

보일러용 연료분사 시스템의 충돌분무 시스템화의 가능성 진단 및 파급효과 분석

박종훈*, 정기훈*, 운영빈*, 황상순**

*서울대학교, **인천대학교

Application of Impinging Jet Injectors to Boiler Spray System : Possibility and Effects

Jong Hoon Park*, Kihoon Jung*, Youngbin Yoon*, Sang-Seun Hwang**

*Seoul National University, **University of Incheon

Abstract

액체 로켓용 충돌분사형 인젝터는 구조가 매우 간단하면서도 고유량의 연료를 분사시킬 수 있기 때문에 여러 엔진에 응용된 바 있다. 본 연구에서는 이러한 인젝터의 특성을 산업용 보일러에 적용하기 위한 기초 실험 및 수치 계산을 수행하였다. 충돌분사 노즐로부터 형성되는 분무의 분포 특성을 실험적으로 측정하였고 이를 실제 조건에 모사하기 위해 수치 계산을 하여, 두 결과를 비교하여보았다. 이로부터 보일러의 효율과 공해물질 저감에 영향을 가져오는 액체의 미립화 특성을 향상시킬 수 있는 연료 분사 조건을 제시하였다.

1. 서 론

초기 보일러 설계시 자본 투자를 낮추기 위해 연료의 경제성 문제는 중요하게 생각하지 않았다. 이 때문에 고가의 연료를 사용해야 하는 지금으로서는 기존의 시스템에 별도의 열회수 장치를 고안하고 과잉 공기를 낮추는 연소 장치를 개발하는 방향으로 시스템 개선이 진행되고 있다[1].

한편, 보일러에서 연료의 연소 방식이 개선됨에 따라 연소효율 이미 70년대에 99.5%에 도달하였기 때문에 연소효율만을 증가시켜 전체 효율을 향상시키는 것은 무의미하다. 그러나 보일러의 전체 시스템에 있어서 열회수는 대부분 90%를 넘지 못하고 있다. 이와같은 열손실의 가장 큰 요인은 과

열기의 온도를 조절하는 과잉공기(excess air)에 있음이 알려져왔고, 이를 개선하기 위하여 배출가스를 재순환시키거나 물을 직접 분사하는 등의 방식을 통해 과열기를 과잉공기와 독립적으로 작동하는 방법을 적용하여왔다. 그러나 과잉공기를 줄임으로써 생기는 이득은 연소의 불완전성으로 인한 효율감소로 인해 반감되었고, 때문에 공기와 연료의 효과적인 혼합을 유도하여 연소를 안정적으로 이루어지게 할 수 있는 연료분사 방식의 연구가 필요하게 되었다.

또한 계속되는 환경규제로 인한 공해 물질의 저감에 대한 필요성으로 연료자체의 개선, 연소과정에서의 연소제어, 연소후의 공해물질 제거함으로써 상당한 효과를 보아왔다. 특히, 연소과정에서 발생하는 매연, SO₃, NO_x 등의 공해물질은 과잉공기의 조절로 개선할 수 있음이 밝혀지면서 다시한번 연료/공기 혼합특성을 향상시킬 수 있는 연료분사 시스템 개발의 중요성이 부각되었다.

충돌분무에 대한 연구는 액체 로켓 개발 이전부터 계속적으로 진행되어왔다. Taylor[2]는 두 오리피스로부터 분사된 액체 제트가 충돌하여 형성되는 액막의 모양과 두께를 이론적으로 계산하였으며 실험을 통해 입증하였다. 그러나 이는 매우 낮은 We 수에서만 적용할 수 있으며 보다 높은 We 수에 대해서는 두 제트의 충돌시 생기는 충돌력(impact force)에 의해 액막 내에서 파가 형성되

고, 이 파의 성장과 분열 과정이 분무의 미립화 특성을 지배한다는 사실이 Dombrowski와 Hooper 등[3]의 실험적 연구에 의해 밝혀졌다. 또한, 수치계산을 통해 이와 같은 분열현상을 Kelvin-Helmholtz 불안정 이론과 선형·비선형 불안정 이론 등을 적용하여 모델링하려는 노력이 계속 진행되고 있다[4].

따라서 본 연구에서는 기본적인 like-doublet 충돌분무 인젝터를 사용하여 그 분무 특성을 파악함으로써 연료/공기 혼합특성을 개선할 수 있는 방안을 제시하는데 초점을 두었다. 또한 수치계산을 통하여 실험 결과와 비교함으로써 실제 보일러 시스템으로의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

2. 본 론

2.1. 실험적 연구

2.1.1. 실험장치 및 방법

연소기의 연소효율은 인젝터에서 분사되는 연료 액적의 크기뿐만 아니라 그 공간적인 분포 특성도 상당히 중요하기 때문에, 제트의 속도 및 충돌각도 등이 액적의 크기와 분포에 미치는 영향에 대하여 살펴보기 위하여 Fig.1과 같은 실험장치를 구상하였다. Ar-Ion 레이저로부터 얻은 빔은 광섬유를 통해 평면광으로 조사된다. 연료는 물과 메틸알콜을 4:1로 사용하였고, 514.5nm의 파장에서 형광을 일으키기 위해 fluorescein을 첨가하였다. 형광신호는 530nm high-pass 필터를 통해 디지털 카메라로 감지되며, 이때 신호의 강도는 형광 분자의 농도에 비례하므로 액적의 부피에 비례하게 된다. 또한 이를 총강도의 합으로 나누어 유량으로의 정량화 시킬 수 있다. 카메라의 수직방향의 접근이 불가능하기 때문에 측면에서 촬영한 후 affine 변형을 통해 원근을 보정해 주었다. 형광신호는 각각 0.7초의 노출시간을 준 10개의 이미지를 평균하여 구한다.

한편 평면광 자체의 강도는 dyecell 이미지로부터 보상해주었으며 레이저가 액적을 지나면서 발생하는 강도 감쇠현상은 Talley[5] 알고리즘을 따라 좌우의 이미지의 기하평균을 구함으로써 보정하였다.

노즐은 정밀 표면가공을 한 금속 튜브를 사용하였으며 안쪽 지름이 0.69mm, 길이가 69.0mm로

L/D=100 으로 하였다. 2bar, 4bar, 6bar의 압력차에 대하여 각각 20, 30, 40°의 각도로 충돌시켰다. 또한 노즐출구에서 충돌점까지의 거리는 5mm로 고정하였다.

한편 액적의 크기는 고배율($\times 10$)의 직접사진(해상도 $45\mu\text{m}$, 최대 측정가능 액적직경 $2000\mu\text{m}$)을 이미지 처리과정을 거쳐 Kadambi[6]의 알고리즘을 응용한 프로그램으로 측정하였다. 각 이미지는 스트로브 스톱을 이용하여 순간촬영을 하였고, 렌즈의 왜곡현상을 최소화하기 위하여 측정위치를 항상 렌즈의 중앙에 위치하도록 하였고, 총 60장의 이미지로부터 통계처리 하였다.

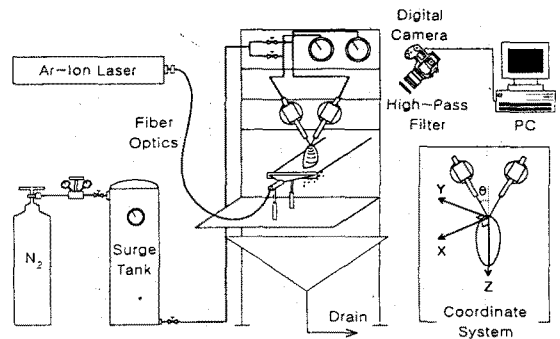


Fig. 1 Schematic of Experimental Setup

2.1.2. 실험결과

액막의 분열

순간촬영 기법을 이용하여 노즐의 압력차에 따른 액막 분열과정을 이해할 수 있었다. Fig.2(a)에서와 같이 3psi에서는 충돌파가 매우 작아 교란이 없는 액막이 형성되며 압력차가 커질수록 충돌점에서 충돌파가 점점 강하게 나타나게 된다. 이때 액막의 면적은 임계압력까지는 증가하나 그 이후는 감소한다(Fig.2(b)). 보다 높은 속도에서는 충돌하는 운동량이 액막 끝단의 표면장력을 훨씬 초월하여 충돌파에 의한 주기적인 분열현상을 보인다(Fig.2(c)). 이후로는 속도에 비례하여 분열 파장이 짧아진다(Fig.2(d)). 이런 현상은 Dombrowski[2]가 밝혀낸 바와 같이 압력차가 커질수록 분사 제트의 난류 특성이 증가하여 제트의 교란파장이 짧아지기 때문이다.

유량의 단면분포

수직방향 We 수 ($\rho U_j^2 D \sin^2 \theta / \sigma$) 150 이후부터

액막은 $500\mu\text{m}$ 이하의 작은 액적으로 분열되며 주기적인 분포 특성을 갖는다. Fig.3는 Z방향으로 30, 50, 70mm에서 PLIF를 이용하여 단면의 이미지를 유속으로 정량화시킨 결과이다. 그림에서처럼 두 체트의 충돌점을 중심으로 전체영역의 6.46% 이내에 절반의 연료가 집중되는 현상을 보인다. 이는 연소효율을 감소시키는 요인으로, 하층에서 둔화(14.32%)되지만 크게 개선되지는 않는다.

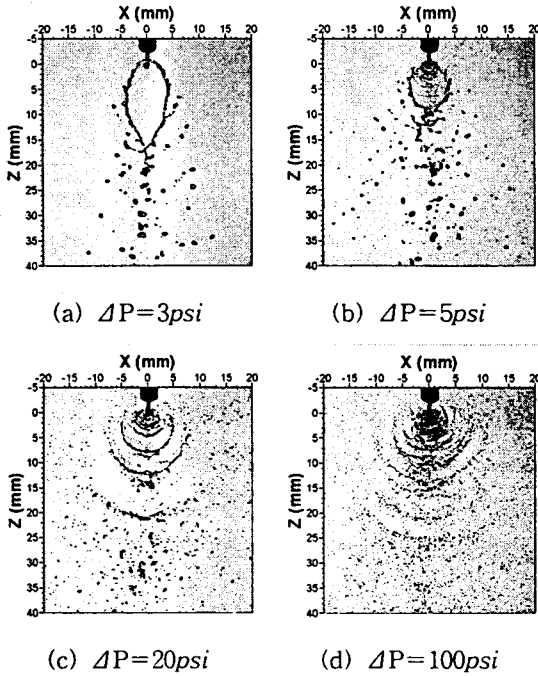


Fig. 2 Liquid Sheet Breakup ($\theta = 40^\circ$)

Fig.4는 전체 유량의 절반이 차지하는 면적을 $\theta = 20, 30, 40^\circ$ 일때, 수직방향 We 수에 대하여 나타낸 결과이다. 수직방향 We 수가 동일하여도 θ 가 증가할수록 면적이 커지는 것으로 보아 유량 집중현상을 개선하기 위해서는 압력차 보다 충돌각의 크기를 증가시키는 것이 더욱 효과적임을 알 수 있다.

액적의 크기분포

유량의 집중현상은 액적의 크기분포로부터 설명될 수 있다. Fig.5(a)는 액적의 평균직경을 중심에서 5mm 간격으로 측정된 결과이다. 평균직경은 중심부에서 다소 불규칙적이거나 전체적으로 볼 때

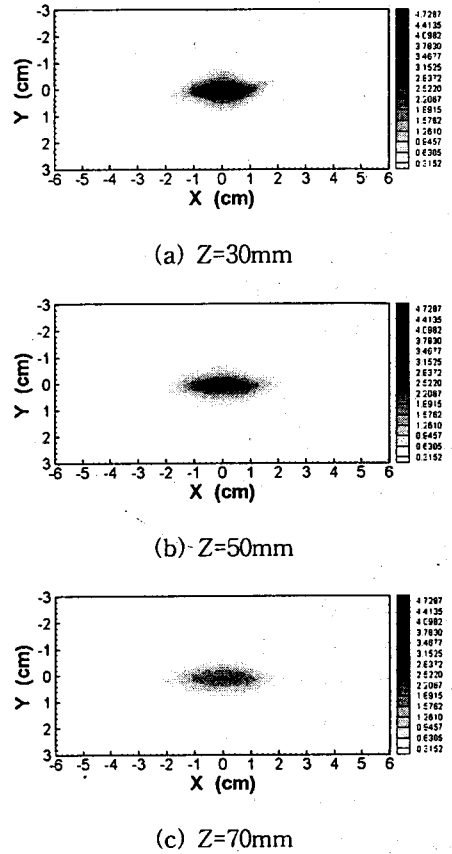


Fig. 3 Radial Massflux Distribution ($\Delta P = 6\text{bar}$, $\theta = 30^\circ$, Unit = $\text{g}/\text{cm}^2\text{sec}$)

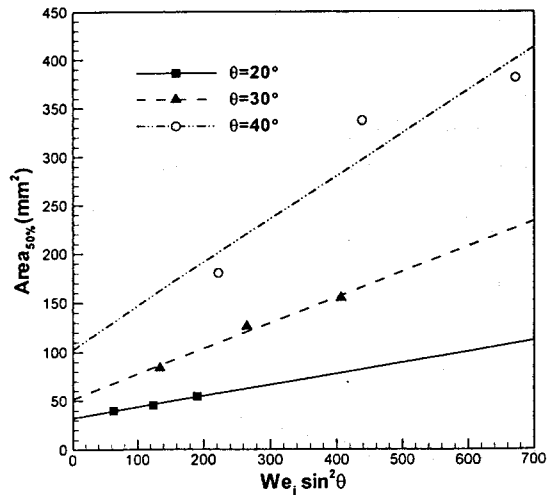
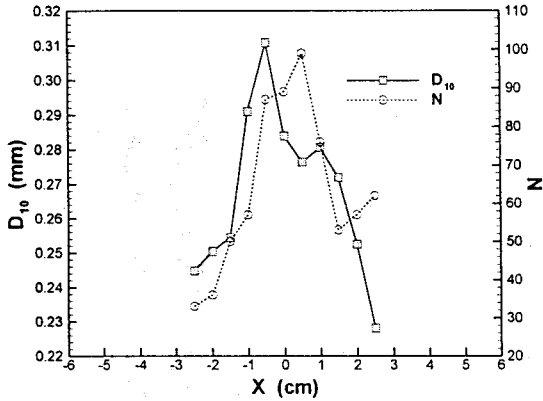
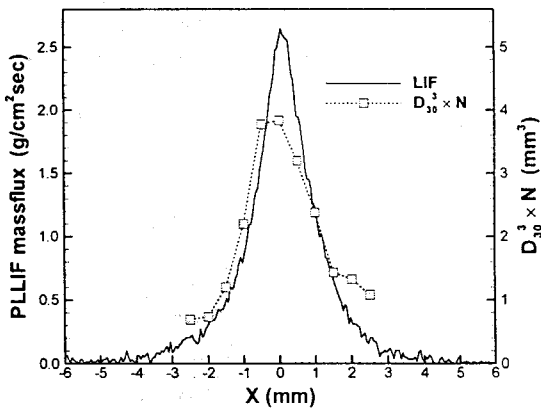


Fig. 4 Mass Concentration ($Z=30\text{mm}$)

중심부에 상대적으로 큰 액적이 존재한다. 뿐만 아니라 액적의 개수도 중심부에서 매우 많기 때문에 유량이 집중되고 있음을 알 수 있다. Fig.5(b)는 액적의 부피와 개수를 곱하여 얻은 유속의 상대적인 크기를 PLIF 결과와 비교한 것이다. 두 결과가 상당히 유사한 경향성을 보이는 것으로부터 측정 방법이 타당함을 알 수 있다.



(a) drop diameter distribution



(b) massflux distribution

Fig. 5 Drop Size Distribution
($\Delta P=2\text{bar}$, $Z=30\text{mm}$, $\theta=40^\circ$)

2.2. 수치적 연구

2.1.1. 수치해석 기법

충돌 분사 노즐의 연소 특성 해석을 위해서는 분사된 액적까지 고려한 유동 해석코드를 이용해야만 한다. 본 연구에서는 분무 유동 해석 코드 중 가장 널리 이용되고 있으며 연료 분무 과정의 상

세한 모델링이 포함되어져 있고 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 알려진 KIVA-II 코드를 충돌 분무 과정을 모사할 수 있도록 수정하여 충돌 분사 노즐의 분무 및 유동 특성을 고찰하였다. 본 연구는 다종의 화학종이 존재하고 액체 연료 분무를 고려한 이상 기체의 3차원 Navier-Stokes 방정식을 지배 방정식으로 이용하였으며 난류 모델링으로는 고려해야될 상수가 하나 적으며 스윙 등의 복잡한 유동에 적합하다고 알려진 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다[7].

본 해석 코드는 액적의 분열(breakup), 충돌 및 유착(collision and coalescence), 기화(evaporation), 벽면 충돌(wall impingement), 액적의 크기 분포(droplet size distribution) 등이 실제와 가깝게 모델링 되어져 있다[8]. 그러나 충돌 분사와 같이 액적(혹은 액주) 충돌 후 분열하는 과정은 모델링 되어져 있지 않으며 shattering 모델과는 또 다른 특성을 지닌다[9]. 따라서 본 연구에서는 액적의 운동량과 운동에너지를 고려하여 충돌 분사를 실제와 유사하게 모델링하였다.

2.2.2. 계산 조건 및 모델 연소기

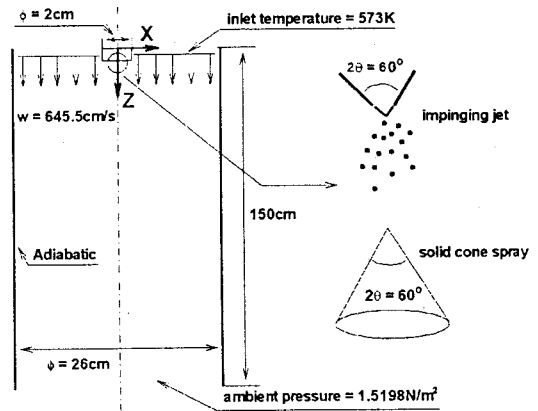


Fig.6 Simulation Condition and Model
Combustor Geometry

Fig.6은 계산 조건과 모델 연소기의 형상을 보여주고 있다. 모델 연소기는 can-type으로 중심부에 연료 노즐이 있고 z-축 방향으로 공기가 유입될 수 있도록 하였으며 노즐 부근은 공기가 유입될 수 없도록 하였다. 연료 노즐은 충돌 분사형(충돌 각 60°)과 solid cone(분무각 60°) 형태의 두가지

경우에 대해 수치 해석을 수행하여 비교 검토하였다. 연료의 초기 분사 속도는 1814cm/s이고 총돌 분사형의 노즐 직경은 0.069cm(690 μ m)이고 solid cone형의 노즐 직경은 0.0961cm(961 μ m)이다. 연료로는 케로신을 이용하였고 초기 온도는 403K로 하였다.

총돌 분사형의 초기 총돌 We 수는 2530이고 solid cone의 액적 분사 We 수는 2.8이다. 연료의 유량은 10.8g/s로 0.5MW정도의 발열량이고 공기의 유량은 313.2g/s로 연료/공기 당량비는 0.5이다.

2.2.3. 수치 해석 결과

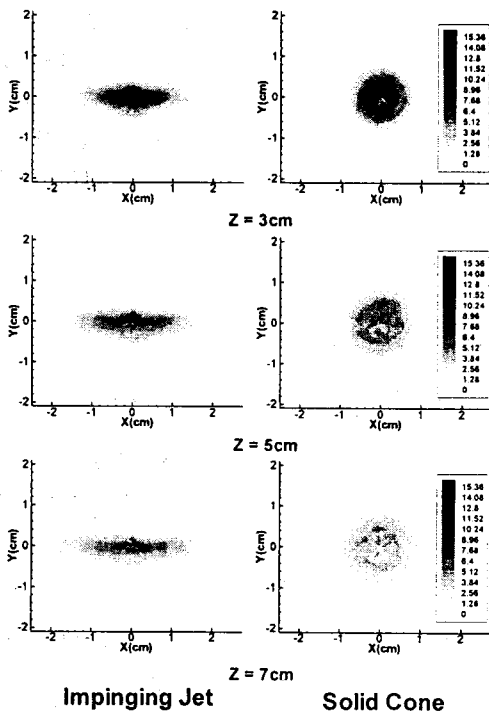


Fig. 7 Non-Reacting Droplet Volume Flux Distribution of Impinging Jet and Solid Cone (unit : g/cm²sec)

Fig.7은 비반응 상태에서 축방향으로 3, 5, 7cm 거리의 위치에서의 액적 유량 플럭스 값을 나타낸다. 왼쪽의 총돌 분사형의 경우 Fig.3에서 보여지고 있는 실험 값과 비교적 잘 일치하고 있어 액주의 총돌 분사 모델이 실제 현상을 잘 모사하고 있다고 판단할 수 있다. solid cone 분사와 총돌 분사를 비교해 보면 solid cone의 경우 매우 균일한

분포를 갖는데 반해 총돌 분사의 경우 중심 부근에 액적이 모여 있음을 알 수 있으며 총돌 분사의 경우 x축 방향으로 액적이 모여 있다.

하류로 갈수록 solid cone의 경우 액적이 쉽게 운동량을 잃어버려 멀리 까지 분포하지 못하는 데 반해 총돌 분사는 액적의 운동량이 비교적 커서 멀리까지 분포하고 있다. 이러한 액적의 유량 분포를 볼 때 총돌 분사의 경우 평면적인 화염이 형성될 것으로 판단되며 비교적 넓은 영역에서 화염이 형성될 것으로 판단된다.

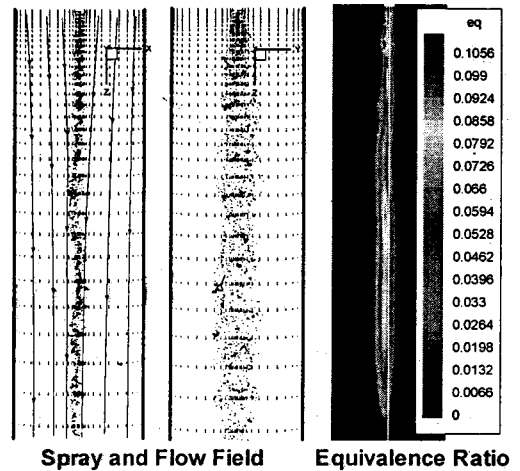


Fig. 8 Non-Reacting Impinging Jet

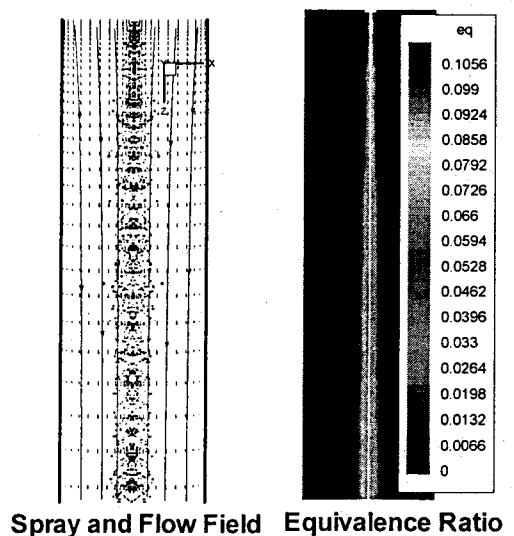


Fig. 9 Non-Reacting Solid Cone Spray

Fig.8과 Fig.9는 각각 충돌 분사형과 solid cone 형의 분무 특성 및 유동 특성과 기화된 연료의 당량비 등고선을 보여주고 있다. 충돌 분무의 경우 축 대칭성을 갖고 있지 않으므로 x-z 평면에서의 분무 특성과 y-z 평면에서의 분무 특성이 다르게 나타난다. 액적들의 분포가 y-z 평면에서 넓게 분포하고 있는 것으로 보아 평면 형태의 화염이 형성될 것으로 보인다. 당량비 등고선에서 보이듯이 아직까지 기화된 연료가 많지 않음을 알 수 있다. 그러나 Fig.9의 solid cone 분무에서의 당량비 등고선과 비교해 보면 충돌 분사에서 더 많은 기화가 일어나고 있음을 알 수 있다. 이는 두 노즐에 대해 액적의 초기 크기는 같으나 충돌 분무의 경우 충돌에 의한 분열로 인해 액적 크기가 작아짐으로서 액적의 기화가 활발한 것으로 보인다. 즉, 만약 초기 액적의 크기가 같은 경우 충돌 분무가 액적의 기화에 더 효과적이다.

3. 결 론

이상의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 충돌형 인젝터로부터 분사되는 연료의 대부분이 충돌점을 중심으로 집중되어 있다. 이는 하류쪽에서 다소 완화되지만 이러한 집중현상으로 공기와의 혼합특성을 감소시킨다. 따라서 연소효율이 저감되며 과잉공기의 운용폭이 좁아진다.
- (2) 이러한 집중현상은 충돌점 중심부에 큰 액적이 집중되어 있고 그 빈도수도 크기 때문이다.
- (3) 이와같은 충돌형 인젝터의 분무 분포 특성은 노즐 양단의 압력차를 증가시키거나 충돌각을 크게하여 개선할 수 있는데, 충돌각을 조절하는 것이 보다 효과적이다.

4. 참고 문헌

- (1) B.P. Breen, "Combustion in Large Boilers: Design and Operation Effects on Efficiency and Emissions". 1977, pp. 19-35.
- (2) Taylor, G. I., "Formation of Thin Flat Sheets of Water", Proceedings of the Royal Society of London, A., Vol.259, 1960, pp. 1-17.

- (3) Dombrowski, N., and Hooper P.C., "A Study of the Sprays Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow", Journal of Fluid Mechanics, Vol.18, Pt.3, 1964, pp. 392-400.
- (4) W.E. Anderson, H.M. Ryan, and R.J. Santoro, "Impinging Jet Injector Atomization", *Liquid Propellant Rocket Combustion Instability*, AIAA, 1990.
- (5) Talley, D.G., Verdieck, J.F., Lee, S. W., McDonell, V.G., and Samuelson, G.S., "Accounting for Laser Sheet Extinction in Applying PLLIF to Sprays", AIAA-96-0469, 1996.
- (6) J.R. Kadambi, W.T. Martin, and M.P. Wernet, "Particle sizing using Particle Imaging Velocimetry on two-phase flows", Power Technology, Vol.100, 1998, pp. 259-259.
- (7) "Fluent User's Guide," Fluent Inc. Lebanon, NM, 1995.
- (8) A. A. Amsden, P. J. O'Rourke, T. D. Butler, "KIVA-2 : A Computer Program for Chemically Reactive Flows," LA-11560-MS, May 1989.
- (9) T. L. Georjon, R. D. Reitz, "A Drop-Shattering Collision Model for Multidimensional Spray Computations", Atomization and Sprays, vol. 9, 1999, pp. 231-254.