

<논 문>

## 전개 확산제트화염의 시간 발달 거동

박 정\* · 신 현 동\*\*

(1995년 8월 16일 접수)

### Temporally Developing Behavior of an Evolving Jet Diffusion Flame

Jeong Park and Hyun Dong Shin

**Key Words :** Primary Vortex(1차 와류), Residual Flame(잔류 화염), Transient Jet(과도 분류), Tip Penetration Velocity(정점 투과 속도), Jet Width(제트 폭), Evolving Jet Diffusion Flame(전개 확산제트화염)

#### Abstract

Experimental investigations on the comparison of developments between transient jets and evolving jet diffusion flames have been made in initial injection period. To achieve this experiment, an ignition technique using a residual flame as the ignition source is devised. High speed Schlieren visualizations, and measurements including jet tip penetration velocities and jet widths of the primary vortex are employed to examine the developing processes for several flow conditions. It is seen that the developing behaviors in the presence of flame are greatly different from those in transient jet, and thus the flow characteristics in the transient part are also modified. The discernible differences are shown to consist of the delay of the rollup of the primary vortex, the faster spreading after the rollup due to exothermic expansion, and the survival of only a primary vortex. The growth of primary vortex in the transient jet is properly explained through an impulsively started laminar vortex prior to the interaction. It is also found that the jet tip penetration velocity varies with elapsed time and an increase in  $Re_s$  gives rise to a higher tip penetration velocity.

#### 기 호 설 명

$D$  : 연료 노즐의 내경  
 $D^*(t)$  : 1차 와의 제트 폭  
 $L_t$  : 과도제트에서의 분류 정점 투과 거리  
 $L_{t,i}$  : 전개 확산제트화염에서의 분류 정점 투과 거리  
 $Re_s$  : 연료 노즐에 근거한 정상 상태에서의 레이놀즈수;  $Re_s = U_s D / \nu$

$r$  : 1차 와환의 반경  
 $t$  : 경과 시간  
 $t_c$  : 과도제트에서의 정점 대류 시간  
 $t_{c,i}$  : 전개 확산제트화염에서의 정점 대류 시간  
 $V_t$  : 과도제트에서의 분류 정점 투과 속도  
 $V_{t,i}$  : 전개 확산제트화염에서의 정점 투과 속도

#### 하첨자

$c$  : 대류  
 $i$  : 전개 확산제트화염에서의 내부 경계  
 $t$  : 정점

\*한국에너지기술연구소 연소로 연구팀

\*\*회원, 한국과학기술원 기계공학과

## 1. 서 론

정상 확산 화염(steady diffusion flame)에 있어서 일반적으로 특성 대류 및 확산 시간은 같은 정도의 시간 크기를 갖는 반면 특성 반응 시간은 훨씬 짧다. 그러나, 특성 확산 시간에 대한 특성 화학 반응 시간의 비로 표현되는 담켈러수(Damköhler No.)가 점차 유한한 값을 갖게 됨(극한적 상황은 화염 소화 한계)에 따라 유동 변화에 따른 화염의 응답이 민감하게 나타나게 되므로 화염과 유동장의 상호 작용은 복잡한 양상을 띤다. 정상 유동장과 화염의 상호 작용에 관한 연구가 연소 체현상을 이해하는데 많은 기여를 했지만 유동의 비정상성(unsteadiness)에 의한 혼합 및 연소 특성의 비정상 효과 파악은 실제적 연소 과정 인식에 도움을 준다.

이러한 관점에서 유동 제어를 통해 혼합 및 연소장을 제어하고자 시도하였고,<sup>(1)</sup> 주기적인 가진이 주어진 제트 유동장을 통해 유동 구조의 조직화(organization) 및 전개 과정(developing process)을 상세히 보고하였다.<sup>(2)</sup> 그러나, 제트 퍼짐 및 유입의 증가에도 불구하고 난류 제트의 자기 유사성(self-similarity)의 기본적 구조는 변화 없으며 하류에 도달하면 정상 제트 특성이 복원되는 것이 보고되었다.<sup>(3)</sup> 한편, 과도 제트는 디젤 분무 연소의 유동 및 혼합을 모사하기 위한 수단으로 연구되었고,<sup>(4)</sup> 정상 난류 제트와의 유동 및 혼합 특성의 결과와 비교를 통한 차이점이 지적되었다.<sup>(5-8)</sup> 속도와 농도장의 상이점이 보고되었고,<sup>(8)</sup> 가속 분류(accelerating jet)를 통하여 극부적으로 낮은 유입률(entrainment rate)이 얻어질 수 있음은 혼합 과정에 있어서의 비정상 효과로 인식되었다.<sup>(5,6)</sup>

예혼합 화염과 비정상 유동장과 상호 작용에 관한 연구는 최근 실험적으로 소수의 연구들이 보고되었다. 전파하는 화염과 대향으로 접근하는 층류 와류(laminar vortex)와의 상호 작용에 관한 연구를 통해 주름진 화염(wrinkled flame)과 포켓 화염 형성(pocket flame)을 위해 요구되는 와류 강도(vortex strength) 그리고 화염을 주름지게 하는 최소 와류 크기가 평가되었다.<sup>(9)</sup> 부연소실(auxiliary combustion chamber)로부터 예혼합 화염이 오리피스를 거쳐 주연소실(main combustion chamber)로 전파하는 경우에 있어서 오리피스 직

경에 따라 유체역학적 구조가 층류로부터 난류로 바뀔 때 따라 화염 전파 및 화학 구조의 변화를 이차원 레이저 유도 형광법을 이용하여 체계적으로 관찰하였다.<sup>(10)</sup>

현재의 연구에서 비정상 유동장과 확산 화염의 상호 작용에 대한 연구를 위한 모델로서 Fig. 1의 연소계를 제안하고 기초적 발달 거동 특성을 파악하고자 한다. Fig. 1의 연소장은 발달 과정 동안에 다음과 같은 유체역학적 기본 요소들로 구성되어 있다. 즉, 시간에 따라 변하는 연료 유체의 정점에 정체점(stagnant point)이 존재하고 정체점 근처에서 유동 분기(flow divergency)에 따라 주유체(primary fluid)는 반경 방향으로 흐름이 유도되어 축대칭의 와환 구조(vortex ring structure)를 갖게 된다. 이러한 연소장의 시간 발달 거동 특성 파악의 기본적 유체 유동장으로서 과도 제트를 선택하였다. 실험의 구현을 위해 점화원으로서는 잔류 화염을 사용하는 점화 기법이 고안된다. 과도 제트와 화염 존재하의 과도 제트(전개확산제트화염)의 발달 과정 비교를 위해 고속 솔리렌 가시화 기법을 사용한다. 발달 과정의 정량적 비교를 위해 제트 정점 투과 속도 및 1차 와류(primary vortex)의 제트 폭을 유량 조건에 따라 측정한다. 상기 가시화 기법 및 측정을 통해 1) 과도 제트와 전개확산제트화염의 발달 과정 동안의 화염 존재의 효과를 평가하고, 2) 전개확산제트화염의 비정상 발달 특성에 대한 기초적 데이터의 구축을 주목적으로 한다. 한편, 기존 과도 제트에 관한 연구들이 시간 발달 거동의 전운전 시간(total run time)에 관심이 주어진 반면 본 연구에서는 근출구 영역(near field) 혹은 초기 분사 기간(initial injection period)에서의 발달 과정에 초점을 맞춘다.

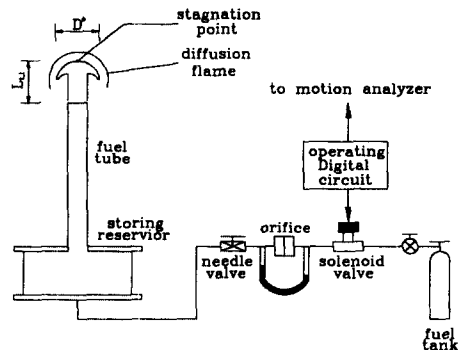


Fig. 1 Schematic drawing of experimental apparatus

## 2. 실험장치 및 방법

기존 과도 제트 연구들과 유사하게 실험 장치를 제작<sup>(3,4,6,7,10)</sup>하였고 Fig. 1에 나타내었다. DC 12 Volt의 솔레노이드 밸브를 거쳐 검정된 마노미터로 조절된 프로판 가스가 길이 834mm, 내경 9, 10.4, 11mm인 연료 파이프 노즐을 통해 대기로 분사된다. 과도제트 실험을 위해서는 기존의 연구에서와 마찬가지로 솔레노이드 밸브의 열림(open)만이 제어된다. 반면에 전개확산제트화염의 실험을 위해 솔레노이드 밸브 개폐 제어용 디지털 회로를 통해 개폐(open/close)를 제어하였다. 개폐 회로는 바이너리 코드 1, 2, 신호 발생기, 4비트를 직렬로 연결한 카운터(7493), 컴퓨터(7485), 낸드 게이트(NAND Gate, 7400), 오픈 컬렉터(7406)로 구성하였고, 신호 발생기의 구형 주파수 신호를 클럭(clock)으로 하여 전체 작동 시간 및 개폐 시간을 결정하였다.

상기 회로를 통해 전개확산제트화염 생성을 위한 잔류 화염을 얻을 수 있게 된다. 즉, 마노미터로 조절된 유량 조건하에서 솔레노이드 밸브를 열면 과도 제트 기간을 거쳐 정상 상태의 확산 화염이 얻어진다. 정상 상태 화염으로부터 솔레노이드 밸브가 닫히면 화염은 두 영역으로 나뉘어 대부분의 하류 화염은 상류로부터 남아 있는 유동 관성에 의해 부상되어 하류로 타면서 흐른다. 반면에 연료 파이프 직경 크기의 잔류 화염은 연료 출구로부터 연료 파이프 내부로 들어가 상류로 이동하게 된다. 잔류 화염이 파이프 벽면으로의 열손실에 의해 꺼지지 않는 밸브의 개폐 사이의 최대 시간 간격은 약 1.5sec였다. 하류로 타서 달아나는 화염이 분사되는 제트 화염의 발달에 영향을 주지 않는 충분한 밸브 개폐 시간 간격은 500msec였다. 이것은 하류

화염이 부상하면서 형성되는 꼬리(이것은 화염이 지나면서 여기열(remaining heat)과 유입된 주위 공기와의 온도차에 의해 솔리렌상으로 나타난다.)의 잔상이 모니터상에서 사라지는 것에 의해 판단되었다. 또한, 유입된 주위 공기와의 온도차에 의해 나타나는 잔상이 모니터에서 사라지는 점과 본 연구 대상인 초기 분사 기간을 모니터 상에 나타내는 12-15D로 제한하고 있기 때문에 분사되는 제트 화염의 하류 조건은 거의 정지 대기로 간주되었다(참고로 연료가 분출되지 않는 상태에서 손가락을 대면 주위 공기와의 온도차에 의한 열기둥(thermal plume)이 형성된다). 500msec 이상의 밸브 개폐간 시간 간격에서는 잔류 화염이 연료 파이프 내부로 이동하는 거리가 거의 변하지 않아 잔류 화염이 연료 파이프내에서 정착하는(settle) 것으로 판단된다. 이것은 500msec 이상의 밸브 개폐간 시간 간격에서의 연료 분사들에 대해 잔류 화염이 연료 파이프 출구에 거의 일정한 초기 출현 시간(constant initial appearance time)을 나타내는 것으로부터 유추된다. 따라서, 잔류 화염의 지속 시간내에 솔레노이드 밸브가 다시 열리면 잔류 화염은 점화원의 역할을 하여 원하는 전개확산제트화염을 얻을 수 있게 된다. 전개확산제트화염의 전체 운전(run) 시간은 최종 솔레노이드 밸브를 열고난 후 1sec를 유지하였다. 본 실험에서 사용된 내경 220mm, 높이 196mm인 연료 저장소를 제원으로 Friedman<sup>(11)</sup>과 유사한 방법인 개폐 실험을 통해 얻은 소화 거리는 프로판 연료에 대해 5mm였고 5-16mm까지는 잔류 화염을 얻을 수 있다. Fig. 2에 잔류 화염을 점화원으로 하는 전개확산제트화염의 전형적인 발달 과정의 일례로써 사염화 티타늄의 Mie 산란된 상을 15mW He-Ne 레이저를 이용하여 1/1000초 카메라 노출 시간과 ASA 1600 필름으로 단발 직접 가시화기법으로 나타내었다. Fig.



Fig. 2 Typical shape of evolving jet diffusion flame with  $TiCl_4$  technique

2의 첫번째 사진이 전형적인 잔류 화염을 나타내고 있다. 잔류 화염을 점화원으로 시간 경과에 따라 전개확산제트화염이 발달해 감을 볼 수 있다.

과도제트와 전개확산제트화염의 시간 발달의 상세한 과정은 단일 광로의 고속 솔리렌계(KODAK, Ektapro 1000 Motion Analyzer)를 사용하여 가시화하였다. 카메라 노출 시간은 1/1000초이며 발달 과정의 시간 동기(time synchronization)는 솔레노이드 밸브의 열림 신호(open signal)를 사용함으로써 재현성을 유지하였다.

평균 제트 정점 투과 속도는 30회의 분사에 대해 Fig. 1에 정의된 제트 정점 투과 거리(jet tip penetration distance)를 시간 평균을 취하고 4차 다항식을 최소 자승법으로 구한 후 시간에 대해 미분하여 구했다.<sup>(3)</sup> 또한, 과도제트와 전개확산제트화염의 발달 과정을 비교하기 위해 1차 와류의 양단 거리(end-to-end distance of primary vortex)로 정의한 제트폭을 역시 30회 분사에 대한 평균을 취하여 조사했다. 분류 정점 투과 거리 및 제트 폭 측정값으로부터의 불확실성은 각각  $\pm 3.8\%$ ,  $\pm 3.6\%$ 였고 노즐 출구로부터 하류로 감에 따라 증가했다. 한편, 본 연구의 측정 및 관찰 범위는 고

속 솔리렌계의 모니터 화면에 나타낼 수 있는 근출구 영역(초기 분사 기간)으로 하였다.

### 3. 실험 결과

Fig. 3에 과도제트와 전개확산제트화염의 전형적인 시간 발달 과정을 솔리렌 가시화하여 나타내었다. 각 사진 밑의 숫자는 연료 제트가 출구에 나타난 이후의 시간 경과를 나타낸다. 레이놀즈수는 정상 상태의 출구 속도와 연료 파이프 직경에 의해 정의된다. 솔리렌상의 상부 및 하단부가 명암이 다른 것은 연료의 출구 초기 출현(initial appearance) 상이 명확하도록 나이프 에지를 하부에 걸었기 때문이다. 전개확산제트화염의 상세한 전개 과정을 조사하기에 앞서 기본적인 유동 구조의 파악을 위해 과도제트의 발달 특성을 먼저 조사하였다.

Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 20msec의 경과 시간에 솔리렌 사진은 노즐 출구 근처에서 와환 구조(vortex ring structure)를 나타내고 있다. 이러한 초기 단계에서는 주위류와의 속도차로부터 발생하는 전단력에 의해 주유체(primary fluid)의 흐름

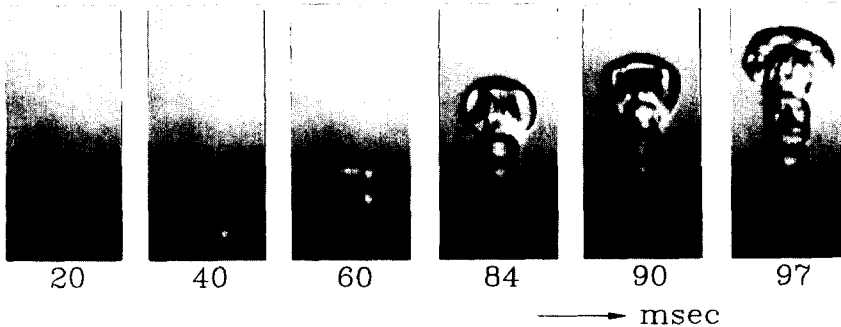


Fig. 3(a) Developing process of typical transient jet;  $D=11\text{mm}$ ,  $Re_s=1778$ ,  $C_3H_8$

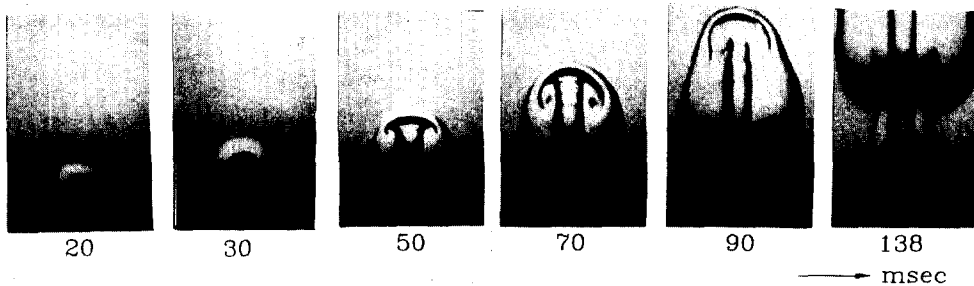


Fig. 3(b) Developing process of typical evolving jet diffusion flame;  $D=11\text{mm}$ ,  $Re_s=1778$ ,  $C_3H_8$

이 반경 방향으로 유도되고 롤업(roll-up)하는 동안에 노즐 출구 근처에 장시간 체제한 후 주위 공기를 유입하면서 점차로 성장하여 하류로 대류한다. 60msec까지 연료 제트의 특징은 성장하는 와류(vortex)와 그 뒤를 따르는 줄기(stem)이다. 제트 발달의 다음 단계에서는 1차 와류가 하류로 대류하면서 2차 와류의 롤업이 나타난다. 84msec가 되면 2차 와류는 연료 제트의 줄기를 따라 하류로 대류하고 1차 와류와 상호 작용하기 시작하면서 일련의 와류들이 뒤를 따르게 된다. 1차 와류와 2차 와류를 포함하는 일련의 와류들의 와환(vortex ring) 크기가 다르게 나타나는 첫번째 이유는 1차 와류가 생성되고 나서 시간 경과에 따라 1차 와류 성장 후에 2차 와류가 생성했기 때문이다. 또한, Tanabe<sup>(7)</sup>는 과도 제트는 주위류를 투과하면서 대류하고 있는 과도 특성부(현재의 연구에서 1차 와환을 구조를 나타내는 상단부)와 그 뒤를 따르는 정상 특성부(현재의 연구에서 2차 와환을 포함하는 일련의 와환 구조들을 나타내는 하단부)로 구성되어 있음을 보고하고 있다. Fig. 3(a)에 나타나듯이 2차 와류를 포함하는 일련의 와류의 셰딩(shedding)이 정상 상태에서의 전개 과정과 유사한 것으로 판단된다. 따라서, 현재의 과도 제트는 선단의 과도 특성부와 하단의 정상 특성부로 구분됨을 알 수 있다. 와류간의 상호 작용은 1차 와류 구조의 확장(enlargement), 지체(retardation) 그리고 변형(deformation)으로 나타난다.<sup>(11)</sup> 결국, 1차 연료 제트 구조는 일련의 와들과의 상호 작용으로 크게 변형된다.

Fig. 3(b)에 나타난 첫번째 사진은 20msec에서의 전개확산제트화염을 나타낸다. 노즐 출구 근처에서 연료 제트 운동은 주로 노즐 중심선을 따르며 주 연료 유체의 롤업이 나타나지 않는다. 또한 연료 제트 줄기는 거의 변하지 않으며 노즐 직경과 근사적으로 일치하고 있음을 알 수 있다. 시간이 경과함에 따라 주 연료 제트는 연료 파이프 출구로부터 후류에서 점차로 평평해지면서 스스로부터 분리되어 30msec가 되면 축대칭의 와환 구조를 나타낸다. 30msec로부터 70msec까지 연소 생성물과 주위 공기를 유입하는 1차 와류 구조는 급격히 성장하며 70msec에서 와류 코어가 고온의 연소 생성물 유입에 따른 팽창에 의해 부풀어져 있음을 볼 수 있다. 90msec 이후에서는 1차 와류의 크기는 거의 일정하게 되며 와류 구조가 축 방향으로 스트

레치되어 있음을 알 수 있다. 이것은 연료 유체의 가속 특성에 기인하며 가속 특성에 관한 상세한 설명은 후에 기술된다. 또한, 마지막 사진에서 알 수 있는 바와 같이 전개확산제트화염의 두드러진 특징은 발달 과정 동안에 축대칭의 1차 와류만이 존재한다는 것이다. 즉, 발달 과정 동안 화염의 존재가 와류의 롤업을 지체시키며 와류 생성을 억제하고 있음을 알 수 있다.<sup>(14)</sup>

과도제트와 비교하여 전개확산제트화염의 발달 과정의 상이한 특징은 다음과 같다: 1) 초기단계에서 주 연료 제트는 상대적으로 짧은 시간 동안 노즐 출구 근처에 체제하게 된다; 2) 1차 와류의 롤업은 노즐 출구로부터 하류로 지체된다; 3) 롤업 이후에 1차 와류의 성장 속도는 상대적으로 빠르게 나타난다; 4) 마지막으로 발달 과정 동안에 와간 상호 작용은 사라지고 1차 와류 구조 만이 존재하며 성장해 감을 알 수 있다. 결과적으로 화염의 존재하에 발달 거동은 과도 제트와는 상이하게 나타남을 알 수 있다.

과도제트와 전개확산제트화염의 몇가지 유동 조건에 따라 분류 정점 투과 속도를 Fig. 4에 나타내었다. 시간은 연료 제트가 노즐 출구에 최초로 나타난 이후의 경과 시간을 나타낸다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 과도 제트에 있어서의 분류 정점 투과 속도는 최초로 감소한 후 2차 와류(secondary vortex)와의 상호 작용 이전까지 증가하고 나서 다시 감소한다. 초기의 감소는 1차 와의 생성 과정 동안에 축방향 모멘텀의 반경 방향 모멘텀으로의 전달과 관련된다. 또한 연료 유체의 가속은  $Re_s$ 의 증가에 따라 증가하여 더 큰 투과 속도를 보임을 알 수 있다. 이러한 유동 가속 특성은

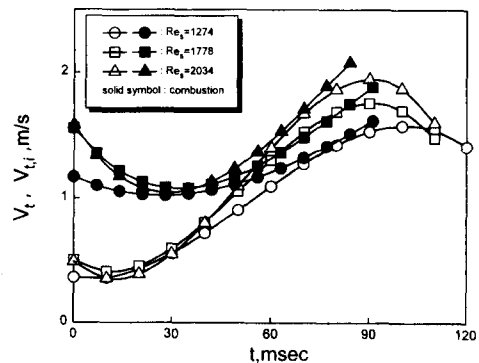


Fig. 4 Tip penetration velocity versus elapsed time with/without combustion;  $C_3H_8$ ,  $D=11\text{mm}$

솔레노이드 밸브를 사용하고 정점 투과 속도를 측정  
 한 기존 과도 제트 연구들의 초기 분사 영역에서  
 관찰되어 왔다.<sup>(3,4)</sup> 따라서, 유동 가속 현상은 솔레  
 노이드 밸브의 전개(full opening)까지 rise time  
 동안에서의 과도 효과로서 간주된다. 마지막 속도  
 감소는 전에 언급된 바와 같이 상호 작용 동안에 1  
 차 와류의 지체에 기인한다. 그러나, 마지막 감소  
 가 전개확산제트화염에서는 나타나지 않는 것은 1  
 차 와 구조만이 생존하여 성장, 발달하기 때문이  
 다. 전술된 바와 같이 전개확산제트화염에 있어서  
 밸브를 닫으면 잔류 화염은 연료 파이프 안으로 들  
 어가 상류로 이동하며 500msec후 밸브를 다시 열  
 면 연료 유체와 화염은 다시 연료 파이프 출구로  
 대류한 후 하류로 전개(development)된다. 이때,  
 연료 파이프 출구까지 연료 유체와 화염은 솔레노  
 이드 밸브의 rise time 동안에 가속될 수 있다. 또  
 한, 화염의 존재로 1차 와류의 롤업이 또한 하류로  
 지체되기 때문에 과도 제트와는 달리 연료 파이프  
 출구 근처에서 와류 생성 및 롤업으로 인한 유동  
 체제 시간은 적다. 따라서, 전개확산제트화염의 경  
 우가 과도 제트에 비해 초기 출구 근처 영역에서  
 더 큰 속도를 나타낸다. 한편, 파이프 출구 근처에  
 서는 전술된 과도 효과에 의해 연료 제트가 가속되  
 고 연료 파이프 출구 하류에서는 시간이 경과함에  
 따라 과도제트와 전개확산제트화염의 분류 정점 투  
 과 속도가 거의 일치해가는 것을 볼 수 있어 현재  
 실험에서의 관심 영역인 근 출구 영역(초기 분사  
 기간)에서는 부력 효과는 무시되어질 수 있다.  
 Fig. 5는 전개확산제트화염에서의 몇 가지 유량 조  
 건에서의 시간에 따른 분류 정점 투과 속도를 나타  
 내고 있다. Fig. 4에서와 마찬가지로 분류 정점 투  
 과 속도는 경과 시간에 따라 변하며  $Re_s$ 의 증가에

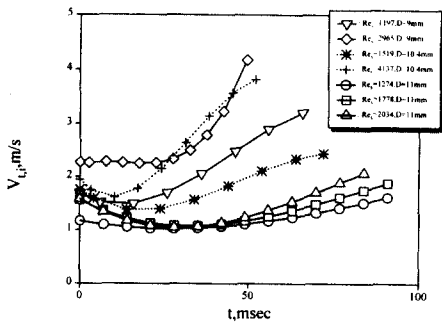


Fig. 5 Tip penetration velocity versus elapsed time with/without combustion;  $C_3H_8$

따라 가속 정도가 크게 나타남을 알 수 있다.

과도제트와 전개확산제트화염의 발달 과정에 대  
 한 와류 성장을 정량적으로 비교하기 위해 제트폭  
 을 측정하였다. Fig. 6와 Fig. 7은 각각 과도제트와  
 전개확산제트화염에 있어서 대류 시간에 따른 제트  
 폭의 변화를 나타내고 있다. 기존의 연구<sup>(15)</sup>에서  
 LDV에 의한 속도 측정을 통해 과도제트에 있어서  
 분류 정점 투과 속도는 1차 와의 대류 속도와 근사  
 적으로 같음을 보인 바 있어 묵시적으로 이러한 가  
 정을 도입하였다. 또한, Fig. 3에서 각 유량 조건  
 에서 연료 줄기(stem)가 연료 파이프 직경과 근사  
 적으로 같기 때문에 제트 폭은  $1+4r/D$ 를 의미하  
 며 r은 1차 와환의 반경을 나타내고 D는 연료 파  
 이프 직경을 나타낸다. 한편, 분사 속도 차이에 따  
 른 영향을 흡수하여 동일 시간축으로 표현하기 위  
 해 정점 대류 시간(tip convection time)을 정의하  
 였고 과도제트에 있어서는

$$t_c = \int_0^{L_t} dL_t / V_t \quad (1)$$

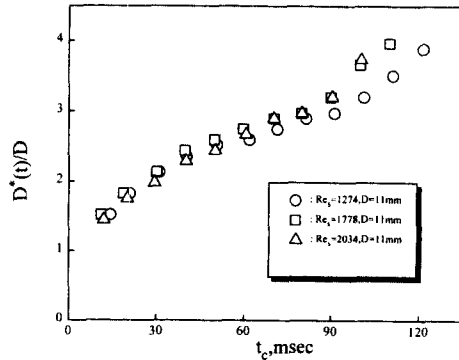


Fig. 6(a) Jet width versus tip convection time without combustion;  $C_3H_8$

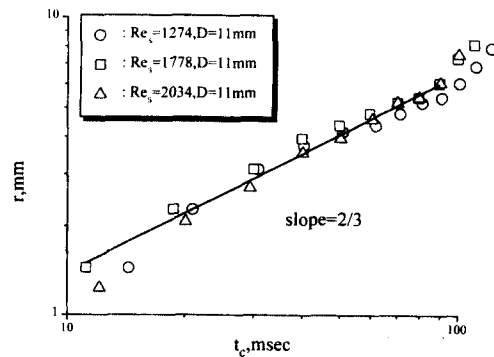


Fig. 6(b) Variation of vortex ring size with tip convection time without combustion

이고 전개확산제트화염에 있어서는

$$t_{c,i} = \int_0^{L_{t,i}} dL_{t,i} / V_{t,i} \quad (2)$$

이 된다.

또한, 전개확산제트화염에 있어서는 1차 와류의 롤업이 노즐 출구로부터 하류로 지체되기 때문에 초기 대류 시간은 다음과 같이 결정하였다. 먼저 제트 성장의 측정 데이터를 3차 다항식으로 표현하여 초기 대류 시간 영(zero)은 3차 다항식이  $D^*(t)/D=1$ 인 선과 만나는 시간으로 결정하였다. 이때,  $L_0$ 는 그 시간 동안에 대류한 거리로 정의하였다. Fig. 6에 있어서 하류에서의 제트폭의 급격한 증가는 일련의 와들과의 상호 작용에 따른 1차 와류 구조의 확장에 기인한다. 상호 작용이 일어나기 전까지의 데이터들로부터 정점 대류 시간에 따른 와환의 성장은 다음과 같은 실험식으로 가장 잘 표현된다.

$$r = At_c^{2/3} \quad (3)$$

여기서  $r$ 은 1차 와환의 반경이고  $A=0.3m/sec$ 이다. 이러한 결과는 피스톤의 임펄스 운동에 의해 생성되는 와환의 생성 및 성장을 묘사한 기존의 연구 결과와 일치한다.<sup>(14)</sup> 따라서, 1차 와환의 성장은 임펄스로 시발된 층류 와류(impulsively started laminar vortex)에 의해 특성지워짐을 알 수 있다. 한편, Fig. 7은 일단 롤업이 시작되면 제트가 과도제트의 경우에 비해 더 빨리 성장함을 나타낸다. 또한, 과도 제트에 있어서 제트 폭의 크기가 상호 작용이 일어나기 전에 약 3을 나타내는 반면 전개확산제트화염에 있어서는 약 3.2로 거의 일정

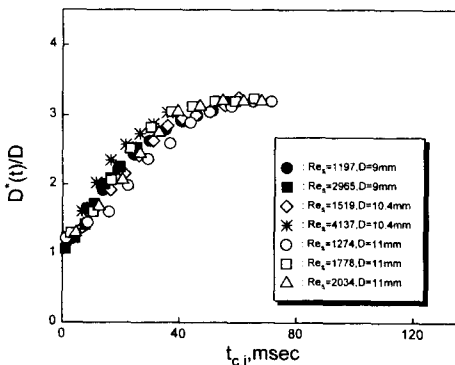


Fig. 7 Jet width versus convection time with combustion;  $C_3H_8$

함을 알 수 있다. 더우기 Fig. 3(b)에서 지적인 바와 같이 70msec에서 와류 코어의 팽창을 나타내고 있다. 따라서, 이러한 효과들은 고온 연소 생성물에 의한 팽창에 기인하며 이러한 효과들은 아음속 반응 사각 제트의 유입에 관한 수치 연구<sup>(15)</sup>와 난류 연소 토치를 묘사한 수치 연구<sup>(16)</sup>에서도 발견된 바 있다. 마지막으로 전개확산제트화염에 있어서 제트 폭이 마지막 단계에서 거의 일정하게 됨을 알 수 있고 이것은 제트 화염이 여전히 발달하고 있음에도 불구하고 제트 폭의 성장은 포화(saturation)됨을 의미하고 있다.

#### 4. 결 론

과도제트와 전개확산제트화염의 발달 과정 비교에 관한 실험적 연구가 근 출구 영역(초기 분사 기간)에서 수행되었다. 전개확산제트화염의 발달 과정 관찰을 위해 연료 파이프 출구 전단면에 점화원이 있는 점화 기법으로 잔류 화염을 이용하는 방법을 고안하였다. 몇 가지 유량 조건에 대해 발달 과정을 조사하기 위해 고속 슈리렌 가시화 기법이 사용되었다. 발달 과정에 대한 정량적 비교를 위해 측정 프로그램은 분류 정점 투과 속도와 1차 와류의 제트 폭을 포함하였다.

초기 단계에 있어서 전개확산제트화염에서는 화염의 존재가 와류의 생성을 지체시켜 주 연료 제트 운동이 노즐 중심선을 주로 따르는 반면 과도제트에서는 반경 방향 운동이 우세해져 와류의 생성 및 롤업 기간 동안에 연료 파이프 출구에서 장시간 체제한다. 그러나 일단 롤업이 시작되면 전개확산제트화염의 경우가 고온 연소 생성물의 영향에 의한 와류 코어의 팽창으로 과도제트에 비해 제트 폭의 성장이 빠르게 나타난다. 또한, 와류의 성장을 근거리 유체역학적 기본 구조가 임펄스로 시발되는 층류 와류로 특성지워짐을 알 수 있다. 마지막 단계로 과도제트에 있어서 주 연료 제트 구조는 일련의 와간 상호 작용을 통하여 확장 및 변형된다. 그러나 화염의 존재로 1차 와류 구조만이 나타나며 제트 화염이 여전히 발달하고 있지만 제트폭은 거의 일정함을 알 수 있다. 결과적으로, 전개확산제트화염에서의 발달 거동은 과도제트와 크게 다르며 화염의 존재가 과도 특성부의 유동 특성을 변화시킴을 알 수 있다. 또한, 분류 정점 투과 속도는 노즐 출구로부터 경과 시간에 따라 변하며  $Re_s$ 의 중

가가 더 큰 분류 정점 투과 속도를 일으킴을 알 수 있다.

### 참고문헌

- (1) Kim, T. K., Park, J. and Shin H. D., 1993, "Mixing Mechanism near Nozzle Exit in a Tone Excited Nonpremixed Jet Flame," *Comb. Sci. Tech.*, Vol. 89, pp. 83~100.
- (2) Crow, S. C. and Champagne, F. H., 1971, "Orderly Structure in Jet Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 48, pp. 547~591.
- (3) Kouros, H., Medina, R. and Johari, H., 1993, "Spreading Rate of an Unsteady Turbulent Jet," *AIAA J.*, Vol. 31, No. 8, p. 1524.
- (4) Arcoumanis, C., Cossali, E. and Whitelaw, J. H., 1987, "Measurement of Tip Penetration of Confined High-Density Transient Jets by Laser Beam Deflection," *Experiments in Fluids*, 6, pp. 422~424.
- (5) Breidenthal, R., 1986, "The Turbulent Exponential Jet," *Phys. Fluids*, Vol. 29, pp. 2346.
- (6) Kato, S. M., Groenewegen, B. C. and Breidenthal, R. E., 1987, "Turbulent Mixing in Nonsteady Jets," *AIAA J.*, Vol. 25, No. 1, p. 165.
- (7) 田辺秀明, 外4人, 昭 57-10, "非定常噴流に関する実験的研究," 日本機械学会論文集(B編), 48卷 434号 p. 2088.
- (8) Roberts, W. L. and Driscoll, J. F., 1991, "A Laminar Vortex Interaction with a Premixed Flame: Measurement Flormation of Pockets of Reactants," *Comb. and Flame*, Vol. 87, pp. 245~256.
- (9) Cattolica, R. and Vosen, S., 1987, "Combustion-Torch Ignition: Fluorescence Imaging of OH Concentration," *Comb. and Flame*, Vol. 68, pp. 267~281.
- (10) Takagi, T. et al., 1988, "Measurement of Velocity and Concentration in Transient Jet by LDV and Rayleigh Scattering," *JSME Int. J., Series II*, Vol. 31, No. 1, p. 119.
- (11) Friedman, R., 1949, The Quenching of Laminar Oxyhydrogen Flames by Solid Surfaces, *Third Symp. (int.) on Combustion*, The Combustion Institute, p. 110.
- (12) Oshima, Y., Kambe, T. and Asaka, S., 1975, "Interaction of Two Vortex Rings Moving along a Common Axis of Symmetry," *J. Phys. Soc. Jpn.*, Vol. 38, No. 4, pp. 1159~1166.
- (13) Savas, O. and Gollahalli, S. R., 1986, "Flow Structure in Near-Nozzle Region of Gas Jet Flames," *AIAA J.*, Vol. 24, No. 7, pp. 1137~1140.
- (14) Pullin, D. I., 1979, "Vortex Ring Formation at Tube and Orifice Openings," *Phys. Fluids*, Vol. 22, No. 3, pp. 401~403.
- (15) Grinstein, F. F. and Kailasanath, K., 1995, "Three-Dimensional Numerical Simulation of Unsteady Reactive Square Jets," *Comb. and Flame*, Vol. 100, pp. 2~10.
- (16) Ghoniem, A. F., Chen, D. Y., and Oppenheim, A. K., 1985, "Formation and Inflammation of a Turbulent Jet," *AIAA J.*, Vol. 24, No. 2, pp. 224~229.