

슬러지 제거용 고압분사 노즐특성에 관한 실험적 연구

이 삼 구

전북대학교

Experimental Study on the Spray Characteristics for Sludge Removal Nozzle with High Pressure

Lee Sam-Goo

Chonbuk National University

Abstract

Water jet trajectories and velocity deficits from a high pressurized nozzles were experimentally observed. In this article, several parameters affecting plugging and erosion onto the steam generator tube were quantitatively analyzed. Visualization, velocity distribution, and spray growth rate with different nozzle configurations have been mainly focused using a 2-D PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer) system. The results indicated that trajectories along the centerline regardless of their momentum has its potential core region. However, the phenomena from the peripheral part need to be meticulously considered. Accordingly, it is evident that quantitative velocity deficits at the outer region are outstanding due to the aerodynamical drag and entrainment.

Key words : high-pressurized jet(고압분사), penetration(관통도), dispersion(분산), C/R(형상비), visualization(가시화), aerodynamic drag(공기항력)

서 론

캐나다 Ontario의 Bruce 원전은 증기발생기 슬러지(Sludge)가 심하게 축적되어 부식 현상에 따른 관막음과 산화철현상에 의한 부차적인 문제를 야기하여 주변 생태계파괴 및 방사능 오염에 의한 근해 어업환경에 막대한 피해를 끼친 사례가 되었다. 고압수를 응용한 증기발생기 슬러지 제거에 대한 필요성은 여러 사례들로부터 중요성이 대두되어, 현재 국내에서도 1996년도부터 고리와 영광 원자력 발전소의 증기발생기(Steam Generator)에 대해서 원전 예방 정비 기간중에 증기 발생기의 슬러지 제거를 위한 세정작업을 실시하고 있다. 세정의 핵심은 최적의 유량 및 압력 조건과 더불어 노즐의 형상

과 직경을 어떻게 선택하느냐에 따라서 결정되게 된다.

현재 국내 산업분야에서 응용되어지는 고압수 분사 세정(cleaning) 방식은 주로 예망그물에 붙어있는 해조류 제거, 김발에 붙어있는 미세한 녹조류 제거, 조선소에서 도킹(docking)시 선박표면(vessel surface)의 녹 및 접착물 제거, 산업용 기계표면에 고착된 그리스나 유지류 또는 이물질 제거, 자동차 세척, 금속가공 및 절단, 건축 공사장의 시공 및 파괴, 액체로켓 연소실험, 농업분야의 항공방제, 파수원에 등에 적용되고 있다. 노즐의 형상 결정과, 유량과 압력에 따른 세정수 주 흐름의 침투(Penetration) 능력 등을 미리 파악함으로써 농수 산업 뿐만 아니라 산업 전 분야에 응용 되어질 최적

의 세정 작업을 수행하기 위한 연구가 절실히 요구되어진다.

연구내용

고압 분사 노즐에서 액체가 분사될 때 외부의 유동을 거시적(Macroscopic)인 관점에서 기술할 때는 분류의 관통도(Penetration), 분류의 진행방향에 대한 속도분포 및 분사각(Spray Angle)에 대한 연구가 절실히 요구된다. 액체 분류의 분산도(Jet Dispersion)란 액적이 공간 내에 퍼진 상태를 말하며, 정량적으로는 액적 체적에 대한 전체 분류체적의 비를 나타낸다. McCarthy(1974)에 의하면 분사 각이 큰 선회(Swirl-Type)형 분류가 분사각이 좁은 단공노즐(Plain Orifice Nozzle)분류에 비하여 분산도가 높게 나타나며, 고압 분사시 저압수의 경우보다 현저히 분산도의 성장률이 크게 된다. Lefebvre(1991)등은 분류의 관통깊이를 정지된 기체(Stagnant Air)내로 분사된 액체 분류의 선단(Leading Edge)이 도달하는 최대거리로 정의 하였고, 이는 분출되는 액체의 운동에너지와 주위 기체에 의한 공기역학적 항력(Aerodynamic Drag)의 상대적인 크기에 의해서 결정된다. 또한, 기체와 액체 사이의 마찰항력에 의한 운동에너지의 소산(Dissipation)이 일어난다. 대체적으로 분사 각(Spray Cone Angle)이 좁고 큰 액적으로 분출되는 액체분류의 침투깊이는 크고, 반대로 분사 각이 크고 미세한 액적으로 분출되는 경우에는 침투깊이가 작다. 침투깊이는 분사압력(Spray Injection Pressure)에 따른 유량, 노즐의 직경(Final Discharge Orifice Diameter), 노즐출구의 직경(d_o)과 길이(l_o)의 비인 형상비(l_o/d_o)에 따라 달라진다.

액체가 고압으로 분사될 때 분사 각은 미립화 되기 이전에는 노즐 근처의 액막이 표면장력에 의해서 안쪽으로 수축되는 효과가 있으며, 미립화된 이후의 하류에서도 주위기체(Ambient Air)의 유입(Entrainment)에 의해 궤적(Spray Trajectories)이 안쪽으로 휘어 들어오는 효과가 있기 때문에 실제 분사 면적은 줄어들게 된다. Beck(1991)등에 의하면 분사 각 역시 분사압력,노즐의 형상이나 치수, 액체의 물성치및 주위 기체의 압력 등에 따라서 변한다. 형상비 증가는 많은 마찰손실을 일으켜 결국은 관내에서 운동에너지의 손실을 낳게된다.

본 연구의 목적은 고압수를 분사함에 있어서 중

요한 요소인 형상비에 따른 확산 및 침투깊이에 대한 유속분포를 규명하여 최적의 노즐 형상을 얻고자 한다.

슬러지 세정노즐 실험장치

PDPA의 속도 측정 원리는 기본적으로 LDA(Laser Doppler Anemometry)의 기본원리와 구성에 기초한 레이저 광선을 이용하여 두 개의 나란한 광속으로 나누고, 그 빔들을 주어진 각으로 서로 교차시켜 측정체적에서 간섭을 일으켜 간섭무늬를 형성시킨다. 슬러지 세정용 노즐특성을 구명하기 위해 본 연구에서는 2차원 PDPA 시스템을 이용하였다. 2차원 PDPA 시스템은 레이저 발진부, 광학계, 신호처리기, 3차원 이송장치로 구성되어 있다. 광원으로 사용되는 레이저는 공냉식 Ar-ion 레이저를 사용하였고, Power controller를 사용하여 200mW로 출력을 고정하였다. 광학계는 송광부와 수광부로 구성되어 있다. 송광부는 레이저 발진부로부터 광섬유(fiber optics)로 전송 받은 레이저광을 40MHz 주파수 편이 시켜 속도의 방향성 계측을 가능하도록 하는 브라셀(Bragg cell)과 광학렌즈로 구성되어 있다. 송광부로부터 동일한 방향으로 방사되는 두 개의 488nm (blue)와 두 개의 514.5nm (green)파장이 서로 교차하여 한 점에서 측정체적을 형성하고 이들 측정체적에 대하여 90도로 두개의 476nm (violet)파장을 갖는 레이저광을 서로 교차하여 3개의 각각 다른 파장의 빔이 한 점에서 측정체적을 형성함으로써 3차원 유속 측정을 가능하게 하였다. 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 측정위치를 이송이 가능한 3차원 이송장치를 설치하였다.

고압수 실험장비

본 연구를 위하여 Fig.1과 같이 플랜저방식의 고압펌프(사용압력: 200 kg/cm², 15 HP, 11kW, 토

출유량 $Q : 30 \text{ l/min}$)를 이용하여 수조로부터 물을 흡입하여 고압탱크(내압 300 bar)에 가압을 한다. 가압된 물이 노즐에 균일하고 맥동(pulsation)현상의 발생을 감소시킬수 있도록 노즐챔버를 둔다. 노즐챔버를 통과한 물은 노즐을 통과하여 정지대기 상태의 공기중에 수평방향으로 분사된다. 분사된 분무액적들에 의하여 형성된 측정체적에 PDPA의 계측에 의하여 축방향 및 반경방향의 분포로부터 얻어진 모든 데이터들은 실시간으로 컴퓨터에 입력된다.

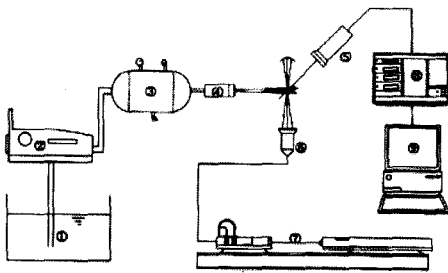


Fig. 1 Schematic diagram

- ① Water tank ② High-pressurized pump
- ③ High-pressurized tank ④ Nozzle ⑤ PDPA receiving optics ⑥ PDPA transmitting ⑦ Laser source ⑧ Signal processor ⑨ Computer system.

1. 분사 가시화(Visualization)

Fig. 2와 같이 노즐 출구로부터의 분류 속도가 크지 않을 때, 대기로 분출된 분류는 주위 대기와 활발히 상호 작용을 하지 않는다. 또한 제트를 발생시키는 노즐로부터 어느 정도 떨어진 축방향 위치에서 액적으로 분열되기 시작할 때까지 제트는 분명한 액주의 형태로 나타나며 이러한 현상은 고압분사보다 저압시에 더욱 분명히 나타난다.

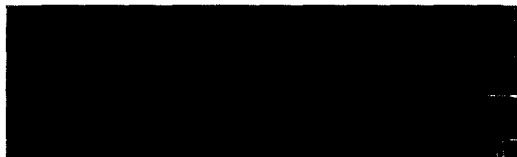


Fig. 2. Visualization at low pressure.

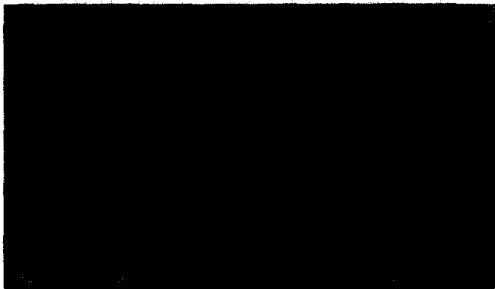
그러나, Fig.3의 경우처럼 노즐을 떠나는 물분사의 속도가 매우 클 때(약 100m/s 이상), 주위대기와 활발하게 작용하며 분류가 축방향으로 진행됨에 따라 반경방향으로 더욱 확산현상이 분명해진다. 고속분사의 경우, 주위 공기와의 동력학적인 상호작용에 의해 조장되는 축대칭 표면과는 나선형상의 불안정한 형상으로 성장하여 사인파형의 분열 메커니즘을 따르게 된다. Fig.3과 같이 노즐출구에서의 속도가 대략 100-200m/s 범위에 있는 물분사를 고려하면, 제트가 노즐을 떠난 직후 주위 공기와의 강한 상호작용 때문에 곧 바로 확산하거나 팽창하며 반경방향으로 퍼진다(Abramovich, 1963, Rajaratnam, 1976). 고속 물분사에서는 확산된 제트에 주위 공기의 유입 현상에 의하여 움직이는 환형모양의 물입자가 뿌연 안개와 같은 모습으로 둘러싸인 고속의 Coherent 코어가 있음을 보여준다.

2. 형상비(l/d_0)에 따른 가시화

Fig.4는 150bar의 고압으로 물을 분출시켜 노즐 출구로부터 150cm의 위치까지를 타겟으로 전단면의 분류형상을 가시화 한 사진이며, 출구 직경이 1.1mm인 노즐의 분류특성을 파악하기 위하여 노즐의 형상비(l/d_0)를 0, 1, 2, 3까지 변화시켰다. 그림에서 보여주듯이 수평방향으로 분류가 계속 직진하고 있어, 실험시 설정한 타겟 지점까지는 분류가 수직방향으로 기울지 않고 있음을 알 수 있다. 특히, (a)와 (b)의 경우 분류가 노즐 출구를 떠나 어느 정도의 거리를 지나면서 분류가 넓게 퍼지고 있음을 보여준다. 이는 분류의 확산현상이 다른 두 경우보다 빠르게 진행되고 있으며, 직진이 진행됨에 따라 미립화가 가속이 되어 주변 공기속으로 유입되는 현상을 알 수 있다. 또한, 이때 발생한 작은 입자들은 주변공기와의 마찰에 의하여 일부는 분류속으로 유입되거나, 일부는 공기중에 부유하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 결국 모멘텀을 약화시켜 증기 발생기 전열관에 침적되어있는 이물질 제거에 부정적인 영향을 가져올 것으로 사료된다. 그림에서 보여주듯이 노즐 출구로부터 분류 중심을 따라 하얗게 일직선의 형태로 나타나는데, 이는 분류 중심에서는 액적화 되지 아니한 채 강한 축방향 모멘텀을 보유 한 영역이다. 따라서 이 부위의 강한 운동량으로 인하여 전열관에 침적되는 이물질이나 부식되는 요인들을 제거할 수 있다.



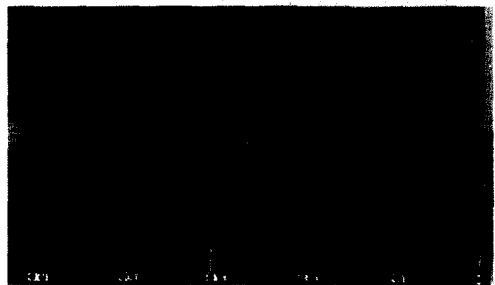
(a) Nozzle exit (do): 1.1mm, C/R(l/do): 0



(b) Nozzle exit (do): 1.4mm, C/R (l/do): 1.14



(c) Nozzle exit (do): 1.1mm, C/R (l/do): 2



(d) Nozzle exit (do): 1.1mm, C/R (l/do): 3

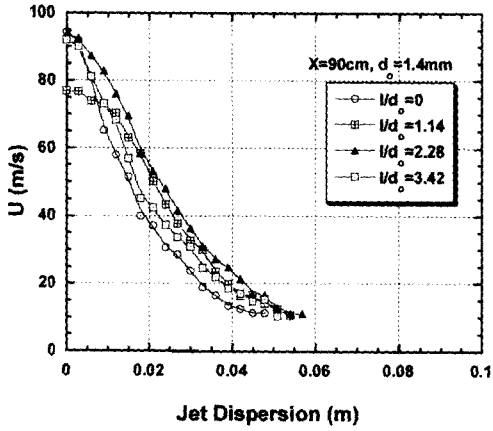
Fig. 4. Visualization with nozzle configuration ratio (C/R).

3. 분류중심과 외곽에서의 분무거동

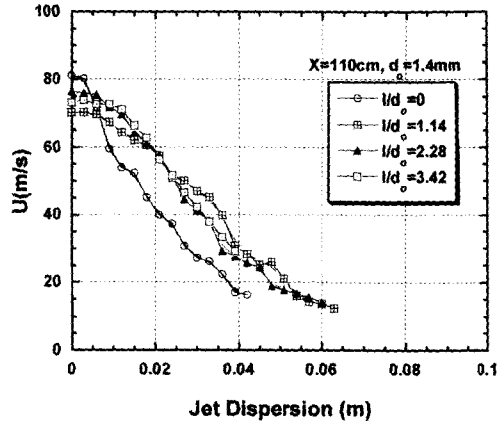
Fig. 5의 (a)~(f)는 세정수를 150bar로 분출시켜 노즐 출구로부터 90cm, 110cm 및 130cm 떨어진 위치에서 측정된 속도분포이다. 측정된 노즐은 출구직경이 1.1mm와 1.4mm이며, 이에 따라 노즐의 형상비를 0~3.42까지 달리하여 유동의 확산도(dispersion)를 비교하였다. 이를 위해 분류구조가 상하·좌우 대칭의 구조를 하고 있어 반 단면만을 분석하였다. 모든 경우에 있어서 분류 중심에서 최대 속도분포를 보이는 가우시안(Gaussian)커브 형태를 띄고 있다. 출구로부터 측정된 영역인 90~130cm 까지의 속도 분포는 노즐의 형상비와는 관계없이 분무 중심영역보다는 외곽영역에서 급격한 속도감쇠(velocity deficit) 현상이 두드러져 있음을 보여준다. 이는 그림에서 알 수 있듯이 분무 중심에서는 외부간섭에 대한 영향이 적어 강한 모멘텀을 유지한 채 분류 관통도(penetration)가 유지되고 있음을 알 수 있었다. 반면에, 분무 외곽부분에서는 미립화(atomization)된 입자들이 주위 공기와의 마찰 및 항력(drag)으로 인하여 유입(entrainment) 현상을 설명한다.

4. 형상비에 따른 속도 분포비교

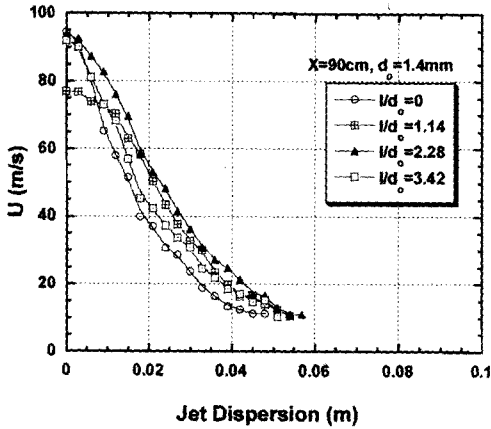
Fig. 5의 모든 경우에 있어서 형상비가 작을수록 특히, $l/d_o = 0$ 일 때, 중심영역의 모멘텀이 가장 크게 나타나고 있다. 이는 중심부분에서 분류의 관통도 측면에서 낮은 형상비를 두어 설계하는 것이 타당하다 여겨진다. 이와 반대로 형상비가 증가할수록 중심영역의 모멘텀이 작아지고 있음을 보여준다. 그러나 분무 외곽영역으로 진행할수록 형상비가 커짐에 따라 강한 운동량을 보유하고 있다. 따라서 보다 넓은 영역의 이물질 제거에 타겟을 삼는다면 노즐의 형상비를 크게 선정하는 편이 바람직하다고 여긴다. 이는 분무 확산(dispersion)이 활발히 진행되었음에도 불구하고 외곽영역에서는 상당히 큰 모멘텀을 유지한 채 유동되고 있어 적당량의 분사 각이 요구되어진다. 일반적으로 분류의 확산 폭이 클수록 내재된 운동량의 변화 즉, 소산(dissipation) 현상이 일어나게 되어 속도감소가 있다는 기존의 미립화 개념과는 대립되는 것이어서 주목할 만한 사실이다.



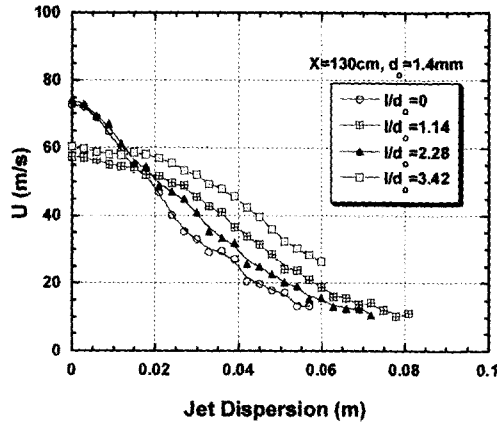
(a) X=90cm, do=1.1mm



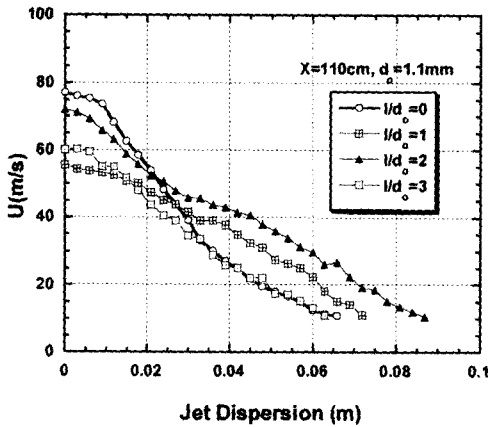
(d) X=110cm, do=1.4mm



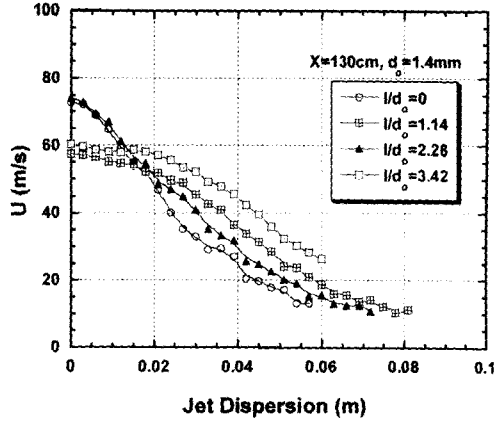
(b) X=90cm, do=1.4mm



(e) X=130cm, do=1.1mm



(c) X=110cm, do=1.1mm



(f) X=130cm, do=1.4mm

Fig. 5. Velocity distribution and dispersion.

5. 속도감쇠(velocity deficit) 현상비교

Fig. 5에서 1.1mm의 경우, 속도분포가 중심에서 외곽으로 갈수록 점진적인 감소현상을 보인다. 1.4mm의 경우, 중심에서 외곽분류로 급격한 속도 감소를 나타낸다. 따라서 1.1mm의 경우 분류 폭은 넓으면서 완만한 속도 감소를, 1.4mm의 경우에는 분류 폭이 상대적으로 좁은 직진성을 보이거나 에너지를 손실이 크게 나타난다.

결론

수산분야의 해조류와 녹조류, 선박표면의 녹, 산업용 기계표면에 고착된 이물질 제거 및 자동차 세척 등에 적용되는 고압분사 노즐의 특성은 다음과 같다.

1. 노즐출구로부터 액적으로 분열되기 이전, 분류는 강한 운동량을 가지고 외부의 영향을 받지 않는 Potential core를 갖는 액주의 형태로 나타난다.
2. 노즐의 형상비와는 관계없이 분무 중심영역보다 외곽영역에서 급격한 속도 감소 현상을 보인다. 이는 분무 중심에서 강한 모멘텀을 유지하며, 외곽에서는 분열된 입자들이 마찰 및 항력에 의한 유입현상이 있기 때문이다. 또한, 노즐형상비가 0 일 때, 중심영역의 모멘텀이 가장 크게 나타난다.

참고문헌

- 1) McCarthy, M.J.(1974) : Review of Stability of Liquid Jets and the Influence of Nozzle Design, The Chemical Engineering, Vol. 7, 1-20.
- 2) Lefebvre, A.H(1991) : Geometric Effects on Spray Cone Angle for Plain Orifice Atomizers, Atomization and Sprays, Vol. 1, 253-268.
- 3) Beck, J.E. and Koblisch, T.R. (1991) : Liquid Sheet Disintegration by Impinging Air Streams, Atomization and Sprays, Vol. 1, 155-170.

2003년 4월 6일 접수
2003년 4월 20일 수리