

원형분류확산화염에서의 음파가진에 의한 혼합효과

김태권* · 박 정** · 신현동***
(1999년 1월 25일 접수)

Mixing Effect by Tone-Excitation in Round Jet Diffusion Flame

Tae Kwon Kim, Jeong Park and Hyun Dong Shin

Key Words: Acoustic Excitation(음파 가진), Resonant Frequency(공명 주파수), Phase Average(위상 평균), Mixing Mechanism(혼합 기구)

Abstract

An experimental investigation has been conducted with the objective of studying the mixing mechanism near the nozzle exit in a tone-excited jet diffusion flame. The fuel jet was pulsed by means of a loudspeaker-driven cavity. The excitation frequencies were chosen for the two cases of the non-resonant and resonant frequency identified as a fuel tube resonance due to acoustic excitation. The effect of tone-excitations on mixing pattern near the nozzle exit and flame was visualized using various techniques, including schlieren photograph and laser light scattering photograph from TiO_2 seed particles. In order to clarify the details of the flame feature observed by visualization methods, hotwire measurements have been made. Excitation at the resonant frequency makes strong mixing near the nozzle. In this case, the fuel jet flow in the vicinity of nozzle exit breaks up into disturbed fuel parcels. This phenomena affects greatly the combustion characteristics of the tone excited jet and presumably occurs by flow separation from the wall inside the fuel nozzle. As a result, in the resonant frequency the flame length reduces greatly.

1. 서 론

가진된 유동장(excited flowfield)에서는 적절히 선택된 주파수에서 연료와 주위류의 혼합이 증진된다는 기대로 음파 가진된 평면 및 원형 분류에 관한 연구들이 수행되어 왔다. 초기 연구들은 층류 자유 전단류의 불안정성에 관심이 주어졌고,^(1,2) 갖가지 자유 전단류에서의 거대 구조에 관한 두드러진 특징들이 보고되었다.⁽³⁻⁵⁾

파이프 내부에서의 가진된 유동에 대한 실험 및 수치적 연구들이 수행되었고,⁽⁶⁾ 최근에는 가진된 유동장에서의 열전달 특성에 관한 연구들에서 열전달율은 하류의 완전 발달된 영역에서의 주파수 변수(frequency parameter)에 의존하여 증가 혹은

감소함을 보인 바 있다.^(7,8) 실험적 접근은 여러가지 기법들을 사용하여 제한된 가진 영역에 대해서만 수행되었다.⁽⁹⁻¹¹⁾ 그러나, 기존 연구들의 대부분은 비반응 유동장에만 제한되었다.

상대적으로 소수의 연구들이 반응 유동장에서와 혼합 기구에 주어져 왔다. 가진된 메탄-공기 확산 화염에서 두 개의 구분된 파장을 갖는 유동 구조를 실험적으로 밝혔고,⁽¹²⁾ 네가지의 상이 동기된 가시화 기법을 통해 한 주기내의 각 위상별 내부 및 외부 와류의 시간 발달 거동을 체계적으로 보인 바 있다.⁽¹³⁾ 축대칭 화염 하에서 4-6개의 로브로 불리는 거대 구조(coherent structure)들의 3차원적 유동 특성이 화염과 상호 작용을 하여 비대칭적 화염을 유발하는 것이 보여진 바 있다.⁽¹⁴⁾ 이상에서 언급된 연구들이 가진된 제트 화염의 유동 특성 및 화염 구조를 이해하는데 많은 기여를 해왔지만, 노즐 내부로부터의 유동 박리(flow separation)에 의한 혼합 기구에 대해서는 연구는 보고된 예가 거의 없다.

* 회원, 계명대학교 자동차공학부

** 회원, 한국과학기술원 기계기술연구소

*** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

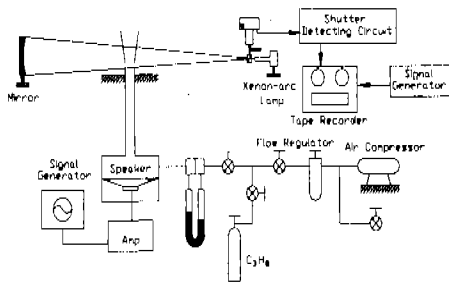


Fig. 1 Schematic of the flow system and schlieren visualization system.

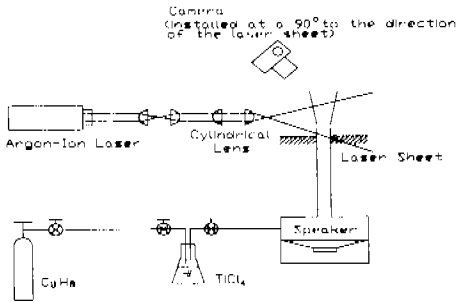


Fig. 2 Schematic of laser light Mie scattering system using TiO_2 particle.

본 연구에서는 겉보기 난류 혼합(apparent turbulent mixing)이 유도되는 특정 주파수로 가진된 반응 제트에서의 노즐 출구 근처의 현상을 규명하는 실험이 수행된다. 이러한 현상은 가진 주기 동안에 노즐 내부로부터의 주기적인 유동 박리(flow separation)가 발생하는 것과 깊은 관련을 갖는다. 노즐 출구 근처에서 유동 구조에 대한 상세한 정보를 얻기 위해 열선 풍속계를 사용하여 위상 평균된 속도가 측정되고, 한 주기내외 각 위상 별 슈리렌 및 Mie 산란 직접 가시화가 수행된다. 화염 형상에 관한 주파수 변화 효과는 논의되고, 연료관(fuel tube) 공명 및 비공명 주파수의 두가지 경우를 비교하여 가진 효과가 논의된다. 특별히 관 공명 주파수로 가진된 경우에서의 혼합에 대해 상세히 논의된다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1에서 보여진 바와 같이 공기 혹은 프로판

이 레귤레이터와 유량이 검정된 오리피스를 거쳐 스피커가 장착된 가진실(내경 222mm, 높이 109mm)로 들어가고, 완전 발달된 내부 유동을 얻기 위해 내경 11.6mm, 길이 72D(D는 연료 관의 내경)인 연료관을 거쳐 주위 공기로 분사된다. 제트는 1.2m x 1.2m x 2.5m인 이중 망사 스크린을 사용하여 외부로부터의 교란을 최소화하였다. 제트 유동을 가진하기 위해 신호 발생기와 증폭기에 구동되는 30Watts, 8inch 직경의 스피커가 장착된다.

측방향 속도는 열선 풍속계를 사용하여 프로판을 사용한 경우와 동일 Reynolds No.인 유동 조건에 대해 공기를 사용하여 측정하였다. 노즐 출구 근처에서의 상세한 유동 가시화를 위해 위상 동기된 슈리렌 가시화 기법이 사용된다. 위상 동기된 슈리렌계는 슈리렌 광학계, 신호 발생기, 테이프 기록기와 카메라 셔터의 개폐(on-off) 신호에 따라 0와 5Volts를 선택적으로 주도록 설계된 카메라 셔터 신호 발생 회로로 구성된다. 슈리렌 상의 위상 동기를 위해 신호 발생기의 신호와 카메라 셔터 신호는 테이프 기록기에 저장된다.

노즐 출구 근처에서의 화염 및 유동 형태에 대한 상세한 관찰을 위해 사염화 티타늄을 이용한 직접 가시화가 수행되었다. 프로판이 유로계를 통과하면서 프로판 연료내에 존재하는 수분과 $TiCl_4$ 가 반응하여 생성된 TiO_2 입자를 산란원(scattering source)으로 사용하였다. 원통형 렌즈를 4W Argon-Ion Laser Beam이 통과하여 주유동 방향과 평행하고 노즐 출구 중심을 지나는 0.4mm 두께의 Laser sheet이 형성되고, 90° 각도에서 집사 렌즈가 장착된 35mm 카메라에 의해 상이 기록된다.

측 방향 속도 데이터의 한 채널은 A/D 변환기로 직접 입력되고, 다른 채널은 순간 속도의 DC 성분을 제거하기 위한 회로를 거쳐 A/D 변환기로 입력된 후 순간 속도는 정상부(steady part)와 비정상부(unsteady part)로 나뉘어 처리된다. 5000개의 데이터가 각 측정점에서 샘플링되었고, 샘플링율은 비공명 주파수의 경우는 2.5kHz, 공명 주파수의 경우는 9.1kHz이다. 제트 가진에 대한 위상 기준으로서 신호 발생기로부터의 정현 신호를 기준으로 속도 데이터에 대해 50 주기 양상본을 취하여 위상 평균 속도를 구하였다.

가진된 비정상 유동은 속도, 가진 주파수, 가진

진폭에 의해 특성화된다. 따라서, 실험 변수는 Reynold No. ($Re=U_e D/\nu$), Strouhal No. ($St=2\pi f D/U_e$) 와 가진 진폭 A가 된다. 여기서, U_e 는 정상 상태에서 노즐 출구 속도, f 는 가진 주파수, ν 는 동점성 계수, D 는 노즐 내경이다. 어떤, 고정된 가진 진폭에 대해 유동은 Reynolds No.와 Strouhal No.가 변수가 된다. 따라서, 주파수 변수(frequency parameter), α 는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = D \left(\frac{2\pi f}{\nu} \right)^{1/2} = Re^{1/2} St^{1/2} \quad (1)$$

물리적으로 주파수 변수는 노즐 직경에 대한 Stokes-layer 두께의 비율 의미하며, 동점성 계수가 감소하거나 주파수가 증가함에 따라 증가하게 된다.⁽⁶⁾ 주기적인 속도는 순간 축방향 속도를 정상부 속도, U_s 와 비정상부 속도, U_p 로 나눌 수 있다 ($u = U_s + U_p$). 정상 상태에서의 Reynolds No.는 400이고 $U_p/u=0.2-0.8$ 인 가진 진폭을 갖는 가진이 주어진다.

노즐 출구 근처의 속도 측정은 $x/D=0.02, -1.72$ 에서 각각 수행된다. 순간 속도의 신호에 대한 조사로부터 관내로 역으로 유입된 유동이 $x/D=-1.72$ 까지는 도달되지는 않았다. 현재의 연구에서는 관의 비공명 주파수와 공명 주파수에 대해 집중적으로 조사된다.

3. 실험 결과 및 논의

0-800Hz 가진 주파수 범위에 대한 화염 거동을 관찰하였다. Fig. 3은 고정된 가진 진폭 하에서 가진 주파수에 따른 화염 거동 변화를 나타낸다. 사진은 노출 시간 1/1000s, $f/1.4$ 로 KODAK ASA 400 film으로 촬영하였다. 100Hz 이하까지 화염의 형상은 Strawa와 Cantwell⁽¹²⁾의 연구에서의 화염의 관찰 결과와 유사하다. 그러나, 140Hz와 290Hz의 화염의 경우는 화염 길이가 상대적으로 크게 감소하며 훨씬 안정하다는 것을 알 수 있다. 반면에 주파수가 더 증가하게 되면 가진되지 않은 화염과 비교하여 특이한 현상은 발견되지 않는다.

현재의 가진 주파수 범위 내에서 화염 거동은 크게 세가지로 나눌 수 있다. 첫째로, 100Hz 정도까지는 노즐 출구로부터 shedding(shedding) 주파수가 가진 주파수와 일치하는 와(vortex)들이 주기적으로 롤업(roll-up)하고 시간에 따라 발달하면서 화염과 상호작용을 한다. 이러한 영역은 기존의 연

구들⁽¹²⁻¹⁴⁾에서 혼합층 내에서의 와 사이의 상호 작용 및 발달 과정에 대한 상세한 연구들이 주어졌다. 두번째로, Fig. 3에서는 나타내지 않았지만 고주파수 영역에서는 가진 주파수의 변화에도 불구하고 화염 형상은 비가진된 경우와 거의 유사하다. 세번째로, 두드러진 특징은 연료관의 공명 주파수와 일치하는 140Hz, 290Hz에서 나타나며, 화염 길이는 비가진된 경우와 비교하여 크게 줄어든다.

Fig. 4는 가진 주파수에 따른 화염 길이와 최대 비정상 속도를 각각 나타낸다. 화염 길이는 140Hz, 290Hz, 441Hz, 590Hz에서 크게 감소하고 이때 최대 비정상 속도는 각각 정점(peak)을 나타내며 140Hz와 290Hz의 정점이 우세하게 나타난다. 이러한 주파수들은 실험 장치의 기하학적 공명 모드와 관련된다. 즉, 음파 가진에 의한 연료관 공명⁽¹⁵⁾이 노즐 출구 근처의 혼합층에 영향을 주어 후에 상세히 논의되었지만 축방향의 대향 유동(axial counter flow)을 유발하여 결과적으로 와들이 노즐 출구 영역으로부터 깨져 난류화된 와 구조(vortical structure)로 변하게 된다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이 본 장치는 헬름홀츠(Helmholtz) 공명 장치의 유형이기 때문에 Fig. 4에 나타난 바와 같이 7Hz에서 헬름홀츠 공명이 나타나며, 화염 길이 및 최대 비정상 속도는 헬름홀츠 공명에 비해 연료관 공명이 더 우세하게 나타난다.

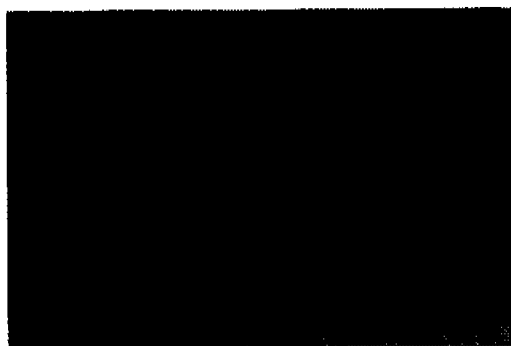


Fig. 3 Flame shape with excitation frequency. A=10 volts (peak to peak) at speaker terminal. (a) unexcited; (b) 20Hz; (c) 30Hz; (d) 40Hz; (e) 60Hz; (f) 100Hz; (g) 140Hz; (h) 290Hz.

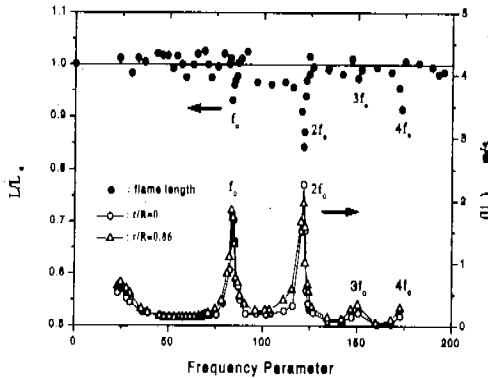
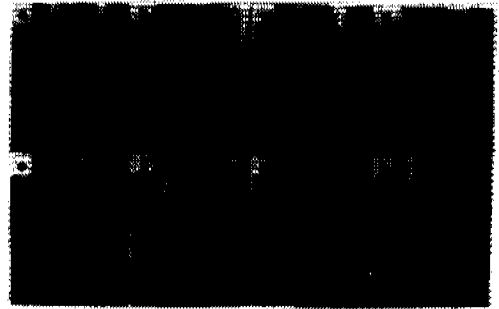


Fig. 4 Variations of flame length and maximum unsteady velocity with excitation frequency. A=10 Volts (peak-to-peak) at speaker terminal.

Table 1 The calculated and measured resonant frequency in the tube.

Frequency	Air		Propane	
	Calculated	Measured	Calculated	Measured
Resonance f_0	201.4	190	1451.1	140
1 st Harmony $2f_0$	402.8	395	290.2	290
2 nd Harmony $3f_0$	604.2	605	435.3	441
3 rd Harmony $4f_0$	805.6	810	580.4	590

Table 1에 보인 바와 같이 계산 및 실험에서의 공명 주파수는 유사하게 나타난다. 본 연구에서의 가진 주파수는 대표적으로 공명 주파수와 비공명 주파수에서의 화염 거동 및 혼합에 관심이 집중된다. Fig. 5는 비공명 및 공명 주파수에서 각 위상별 슈리펜 상을 나타낸다. 비공명 주파수의 경우는 가진 주파수와 일치하는 주기적인 층류 와동이 시간에 따라 불연속하고 성장하여 발달하는 것이 관찰된다. 반면에 공명 주파수로 가진이 주어진 경우는 노즐 출구 근처에서 이미 와 구조가 깨지고 난류화된 구조들이 나타나며 반경 방향으로 제트 퍼짐도 큰 것을 알 수 있다.



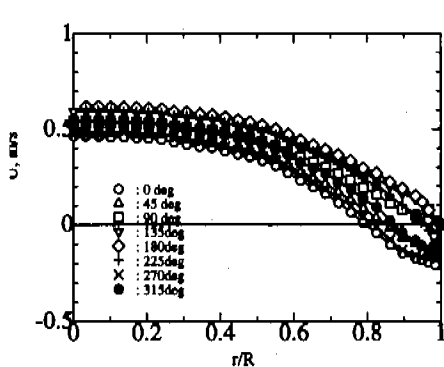
(a)



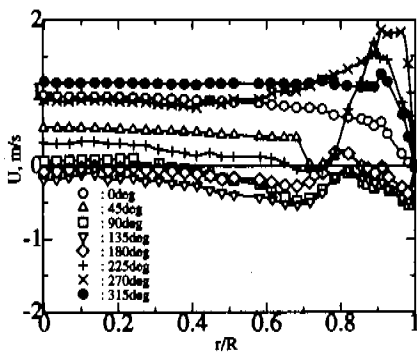
(b)

Fig. 5 Chronological schlieren images of combusting flow (a) at nonresonant frequency; a, 0°; b, 40°; c, 98°; d, 145°; e, 200°; f, 238°; g, 279°; h, 343° and (b) at resonant frequency; a, 8°; b, 73°; c, 111°; d, 154°; e, 190°; f, 238°; g, 279°; h, 335°.

한편, 공명 주파수의 경우에 있어서는 노즐 출구에서의 연료 줄기(fuel stem)가 특정 위상에서 노즐 직경보다도 작고 다시 노즐 직경의 크기를 회복하는 주기적인 거동을 나타낸다. 연료 줄기가 노즐 직경보다 작다는 것은 주위 공기가 상류 노즐 내부로 유입되는 것을 의미한다. 이러한 상세한 거동을 파악하기 위해 노즐 출구와 상류 노즐 내부에서 속도 측정을 하였다. 속도 측정은 공기에 대해 수행하였고, 프로판올 사용한 경우와 동일 Reynolds No.가 되도록 노즐 출구 속도를 결정하였다. Figs. 6과 7은 비공명 및 공명 주파수에서 $x/D=0.02, -1.72$ 인 경우에 반경 방향에 따른



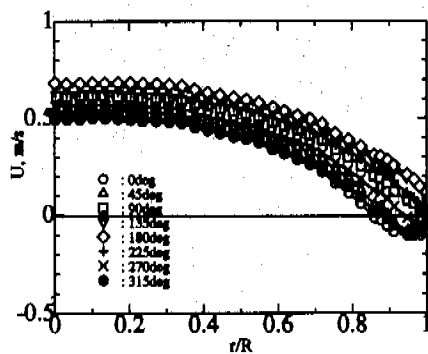
(a)



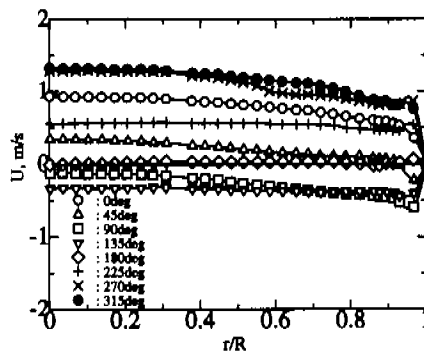
(b)

Fig. 6 Comparison of instantaneous velocity between the nonresonant and the resonant case at $x/D=0.02$. (a) $f=30\text{Hz}$ and (b) $f=190\text{Hz}$

축방향 순간 속도를 각 위상별로 나타내었다. Fig. 6a에 보이는 바와 같이 노즐 출구에서 비공명 주파수인 경우에는 위상이 0-180°까지는 음의 압력 구배에 의해 유동은 가속되고, 180° 이후에 유동은 서서히 감속되는 주기적인 거동이 반복된다. Fig. 6b에 나타낸 바와 같이 공명 주파수인 경우에 있어서는 속도는 노즐 벽 근처 ($r/R=0.8-1.0$)에서 급격한 변화를 나타낸다. 또한, 공명인 경우에는 비정상 속도의 진폭은 비공명인 경우에 비해 약 10배 정도이며 약 4배의 순간 속도를 나타낸다. 결과로써 Fig. 5에서 나타나듯이 비공명 주파수에 비해서 와 강도(vortex strength)가 큰 와동이 나타나게 됨을 알 수 있다. 공명인 경우에 위상 315°-135°에서 유동은 양의 압력 구



(a)



(b)

Fig. 7 Comparison of instantaneous velocity between the Nonresonant Frequency and the Resonant Frequency at $x/D=-1.72$. (a) $f=30\text{Hz}$ and (b) $f=190\text{Hz}$.

배에 의해 점차로 감속되고, 90°에서 음의 속도가 나타나게 된다. 음의 속도는 주위 공기를 노즐 내부로 유입하게 됨을 의미한다. 노즐 출구에서의 제트 유동은 135°에서 정체한 후 음의 압력 구배에 의해 유동은 가속되어 순간적으로 노즐 내부의 유체들을 밀어내게 된다. 벽 근처 유동의 국부적인 가속 현상은 225°에서 나타나는데 결국 이러한 현상이 특정 위상들에서의 과다 속도 (velocity overshoot)를 일으키게 한다. 결국 유입된 공기로 국부적 가속에 의해 노즐 내부로부터의 유체가 침입하면서 노즐 출구 근처에서 부분적 예혼합을 일으킨다. 일단 부분 예혼합된 제트가 분사되면 유동은 하류로 대류하게 되어 비공명인 경우에 비해 침범이 넓게 분포한다. Fig. 7에 나

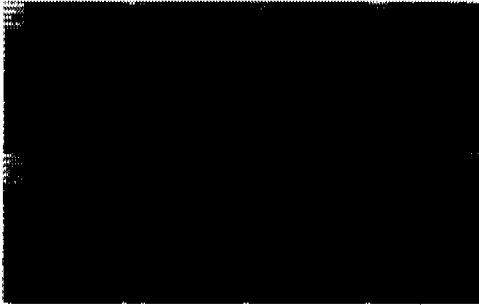


Fig. 8 Chronological Mie scattering images of combustive flow at resonant frequency. a, 25°; b, 33°; c, 79°; d, 134°; e, 162°; f, 233°; g, 260°; h, 313°

타난 바와 같이 노즐 내부에서의 속도 분포는 노즐 출구와 비교하여 유사하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 음의 속도 구간이 존재하지만 벽 근처에서의 속도 분포가 노즐 출구와 비교하여 약간 다른 것은 현재의 현상이 노즐 출구 바로 전후에서만 나타난다는 것을 의미한다. 따라서, 이러한 사실을 확인하기 위해 연료관을 파이레스판으로 대체하여 사업화 티타늄을 이용한 직접 가시화를 수행하였다.

Fig. 8은 공명 주파수로 가진이 주어진 경우에 있어서 TiO_2 입자물 이용한 Mie 산란상을 위상별로 나타내고 있다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 162°까지 연료 제트 유동은 노즐 내부 벽으로부터 박리(separation)되어 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 순간 속도가 음(negative)임을 의미하며, 유동은 스피커에 의해 유도되는 양의 압력 구배에 의해 영향을 받고 있음을 나타낸다. 그러나, 162° 이후에는 음의 압력 구배에 의해 유동은 점차로 가속되어 Fig. 6b에 나타난 바와 같이 벽 근처에서 파다 속도를 나타내면 연료관내의 유체가 유입된 공기를 침입하게 되면서 유동 박리점은 사라지게 된다. 결국 노즐 출구 내부에서 유입된 공기와 연료 유체가 주기적으로 혼합되고 있음을 의미한다. 결론적으로, 이러한 붕괴 혼합(collapsible mixing)이 층류 연료 제트에서 발생함으로써 유동 구조를 난류화된 구조로 바꾸게 되고 노즐 출구 근처 혼합기의 부분적 예혼합을 촉진시켜 화염 길이를 감소시키는 주요한 원인이 되고 있다.

4. 결 론

화염 거동에 있어서 음파 가진의 효과에 관한 가시화 및 속도 측정 결과로부터 다음과 같은 결론이 얻어진다.

100Hz 이하까지의 가진 주파수가 주어진 경우는 기존 연구들^(12,13,14)과 유사한 연료 제트 거동 및 화염 거동이 나타난다. 즉, 주어진 가진 주파수와 일치하는 세딩 주파수를 갖는 와동들이 생성되어 전개되며 화염과 상호 작용하는 형상(configuration)을 갖는다. 그러나, 연료관 공명 주파수로 가진된 유동 특성 및 화염 거동은 비공명 가진 주파수의 경우와 비교하여 크게 다름을 알 수 있다. 즉, 공명 및 조화 주파수로 가진된 경우 최대 비정상 속도는 정점(peak)을 나타내고 일치하는 주파수에서 화염 길이는 크게 줄어들며, 노즐 근처에서 속도 변동은 커서 강도가 큰 와들(vortices)이 주기적으로 발생한다. 또한, 공명 주파수로 가진된 경우에 있어서 특정 위상 범위에서 순간 속도가 음(negative)이 되며 노즐 벽으로부터 연료 제트 유동의 박리가 발생한다. 연료관내에서 양의 압력 구배에 의해 유입된 공기로 벽 근처에서 파다 속도(velocity overshoot)가 발생하는 순간에 연료 제트가 침입하면서 유동 박리점은 사라진다. 이러한 붕괴 혼합(collapsible mixing)에 의해 노즐 출구로 분사되는 제트의 부분적 예혼합을 유도하여 노즐 출구로부터 제트의 퍼짐이 급격히 증가하고 청염이 넓게 존재하며 화염 길이는 상당히 짧아진다.

참고 문헌

- (1) Freymuth, P., 1966, "On Transition in a Separated Laminar Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, 26, pp. 683~704.
- (2) Becker, H. A. and Massaro, T. A., 1968, "Vortex Evolution in a Round Jet," *J. Fluid Mech.*, 31, pp. 435~448.
- (3) Crow, S. C. and Champagne, F. H., 1971, "Orderly Structure in Jet Turbulence," *J. Fluid*

- Mech.*, 48, pp. 547~591.
- (4) Zaman, K. B. M. Q. and Hussain, A. K. M. F., 1980, "Vortex Pairing in a Circular Jet under Controlled Excitation: Part I, General Jet Response," *J. Fluid Mech.*, 101, pp. 449~491.
- (5) Hussain, A. K. M. F. and Zaman, K. B. M. Q., 1980, "Vortex Pairing in a Round Jet under Controlled Excitation: Part 2, Coherent Structure Dynamics," *J. Fluid Mech.*, 101, pp. 493~544.
- (6) Uchida, S., 1956, "The Pulsating Viscous Flow Superposed on the Steady Laminar Motion of Incompressible Fluid in a Circular Pipe," *ZAMP*, 7, pp. 403~422.
- (7) Siegel, R., 1987, "Influence of Oscillation-induced Diffusion on Heat Transfer in a Uniformly Heated Channel," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 109, pp. 224~247.
- (8) Cho, H. W., 1990, "Numerical Solution of Flow and Heat Transfer of Pulsating Motions," Ph.D. thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Seoul, Korea.
- (9) Clamen, M. and Minton, P., 1977, "An Experimental Investigation of Flow in an Oscillating Tube," *J. Fluid Mech.*, 81, pp. 421~431.
- (10) Yoshiki, M., Tsumura, S., Endoh, T., and Takama, N., 1986, "A Study on Some Periodically Oscillating Flows in a Circular Pipe: Experimental Velocity Distribution," *Trans. JSME(B)*, 52, pp. 3650~3654.
- (11) Gaver, III, D. P. and Grotberg, J. B., 1986, "An Experimental Investigation of Oscillating Flow in a Tapered Cannel," *J. Fluid Mech.*, 172, pp. 47~61.
- (12) Strawa, A. W. and Cantwell, B. J., 1989, "Investigation of an Excited Jet Diffusion Flame at Elevated Pressure," *J. Fluid Mech.*, 200, pp. 309~336.
- (13) Vandsburger, U., Seitzman, J. M., and Hanson, R. K., 1988, "Visualization Methods for the Study of Unsteady Non-premixed Jet Flame Structure," *Comb. Sci. Tech.*, 59, pp. 455~461.
- (14) Gutmark, E., Parr, T. P., Parr, D. M., and Schadow, K. C., 1989, "Planar Imaging of Vortex Dynamics in Flames," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 111, pp. 148~155.
- (15) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., and Sanders, J. V., 1982, *Fundamentals of Acoustics*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 200~224.