

균일 유동장에 수직으로 분사된 제트화염의 구조에 대한 실험적 연구  
An experimental study on the structure of the jet flame in cross flow

유영돈  
고동기술연구원 전력에너지 연구실

요 약

주유동에 수직으로 분사된 제트 화염의 구조는 이해하기 위하여 화염 길이와 온도를 측정하고 reactive mie scattering 방법을 이용하여 단면 가시화를 실시하였다. 주유동 속도와 제트 분사 속도의 증가에 따라 화염 길이도 함께 증가함을 알 수 있고, 단면 가시화 결과 화염 내부에 존재하는 inner vortical structure는 일반적인 동축제트 화염과 같은 대칭 구조를 갖지 않고 유동 조건에 따라 inner vortical motion 의 생성 위치가 변화함을 알 수 있다 이는 본 유동장의 특성 중의 하나인 bound vortex와 제트와 주유동이 접하는 상류 면에서 발생하는 rolling-up 의 강도에 좌우됨을 알 수 있다.

제 1 장 서론

동축 제트 화염(co-axial jet flame)이나 선회 제트 화염(swirl jet flame)의 구조에 대한 연구는 오래전부터 상당한 연구가 진행되어왔다. 이러한 제트 화염에 대한 여러 연구 방향 가운데 연료와 산화제인 공기의 혼합 방법에 대한 연구가 관심을 끌고 있다. 그 결과를 보면 연료와 공급되는 공기 사이에 형성된 전단층(shear layer)에 의해 지배된다는 것이 보고되고 있다<sup>(1),(2),(3)</sup>. 즉, 제트화염이나 일반적으로 동축 제트에서 주위 전단층과의 상호 관계와 볼렉스 구조의 형성은 제트의 성장과 혼합을 일으키는 질량과 운동량의 반경 방향 확산에 중요한 영향을 미치고 결과적으로 화염 구조를 결정한다는 것이다. 본 연구에서는 제트의 주위에 제트에 수직으로 공기 유동장을 형성하여 주유동의 공기와 수직으로 분사된 연료 제트와의 상호 관계 및 와구조에 대한 연구를 진행하여 일반적인 동축 제트 화염의 구조와 비교하였다<sup>(4),(5),(6)</sup>. 이를 위하여 본 연구에서는  $TiCl_4$  와 수분과의 반응에 의해 형성된 Reactive Mie Scattering을 이용한 단면 가시화 방법을 유동장에서의 확산 화염의 유동 구조를 묘사하는데 이용하였다. 이 결과들을 바탕으로 하여 주유동에 수직으로 분사된 제트와 제트 화염에 대한 이해를 통하여 일반 제트와의 차이를 정성적으로 시도하였다.

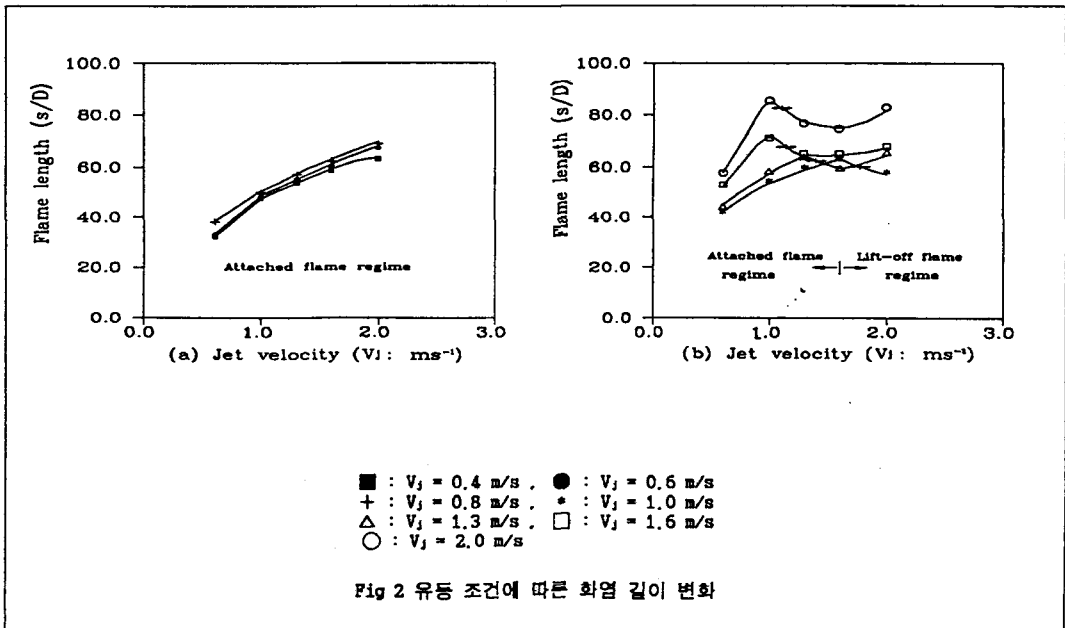
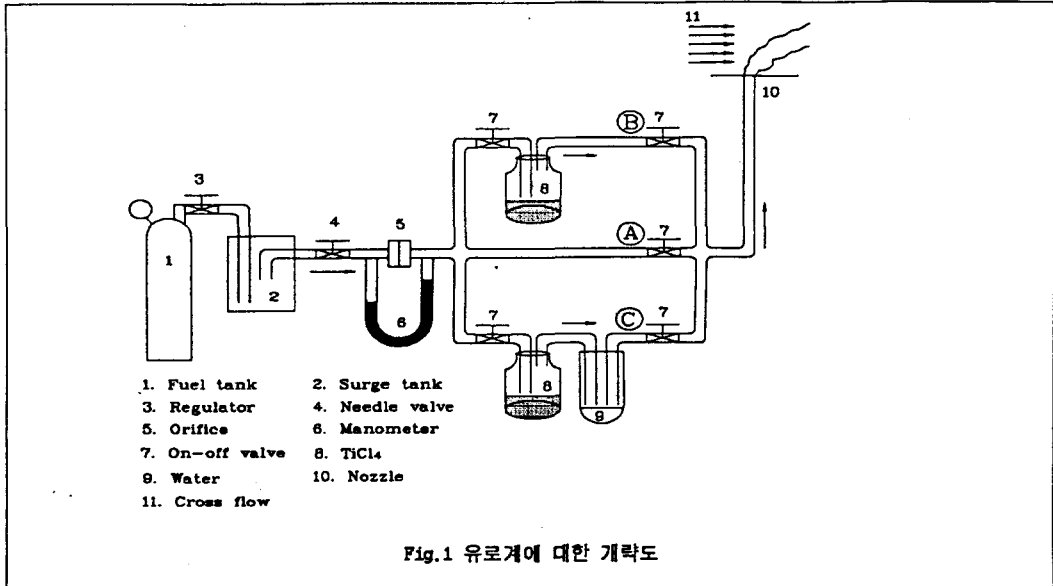
제 2 장 실험 장치 및 실험 방법

균일한 속도의 주유동장을 형성하기 위하여 0.4 m x 0.7 m 의 시험부 단면적을 갖는 풍동을 제작하였다. 시험부에 균일한 공기의 흐름을 제공해 주기 위한 이 풍동은 송풍기, 확대부, 정체실, 수축부, 그리고 시험부로 구성되었다. 시험부에서의 주유동의 속도 범위는 0.3m/s에서 6m/s까지이다. 풍동의 밑바닥으로부터 0.1 m 의 상부에 두께 0.0015 m, 폭 0.3 m, 그리고 너비 0.7 m 의 평판을 설치하였고, 이 평판의 선단으로부터 6.5 d 인 위치에 9mm 의 원형 노즐을 설치하였다. 실험에 사용된 연료는 상용 프로판 가스를 이용하였다. 연료 탱크에서 나온 연료는 조절기와 완충 탱크와 유량 제어용 니들 밸브를 지나 오리피스를 통과한다. 오리피스를 통과한 연료는 입자 발생 장치를 통과하거나 또는 직접 노즐을 통하여 주유동장의 공기에 분사된다. 가시화 실험을 실시할 때는 입자 발생 장치를 통과시켜야 하므로 Fig.1과 같은 연료 유로계를 제작하였다.

제 3 장 실험 결과

### 3.1 화염 길이

본 연구에서는 주유동 속도( $U_j$ )와 연료 제트의 분사 속도( $V_j$ )의 변화에 따른 화염의 형태와 길이의 특성을 이해하기 위하여 화염의 직접사진을 이용하였다. Fig.2는 유동 조건에 따른 화염의 길이를 나타낸 것이다. 본 연구에서 정의한 화염 길이는 노즐 출구로부터 화염의 꺾적을 따라 화염 끝까지 측정된 곡선 거리이다. 분사 속도나 주유동 속도를 증가시키면 화염은 노즐에 부착되지 않고 부상하여 심한 불안정을 나타내는데 이 경계는 그림에서 수직선으로 표시하였다.



주유동장에서의 제트 화염의 길이에 대한 기존 연구는 연료의 분사 속도가 매우 큰 경우에 대해서 진행되었다<sup>(7)</sup>. 본 실험과 같은 제트 분사 속도가 저속 경우, Fairweather 등이 실시한 제트 분사 속도가 고속인 경우와는 반대로, 주유동 속도를 일정하게 하였을 경우, 제트의 분사 속도를 증가시키면 화염 길이도 따라 증가하는데 이는 주유동이 존재하지 않는 일반적인 층류 제트 화염에서 분사 속도의 증가는 화염 길이의 증가를 초래하는 것과 정성적으로 유사하다. 또한 화염의 길이는 주유동의 속도의 증가에 따라서도 증가함을 알 수 있다. 그러나 앞에서 언급한 제트의 분사 속도가 고속일 경우, 제트 분사 속도의 증가에 따라 화염 길이는 감소한다는 것이 알려졌다. 이는 제트의 속도가 매우 커서 화염이 부상되어 있고 난류 강도가 크기 때문에 주유동 속도의 증가는 부상된 비반응 영역에서 제트와 주유동의 혼합을 촉진하여 화염 길이의 감소를 초래하지만, 본 연구에서와 같이 제트의 분사속도가 저속인 경우는 주유동 속도의 증가는 오히려 제트화염의 주유동 방향으로의 급속한 굽힘을 일으켜 주유동과 제트화염의 상대 속도를 감소 시켜 주위 공기의 유입의 감소로 인한 화염 길이의 증가를 초래한다. 그리고 화염이 노즐 선단부로부터 부상되면 부상되기 전보다 화염 길이는 감소한다. 이는 화염이 부상이 되면 부상된 비반응 영역에서의 공기와 연료의 혼합을 촉진함으로써 전체적인 화염길이의 감소를 초래한다.

### 3.2 단면 가시화

본 유동장에서의 유동 형태를 알기 위하여 연료 공급계 내에서 미리 생성된  $TiO_2$  을 이용하여 연소장과 비연소장에 대하여 대칭면에서의 단면 가시화를 실시한 사진들을 Fig.3에 나타내었다. 이들 입자들은 앞에서 언급한바와 같이 유로계 내에 설치된 수분관에 연료와 그 속에 포함된  $TiCl_4$  를 통과시켜 노즐에서 분사되기 전에  $TiO_2$  입자들을 형성하여 이 입자를 이용하여 가시화한 경우이다. 제트의 분사 속도가 1.0 m/s 이하의 경우, 노즐 중심으로부터 대략 3d 정도의 하류에서부터 볼텍스 운동이 나타나고 이들 크기는 연료 노즐의 반경  $r$  보다 훨씬 크고 그들의 운동의 방향은 시계방향으로 회전하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 유동 조건에서는 이와 같은 볼텍스의 크기와 방향을 갖기 위해서는 제트 분사 효과는 전 유동장에 큰 영향을 미치지 않고 마치 주유동장에 위치한 blunt body 와 같은 작용을 하여 연료 노즐의 후류에서의 전체적인 유동 형태는 wake 와 같은 유동 특성을 갖음을 알 수 있다. 연료 제트의 분사 속도를 1.3 m/s 이상으로 증가시키면 연료 제트와 주유동이 만나는 경계에서 큰 스케일의 유체 운동은 그의 회전 방향은 반시계 방향(이 방향은 대칭면에서 원형 노즐 내에서의 볼텍스의 회전 방향과 동일) 으로 바뀔 수 있고, 그 운동의 크기는 연료 노즐의 반경  $r$  과 같은 크기의 오더를 갖음을 알 수 있다. 따라서 이들 볼텍스의 운동을 일으키는 주된 요인은 원형 연료 노즐의 내부에 존재하는 볼텍스 운동들이 분사된 후 발달된 것으로 사료된다. 위와 같은 비연소장과는 달리 반응이 존재하는 연소장에서의 변화를 알아보기 위해서 동일한 가시화 방법으로 연소장에 대한 가시화를 실시하였다. 비연소 유동장과는 달리 연소 반응이 존재하면 고온의 연소 가스에 의해 점성계수의 증가로 인하여 비연소장과 비교하여 확실히 감쇄된 볼텍스 운동이 존재함을 알 수 있다. 이들 볼텍스의 운동은 제트의 분사 속도가 1.6 m/s 이하에서는 화염대 내부의 연료 제트에서 볼텍스들은 외형상 시계 방향으로의 회전 방향을 갖는다. 제트의 분사 속도의 증가에 따라 내부 유동의 관찰로부터 그의 강도가 감소되고, 제트의 분사 속도가 1.6 m/s 일 경우는 연료 제트 내부의 볼텍스 운동은 거의 존재하지 않고 그 이상의 제트 분사 속도에서는 볼텍스의 크기는 노즐 반경 정도의 오더를 갖고 반시계 방향으로의 회전함이 관찰된다. 그러므로 분사 속도가 1.6 m/s 에서는 시계 방향으로 회전 운동을 일으키는 주유동과 반시계 방향으로 운동을 일으키는 제트의 운동이 볼텍스의 크기와 회전 방향의 관점에서 평형을 이룸을 알 수 있다. 연료 속도의 증가는 화염대 내부에 존재하는 볼텍스의 회전 방향이 연료 분사 속도 1.6 m/s 를 경계로 하여 시계 방향에서 반시계 방향으로 바뀔 수 있다. 그러나 이와 같은 가시화 방법은 미리 유로계 내에서 Mie scattering 입자를 생성시킨 것이므로 유동의 전체 형태는 이해할 수 있으나 화염 내부의 유동 구조는 이해하기 어렵다. 따라서 화염대와 연료 사이에 존재하는 inner vortices 구조를 이해하기 위하여 R.M.S(Reactive Mie Scattering) 기법을 이용하여 화염대 내부의 볼텍스의 운동을 가시화 하였다. 이 방법은 앞에서 언급한바와 같이 연료와  $TiCl_4(g)$  를 노즐을 통하여 분사시키고 연소 생성물인 수분과 반응하여  $TiO_2(s)$  입자들은 연소 생성물이 존재하는 화염대 내부의 연소 생성물과

연료의 사이에 발생된다.

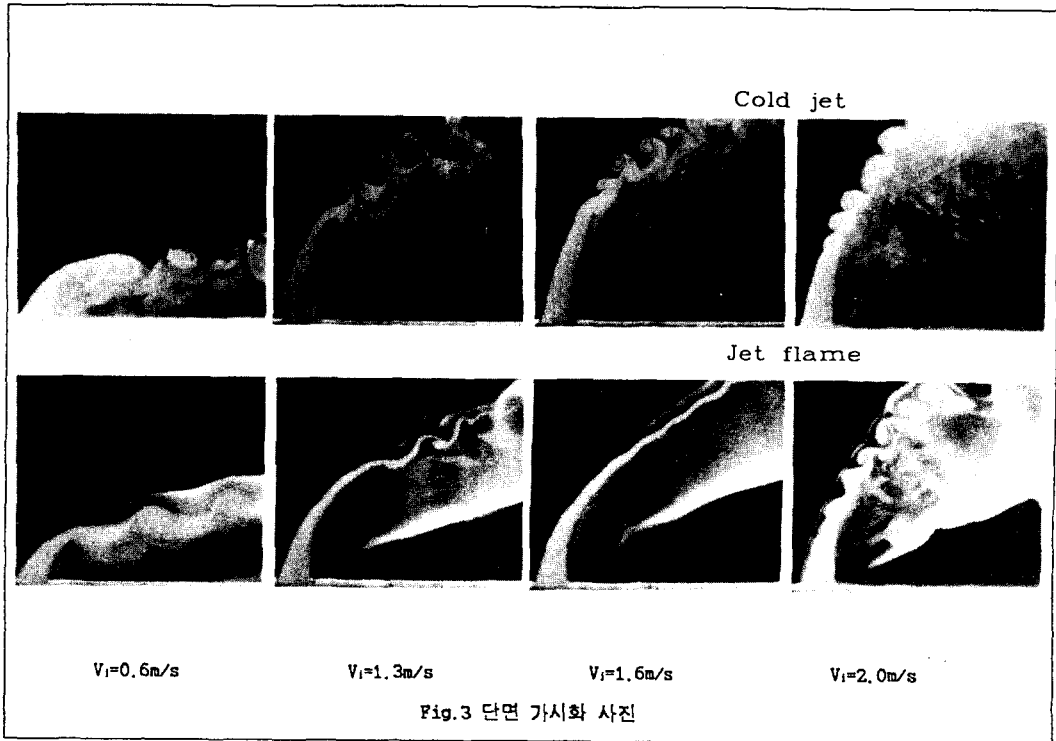
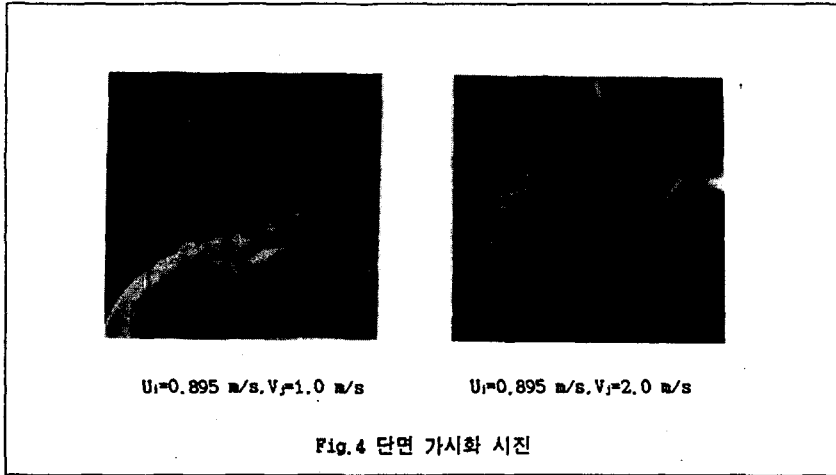


Fig.3 단면 가시화 사진

Fig.4는 제트의 분사 속도를 1 m/s 와 2 m/s 일 때 주유동의 속도를 0.85일 때 대칭면의 가시화 사진들이다.  $V_j = 1.0 \text{ m/s}$  인 경우, inner vortices 는 연료 제트의 lee side 에서만 존재하고 windward side 에서는 볼텍스들이 존재하지 않고, 하류로 진행되면서 lee side 와 windward side 는 서로 합체되어서 후류의 유동장은 lee side 에서 형성된 vortices 에 의해 지배됨을 알 수 있다. 제트의 분사 속도를 2.0 m/s 로 증가시킨 경우, 이 유동 조건에서는 제트의 분사 속도가 1.0 m/s 일 때와는 달리 연료제트의 windward side 에서만이 inner vortices 가 존재하고 lee side 에서는 볼텍스들이 존재하지 않음을 알 수 있다. 따라서 Fig.3 과 같은 유로계 내에서 미리 생성된 입자를 이용한 가시화 사진에서 화염대 내부에서 볼텍스들의 회전 방향의 변화는 단지 연료 제트 내부에서의 볼텍스 생성 위치의 변화를 나타내는 것이다.

먼저 제트 분사 속도가 1.0 m/s 일 경우, 주유동이 존재하지 않는 동축류 제트화염의 경우와 비교하여, 주유동이 존재하면 제트 화염의 windward side 에서는 순방향 압력 구배가 작용하여 주유동이 존재하지 않는 경우보다 압력이 증가하고, 반면 lee side 에서는 주유동장에 위치한 실린더의 후면에 저압부가 존재하는 것과 같이 주유동이 존재하지 않는 제트화염의 경우보다 저압부가 존재한다. 이 저압부의 존재에 의해 제트의 안쪽으로부터 바깥쪽에서의 유동을 야기하여 lee side 에서는 이 면에 수직한 방향으로의 볼텍스 운동이 존재함을 알 수 있다. 그러나 제트 분사 속도를 2.0 m/s 로 증가시키면 제트화염이 주유동장으로 침투되는 정도는 증가하고 이로 인하여 제트의 lee side 에 존재하는 부착 와동의 강도는 증대된다. 여기서 부착 와동의 회전 방향은 제트의 바깥쪽에서 제트의 대칭면으로 회전하며 제트의 lee side 에 따라 하류로 전파한다. 제트 분사 속도의 증가에 대해 주유동장에 의해 형성된 압력장은 windward side 에서의 볼텍스 운동을 억제시키려고 하지만 그에 비하여 제트 분사 운동량이 증가하여 windward side 에서는 연료 노즐 내부에서 발생된 볼텍스들이 계속 성장하지만, lee side 에서는 저압부의 형성에 의해 야기된

유동 방향과 강한 부착와동에 의해 야기되는 유동 방향이 서로 반대되어 강력한 난류 유동장을 형성하여 large eddies 운동을 억제함을 알 수 있다.



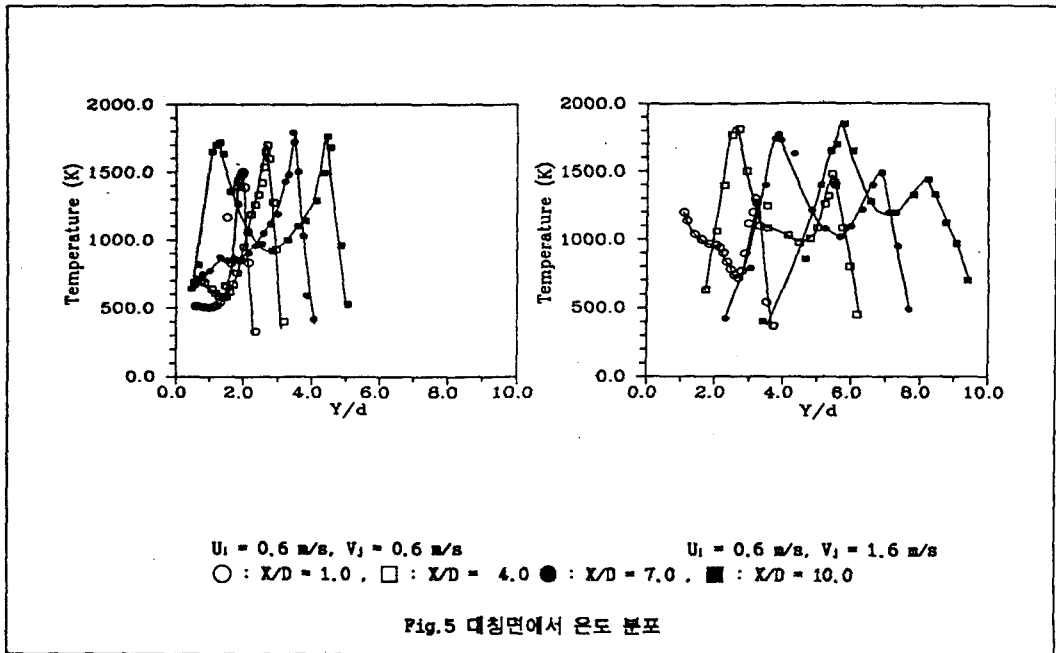
### 3.3 온도 분포

화염의 형태를 이해하기 위해서는 온도 분포를 구하는 것이 필수적이다. 본 유동장에서의 제트 화염은 대칭면에서 온도 분포는 두 위치에서 온도 peak 를 나타낸다. 그 위치를 상부, 하부 화염 대라 정의한다. 상부 화염대는 주유동의 공기와 접촉하는 interface 이고 하부 화염대는 lee side 에서의 화염대를 말한다. Fig.5는 각 유동 조건에서 대칭면에서 하류로 진행하면서 온도 분포이다. 노즐 근처에서는 화염대가 한 곳만 존재하지만 하류로 진행되면서 상부와 하부 두 곳에 화염 대가 존재한다. 그러나 제트 분사 속도가 클 경우, 노즐 근처의 영역에서도 상부 및 하부 두 곳에 화염대가 존재함을 알 수 있다. 제트 분사 속도가 작은 경우( $V_j=0.6 \text{ m/s}$ ), 상부 화염대의 온도가 하부 화염대의 온도보다 더 큰 값을 갖지만, 제트 분사 속도가 증가될 경우, 하부 화염대의 온도가 상부 화염대의 온도보다 상승됨을 알 수 있다. 이는 제트 분사 속도가 증가하면 제트 화염의 lee side 에 존재하는 볼텍스의 영향에 의해 주위 공기의 유입의 증가와 또한 고온의 연소 생성물의 존재에 기인된 것으로 생각된다. 즉 후류로 진행하면서 제트의 배면에 부착된 bound vortex 의 강도는 증가되고 제트의 거동을 지배하고 bound vortex의 발달은 제트의 분사 속도가 클수록 빨리 발달됨을 알 수 있다.

### 제 4 장 결론

본 연구에서는 주유동에 수직으로 분사된 제트와 제트 확산 화염의 구조를 이해하기 위하여 단면 가시화와 온도 분포를 측정 하였다. 그 결과들로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 주유동 속도와 연료 분사 속도가 작은 경우는 화염의 길이는 연료의 분사 속도와 주유동의 속도에 증가와 함께 증가하므로, 단지 속도비의 하나의 함수만으로는 화염 길이를 정의할 수 없음을 알 수 있다. 제트 분사 속도가 증가함에 따라 화염 길이가 감소되는 영역은 주유동 속도는 낮으면서 제트 분사 속도가 큰 영역에서 속도비의 역수가 0.05 이하일 때 임을 알 수 있었다.
2. 본 유동장의 특징적인 유동 형태는 제트와 주유동이 만나는 상류 경계면에서 존재하는 large eddy motion 과 제트의 배면(lee side)에 존재하는 bound vortex 임을 알 수 있다.
3. 제트 화염 내의 대칭면에서의 최고 온도 위치는 노즐 근처에서는 상부 화염대에 존재하지만 하류로 진행하면서 최고 온도 위치는 하부 화염대로 이동함을 알 수 있다.



### 참고 문헌

1. H. Eickhoff and Winandy, Visualization of vortex formation in jet diffusion flames, Combustion and flame, 60, p. 99(1985)
2. A.J.Yule, N.A.Chigier,S.Ralph,R. Boulderstone, and J.Venture, AIAA. J., 19, p. 725(1981).
3. CHEN L -D and SEABA J P , ROQUEMORE W M, and GOSS L P, Buoyant diffusion flames, Twenty-second symposium(International) on combustion, 1988, p 677.
4. Z.M. Moussa, J.W. Trischka, and S. Eskinazi, The near field in the mixing of a round jet with a cross-stream, J. Fluid Mech., 80, pp.49-80(1977).
5. J. Andreopoulos and W. Rodi, Experimental investigation of jets in a cross flow, J. Fluid Mech., 138, pp. 93-127(1984).
6. J. Andreopoulos, On the structure of jets in a crossflow, J. Fluid Mech., 157, pp.163-197(1985).
7. Gollagalli, S.R.and Brzustowski,T.A., Trans. CSME, p.205(1975).