노즐 형상비에 따른 고압분사의 유동 특성에 관한 실험적 연구

이상진†, 남궁정환*, 노병준**

Experimental Investigation on the Flow Characteristics of High Pressurized Jet with Nozzle Aspect Ratio

Sang-Jin Lee, jung-hwan Nam-Kung, Byung-Joon Rho

Key Words: aspect ratio(형상비), potential core(포텐셜 코어), momentum(운동량), penetration(관통도)

Abstract

High-pressurized jet is widely using in industrial works. however, few papers studied on the performances or characteristics on that kind of nozzles. And in this study, some flow characteristics with the variation of nozzle aspect ratios such as mean velocity distributions, momentum variations along the center line have been experimentally investigated. As the results, some semi-empirical correlations of profiles of pressure and mean velocity distributions, momentum conservations with the nozzle aspect ratios are formulated. It is expected that these empirical formula can be applied for the random estimations of nozzle performances.

기호설명

L	: 노즐 팁 길이(㎜)
d_o	: 노즐 출구 직경(㎜)
L/d_o	: 노즐 형상비(aspect ratio)
X	: jet 분무 거리(㎜)
P_{mean}	: 유동 중심점 평균압력($kg_f/㎠$)
P_{max}	: 유동 중심점 최대압력($kg_f/㎠$)
U	: 축방향 유동 중심점 평균속도(m/s)
U_{max}	: 축방향 유동 중심점 최대속도(m/s)
M_o	: 분류의 평균 모멘텀($kg_f m/s^2$)
$(M_o)_{max}$	: 분류의 최대 모멘텀($kg_f m/s^2$)

† 전북대학교 대학원 정밀기계과
E-mail : sjforyou@hotmail.com
TEL : (063)270-2370 FAX : (063)277-7308
* 전북대학교 대학원 정밀기계과
** 전북대학교 기계항공시스템공학부 교수, 자동차 신기술 연구센터
Homepage : http://Fluid.chonbuk.ac.kr
email : rhobj@moak.chonbuk.ac.kr

1. 서 론

최근에는 산업사회의 급속한 발전과 더불어 환경산업이라는 분야가 공학의 주된 관심사가 되고 있다. 기술의 발전에 의한 필연적인 환경오염의 문제가 이제는 역으로 환경을 보존하는 방향으로 흘러가고 있는 것이다. 예를 들면, 발전소에서 사용하는 증기발생기의 내부 슬러지 제거나 압연이나 열간 가공에서 표면에 생기는 스케일을 제거하고, 재료의 절단에 사용되는 워터젯(water-jet)등과 같은 고압 분사를 이용한 기술들도 이러한 내용과 연관이 있다고 할 수 있다.

일반적으로, 고압 분사 노즐은 압력 챔버 내부 압력이 100 $kg_f/㎠$ 이상으로 대기 중으로 분사되는 것을 말한다. 고압 분사는 정지 혹은 유동 상태의 공기와의 충돌에 의한 분사류의 미립화 부분과 한정된 체적을 가지는 액주 형태의 유동으로 구분할 수 있다. 노즐의 형태와 구조에 따라, 자동차나 항공기 등에서 사용되는 최적의 연소 환경을 위한 미립화 노즐이 있고, 앞서 언급한 것처럼 세정이나 절단을 위한 고압 분사로 구분할 수 있다. 본 논문에서는, 운동량을 가지는 액

주 형태의 분사 특성에 초점을 맞추고, 분사류에서의 압력과 속도, 모멘텀의 측정을 통해서 최적의 노즐을 개발하는데 목표를 두고 있다.

고압 분사에서 분사류의 특성을 결정하는 인자는 노즐의 내경과 외경의 비, 노즐 수축부의 수축각, 노즐의 형상비(aspect ratio) 등의 영향을 고려할 수 있다. 통상적으로 수축각의 크기나 내경과 외경의 비에 대한 연구는 많이 수행되어왔고, 그에 따른 일반적인 관계도 많이 알려졌다. 그러나 형상비에 따른 고압 분사 노즐의 특성에 관한 연구는 미비하고 또한 그에 대한 논문역시 미비한 실정이다.

이와 관련한 논문으로는 Madhusarathi Nanduri 등은 Abrasive Water Jet(AWJ)을 제작하여 고압(200 ~ 300 Mpa) 상태에서 분사될 때 노즐 길이, 입구각, 직경에 의해 노즐 마모 정도의 변화 정도를 살펴보았고,[1] Bauman 등은 HIF 액체 챔버에서 단일 분사 실험을 통해 노즐의 설계에 따른 레이놀드수와 웨버수의 변화를 모색하여 최적의 유동 상태를 이론과 실제 실험을 통해 확인하였다.[2] 또한 McCarthy 등은 액체 분사의 안정성과 노즐 설계의 영향에 대해 고찰하였는데 노즐의 형상비(l/d)와 수축각이 노즐 성능에 미치는 영향이 크다고 보고하였다.[3]

따라서 본 논문에서는 이러한 고압 분사 노즐의 특성 파악을 위해, 노즐의 형상비를 변화시켜 형상에 따른 압력, 속도, 및 모멘텀을 통해 고압 분사 노즐의 유동 특성을 파악하고자 하는데 목적이 있다.

2. 실험 장치 및 측정 방법

2.1 실험 노즐

본 실험에 사용된 노즐은 세정을 목적으로 특별히 고안된 노즐로써, 1.2㎜의 직경과 4.6°의 수축각을 갖는다. Fig 1에서 나사산은 노즐과 노즐 holder의 결합을 위한 것이다. 실제로 분무의 특성을 결정하는 부분은 그림 1의 노즐에서 나사산 이후의 직관부와 노즐부분이다. 이 부분의 길이와 각이 분무의 특성을 결정한다. Fig 2는 본 실험에 사용된 노즐의 단면으로, 노즐 팁의 길이(L)와 노즐 출구의 직경(d_o)의 비에 따라 각각 0, 2, 4 type으로 나타낸다. 각 타입 노즐의 실험을 통하여 압력, 속도, 모멘텀을 측정하고, 그 데이터를 통해 고압 분사 노즐의 유동에 대한 특성을 연구하고자 하였다.

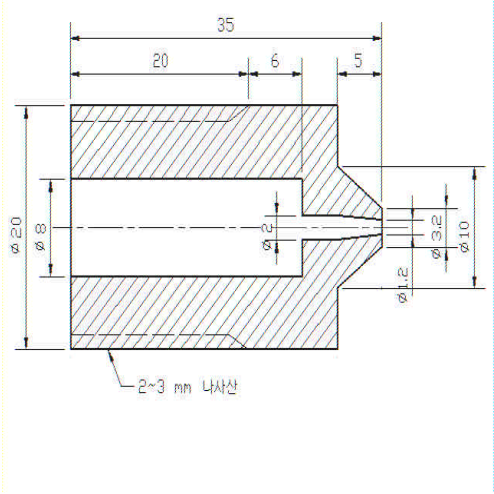
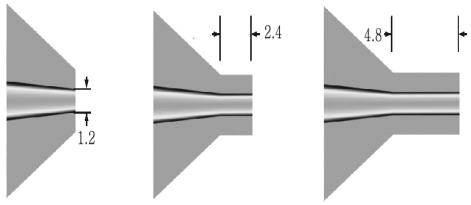


Fig 1. Schematic configuration of high-pressurized jet nozzle



(a)L/d_o=0 (b)L/d_o=2 (c)L/d_o=4

Fig 2. Aspect ratios of used nozzle

2.2 실험 장치

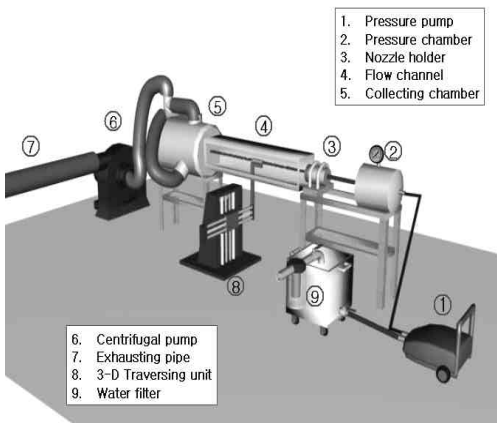


Fig 3. Experimental apparatus of high-pressurized system

Fig 3. 은 노즐 분사 장치를 나타낸 것이다. 노즐 분사 장치는 크게 세 부분으로 구성되어 진다. 각 부분은 고압 유체를 공급하기 위한 유체 공급부, 분사된 분무의 데이터와 이미지 획득을 위한 채널부, 채널부를 통과한 유체를 포집하고 채널내부의 정지된 공기를 흡입하기 위한 포집부로 구성된다. 그림에서 유체 공급부는 물을 정제하기 위한 water-filter(⑨)와 유체에 압력을 공급하기 위한 압축 펌프(①), 지속적인 압력을 유지하기 위한 압력 챔버(②), 그리고 실제 분사를 담당하는 노즐부(③)로 구성된다. 채널부는 분사된 유체의 가시화를 위해 전면 창을 투명하게 제작하였고, 데이터 획득을 위한 장치의 설치와 이동을 위해 바닥면의 중앙에 노즐 출구부터 약 1800㎜까지 따내기를 하였다. 포집부는 포집 챔버(⑤)와 채널 내부의 정지된 공기를 흡입하기 위한 centrifugal pump(⑥), 흡입된 공기와 mist를 배출하기 위한 배출 pipe(⑦)로 구성된다. centrifugal pump는 두 가지 목적으로 설치한 것으로 정지된 공기와 분무의 충돌로 인한 손실을 최소화하고, 공기와 분무의 충돌로 인해 발생하는 mist에 의한 가시화 효과의 저감을 위한 것이다. Fig 3.에서 traversing(⑧)은 데이터 획득을 위한 장치를 장착한 3차원 이송장치이다.

본 실험에서는 공급압력을 압력 챔버(②)를 기준으로 100, 120, 140, 160 kg_f/cm^2 까지 변화시켰고, 측정 범위는 노즐 출구로부터 축 방향으로 1200㎜ 까지 100㎜ 단위로 측정하였다. 단, 일반적으로 100 d_o 즉, 노즐 출구 직경의 100배 되는 거리에서는 외부 공기의 영향에 의한 확산이나 미립화가 거의 일어나지 않는 퍼텐셜 코어(potential core)영역이 존재하므로, 영역의 확인을 위해서 120㎜ 이내 영역에서는 각각 70㎜, 100㎜ 120㎜에서 데이터를 획득하였다.

2.2 측정 장치

본 실험에서는 데이터 습득을 위해서 pitot-tube를 사용하였다. pitot-tube의 직경은 8㎜이며, pitot-tube와 연결된 관의 끝에는 압력 데이터 습득을 위한 압력 게이지와 압력 센서(pressure transducer)가 장착된다. 압력 게이지는 각각 6, 10, 21, 35 kg_f/cm^2 의 것을 사용하였고, 압력 센서는 Hydro-technik의 200 kg_f/cm^2를 사용하였다. 그러나 200 kg_f/cm^2 압력 센서는 노즐 출구로부터의 압력에 비해 상대적으로 너무 큰 값을 가지고 있기 때문에, 데이터 획득의 목적보다는 비교의 목적으로 사용되었다. 게이지를 통해 획득한 데이터는 각 단면의 평균압력으로, 각 단면에서 유동의 중심부분에서 얻어진 데이터들이다.

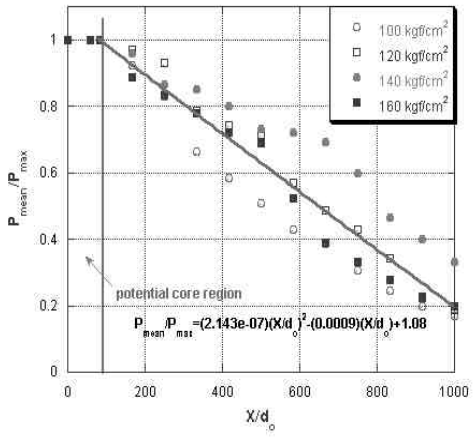
3. 분석 및 고찰

3.1 Pressure distributions

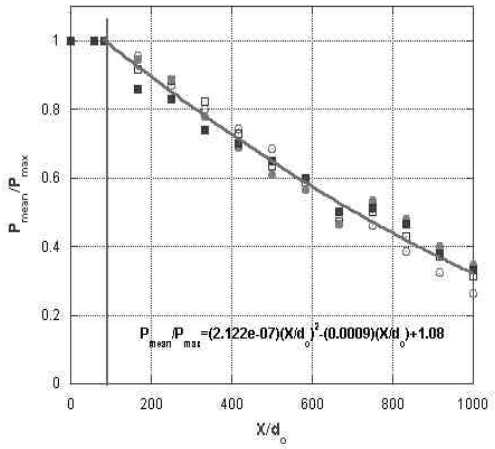
Fig 4.는 aspect ratio에 따른 압력을 공급압력 100, 120, 140, 160 kg_f/cm^2 에 대해서 나타낸 것이다. 각 데이터는 일반화를 목적으로 각각 평균 최대 압력(P_{max})과 노즐 직경(d_o)으로 나누어 무차원화 시킨 그래프이다. Fig 4. (a)에 나타나 있듯이, 노즐 직경의 약 100배, 즉 100 d_o까지는 액적의 형태를 잃지 않고, 운동량을 계속 유지하는 퍼텐셜 코어(potential core)영역이 존재한다. 그 이후의 영역에 대해서는 각 압력에 대한 데이터에 대한 일반식을 이끌어 낸 것이다. 각 곡선의 correlation coefficient(R^2)는 0.98 이상을 가지며, 무차원 거리에 대한 2차원의 식으로 표현될 수 있다.

형상비에 대한 데이터를 비교해 보면, 각 그래프 공히 퍼텐셜 코어 영역이 존재하는 것을 볼 수 있다. 그리고 압력 데이터의 응집도를 비교해 보면, 형상비가 증가할수록 하나의 곡선에 대해서 응집도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이에 대한 설명은 두 가지로 해 볼 수 있다. 첫째로, 형상비가 증가할수록, 공급 압력의 변화에 대한 출구 압력의 변화의 비가 일정하다고 생각할 수 있다. 이는 수축부를 통과한 유체가 직관부의 존재(형상비가 커질수록)에 의해서 분산(separation)이나 cavitation의 영향을 덜 받을 수 있기 때문으로 생각된다. 둘째로는 형상비의 증가에 따라서 분사 거리의 증가에 대해서도 중심부분의 유동이 주변 공기에 의해서 분산되지 않고 운동량을 어느 정도 지속적으로 보존하고 있다고 볼 수 있다. 이는 각 그림을 비교해 보면, (a)에서 보다 (b), (c)로 갈수록 무차원 압력의 최소값이 증가하고 있고, 수식을 통해 볼 때, 기울기가 형상비가 증가할수록 감소하는 것을 통해 알 수 있다. 기울기가 증가한다는 것은 무차원 압력의 감소의 폭이 상대적으로 적다는 것을 나타내는 것

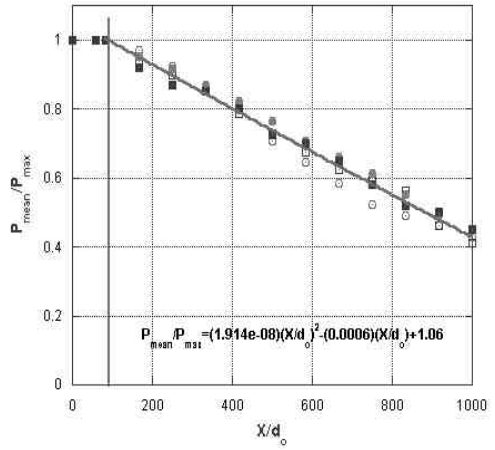
이다.



(a) L/d_o=0



(b) L/d_o=2

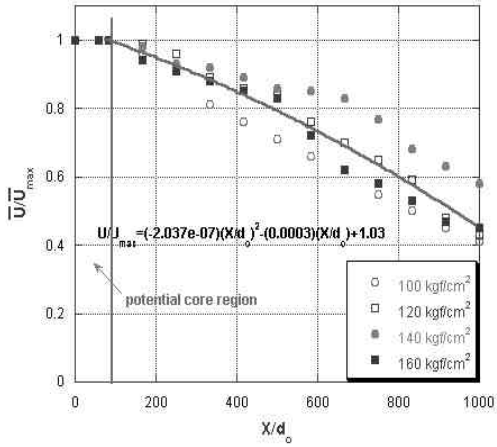


(c) L/d_o=4

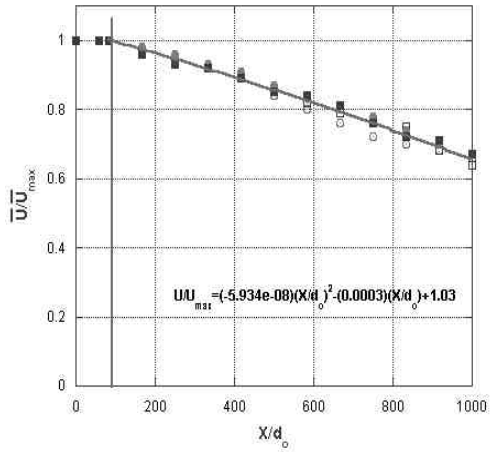
Fig 4. Pressure distributions with aspect ratios

3.2 Velocity distribution

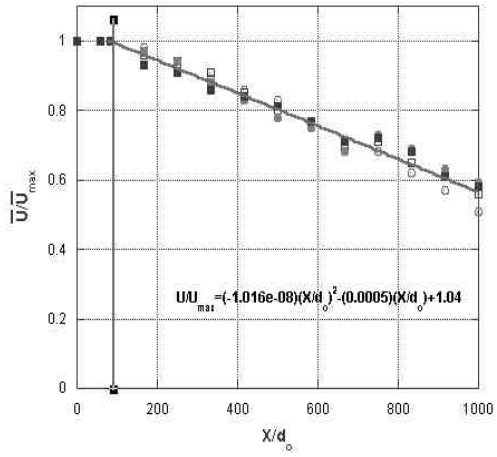
Fig 5.는 각 타입에 대한 속도 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 속도 데이터는 압력 데이터로부터 계산식에 의해 얻어진 것이다. 압력 분포와 마찬가지로 속도 분포 역시 퍼텐셜 코어 영역이 존재하고, 그 이상의 영역에서 무차원 거리에 대한 2차 함수로 표현할 수 있다. Fig 5.를 통해서 속도 분포 역시 형상비가 클수록 속도 감소폭이 작은 것을 볼 수 있다. 그림을 통해서 형상비가 증가할수록, 속도 감소폭도 역시 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 형상비의 증가와 무차원 압력 기울기의 감소폭과의 연관성을 통해 알 수 있다. 그리고 속도 분포를 통해서 분무의 관통도(penetration) 또한 형상비가 증가할수록 길어질 것으로 예상된다.



(a) L/d_o=0



(b) L/d_o=2



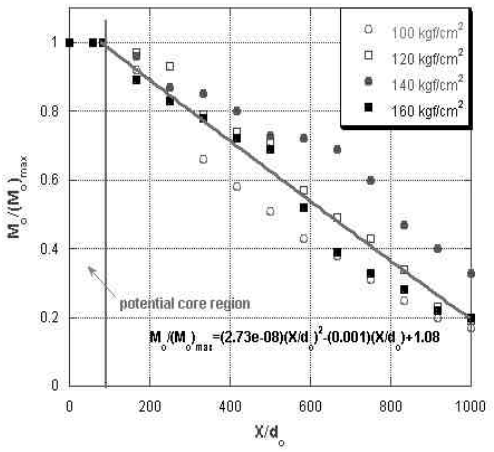
(c) L/d_o=4

Fig 5. Velocity distributions with aspect ratios

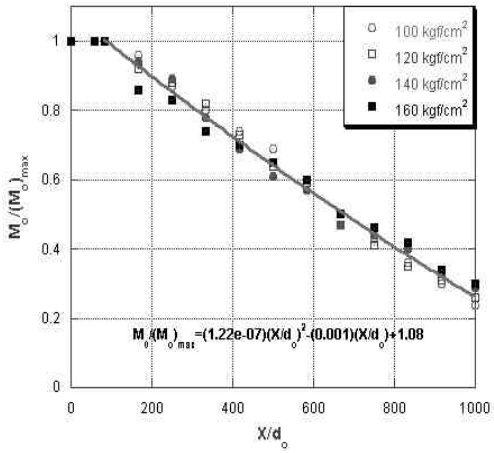
3.3 Momentum distribution

Fig 6.은 각 형상비에 대한 모멘텀의 변화를 각각의 공급압력에 대해 나타낸 그래프이다. 그리고 Fig 7.은 공급압이 120 kg_f/cm^2 일 때의 분사 사진이다. Fig 6.을 통해서 형상비가 증가할수록 모멘텀 역시 증가한다는 것을 알 수 있다. 그리고 분사 사진을 통해서 볼 때, 형상비가 0인 경우가 2, 4인 경우보다 보다 일찍 mist가 발생하고 후반부로 갈수록 액주 형태가 희미해지는 것을 알 수 있다. 이것 역시 형상비가 증가할수록 분사되는 유체의 운동량 전달 효과가 크다는 것을 보여주는 것이다.

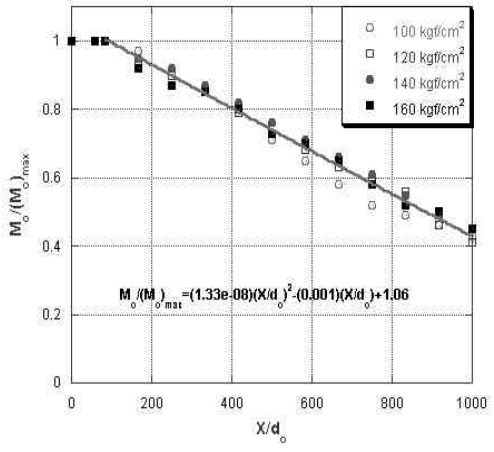
Fig 7.의 사진에서 형상비가 2일 때와 4일 때를 비교해 보면, 형상비가 2인 경우가 좀더 액주의 폭이 작고, mist의 발생도 작은 것을 볼 수 있다. 이것은 노즐 내부의 유동에 의한 것으로 보이는데, 노즐의 수축부를 지나서 빠져나올 때, 형상비가 0인 경우와 4인 경우는 각각 주변의 공기와 노즐 팁의 내벽에 의한 영향을 크게 받지만, 형상비가 2인 경우는 수축부를 지난 유체가 둘의 영향이 최소화 되는 상태에 있기 때문으로 생각된다. 그러나 실제 압력, 속도, 모멘텀등의 데이터를 비교해 보았을 때, 형상비의 증가할수록 각 데이터들의 감소폭이 작다는 공통점을 발견할 수 있다. 따라서 실제 사용되는 현장에서는 사용목적에 맞게 노즐을 선정하고 그에 따라서 형상비까지도 고려해야 할 것이다.



(a) L/d_o=0

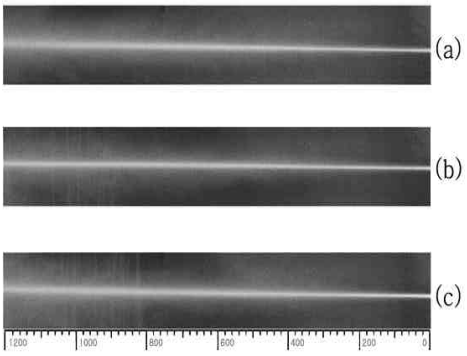


(b) L/d_o=2



(c) L/d_o=4

Fig 6. Momentum distributions with aspect ratios



(a) L/d_o=0, (b) L/d_o=2, (c) L/d_o=4

Fig 7. Visualization of high-pressurized jet

4. 결 론

본 실험은 노즐 분사 중 고압 분사의 특성 연구를 위해 수행된 것이다. 또 유동 특성을 결정하는 많은 인자 중에서 수축각을 고정하고, 형상비를 변화시킴으로써 형상비에 따른 고압 분사류의 특성을 연구하기 위한 것이다. 실험을 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 형상비가 작을수록 노즐 출구 가까운 영역에서는 주변 공기의 영향을 크게 받아 유동의 확산이 증가되었다.

2. 형상비가 작을수록 분사 후류영역에서 미립화와 확산이 증가하는 것으로 나타났다.

3. 형상비가 클수록 전반적으로 압력, 속도, 모멘텀 등의 손실이 감소하여 운동량 보존이나, 관통도가 크게 나타난다.

참고문헌

(1) Madhsarathi nanduri, "The effect of system and geometric parameters on abrasive water jet nozzle wear",International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 615 ~ 623

(2) C. Bauman, S. Pemberton, P. F. Peterson, "Single jet experiments for HIF thick-liquid chambers", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 464 (2001) 400 ~ 403

(3) M. J. McCarthy and N. A. Molloy, "Review of Stability of Liquid Jets and the Influence of Nozzle Design", The Chemical Engineering J. Vol.7 (1974) pp. 1 ~ 20

(4) N. Rajaratnam, "Turbulent Jets", Elsevier Scientific Publishing company, (1976)

(5) Jiusheng Li, Hiroshi Kawano, "Sprinkler performance as affected by nozzle inner contraction angle", irrig Sci(1998) 18. 63-66