

충돌제트의 순간 거동

한용식* · 오광철** · 신현동** · 김명배*

Transient process of the impinging jet

Yong-Shik Han, Kwang-Cheul Oh, Hyun-Dong Shin and Myung-Bae Kim

Key Words: Impinging jet, Visualization, Vortex interaction

The flow induced by a circular jet vertically impinging under a horizontal plate is investigated by visualization technique, using kerosene smoke in nitrogen gas to visualize the flow in the vortex as well as under the plate. The light source was the sheet beam of Ar-Ion laser. The vertical and 3-dimensional images of vortices were recorded by the digital video camera.

기호설명

Re : Reynolds number (= UD/ν)
D : nozzle diameter (= 9.7mm)
H : height (= 80mm)
r : radial-direction
U : mean velocity at the nozzle
y : vertical-direction

1. 서론

충돌제트는 열전달, 물질전달, 연소, 환기 등 여러 실제 현장에서 사용되고 있다.[1]-[3]

충돌제트의 기본인 원형 제트는 평면에 수직으로 충돌한 후 potential stagnation flow와 거의 유사한 방사상의 벽면제트(wall jet)를 형성한다. 이 때 발생하는 충돌제트의 벽 유동은 제트 전단층에서 형성된 복잡한 형태의 primary vortex와 primary vortex의 비정상 유동에 의해 벽면에 걸쳐 야기된 secondary vortex를 포함한다. Secondary vortices들은 충돌판 부근에서 형성되며, primary vortex로부터 바깥쪽으로 떨어져 나가는 것을 실험적으로 관찰하였으며[4], 직접 계산에 의해 단일환의 거동을 계산한 예도 있다[5].

* 한국기계연구원

** 한국과학기술원

충돌제트 중 round jet나 pool fire와 같은 유동형태에서는 충돌전의 유동에 거대구조의 규칙적인 운동이 존재한다. 특히 pool fire plume의 거동 주파수 (frequency)는 대략 직경의 제곱근에 반 비례하는 것으로 알려져 있다[6]. 이들의 주기적인 거대 구조들은 충돌 후에 형성되는 유동장의 난류구조 및 경계층 형성 등에 직접적인 영향을 줄 것으로 생각되지만 이에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다.

연소에서의 충돌제트는 대단히 유용한 실험적 도구를 제공한다[2]. 간단한 실험장치임에도 깨끗한 유동장과 다양한 혼합조건을 구현할 수 있으며, 손쉽게 가시화할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 kerosene smoke 가시화 기법을 사용하여 평판과 충돌하는 원형 제트의 순간 거동을 가시화하여 평판과 충돌 후 평판아래에 형성되는 벽면제트 내에서의 vortex의 생성과 진행과정을 연구하고자 한다. 특히 제트의 유동조건 변화에 따른 충돌제트 내의 vortex 형성 및 vortex 간의 상호작용에 대해 파악하고자 한다. 추후 연소실험에 대한 비연소상태의 자료 확보 또한 연구목적 중의 하나이다.

2. 실험장치 및 실험방법

평판과 충돌한 후 천장 아래에 경계층을 형성하면서 진행되는 충돌제트 유동을 연구하기 위해 축대칭 원형제트를 이용한 실험장치를 구성하였으며, Fig. 1은 실험 장치의 개략도이다.

노즐은 내경이 9.7mm(D)인 원형 파이프를 사용하였으며, 충돌판인 상판과 하판은 직경이 90D인 원형이며, 충돌 후 벽면제트를 충분히 관찰할 수 있는 크기를 가진다. 두 판 사이의 높이 H는 80mm로 고정하였다. 측면은 외풍에 의한 교란을 방지하면서 유동장을 가시화하기 위해 사각투명 아크릴로 마감하였으며, 상판 및 하판과 측면 사각 아크릴을 제외한 부분은 철망으로 처리하였다.

원형 분사노즐의 길이는 내부유동이 완전 전개될 수 있는 충분한 길이를 가진다.

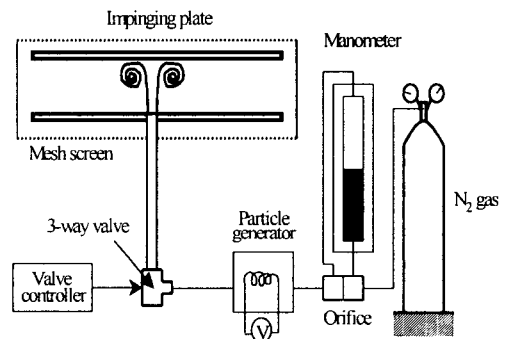


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

본 실험은 공기의 주성분인 질소가스를 제트유체로 사용하였다. 압력조절기와 유량 측정용 orifice를 통과한 질소가스는 입자 발생기 (particle generator)와 3방향 솔레노이드 밸브 (3-way solenoid valve)를 통해 분사 노즐에서 test section으로 분사된다.

두개의 timer와 릴레이로 구성된 작동시간 조절용 valve controller에 의해 3방향 솔레노이드 밸브의 개폐시간을 조절함으로써 주기적인 유동장을 구현하였다. 한 주기 당 ON-timer가 작동하는

동안은 3방향 슐레노이드 밸브에서 test section으로 연기가 공급되며, OFF-timer가 작동하는 동안은 3방향 슐레노이드 밸브의 다른 출구를 통하여 입자가 바깥으로 배출된다.

입자 발생기는 laser 평면광에서 산란광을 얻기 위해 수mm의 입자들을 생성시키는 장치이다. 본 실험에서는 kerosene을 사용하여 입자를 발생시켰으며, kerosene의 증발에 의한 팽창은 유동에 고려되지 않았다.

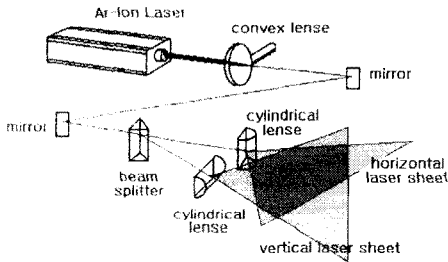


Fig.2 Schematic of visualization system

실험에서는 Fig. 2에서 보여지는 형태의 유동장 가시화 장치가 사용되었다. 제트 내에 포함된 미세 kerosene 입자가 laser 평면광에 산란(scattering)되는 상을 디지털 비디오 카메라로 녹화하였다. 광원은 Ar-Ion laser(최대출력 5W)로 3W의 출력을 사용하였다. 발생한 laser를 초점거리 1.5m의 볼록렌즈를 통해 test section에 초점을 맞춘 다음, cylindrical 렌즈를 통과시켜 수직 평면광을 만들었다. 이 때 laser sheet의 두께는 대략 1mm이다. Cylindrical 렌즈와 오목렌즈들을 조합하여 충돌 후 반경방향으로 이동하는 vortex ring의 3차원 구조를 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig.3은 Re가 450인 유동조건에 대해 디지털 비디오 카메라를 통해 얻은 수직 평면광에 산란된 벽면 제트 상들을 시간적 순서대로 나열해 놓은 것이다. 노즐에서 분사된 제트의 vortex ring은 상승하면서 성장한다. 평면과 충돌한 제트 선단의 vortex ring은 모양은 변형되지만 계속적으로 core를 유지하면서 방사상의 벽면제트(wall jet)를 형성한다. 즉, 충돌 전의 vortex ring의 core는 충돌 후 형성되는 벽면제트에서의 primary vortex의 core로 바뀌면서 vortex core를 형성하는 것이 관찰된다. 이러한 사실은 single vortex의 실험결과에서 관찰되었다[4].



Fig.3 Visualization of the impinging jet

Potential stagnation flow와 마찬가지로 충돌제트 역시 정체점에서의 정압이 가장 높기 때문에 충돌 후 형성되는 벽면제트는 압력에 의해 가속되어 빠른 속도로 반경방향으로 흘러간다. 이때 형성

된 primary vortex의 바깥부분은 정지유체 혹은 상대속도가 낮은 유체와 접하므로 속도구배가 존재하게 되어 점성효과에 의한 secondary vortex를 형성시킨다.

벽면제트의 가장 큰 특징은 primary vortex와 secondary vortex의 상호작용이 존재한다는 것이다. 평판을 따라 반경방향으로 진행되는 primary vortex와 정지된 주변유체 사이에는 속도구배가 존재하기 때문에 경계면에서는 primary vortex 회전방향과 반대인 secondary vortex가 생성된다. Primary vortex는 천장제트에 의해 운동량(momentum)을 계속 공급받기 때문에 천장을 따라 이동하지만, secondary vortex는 천장아래 유동을 유지시킬 운동량의 공급이 이루어지지 않기 때문에 결국에는 primary vortex에 흡수된다. Secondary vortex는 복잡한 3차원적인 구조(azimuthal structure)를 가진다는 것을 Fig.4로부터 관찰할 수 있으며, primary vortex가 반경방향으로 대략 7D까지 진행되는 동안 계속 존재한다.

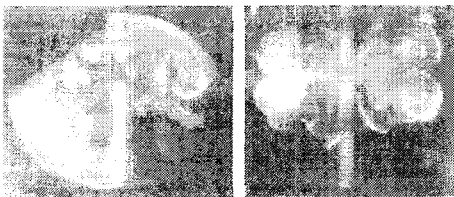


Fig. 4 Visualization of the vortex ring at $Re=450$

반경 7D 이후 반경방향으로 이동하는 primary vortex의 형상이 타원형으로 변화된다. 이것은 Primary vortex 선단 부분에서는 천장제트에 의해 지속적인 운동량이 공급되어 반경방향으로 진행하지만 primary vortex의 후류에서는 점

성효과에 의한 속도 저하가 나타나기 때문인 것으로 유추된다.

Fig.4는 충돌에 의해 생성되는 vortex의 3차원 구조를 보여준다. 그림에서 toroidal structure를 가지는 것이 primary vortex이며, toroidal structure의 주변에서 생성되는 eddy들이 secondary vortex에 해당된다.

Fig.5는 Fig.3에 보이는 vortex의 중심의 위치를 나타낸 것이다. 분사제트에 의해 생성된 vortex core는 수직으로 상승되며, 제트의 선단이 충돌판과 충돌한 후에도 vortex core는 충돌판 쪽으로 상승한 후 반경방향으로 이동한다. 반경방향으로 1.5D의 위치에서 평판과의 거리가 가장 가까운 것이 육안으로 관찰되었다. 이 지점을 통과한 후부터 vortex의 직경이 계속 성장되는 것을 알 수 있다.

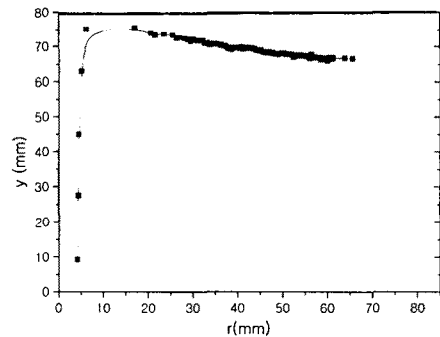
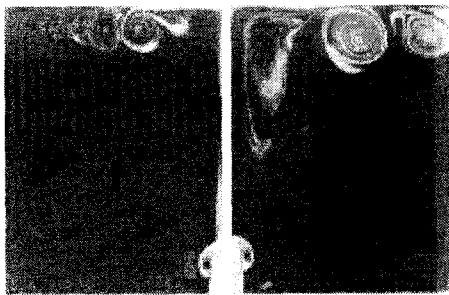


Fig.5 Positions of the primary vortex core

Fig.6은 Re 를 450으로 고정된 후, 공급되는 제트의 ON-OFF 주기를 바꾸어 가면서 관찰한 충돌 후 형성된 벽면제트의 vortex 크기를 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 ON-OFF 주기에 따라 형성되는 vortex의 크기에 많은 차이가 있음을 확연하게 볼 수 있으며, 같은 반경

위치에서 0.625Hz와 2.5Hz를 비교하면 vortex 크기가 대략 1.5배 차이가 있는 것을 알 수 있다. 즉, 같은 유량 및 유속 조건으로 다양한 유동장을 구현하는 것이 가능함을 알려 준다. 이것으로부터 공급되는 제트의 ON-OFF 주기를 조절하므로써 같은 유량 조건하에서 충돌제트에 의해 형성되는 유동 및 물질확산 등을 제어할 수 있음을 알 수 있다.



a) $f = 2.5\text{Hz}$ b) $f = 0.625\text{Hz}$

Fig.6 Variation of the flow field at $Re=450$

Fig.7은 주기적인 운동이 있는 벽면 제트에서 형성되는 vortex들 사이의 상호작용을 관찰하기 위해 $Re=300$ 에서 0.6Hz 주기로 제트를 ON-OFF하여 얻은 유동장을 가시화한 것이다. Fig.3의 단일 vortex는 최초의 선단 vortex가 반경방향으로 계속 진행하면서 형상이 변형되지만 주기적인 운동이 있는 경우 전후 vortex의 영향을 받게 된다. Fig.6에서 정체점에 가장 가까운 vortex는 선회도가 강하여 형상이 거의 원형을 유지하고 있지만 정체점으로부터 멀어짐에 따라 체적 팽창 및 주변 유체와의 상호작용에 따른 선회도 감소로 인한 vortex 형상 변화가 관찰된다. 그림에서 알 수 있듯이, 뒤따르는 vortex의 선회에 의해 vortex core를 기준으로 벽면쪽과 아래

쪽에서 하류쪽 vortex가 상류쪽 vortex로 stretching 되는 현상이 존재하며, 결국에는 두 vortex가 merging되므로써 경계층의 두께가 두꺼워진다.



Fig.7 Vortex interaction at $Re=300$

4. 결론

본 연구에서는 kerosene smoke 가시화 기법을 사용하여 평판과 충돌하는 원형 제트의 순간 거동을 가시화하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 충돌 전 제트 선단의 vortex ring은 충돌 후에 primary vortex의 core를 형성하며, primary vortex의 경계면에서 생성된 secondary vortex는 반경방향으로 진행하면서 primary vortex에 흡수된다.
2. 공급 제트 주기의 변화에 따라 벽면 제트의 크기가 바뀌기 때문에 공급되는 제트의 ON-OFF 주기를 조절하므로써 같은 유량 조건하에서 충돌제트에 의해 형성되는 유동 및 물질확산 등을 제어할 수 있음을 알 수 있다.
3. 충돌에 의해 평판아래에 형성된 vortex간에는 상호작용이 존재하며, 벽면 제트의 경계층 형성과 밀접한 관계를 가진다.

추후 질소 대신 메탄과 같은 연료를 공급하고 정체점 부근에서 점화시키는

실험을 수행할 예정으로, vortex 면을 따라 진행되는 화염대 전파에 대한 연구를 계획하고 있다.

참고문헌

1. J. W. Baughn and S. Shimizu, "Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet", *Journal of Heat transfer*, Vol. 111, 1096-1098(1989)

2. T. Foat, K. P. Yap and Y. Zhang, "The visualization and mapping of turbulent premixed impinging flames", *Combustion and Flame*, Vol. 125, 839-851(2001)

3. C. O. Popiel and O. Trass, "Visualization of a free and impinging round jet", *Experimental thermal and Fluid Science*, Vol. 4, 253-264(1991)

4. J. D. A. Walker, C. R. Smith, A. W. Cerra and T. L. Doligalski, "The impact of a vortex ring on a wall", *J. Fluid Mech.*, Vol. 181, 99-140(1987)

5. P. Orlandi and R. Verzicco, "Vortex rings impinging on walls : axisymmetric and three-dimensional simulations", *J. Fluid Mech.*, Vol. 256, 615-646(1993)

6. A. Hamins, J. C. Yang and T. Kashiwagi, "An Experimental Investigation of the Pulsation Frequency of Flames", 24-th Combustion Symposium, 1695-1702(1992)