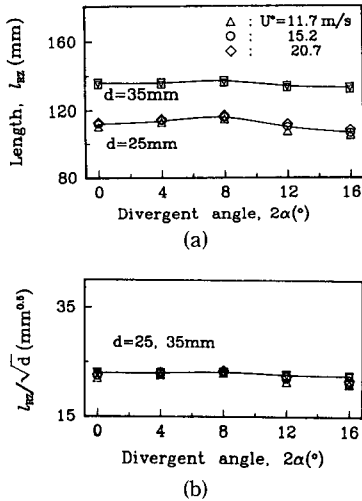


Fig. 7 Effect of divergent angle on length of recirculation zone

염형태나 후술(後述)하겠지만,  $Na^+$ 이온의 염색(炎色) 반응을 이용해 재순환영역 변화를 살펴보았다.

보염기 직경이 일정할 때 확대각 증대에 따라 Fig. 7(a)과 같이 재순환영역 길이는 거의 변화가 없다. 그러나 이 영역 후미부분의 체적이 증가하여 뭉뚱하게 되면서 약  $2\alpha=10^\circ$  이후부터는 화염 후미 중심 안쪽면의 기연가스(burnt gas)가 폐루프(closed loop)로 형성된 재순환영역의 후미로 역류되어 들어와 전체적으로 이곳의 온도를 저하시키기 때문에 위와 같은 경향을 나타낸다고 생각된다. 따라서 이 불연속대의 중심이 되는 확대각을 임계확대각이라고 부르고,  $2\alpha_{cr}$ 로 표시해 변화의 형태를

분류하면,  $2\alpha < 2\alpha_{cr}$ 의 범위에서는  $2\alpha$ 의 증대에 따라  $U_{bo}^*$ 는 선형적으로 감소하지만  $2\alpha > 2\alpha_{cr}$ 영역에서는  $2\alpha$ 의 값에 무관하게 거의 변화가 없다. 확대각이 약  $10^\circ$  이상인 경우에는 확대유로내 유동의 박리(separation)의 영향으로 공기흐름의 유효 단면적 변화가 크지 않으므로 블로오프 속도에도 변화가 없다. 따라서 단순히 블로오프 속도의 대소만의 관점에서 보염성을 비교하면, 임계각 이전에서 형성된 화염쪽이 더 나은 연소형태를 나타내었다. 본 실험의 범위에서는 확대각이 작을수록 고속류에서 보염이 가능하다. 그리고 본 논문에서는 보여주지 않았으나,  $BR=0.35$  및  $0.45$ 와 같이 폐쇄비가 증대하면 임계확대각이 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 어느 쪽의 경우에도 블로오프 속도( $U_{bo}^*$ )는 각각 임계확대각( $2\alpha_{cr}$ )을 경계로 해서 Fig. 7과 같은 경향을 나타냈었다.

### 3.3 재순환영역의 특성

#### 3.3.1 재순환영역의 길이( $l_{RZ}$ )

보염기 후류에서 형성되는 재순환영역은 고온의 연소가스로 형성되어 열 및 활성 화학종의 공급원으로 작용하기 때문에 보염성능을 지배하는 중요한 인자라고 생각된다. 그러므로 확대유동장내 화염의 안정성을 논함에 있어서 압력구배의 변화에 따른 재순환영역의 특성을 밝히기 위해 직접사진, 슈리렌사진, 재순환영역의 길이, 온도 등을 시간평균으로부터 검토했다.

균일한 혼합기류중에 위치한 비유선형물체(bluff body)에 의해 예혼합화염(焰)을 유지하는 경우 보염기 후류에 형성되는 재순환영역은 예혼합기에 대한 정상적인 착화 원이며 보염기구를 지배하는 중요한 요인이다. 더구나, 재순환영역의 길이( $l_{RZ}$ )는 보염성능(能)에 크게 관여되어 있다는 것이 잘 알려져 있다. 따라서 본 연구에 있어서도  $l_{RZ}$ 는 보염성능에 중요한 영향을 갖는 다고 예상되어,  $Na^+$ 이온의 염색(炎色) 반응을 이용해  $l_{RZ}$ 를 측정하였다.

폐쇄비 및 확대각을 변화시킨 경우의  $l_{RZ}$ 변화를 Fig. 7에 나타내었다.  $l_{RZ}$ 는 직경이 같은 보염기에서는 확대각 및 공기속도의 변화에 무관하게 거의 일정하다.

또 보염기 직경이 클수록  $l_{RZ}$ 는 길어진다. Fig. 7(b)는 재순환영역의 길이를  $l_{RZ}/\sqrt{d}$ 로 정리한 그림이다. 본 실험의 범위 내에서 공기속도나 보염기

직경의 크기에 관계없이  $l_{rz}/\sqrt{d} = \text{일정한 관계가 성립하였다.}$

이후에서는 현상의 특징을 설명하기 위하여 확대각의 영향이 가장 강하게 나타난다고 생각되는  $BR = 0.25$ 의 흐름조건을 대표로 취해, 확대각을 증대시켰을 때의 순간 슈리렌촬영을 통해 화염구조를 거시적으로 관찰하고 화염의 온도 및 이온전류를 검출하여 동시 또는 각각의 변동 파형의 특징을 조사하여 기본적인 화염구조를 조사했다.

3.3.2 재순환영역의 국소온도

공기속도를 11.7 m/s, 연료분출속도를 2.6 m/s로 일정하게 한 조건에서 확대각이 각각 0°, 8° 그리고 16°인 경우에 임의의 지점에서의 국소온도를 Fig. 8에 나타내었다.  $2\alpha = 0^\circ$ 의 경우 보염기 직후인  $x = 30$  mm 단면에서의 중심부 온도는 높으나,  $y$ 축 방향으로 갈 때 급격한 온도 감소를 보인다. 하류부에서의 온도구배가 완만한 것으로 보아  $y$ 축 방향으로 연료 확산량이 많아지고 있다는 것을 알 수 있다.

$2\alpha = 8^\circ$ 인 경우 보염기의 배후부터 후류부  $x = 90$  mm까지 높은 온도를 나타내고 구배는 완만하다.  $2\alpha = 16^\circ$ 인 경우 보염기 직후의 온도는 낮고 후류에

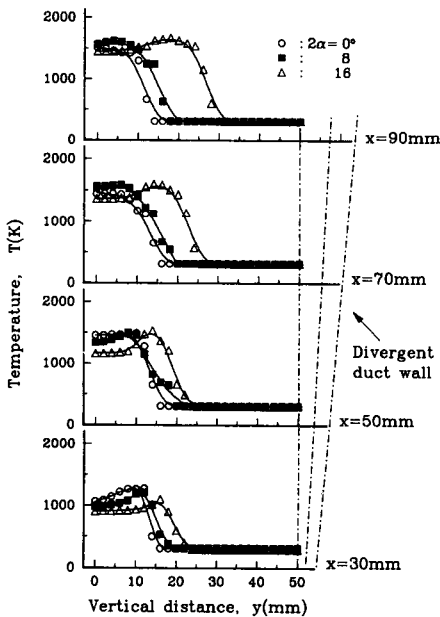


Fig. 8 Local temperature distribution in recirculation zone for different divergent angle ( $U^* = 11.7$  m/s,  $u_f = 2.6$  m/s)

서도 그다지 온도가 높지 않다. 이는 임계확대각 이상의 경우에 확대각 증대에 따른 흐름방향의 압력구배의 증대와 흐름의 벽면 이탈로 인한 스톨손실(stall loss)로 인해 보염기 배후의 중심부로 혼합기가 충분히 유인(entrainment)되지 못한다. 그리고 그에 따라 반응이 활발하게 진행되지 않아 임계확대각 이상의 보염기 배후 중심부의 온도가 낮은 것으로 생각된다. 대체로 온도구배가 대단히 급격한 부분을 반응대로, 내부의 온도가 거의 변하지 않는 부분을 재순환영역으로 추측할 수 있다. 그리고 확대각이 증대될수록 재순환영역의 폭도 커지는 것을 알 수 있었다.

3.3.3 재순환영역의 대표온도

공기속도를 각각 11.7, 15.3 m/s로 한 상태에서 연료량을 증가시켰을 경우, 확대각에 대한 재순환영역의 대표온도( $T_{rz}$ )를 Fig. 9에 나타내었다.  $y = 0$ 인 중심부에서  $x = 30, 50, 70, 90$ 과 100 mm인 5 지점에서 측정된 국소온도를 평균한 값을 재순환영역의 대표온도로 정의한다. 대체로 연료유량이 증가함에 따라 온도가 1600 K까지 증가하다가 서서히 감소됨을 알 수 있었다. 이는 분출 연료량의 증가에 따라 재순환영역 내부가 이론혼합기가 될 때에 최고 온도까지 증가하고 과농한 상태가 되면 산소부족에 의해 반응이 서서히 둔화되어 저하한다. 최고 온도를 나타낼 때 당량비가 약 1.0인 이론혼합기 상태로 예측된다.

대표온도의 피크치는 확대각 및 연료의 분출속도 증대에 따라 증대되어 나타났다. 즉 임계확대각 이상에서는 보염기 배후의 부압때문에 후류중심부의 온도가 낮은 기연가스가 재순환영역으로 유입되어 활성 화학종의 희박화를 초래하여 하기 때문이다.

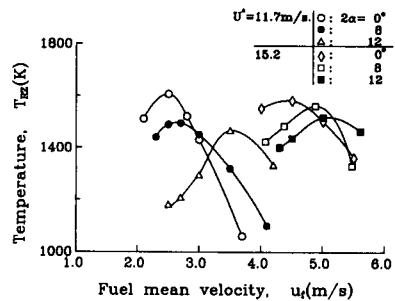


Fig. 9 Representative temperature distributions in recirculation zone

3.4 화염구조

Fig. 10은 확대각이 0°, 8° 및 16°인 경우의 후류 화염구조를 나타내는 순간 슈리렌사진이다. 공기속도와 연료분출속도는 각각 11.7 m/s와 2.6 m/s이고, 폐쇄비(BR)는 0.25( $d=25$  mm)이다.

Fig. 10(a)와 (b)에 의하면, 원주후류에 화염을 안정화시키는 경우에 확대각이 없는 평행기류 및 확대각이 8°인 경우는 보염기 배후의 후류역 중심부근의 상하 전단층 사이에 온도구배로 인한 밀도구배가 나타나나, 확대각이 임계각보다 큰 16°인 경우의 밀도구배는 나타나지 않았다. 앞서 논했던 직접사진이나, Na<sup>+</sup>이온의 염색(炎色)반응을 이용한 재순환영역의 관찰 결과에서 보면, 후류역의 기연가스가 재순환영역으로 유입해 이와 특성을 갖는다고 생각된다.

확대각에 따라 더욱 상세한 화염구조변화를 조사하기 위하여 공기속도( $U^*$ )가 11.7, 15.3 및 20.0 m/s에서 안정화된 화염을 형성시켜 확대각이 0°, 8°, 16°인 경우의 순간 슈리렌사진을 Fig. 11과 같이 촬영하여 화염구조를 관찰하였다.

한편 임계확대각 이상인 16°인 경우의 화염구조는 전단층에서 주로 스케일이 작은 와(small scale eddy)로 구성되어 거동하고 스케일이 큰 와(large scale eddy)는 거의 나타나지 않았다. 그러나 확대각이 임계확대각 이하인 0°와 8°인 경우는 스케일

이 큰 와속에 스케일이 작은 와가 포함되어 함께 거동하고, 다시 더 작은 스케일 와로 쪼개지면서 후류에서 나타났다. 확대각에 따른 압력구배의 영향으로 와가 압력구배가 있는 유동장을 지나면서 스케일이 큰 와의 에너지가 소산되면서 작은 스케일 와로 되는데, 특히 임계확대각 이상의 경우에는 보염기 직후에서부터 전체적으로 스케일이 작은 와로 구성되어 거동하였다.

3.5 이온전류 및 변동온도

난류화염의 구조 및 특성을 이해하는 데는 각종 물리량들을 동시에 측정하여 화염구조를 연관시켜 해석함이 필요하다.

화염중에는 고농도의 이온전류가 존재하기 때문에 이온농도 측, 이온전류는 연소반응강도에 비례한다고 생각된다.

주름상 층류화염(wrinkled laminar flame)과 분산 반응역(distribution reaction zone)을 구분하는 방법<sup>(9)</sup>의 하나로써, 변동온도의 확률밀도분포에서 중간온도의 확률이 낮으면 주름상 층류화염, 중간온도의 확률이 높으며 분산반응영역이 존재한다고 보고 있다. 따라서 우선 기본적으로 온도 및 이온전류의 동시측정을 통하여 그 두 신호의 관계 및 변동온도의 확률밀도분포를 통해 유로의 확대에 따른 화염구조 및 특성을 밝히고자 한다.

Fig. 12는 앞서 슈리렌사진 관찰을 통해 보염기 후류에서 와의 성장이 큰  $x=100$  mm단면에서 온도변동이 가장 심한 위치와 이온전류 강도가 가장 큰 위치에서 동시측정한 변동온도와 이온전류의 신호 파형을 나타낸다.

Fig. 12의 이온전류 및 변동온도의 동시 측정 신호에서 임계확대각 이하에서는 이온전류 신호의 크고 작은 상방 피크치가 나타나는 것으로 보아, 작은 와를 포함한 큰 와 구조에서 나타나는 신호형태를 보이나, 임계확대각 이상에서의 신호들은 거의 작은 와 분포 구조에서 나타나는 불규칙한 특성을 나타냈었다.

Fig. 13은 Fig. 12의 신호중 변동온도 신호의 확률밀도분포를 나타낸 것이다. 온도 변동이 심한 위치에서의 확률밀도분포 형상인 아래 그림들은 전체적으로 어느 확대각이나 사다리꼴 형태이다. 이러한 확률밀도분포 형태는 스케일이 작고 난류강도가 높은 유동장에서 나타나는 분산반응영역이나, Yoshida<sup>(10)</sup>가 층돌류 화염에서 관찰한 확률밀도분포 형태와

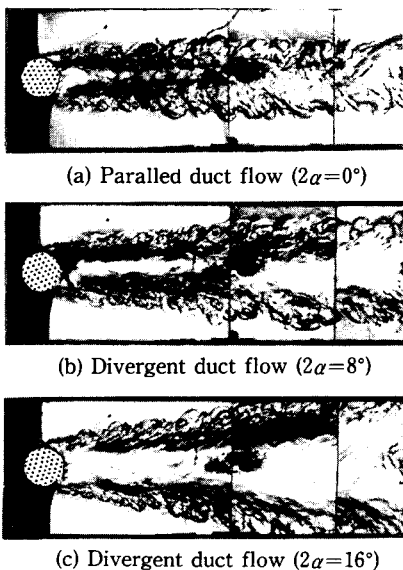


Fig. 10 Schlieren photographs for different divergent angle( $U^*=11.7$  m/s,  $u_r=2.6$  m/s)

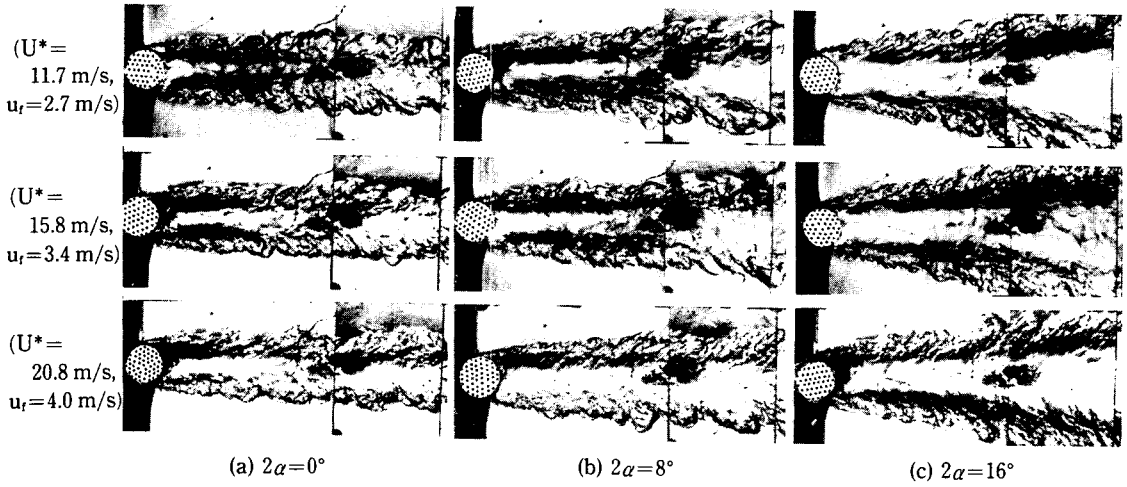


Fig. 11 Combustion pattern for different divergent angle

유사하다. 그런데 확대각에 따라서 고온, 저온 및 중간온도분포를 보면, 임계확대각 이하의 확률밀도 분포는 중간온도가 고온과 저온확률과 비슷한 분포 형태를 나타낸다. 그러나 임계확대각 이상에서는 고온보다 저온 확률이 낮게 분포되어 있는 것으로

보아, 이 위치에서 난류의 와가 압력구배가 있는 유동장을 지나면서 스케일이 작은 와의 급격한 에너지 소산으로 인하여 작은 스케일 와로 변해 혼합기를 고온류쪽으로 유인시키지 못하기 때문인 것으로 생각된다.

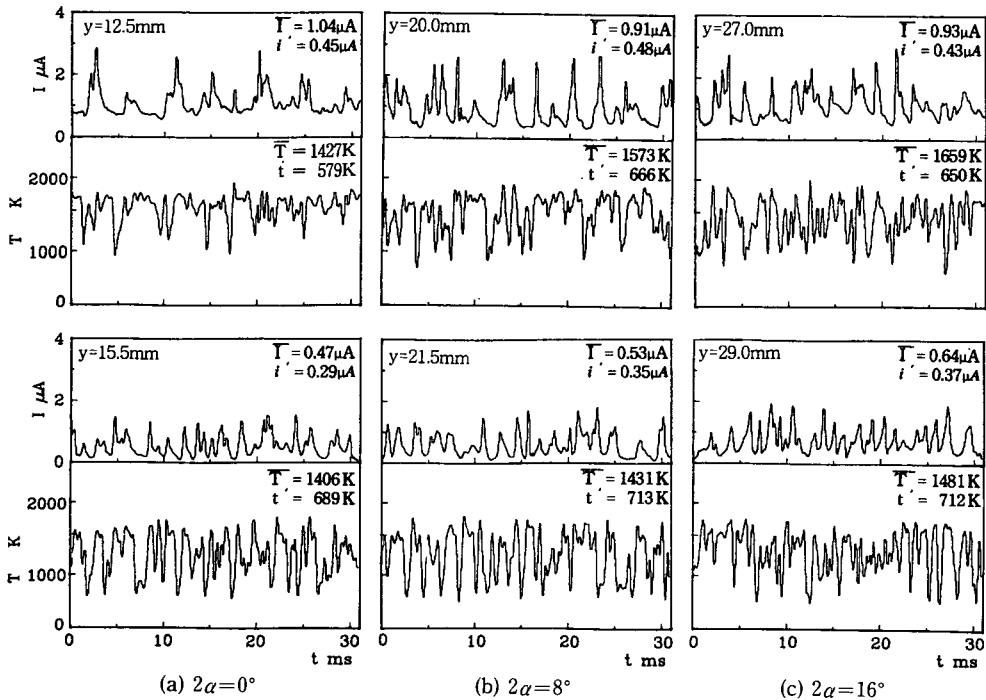


Fig. 12 Simultaneous signals of fluctuating temperature and ion current ( $U^* = 11.7$  m/s,  $u_r = 2.6$  m/s,  $x = 100$  mm)



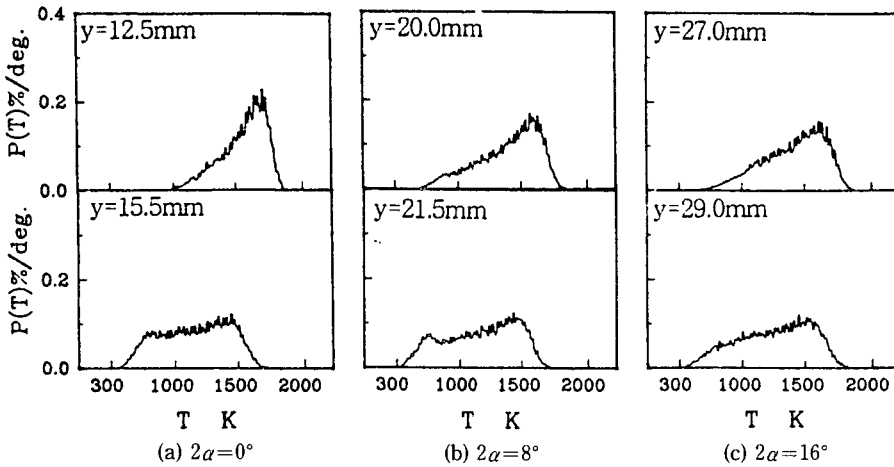


Fig. 13 PDFs of fluctuating temperature( $U^*=11.7\text{m/s}$ ,  $u_r=2.6\text{ m/s}$ ,  $x=100\text{ mm}$ )

#### 4. 결 론

본 연구에서는 확대각이 변하는 이차원 유로에 원주형 보염기를 설치하고 유동방향에 대해  $\theta = \pm 30^\circ$  방향으로 연료를 분출하여 형성된 난류확산화염에 대하여 유로 확대각의 변화가 화염의 구조 및 특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 실험에 의해 얻어진 결과를 요약하면, 다음과 같다.

(1) 확대각의 증대에 따라 임계확대각( $8^\circ \leq 2\alpha_{cr} \leq 12^\circ$ ) 이하에서의 블로오프속도는 거의 선형적으로 감소하였으나, 임계확대각 이상에서는 블로오프속도 변화가 없으며, 이러한 현상은 “확대유로내 흐름의 박리에 의해 공기흐름의 유효 단면적 변화가 거의 없기 때문”이라고 생각된다.

(2) 보염기 직경이 클수록 재순환영역 길이( $l_{RZ}$ )는 길어지고, 직경이 같은 보염기에서는 확대각 및 공기속도의 변화에 무관하게 거의 일정하다.

(3) 재순환영역 중심부 온도는 임계확대각 이하에서는 확대각에 따른 변화가 크지 않으나, 임계확대각 이상에서는 중심부 온도가 낮다.

(4) 임계확대각 이상에서 화염의 전단층에서 형성된 와는 압력구배가 있는 유동장을 지나면서 큰 스케일의 와가 가지는 에너지가 급격하게 소산되면서 주로 작은 스케일의 와로 구성되어 거동하나, 임계확대각 이하에서는 큰 스케일 와속에 작은 스케일 와가 포함되어 함께 거동하는 것으로 생각된다.

(5) 온도 변동이 가장 심한 위치에서 확률밀도분포 형상은 모두 사다리꼴이다. 임계확대각 이하에서는 고온, 중간온도 및 저온의 미연혼합기의 확률이 비슷하나, 임계확대각 이상에서는 스케일이 큰 와의 급격한 에너지 소산으로 인하여 작은 스케일 와로 변해 혼합기를 고온류쪽으로 유인시키지 못하여, 저온 혼합기의 확률이 낮게 분포하는 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

- (1) Lefebvre, A. W., 1983, *Gas Turbine Combustion*, Mcgraw-Hill, New York, pp. 77~88.
- (2) Ackeret and Sprenger, 1979, *Boundary Layer Theory*, Mcgraw-Hill, Inc., pp. 626~629.
- (3) Kanemoto, T. and Toyokura, T., 1982, “圓柱後流を有する廣かり流路内の流れ,” *JSME(B)*, Vol. 48, No. 425, pp. 18~24.
- (4) Yamaguchi, S., 1990, “Cold Flame Structure and Stabilization in a Divergent Flow,” *JSME(B)*, Vol. 56-523, pp. 803~808.
- (5) Ishino, Y. and Yamaguchi, S., 1990, “Flame Structure and Stabilization in a Divergent Flow,” *JSME(B)*, Vol. 56, No. 528, pp. 2469~2475.
- (6) Morel, T., 1975, “Comprehensive Design of Axisymmetric Wind Tunnel Contractions,” *Journal of Fluid Engineering*, pp. 225~233.
- (7) Tulapurkara, E. G. and Bhalla, V. V. K., 1988, “Experimental Investigation of Morel’s Method

for Wind Tunnel Contractions," *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 110, pp. 45~47.

- (8) Ito, K., 1977, "Stabilization Mechanism of Turbulent Diffusion Wake Flame Behind Bluff Bodies with Fuel Injection," *JSME(B)*, Vol. 83, No. 0123, pp. 1144~1151.
- (9) 香月正司, 1985, "亂流火炎の計測と燃焼診斷技術," *日本機械學會學術雜誌(展望講演)*, pp. 77~81.
- (10) Yoshida, A. and Tsuji, H., 1978, "Measurements of Fluctuating of Temperature and Velocity in a Turbulent Premixed Flame," *17th. Symp. (International) on Combustion*, Williams & Wilkins, pp. 945~956.
- (11) Zukoski, E. E. and Marble, F. E., 1956, "Experiments Concerning the Mechanism of Flame Blowoff from Bluff Bodies," *Gas Dynamics Symposium on Aerothermochemistry*, pp. 205~210.

부 록

열전대의 응답지연 보상방법

세선(細線) 열전대의 응답지연을 전기적으로 보상하는 방법은 세선내의 열전달과 복사를 무시하면, 가스온도  $T_g$ 는

$$T_g = T_i + \tau_c \frac{dT_i}{dt}, \quad \tau_c = \frac{\rho c V}{\mu s}$$

여기서,  $T_i$ 는 열전대의 온접점(溫接點) 온도,  $\mu$ 는 열전달률,  $\rho, c, s, V$ 는 각각 소선(素線)의 밀도, 비열, 접점의 표면적, 접점체적이다. 따라서  $\tau_c$ 가 상수라면, 시정수  $\tau_c$ 의 1차 적분연산을 통해서  $T_i$ 로부터  $T_g$ 를 구한다.

이 지연보상 열전대를 사용하여 실험적으로 시정수  $\tau$ 를 구하는 방법으로 여러 방법이 있으나, 시정수 측정에 있어서 편차, 국소 물성치 및 유동장의 정보가 알려져 있지 않은 경우의 부정확함을 고

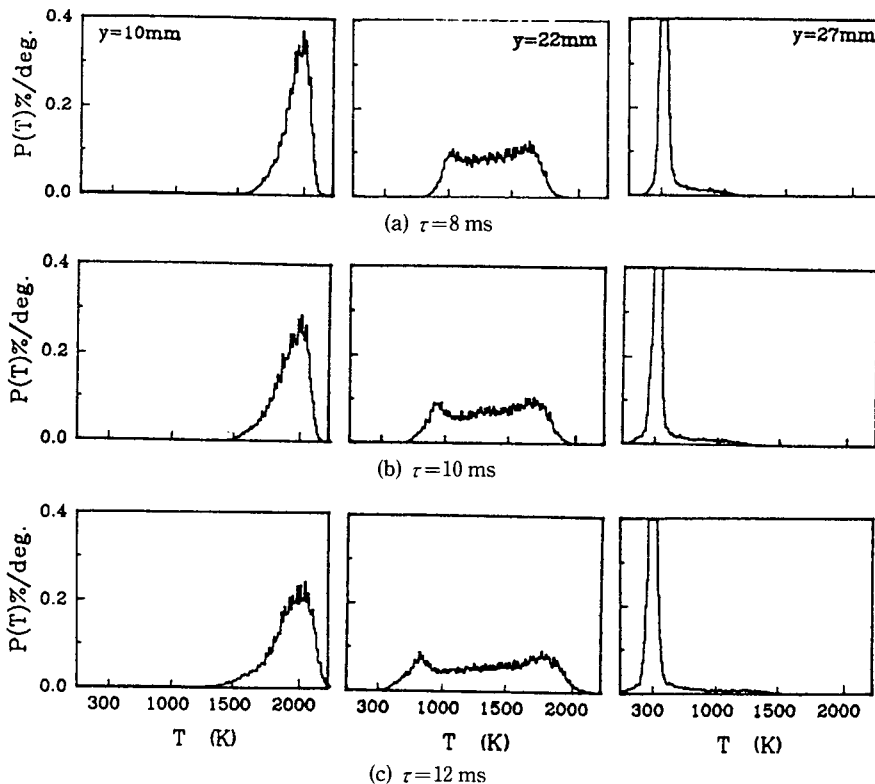


Fig. A The change of PDF of fluctuating temperature for different time constant ( $U^* = 11.7$  m/s,  $u_r = 2.6$  m/s,  $2\alpha = 8$ ,  $x = 100$  mm)

려하면 각각 장단점은 있다.

본 연구에서는 화염구조를 특징적으로 나타내는 변동온도의 확률밀도 분포형에 주목하여 다음과 같은 방법을 이용하였다.

Fig. A는 시정수 설정의 한 예로 공기속도  $U^*=11.7$  m/s이고, 연료분출속도  $u_f=2.6$  m/s인 조건의 화염내의 축방향의 한 단면  $x=100$  mm에서 시간 평균적인 반응영역의 연소가스층, 중앙 및 미연 혼합기층의 3위치에서 측정된 맥동온도의 확률밀도 분포를 시정수를 파라미터로 하여 나타낸 것이다. Fig. A의 좌측 그림들은  $y=10$  mm에서 고온의 연소가스층의 위치로  $\tau=12$  ms일 때는 실제 화염온도 보다 높은 온도에까지 확률분포 형태를 나타내고 있어 과보상(過補償)되었음을 알 수 있다. 중앙 그림들은  $y=22$  mm의 위치에서 고온영역과 저온영역 중앙부근에서 고온 가스괴(塊)와 저온의 미연 가스괴가 교차하면서 거의 같은 비율로 통과하는 위치로  $\tau=12$  ms에서는 최고 한계온도가 실제의 화염온도보다 높게 나타나 역시 과보상이라는 것을 알 수 있다.  $\tau=8$  ms에서는 역으로 보상부족의 경향 즉, 저온측의 피크가 실온보다 상당히 높은 경향을 보이고 있다.  $\tau=10$  ms에서는 실온과 화염온도에 합당한 피크치를 갖고 이 위치에서 온도맥동

의 확률밀도분포를 정확히 나타내고 있다고 생각된다.

Fig. A의 우측 그림들은  $y=27$  mm로 거의 미연 가스가 통과하고 때때로 화염이 가로지르는 경우도 있지만 좌측의 경우와 똑같이 피크 위치에 시정수 변화의 영향이 그다지 보여지지 않는다. 그러나 실온( $T=300$  K)의 피크 위치를 잘 나타내는  $\tau=10$  ms의 것이 화염온도에 가장 근사한 것으로 생각되어 이 시정수가 적당하다고 판단된다. 이상으로부터 이 단면에서는  $\tau=10$  ms로 하면 실제의 맥동온도를 정확하게 측정할 수 있음을 확인하였다.

이 방법은 열전대의 열관성에 의한 응답지연을 1차 지연이라고 가정한다는 점에서 문제가 있으나 어떤 다른 방법에 의한 시정수 결정에도 큰 편차가 있기 때문에 어느 방법을 취해도 그 한계가 있다. 그러나 본 방법이 현상과의 대응에 용이하고 맥동 파형에 주목할 때에는 이치에 맞는 시정수의 설정이 가능하다는 점에서 우수하다고 생각된다. 따라서 어떤 단면의 변동온도를 측정할 때는 반응대의 중앙부근 위치에서 적당한 시정수를 그 때마다 확률밀도분포 형상으로부터 결정해 그 단면 전체에 대해 시정수를 일정하게 하여 맥동온도를 측정하였다.