

노즐 형상비에 따른 고압 분사류의 유동특성에 관한 실험적 연구
남궁 정환*, 이상진*, 김규철*, 이삼구**, 노병준**

Experimental Study on the Flow Characteristics of High Pressurized Jets
Depending upon Aspect Ratio

J.H.Namkung*, S.J.Lee*, K.C.Kim*, S.G.Lee** and B.J.Rho***

Keywords : High Pressurized Jets (고압 분사), PDPA(위상 도플러 입자 분석기), Aspect ratio(형상비 : l/d)

Abstract

The high-pressurized spray nozzle is used for special washing and cutting with strong impact force. The performance of this nozzle, which focused on spray penetration and radial dispersion, was mainly investigated to maximize the momentum and minimize the flow loss. Hence, our experimental research was conducted by changing the aspect ratio ranging from 0 to 3 with nozzle outlet of 1.1. The spray trajectory for high-pressurized water was experimentally investigated using PDPA diagnostics, which was available at spray downstream region. As the spray at upstream near the nozzle exit did not show the improved disintegration. The results showed empirical correlation with regard to non-dimensional axial velocity distribution, spray penetration, and radial spreading rate with photographic visualization.

1. 서론

고압수 분사는 산업 사회에 응용되는 분야로서 가열이나 열간 압연공정에서 재료 표면에 생기는 스케일(scale)을 제거 하거나 하수관 내부를 세척하기 위하여 응용된다. 또한 일관 작업에 의해 진공 흡인장치로 퇴적물을 탱크로 흡입하여 운반 덩핑하는, 위생적이고도 능률적인 준설 세정작업에 사용되고 있다. 본 연구의 목적은 공기 중으로의 고속으로 물을 분사하여 유동장내의 속도 패턴을 연구하고, 제트와 주위 공기 사이에 발생된 전단력에 의해 야기된 분무확산의 본질 및 범위를 연구하는 것이다. 이를 위하여 PDPA를 사용함으로써 고속의 물 분사 구조에 대한 실험적인 연구결과를 제시하고자 한다.

이에 관련한 논문으로는 Madhusarathi Nanduri 등은 abrasive water jet(AWJ)을 제작하여 고압(200~350 MPa) 상태에서 분사될 때 노즐 마모 정도가 노즐 길이, 입구각, 직경에 의한 효과를 살펴보고,^[1] Bauman 등은 HIF 액체 챔버에서 단일 분사 실험을 통해 노즐의 설계에 따른 레이놀드수 와 웨버수의 변화를 모색하여 최적의 유동 상태를 이론과 실제 실험을 통해 확인하였다.^[2] 또한 McCarthy 등은 액체 분무의 안정성과 노즐 설계의 영향에 대해 고찰하였는데 노즐의 형상비(l/d)와 수축각이 노즐 설계에 따라 변화가 크다고 보고하였다.^[3] Rajaratnam 등은 노즐을 통해 분무가 진행함에 따라 난류강도의 변화를 연구하였다.^[4] Safman 등은 고속 분무시 분사되는 액적의 크기 및 속도를 LDA 장비를 사용하여 측정했는데, 그 요소들을 정성적으로 분석하였다.^[5]

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 고압수 노즐 제작

본 실험에 사용한 고압수 노즐의 성능은 수축부 곡선의 형상에 크게 지배를 받는다. 그러나 이 곡선의 계산식들은 완전한 이론식에 의해서만 유도할 수가 없기 때문에 대부분 실험을 통한 반 실험식(semi-empirical equation)에 의해서 유도되고 있다. 따라서 이 곡선의 식들을 유도하기 위해서는 대부분이 고차원 다항식, 타원의 식, sine 곡선의 식 등이 적용되고 있다. 본 실험에 사용하기 위해 특별히 고안된 노즐은 Fig. 1과 같다

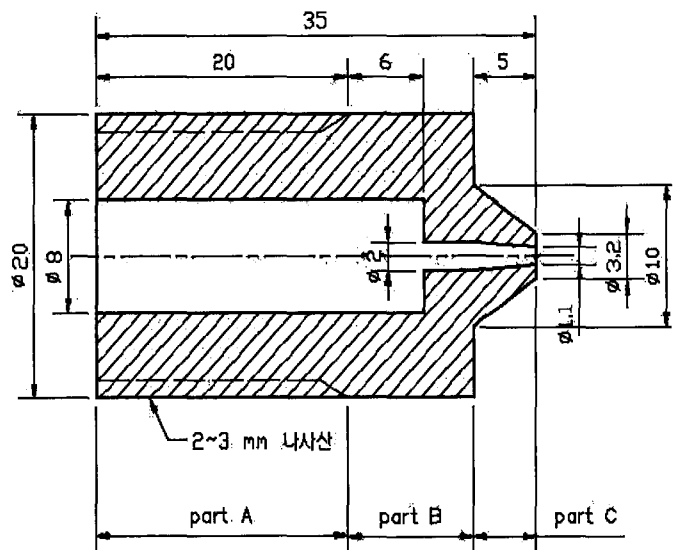


Fig.1 Schematic of nozzle design

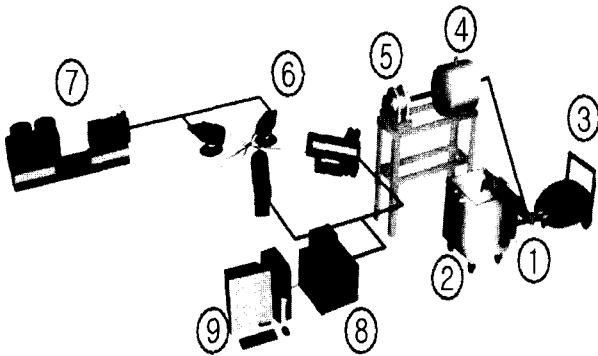
노즐 출구직경이 1.1mm이고, 각각 노즐출구의 길이 대 직경 비로 나타내는 형상비 (l/d)가 0, 1, 2, 3 이다. 노즐 출구로부터

* 전북대학교 대학원, nk9412@hanmail.net
** 전북대학교 공학연구원, comfy39@hanmail.net
*** 전북대학교 기계항공시스템공학부 교수, 자동차신기술 연구 센터 rhobj@moak.chonbuk.ac.kr

분출된 유동분포는 노즐 내부 형상에 의해 크게 좌우된다. 따라서 본 연구에 있어서는, 노즐 직경 1.1mm에서 분출되는 고압 분사류의 축방향 및 반경방향에 대한 유동분포 및 형상비에 따른 유동의 변화를 중심으로 노즐의 성능을 비교하고자 한다. 이를 토대로 어느 것이 반경방향 분포, 즉 분류폭이 작으면서 강한 모멘텀을 가지고 분류의 관통도가 우수한가에 대한 분석의 초점을 두게 될 것이다. 고압수 분사 노즐이므로 미립화 보다는 직진성이 우수하고 미립화 되기 이전의 상태로 노즐 출구로부터 목표 지점까지 분출될 때 보다 큰 모멘텀을 가진 노즐의 형상이 요구되리라 믿어진다.

2.2 고압수 분사 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치 및 계측장비의 구성은 Fig.2와 같다. 주요 구성품으로는 고압 분사펌프, 고압 노즐, PDPA 장치이다. 실험과정은 1) water filter를 통해 들어온 물을 2) water tank에 저장을 한 후, 3) high pressure compressor에서 물을 150bar로 압축을 하고, 또한 compressor에서 압축된 물은 4) surge tank에서 맥동을 방지한 후 5) high pressure nozzle로 분사된다.



- 1) water pressure compressor 2) water filter 3) water storage 4) surge tank 5) high pressure nozzle 6) PDPA system 7) Laser source 8) signal processor 9) computer

Fig.2 Experimental Apparatus

6)~9)는 PDPA system으로, PDPA는 신호처리기, 광학계, 3차원 이송장치로 구성된다. 측정 위치로의 이동은 자동으로 이루어졌다. 신호처리기 (signal processor DANTEC 58N10)는 버스트 검출기 방식으로 입자의 크기와 속도는 도플러 신호의 상대적 위상차와 주파수에 의해 측정되며 각각의 광 배율기 (photo-multiplier)에 공급되는 개별적인 고전압 공급 장치를 갖추고 있다. 광원으로 사용되는 레이저는 공냉식 Ar-ion 레이저 (ion laser technology, max. power:750mW)를 사용하였다. 본 실험에서는 power controller를 사용하여 200mW로 출력을 고정하였

다.

광학계는 송광부(transmitting optics)와 수광부(receiving optics)로 구성되어 있다. 송광부는 레이저 발진부로부터 광섬유(fiber optics)로 전송 받은 레이저광을 40MHz 주파수 편이시켜 속도의 방향성 계측을 가능하도록 하는 브라그셀 (bragg cell)과 광학렌즈로 구성되어 있다. 측정체적을 통과하는 액적의 굴절되는 산란광을 수광부에서 검출하여 광검출기 (photo detector)에서 전기적인 신호로 변환시킨다. 본 실험에서는 산란광을 측정하기 위하여 송광부와 수광부가 이루는 각도는 송광부에서 방사된 레이저광의 진행방향으로 설치한 전방 산란 방식 (forward scattering)을 채택하였다. 측정체적이 한 점에서 이루어져야 2차원 유속 측정이 가능하므로 송광부와 수광부는 벤치에 견고하게 고정하였으며, 컴퓨터에 의해 정확하게 측정 위치로 이송이 가능한 3차원 이송장치에 설치하여 측정위치로 이동하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 고압수 분사 가시화 분석

Fig.3은 150bar의 고압으로 물을 분출 시켜 노즐 출구로부터 150cm의 위치까지를 전단면의 분류형상을 가시화 한 사진이다. 출구 직경이 1.1mm인 노즐의 분류특성을 파악하기 위하여 노즐의 형상비에 따라 실시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 수평방향으로 분류가 계속 직진하고 있어, 실험 시 설정한 지점까지는 분류가 수직방향으로 기울지 않고 직 분사 되고 있음을 알 수 있다. 특히, 형상비가 1과 2인 경우 분류가 노즐출구로부터 어느 정도의 거리를 지나면서 분류가 넓게 확산되고 있음을 보여준다. 이는 분류의 확산현상이 다른 두 경우보다 빠르게 진행되고 있으며, 분류주변의 미립화도 크게 발달하고 있음을 알 수 있다. 또한, 이때 발생한 작은 입자들은 주변공기와의 마찰에 의하여 일부는 분류 속으로 유입되거나, 일부는 공기 중에 부유하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 결국 모멘텀을 감소시키는 부정적인 영향을 가져올 것으로 사료된다. 또 형상비 3의 경우 분류가 심하게 확산되어 유동 되고 있는 것은 노즐 내부의 가공 정밀도가 낮은 것으로 판단된다.

가시화 사진에서 알 수 있듯이 강한 모멘텀을 갖기 위해서는 노즐 가공 상의 사소한 오차도 있어서는 안된다. Fig.3에서 보여주듯이 노즐출구로부터 분류 중심을 따라 하얗게 일직선의 형태로 나타나는데, 이는 분류 중심에서는 액적화 되지 아니한 채 유동 되는 액주의 현상이다. 따라서 이 부위의 강한 운동량으로 인하여 고형화 또는 침적된 부착물들이 제거 될 수 있다. 그러므로, 이러한 유동 영역이 전단면에 균일 분포 유동될 수 있는 노즐의 정량적 특성의 검증이 필요하다.

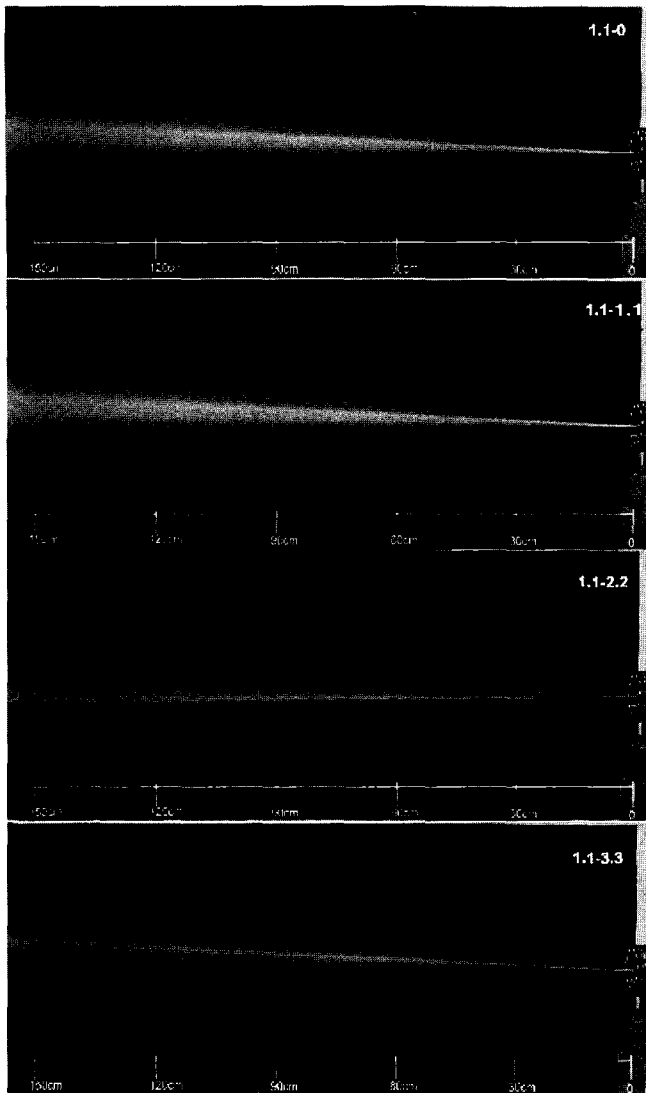


Fig.3 Visualization of High pressure nozzle jet ($l/d=0\sim3$)

3.2 분사 축방향의 유속분포

Fig.4는 노즐 출구직경이 1.1mm의 조건에서 동일한 압력 (15MPa)으로 분사 시켜 노즐 출구로부터 가까운 영역의 분류를 형상비(l/d)에 따라 각각 나타내었다. 이 그림을 통하여 노즐 출구근처부터 유동의 차이가 선명하게 나타나고 있음을 보여준다. 물을 150bar로 분출 시켜 노즐 출구로부터 90cm, 110cm 및 130cm 떨어진 위치에서 측정한 속도 분포이다. 축 방향의 측정 위치나 노즐의 형상비에는 무관하게 각 위치에서 유속분포의 대칭성을 볼 수 있으며, 분류의 중심부에 분류의 모멘텀이 크게 집중되어 있음을 예측할 수 있다. 따라서 Fig. 4에서 알 수 있듯이 분무 중심에서 강한 모멘텀이 유지되어 분류가 보다 멀리 관통되어 갈 수 있음을 알 수 있다. 반면에, 분무 외곽부분에서는 공기와의 충돌 저항력에 의하여 미립화(atomization)된 입자들이 주 분류에 유입 또는 부유하는 현상을 보여주고 있다.

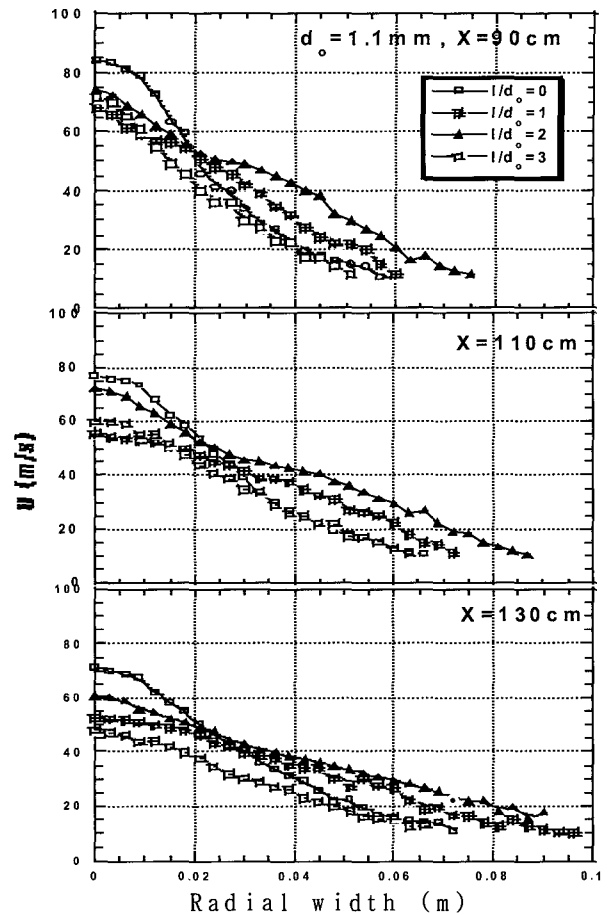


Fig.4 Axial mean velocity distributions with aspect ratio (l/d) ($X=90\sim130$)

노즐을 통과하여 분출되는 대부분의 유동분포는 노즐 내부에서의 유로 형상이나 노즐 팁 부분의 영향에 크게 좌우된다. 따라서 본 연구에서도 고압수를 분사할 때 노즐의 형상과는 어느 정도의 상관성을 보이는지에 대한 결과를 도출하고자 한다. Fig.4의 모든 경우에 있어서 형상비가 작을수록 특히, $l/d=0$ 일 때, 중심영역의 유속이 가장 크게 나타나고 있다. 노즐의 형상비는 분류의 역할에 따라 설계 방향이 달라질 수 있다. 즉, 분류의 확산도, 관통도, 필요로 하는 모멘텀 등이 그것이다. 또한 분무 외곽영역으로 진행 할수록 형상비가 커짐에 따라 강한 운동량을 보유하고 있다. 따라서 보다 넓은 영역의 이 물질 제거에 목적을 둔다면 노즐의 형상비를 크게 선정하는 편이 바람직하다고 여긴다.

Fig.5에서는 노즐 출구로부터 축 방향으로의 속도 분포를 보여준다. 각각의 형상비에 따라 변화하는 형태를 볼 수 있는데, 형상비가 0일때 속도 선도가 동일한 조건에서 가장 큰 분포를 나타내고, 형상비가 증가하여 3일 때가 가장 낮은 유속 분포를 보여준다.

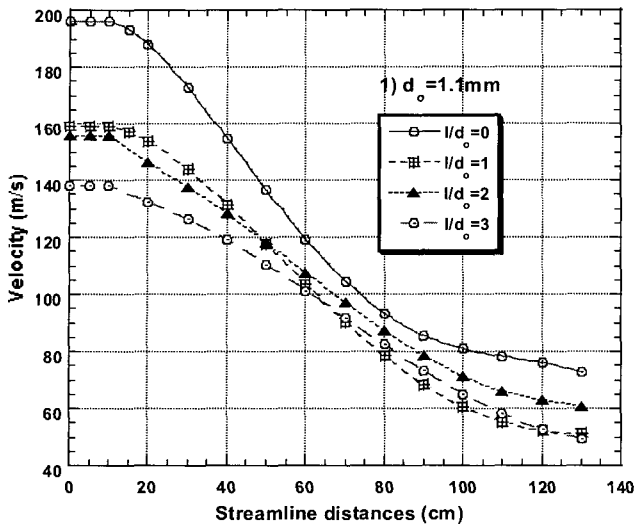


Fig.5 Distributions of axial mean velocity deficit along the axial distance

그림에서 일 수 있는 바와 같이 각각의 형상비 조건하에서 공통된 특징은 노즐 출구에서는 포텐셜 코어 (potential core)의 영향으로 인하여 노즐 출구로부터 약 10cm 위치까지는 유속이 유지됨을 보인다. 그러나 노즐 출구에서 멀어짐에 따라서 속도 감소 현상이 두드러지고 있다. 한편, 형상비가 0일 때 가장 큰 유속분포를 갖는 이유는 고압수가 노즐로부터 분출될 때 노즐 팁 길이로 인한 마찰손실 (friction loss)이 가장 적어 상대적으로 큰 모멘텀을 유지 되는 것으로 사려 된다.

Fig.6에서는 직경 대 거리비(x/d_0)에 따른 중심점의 속도 비(U_m/U_{cl})로 무차원화한 그림이다.

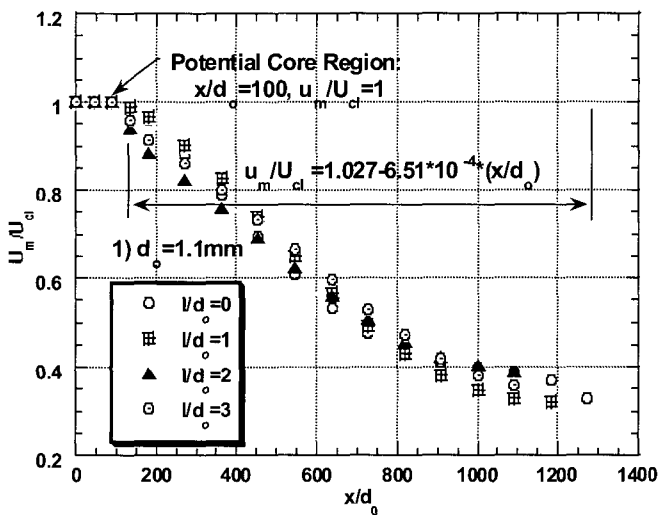


Fig.6 Non-dimensional axial mean velocity distribution as a function of x/d_0

고압수 고속 분사에서는 일반적으로 노즐 직경의 100배가 되는 영역까지는 포텐셜 코어 영역이 유지 되어 분류 중심 축상의 속도가 동일한 값을 갖게 된다. 그러나 유동방

향의 거리가 멀어짐에 따라 속도가 크게 감소하여감을 알 수 있다. 이는 노즐 출구로부터 멀어짐에 따라 분사류는 액주가 파산 되어 미립화 단계로 변하여 감으로서 액적화된 분류는 급격한 운동량의 감소로 유속의 감소를 초래하게 된다. Fig.6에서도 이 현상이 뚜렷하게 나타나 있음을 볼 수 있으며, 본 실험 데이터에 의한 무차원 속도 감소 현상을 반 실험식

$$U_m/U_{cl} = 1.027 - 6.51 \times 10^{-4} (x/d_0) \quad (1)$$

로 나타낼 수가 있다.

4. 결론

고압수 분사에 대한 실험적 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 노즐출구로부터 어느 정도 위치까지는 액적으로 분열되기 이전, 분류는 일정한 운동량을 가지고 외부의 영향을 받지 않는 포텐셜 코어(potential core)를 갖는 액주의 형태로 나타난다.
- 노즐의 형상비가 0일 때 가장 큰 모멘텀을 갖게 되며, 형상비에 관계없이 일정한 속도 감소 현상을 볼 수 있다.
- 분무 중심영역보다 외곽영역에서 급격한 속도감쇠(velocity deficit)를 보이는 현상을 분무 가시화와 속도 분포 선도를 통하여 알 수 있다.

참고문헌

- [1] Madhusarathi 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] Safman, M., Fraidl G. K, "Application of Phase and Laser Doppler Anemometer to the Measurement of Droplet Size and Velocity in Gasoline and Diesel Fuel Injection System", 6th Intl. Symposium, Lisbon, Portugal (1988).