

증기발생기 세정 장비용 고압 분사 노즐 개발

Development of a high pressure water jet nozzle for steam generator lancing system

김남훈*, 정우태*, 박용수***, 최유성*, 손선영*, 노병준**

*한전전력연구원, **전북대학교, ***한빛 ENG

요 약

증기발생기 내부의 Tube Sheet에는 시간이 지날수록 금속성 슬러지가 침적된다. 이는 열전달 효율을 저하시키는데 이를 방지하기 위해 튜브 시트 및 전열관을 세정하는 것이 권장되고 있다. 원자력발전소 증기발생기 세정 효율은 노즐 성능에 많은 영향을 받는다. 노즐 성능에 영향을 미치는 많은 요소 중에서 형상비가 노즐 분출수의 형태와 성능에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 노즐 형상비를 변화시키면서 노즐 분출수의 유동 특성을 실험적으로 고찰하였다. 이 실험을 통해 형상비를 증가시키면 물 분사 제트 에너지가 감소됨을 알 수 있었다. 결론적으로 노즐 성능은 노즐의 형상비에 크게 좌우됨을 분명히 알 수 있었다.

Abstract

Metal-oxide sludge accumulates on the tube sheet of nuclear steam generators as time passes. To prevent degradation of thermal efficiency of nuclear steam generators, it is recommended to clean the tube sheet and the tubes. It is important that efficiency of lancing of steam generators in nuclear power plants depends on nozzle performance. The aspect ratio, among many factors affecting the performance of a nozzle, plays a major role in determining the outer flow pattern and nozzle performance. So in this study, some flow characteristics with the variation of nozzle aspect ratios have been experimentally investigated. By this experiments, the increase of aspect ratio causes decrease of water jet energy. As a result, it was obviously concluded that the nozzle performance depends on the aspect ratio of nozzle.

1. 서론

원자력발전소의 증기발생기 2차계통 내부에는 계통을 구성하는 펌프, 배관 등 수많은 부품들의 침·부식으로 생성된 금속성 슬러지가 침적된다. 이 금속성 슬러지는 전열관의 균열 및 마모를 촉진시키고 열전달 효율을 저하시키므로 증기발생기 제작사에서는 예방정비 기간 중 정기적으로 슬러지를 제거토록 권고하고 있다. 따라서 원자력발전소 화학부에서는 매 예방정비 기간마다 슬러지 제거 작업을 수행하고 있으며, 화학세정이 필요한 특별한 경우를 제외하고는 고압수를 분사하여 제거하는 방식을 활용하여 세정작업을 실시하고 있다.

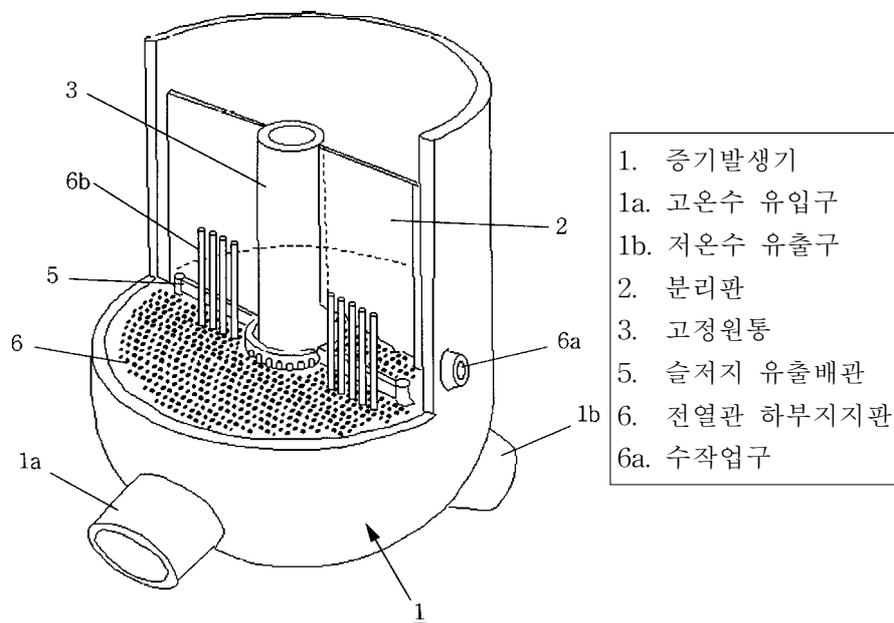


Fig. 1 Schematic configuration of steam generator

Fig. 1은 증기발생기 내부의 개략도이다. 실제로 세정작업을 수행하기 위해서는 수작업구를 통하여 세정장비를 투입해야 되고, 세정작업을 해야 하는 튜브들의 간격이 좁기 때문에 기구 설계에 많은 어려움이 있다. 하지만 일단 이러한 공간적인 제약을 해결하고 나면 세정 효율은 고압수를 분사하는 고압 분사 노즐의 성능에 따라서 달라진다.

고압 분사 노즐은 일반적으로 세정용과 절단용으로 크게 구분할 수 있다. 고압 분사 노즐은 $100 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 이상의 고압으로 액체나 액체·기체 혼합물을 대기 중으로 분사하는 것을 말한다.

고압 분사 노즐의 성능을 결정하는 인자는 수축비(노즐의 외경과 내경의 비), 노즐 수축부의 수축각, 노즐의 형상비(aspect ratio) 등을 들 수 있다. 지금까지 수축비나 수축각에

의한 노즐의 분사 특성에 대한 연구 결과들은 많이 보고 되었으나, 노즐의 형상비(aspect ratio)에 의한 노즐의 분무 특성에 대한 연구는 미비한 실정이다. McCarthy[1] 등은 Liquid jet의 안정성과 노즐 디자인의 영향에 대한 연구를 통해, 노즐의 중요 요구 사항은 potential 에너지를 kinetic 에너지로 변환하는 효율이며, 이는 급축소나 곡률을 이용해 얻을 수 있다고 밝히고 있다. 또한 노즐의 형상비(aspect ratio)가 초기 jet의 속도에 큰 영향을 미치고, 최고의 성능을 얻기 위해 노즐의 내부 표면의 가공도가 중요함을 밝혔다. Ohm과 Senser [2]등은 오리피스 연구에서 round를 준 경우 C_d 가 증가한다고 하였다. Kiljanski와 Pearce [3-6]등은 유동의 형태를 separated flow, separated flow followed by attachment, cavitated flow로 구분하였고, separated flow와 cavitated flow의 경우 축소된 유동 영역에 의해 작은 C_d 값을 가진다고 하였다. Ramamurthi [7]등은 sharp-edged 오리피스의 연구를 통해 오리피스 내부유동과 형상비(aspect ratio)에 따른 유량계수관계를 밝혔다.

본 논문은 세정 장비에서 사용되는 고압노즐의 형상비에 따른 분무 특성 연구를 통해 증기발생기의 세정효율을 최대한으로 할 수 있는 고압 분사 노즐 개발을 위한 데이터를 축적하고, 산업에 이용할 수 있도록 하는데 목적이 있다고 하겠다.

2. 실험 장치 및 측정 방법

2.1 실험 노즐

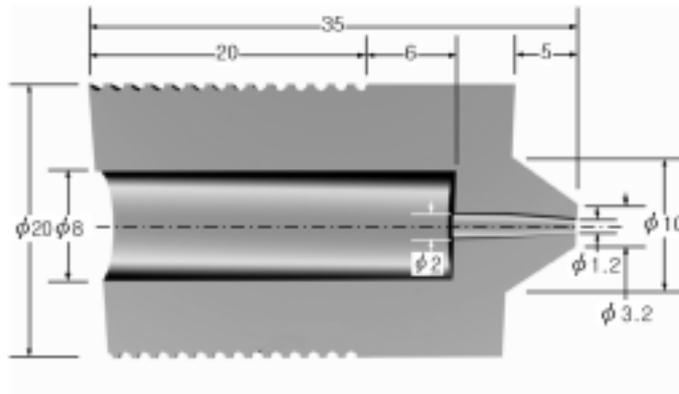


Fig 2. Schematic configuration of high-pressurized jet nozzle

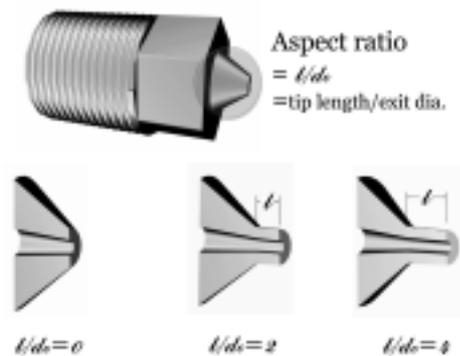


Fig 3. Aspect ratio of used nozzle

Fig 2는 세정을 목적으로 특별히 고안된 노즐로써, 1.2mm의 직경(d_o)과 4.6°의 수축각을 갖는다. 실제 분무의 특성을 결정하는 부분은 Fig. 2에서 나사산 이후의 직관부와 노즐 부분이다. 직관부와 노즐 끝단부의 직관길이와 수축각이 분무의 특성을 결정한다.

Fig. 3은 실험에 사용된 세 가지 타입의 노즐을 나타낸 것으로, 그림에 나타난 것처럼

노즐 직경(d_o)과 노즐 팁의 길이(l)의 비로 형상비(aspect ratio)가 결정된다. 본 실험에서는 각각 0, 2, 4 세 가지 타입의 노즐이 사용되었다. 각 타입 노즐들에 대하여 실험을 통하여 유량계수, 분사류의 압력, 분사류의 확산각, 압력 강하를 측정하고, 그 데이터를 통해 고압 분사 노즐의 유동에 대한 특성을 연구하고자 하였다.

2.2 실험 장치

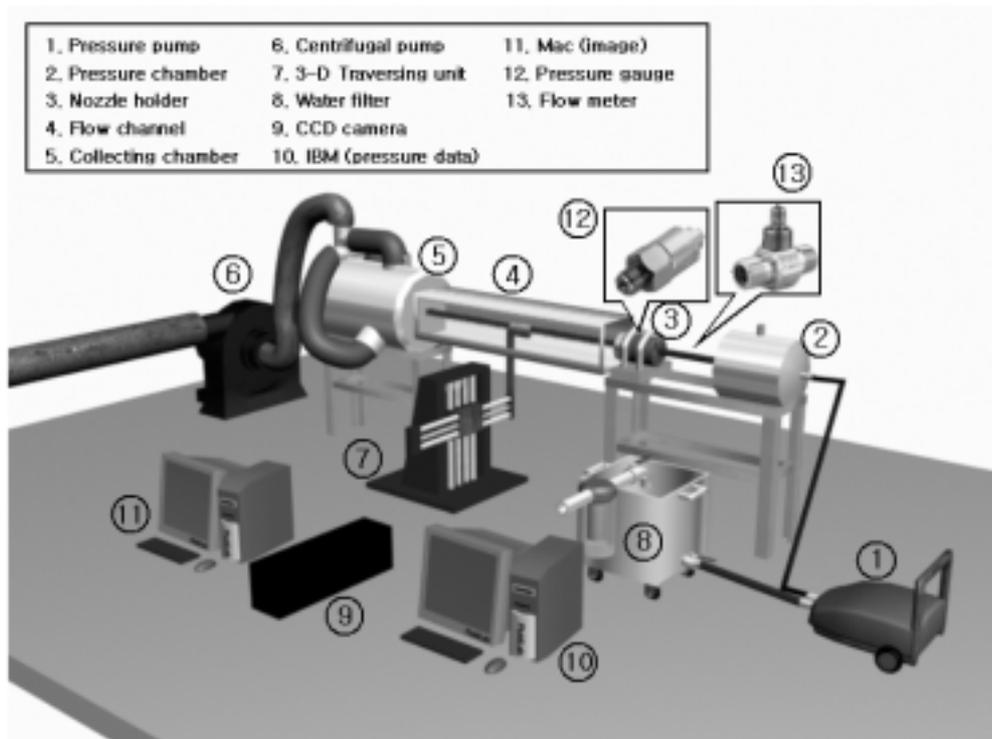


Fig. 4 Experimental apparatus of high-pressurized system

Fig. 4는 고압 노즐 분사 장치를 나타낸 것이다. 노즐 분사 장치는 크게 세 부분으로 구성되어 있다. 각 부분은 고압 유체를 공급하기 위한 유체 공급부, 분사된 분무의 데이터와 이미지를 획득하기 위한 채널부, 채널부를 통과한 유체를 포집하고 채널 내부의 정지된 공기를 흡입·배출하기 위한 포집부로 구성된다.

Fig. 4에서 유체 공급부는 물에 포함된 이물질과 불순물을 제거하기 위한 water-filter (⑧)와 유체에 압력을 공급하기 위한 압축 펌프(①), 지속적으로 일정한 압력을 유지시킬 수 있도록 고안된 공기실을 포함한 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 1800mm까지 따내기를 하였다. 포집부는 포집 챔버(⑤)와 채널 내부의 정지된 공기를 흡

입하기 위한 centrifugal pump(⑥)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 방지하기 위한 것이다. Fig 4.에서 traversing(⑦) unit는 데이터 획득을 위한 장치를 장착하여 측정위치를 정확하게 제어하기 위한 3차원 이송장치이다.

2.3 측정 장치

본 실험에서는 동일한 실험 조건을 위해 Fig. 4에서 압력 챔버(②)와 노즐부(③) 사이에 유량계(⑬)를 설치, 각 노즐에 대해 동일한 유량을 공급하도록 하였다. 실험에 사용된 유량은 각각, 9.5, 10.2, 10.8, 11.6 L/min으로 이 값은 형상비(aspect ratio)가 0인 노즐을 기준으로 압력 챔버에서 100, 120, 140, 160 kg_f/cm^2 의 압력이 작용할 때의 유량을 적용한 것이다. 분사류의 압력측정을 위해 직경 8mm의 pitot-tube를 사용하였다. 분사류의 압력 데이터 획득을 위해 250 psi(pressure systems)의 압력 센서를 pitot-tube에 연결하였고, 공급압을 측정하기 위해 노즐부(③)에 200 kg_f/cm^2 (Hydro-technik)의 압력 센서(⑫)를 설치하여, 각각의 데이터를 IBM PC(⑩)를 통해 획득하였다. 센서를 통해 획득한 데이터는 각 단면에서 얻어진 최대치의 평균값으로, 각 단면에서 유동의 중심부분에서 얻어진 데이터들이다. 데이터의 측정은 노즐 직경을 기준으로 50do부터 1200mm까지 측정을 하였고, 노즐 출구로부터 150do까지는 12mm(10do), 그 이후는 36mm(30do)간격으로 측정을 하였다. 또한 분사 이미지 촬영을 위해 CCD 카메라(⑨)와 이미지 프로세싱을 위한 Mac(⑪)을 설치해 분사 이미지를 획득하였다. 다음 Table. 1은 본 실험에서의 실험조건을 정리하였다

Table 1 Experimental conditions

| 구 분 | 내 용 | 비 고 |
|-------|-----------------------|------------|
| 작동 유체 | water(20℃) | |
| 노즐 타입 | 0, 2, 4 | l/d_o |
| 작동 조건 | 9.5, 10.2, 10.8, 11.6 | $Q(L/min)$ |
| 측정 구간 | $50d_o \sim 150d_o$ | 12mm 간격 |
| | $150d_o \sim 1000d_o$ | 36mm 간격 |

3. 분석 및 고찰

3.1 노즐의 분무 특성

Fig. 5는 노즐부에 공급되는 유량과 압력과의 관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 동일 공급 유량에 대해 형상비(aspect ratio)의 증가는 노즐부의 압력을 증가시킴을 볼 수 있다. Table. 2는 각 타입의 노즐에 대한 유량계수의 평균치를 구한 것이다. 유량계수는 실제 공급유량과 노즐부에서 측정된 압력과의 관계를 통해 식 (1)을 이용해서 구한 것이다.

$$Q_{act} = C_d A_o \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \text{-----(1)}$$

식 (1)에서 A_o 는 노즐 출구 단면적을 나타낸다. 이상의 결과를 통해, 노즐 텃 길이(l)의 증가와 유량계수는 반비례적인 특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

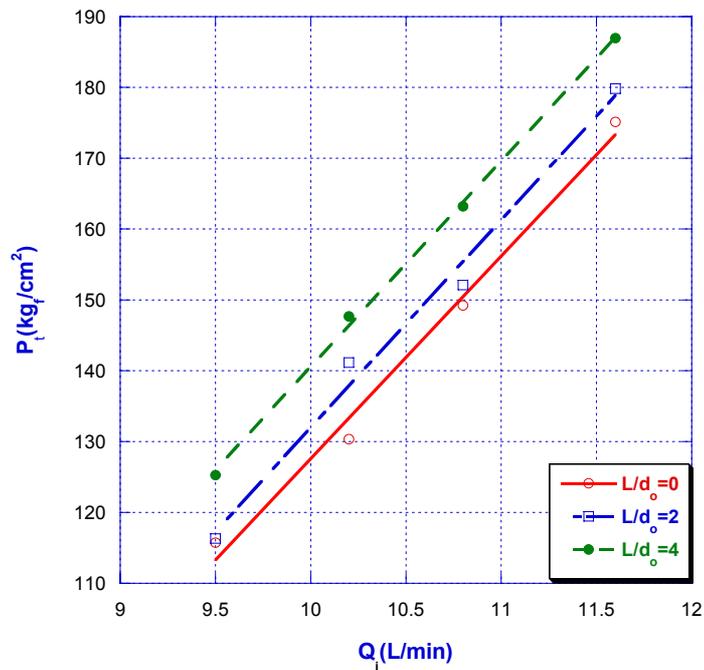


Fig. 5 Nozzle chamber pressure distribution with aspect ratio

Table 2 C_d with aspect ratio

| 형상비 | 0 | 2 | 4 |
|-------|------|------|------|
| C_d | 0.93 | 0.91 | 0.89 |

3.2 Pressure Distribution

Fig. 6~8은 분무 중심에서 얻어진 평균 압력을 나타낸 그림이다. Fig. 6은 동일한 형상비($L/d_o=4$)에 대하여 공급 유량을 변화시켰을 때, 나타나는 압력 분포를 도시하였다. 공급 유량이 증가함에 따라 노즐 출구에서의 압력이 비례적으로 증가하는 현상을 보이고

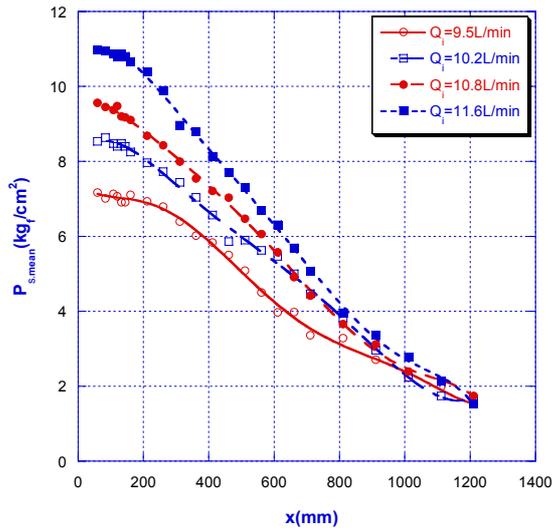


Fig. 6 Pressure distribution with inlet flow rate

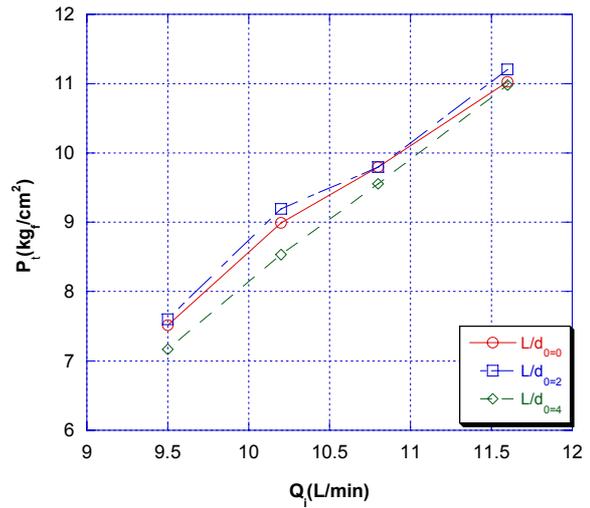
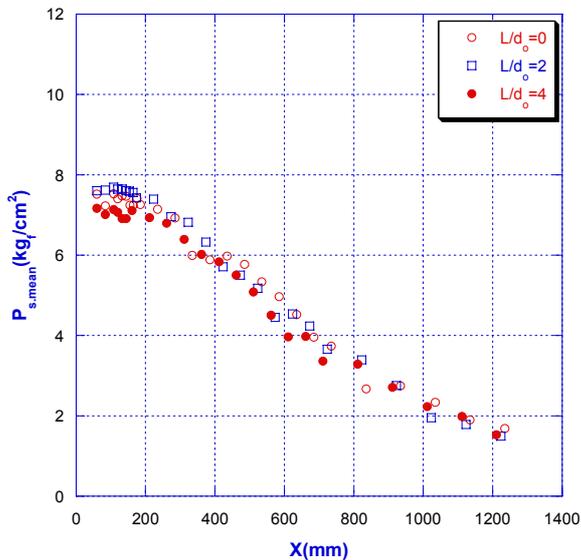
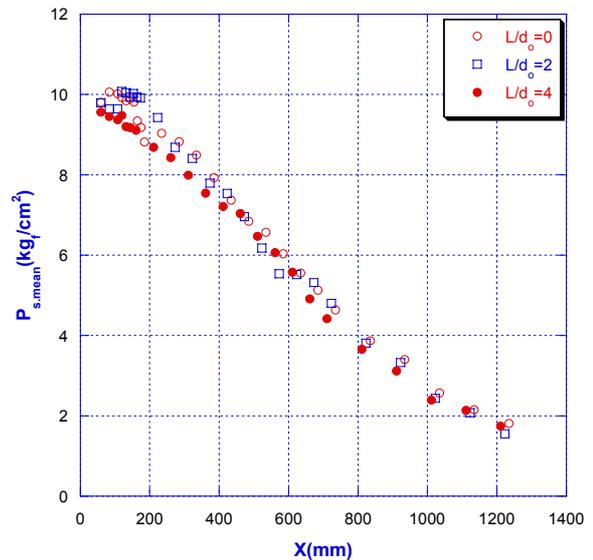


Fig. 7 Pressure distribution with aspect ratio ($x=50\text{mm}$)



(a) $Q_i = 9.5\text{L/min}$



(b) $Q_i = 10.8\text{L/min}$

Fig. 8 Pressure distributions with aspect ratio

있음을 알 수 있다. Fig. 7은 분무 상류 영역($x=60\text{mm}$)에서 각각의 유량에 따른 압력 분포를 나타내고 있다. 유량이 증가 할수록 압력 또한 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6, 8에서 공통적으로 나타나는 현상은 노즐 출구에서 200mm지점까지는 압력 분포 v 가 일정한 구간이 나타나는데, 이는 일반적으로 퍼텐셜 코어(potential core)영역이 $100d_0$ 까지 유지된다는 기존 연구 결과와 비교해 볼 때, 본 실험에 사용된 노즐이 분무 초기의 에너지를 더 오래 보존한다고 할 수 있다. 이는 최초에 노즐들을 설계할 때 충격량을 최대한 멀리 까지 집중하여 전달하도록 손실을 작게 하는 구조로 설계했기 때문이다. Fig. 8에서 유동은 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 먼저 0-200mm구간은 앞서 언급했던 것처럼 퍼텐셜 코어 영역으로 분무 초기의 압력이 거의 일정하게 유지되는 영역이다. 200-800mm구간은 그림에서 기울기가 가장 급격한 구간으로 공기와의 마찰에 의해 가장 많은 에너지 손실이 발생한다. 800-1200mm구간은 전 구간에 비해 적은 에너지를 손실하기 때문에 기울기가 보다 완만하게 나타나고 있다. 두 번째 구간에서 공급 유량, 즉 초기 압력이 클수록 에너지 손실이 크게 발생하고 있고, 각각의 유량 조건에 대해 1200mm지점에서 거의 동일한 압력 값을 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 유량을 달리 했을 때, 형상비에 따른 압력분포를 나타낸 그림으로, 전반적으로 압력 분포 형상이 비슷한 양상을 보이고 있고, 출구 압력과 1200mm에서의 압력 값이 형상비에 관계없이 거의 비슷한 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

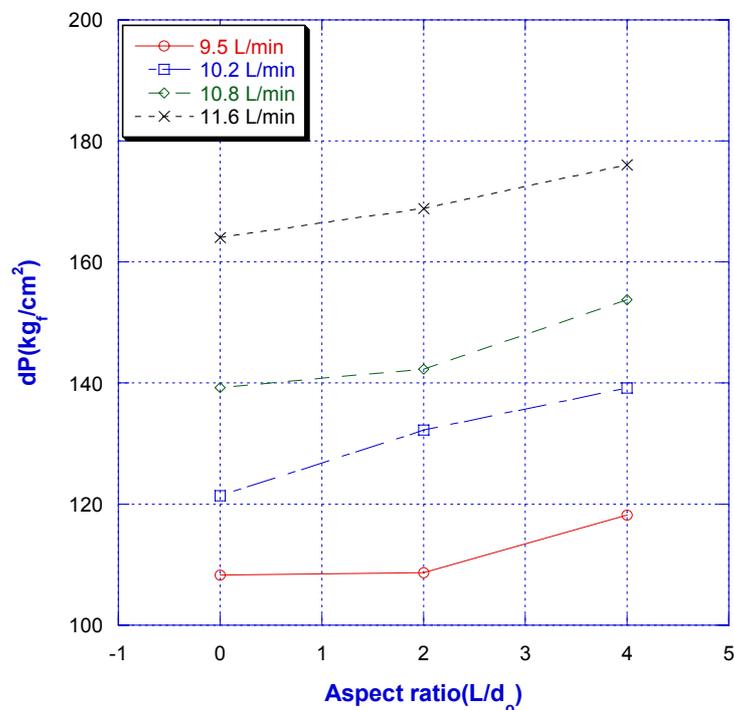


Fig. 9 Pressure drop at nozzle exit

그러나 Fig. 6에서 동일한 유량에 대해 노즐 챔버에서의 압력이 $5\sim 10 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ 의 차이를 보이고 있으므로 이 차이를 감안할 때, 형상비가 증가할수록 분무의 압력 감소는 더 큰 것을 알 수 있다. 이 사실은 노즐 챔버 압력과 노즐 출구에서의 압력 차이를 나타낸 Fig. 9를 보면 확실히 알 수 있는데, 동일 형상비에 대해서 공급 유량이 증가함에 따라 압력차가 커지고, 동일 유량에 대해서도 형상비가 증가함에 따라 압력차가 증가함을 알 수 있다.

3.3 Diffusion angle

증기발생기의 세정 효율을 감안 할 때, 분무각은 초기의 운동량을 세정작업을 하고자 하는 튜브까지 전달 할 수 있도록 작은 것이 좋다. 운동량을 최대한 전달 할 수 있는 분무 구조는 미립화가 전혀 일어나지 않는 액주 상태의 형상이다. 그러나 그렇게 되면 실제 세정 할 수 있는 면적이 너무 작아지므로 이는 바람직한 분무 구조라 할 수 없다. 그러나 본 실험에서 사용된 노즐들의 분무 구조는 분무 하류로 갈수록 분무 영역이 넓어지는 구조이다. 따라서 이미 충분한 세정면적을 확보 할 수 있는 구조이므로 운동량을 최대한 전달하기 할 수 있도록 확산각이 적은 노즐이 적당 하다 할 수 있다.

Fig. 10는 노즐 챔버 압력에 대한 확산각(Diffusion angle)을 나타낸 것이다. 확산각은 노즐 출구로부터 $60d_o$ 거리에서 측정된 것이다. Fig. 10에서 보듯이 형상비가 증가할수록 확산각이 증가하고 있다. 특히 형상비가 0에서 4로 증가할 때, 확산각이 거의 2배로 커짐을 알 수 있다. 각각의 경우는 일정한 기울기를 가지고 있다. 실제 세정 작업에서는 적당한 확산각이 필요하지만 너무 큰 확산각을 가지는 것은 분사류가 가지는 에너지가

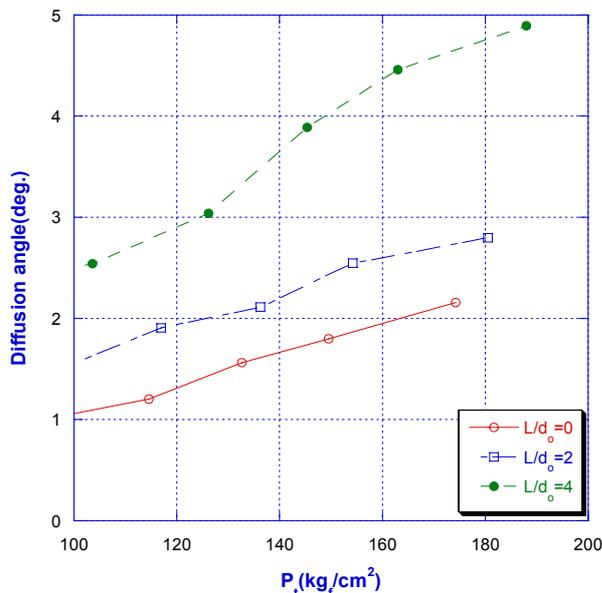
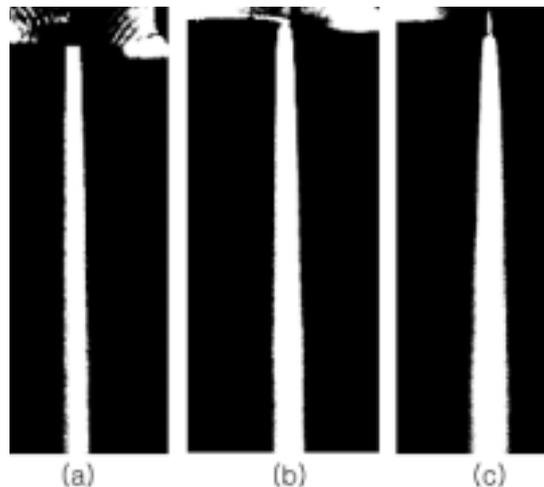


Fig. 10 Diffusion angle with aspect ratio



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

Fig. 11 Visualization of Diffusion angle with aspect ratio ($Q_i = 11.6L/\text{min}$)

분산됨을 의미하므로 좋은 성능이라고 할 수 없다. Fig. 11는 $Q_f=11.6L/min$ 의 공급 유량을 가질 때, 각각의 형상비에 대한 분무 이미지를 촬영한 것이다. 구간은 노즐 출구에서 $60d_o$ 까지이다. 이 그림에서도 형상비에 따른 확산각 변화가 뚜렷하게 나타난다. 이것은 수축부 이후의 노즐 팁 직관부에서 나타나는 박리현상과 재 부착으로 인하여 액주 표면에 발생한 교란 때문이라고 사료된다. 이 교란은 노즐을 통과하여 공기와의 상호 작용을 촉진시킴으로서 액주의 미립화를 활발하게 하는 것으로 알려져 있다.

4. 결 론

본 실험은 증기발생기 세정 장비용 고압 분사 노즐의 형상비에 따른 분무 중심축에서의 받는 압력과 확산각, 유량계수 등을 고찰하였다. 이러한 분무 유동 특성을 통하여 노즐 성능을 평가하고 최적의 고압 분사 노즐 개발을 위한 설계 데이터를 확보하였다. 실험을 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 동일한 노즐에서 공급 유량의 증가는 초기 압력을 증가시키지만, 노즐 외부에서 분무의 거리에 대한 압력 감소 기울기가 증가하는 경향을 보인다. 결국 임의의 거리, 본 실험에서는 1200mm($1000d_o$)이상의 거리에서 공급유량과 관계없이 거의 일정한 분무압력을 가졌다.

2. 형상비의 증가는 분무의 확산각의 증가를 보였고, 형상비가 0에서 4로 증가할 때, 확산각은 약 2배가량 증가하는 경향을 보였다. 증기 발생기 세정장비에서는 확산각이 적은 노즐이 세정작업에 유리하다고 판단된다.

3. 동일한 공급유량 조건일 때 분무 중심축선상에서 받는 압력은 형상비가 작을 수록 증가하고, 유량계수도 커진다. 이는 수축부 이후의 노즐 팁 직관부에서 나타나는 박리현상과 재 부착으로 인하여 액주 표면에 발생한 교란 때문이라고 사료된다. 또한 중심축선상에서 받는 압력이 높을수록 증기발생기의 튜브에 부착 되어 있는 슬러지 제거에 용이하다.

참고문헌

- (1) M. J. McCarthy, 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
- (2) T. R. Ohm, D. W. Senser, A. H. Lefebvre. " Geometrical Effects on Discharge Coefficients for Plain Orifice Atomizers". Atomization and Sprays . (1991) pp. 137~153

- (3) T. Kiljanski, Discharge coefficients for free jets from orifices at low Reynolds number. *ASME J. Fluids Engineering* (1993), pp. 778~781.
- (4) I. D. Pearce, A. Lichtarowicz, Discharge performance of long orifices with cavitating flow, in: *Proc. Second Fluid Power Symposium*, January 1971, Guildford Paper D2, University of Surrey, 1971, pp. D2-13~35.
- (5) R. H. Spikes and G.A. Pennigton, Discharge coefficient of small submerged orifice. *Inst. of Mechanical Engineers* (1959), pp. 661~665.
- (6) T. Hasegawa, M. Sukanuma and H. Watanbe, Anomaly of excess pressure drops of the flow through very small orifices. *Phys. Fluids* (1997), pp. 1~3.
- (7) K. Ramamurthi, K. Nanakumar. " Characteristics of Flow through Small Shape-edged clindrical Orifices". *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 10, Issue 3, (1999) pp. 133~143