

형상비에 따른 고압 분사 노즐의 유동 특성 연구

노병준**, 정우태* 이상진†, 김성민*

Flow characteristics of high pressurized jet with aspect ratio

Byung-Joon Rho, Woo-Tae Jeung, Sang-Jin Lee, Sung-Min Kim

Key Words: aspect ratio(형상비), diffusion angle(확산각), flow coefficient(유량계수), pressure drop(압력강하)

Abstract

The aspect ratio is the main parameter which governs the outer flow pattern and nozzle performance. And in this study, some flow characteristics with the variation of nozzle aspect ratios such as mean pressure distributions along the center line of the outer flow, flow coefficients and the diffusion angles have been experimentally investigated. Through the experimental analysis, the higher aspect ratio was known to decrease the jet kinetic energy because of the friction losses at the outer of nozzle. As the result, it is found that the nozzle performance depends mainly on the aspect ratio of nozzle.

기호설명

L : 노즐 팁 길이(mm)
 d_o : 노즐 출구 직경(mm)
 L/d_o : 노즐 형상비(aspect ratio)
 X : Jet 분무 거리(mm)
 E_k : 운동에너지($kg_f \cdot m$)
 C_d : 유량계수(flow coefficient)
 Q_i : 공급유량(L/min)
 P_t : 노즐 챔버 압력(kg_f/cm^2)

$P_{s,mean}$: 유동 중심점 평균 압력(kg_f/cm^2)
 M_o : 모멘텀($kg_f \cdot s$)
 T, t : 아래첨자; 노즐 챔버

1. 서론

고압 분사 노즐은 일반적으로 세정용과 절단용으로 크게 구분할 수 있다. 고압 분사 노즐은 100 kg_f/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 급속소나 곡물을 이용

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

해 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. Ohrn과 Senser [2]등은 오리피스스의 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 오리피스스의 연구를 통해 오리피스스 내부유동과 형상비(aspect ratio)에 따른 유량계수관계를 밝혔다.

본 논문은 형상비에 따른 분무 특성 연구를 통해 최적의 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 1은 세정을 목적으로 특별히 고안된 노즐로써, 1.2mm의 직경(d_o)과 9.2°의 수축각을 갖는다. 실제 분무의 특성을 결정하는 부분은 Fig. 1에서 나사산 이후의 직관부와 노즐 부분이다. 이 부분의 길이와 각이 분무의 특성을 결정한다.

Fig. 2는 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

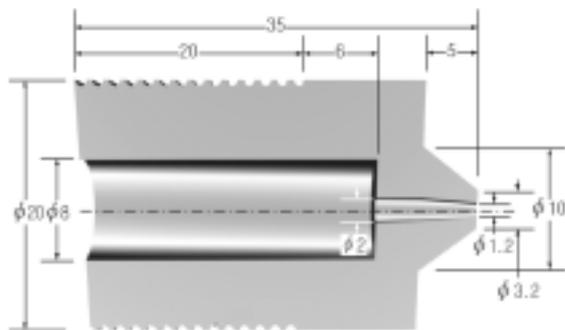


Fig 1. Schematic configuration of high-pressurized jet nozzle

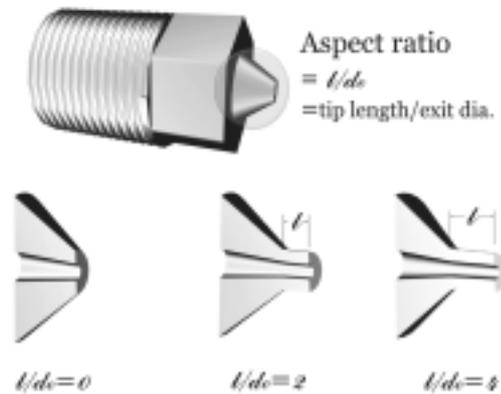


Fig 2. Aspect ratio of used nozzle

0, 2, 4 세 가지 타입의 노즐이 사용되었으며, 각 타입 노즐의 실험을 통하여 분무의 압력, 모멘텀, 운동에너지 계측을 통해 형상비에 따른 고압 분사 노즐의 특성을 연구하였다.

2.2 실험 장치

Fig. 3은 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. 그림에서 유체 공급부는 물을 정제하기 위한 water-filter(⑧)와 유체에 압력을 공급하기 위한 압축 펌프(①), 지속적인 압력을 유지하기 위한 압력 챔버(②), 그리고 실제 분사를 담당하는 노즐부(③)로 구성된다.

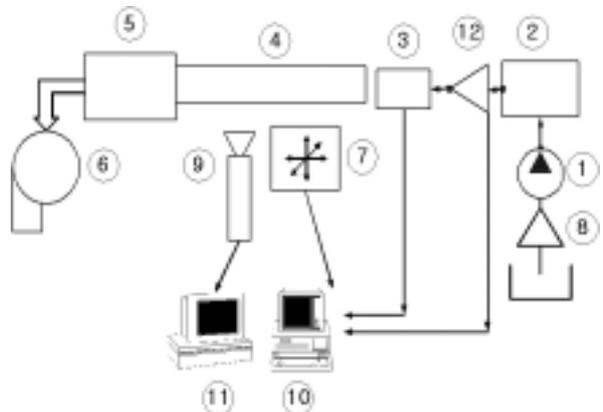


Fig. 3 Experimental apparatus of high-pressurized system

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 흡입하기 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 위한 것이다. Fig 3.에서 traversing(⑦)은 데이터 획득을 위한 장치를 장착한 3차원 이송장치이다.

2.2 측정 장치

본 실험에서는 동일한 실험 조건을 위해 Fig. 3에서 압력 챔버(②)와 노즐부(③)사이 유량계(⑫)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 압력 측정을 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 센서를 설치하여, 각각의 데이터를 IBM PC(⑩)를 통해 획득하였다. 센서를 통해 획득한 데이터는 각 단면에서 얻어진 최대치의 평균값으로, 각 단면에서 유동의 중심부분에서 얻어진 데이터들

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

이다. 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.

3. 분석 및 고찰

3.1 노즐의 분무 특성

Fig. 4는 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 노즐에서 실제 공급유량과 노즐부에서 측정된 압력과의 관계를 통해 아래의 식을 이용해 유량계수의 평균치를 나타낸 것이다. 유량계수를 통해서도 동일 유량에 대해 형상비의 증가가 노즐부의 압력을 증가시킴을 볼 수 있는데,

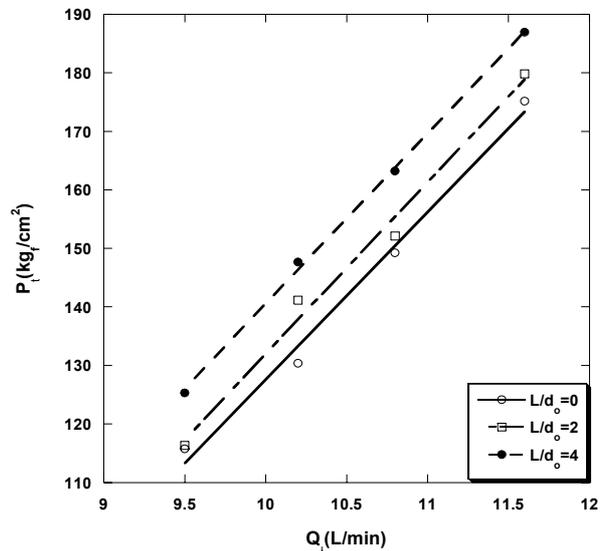


Fig. 4 Nozzle chamber pressure distribution with aspect ratio

Table 2 C_d with aspect ratio

내용	형상비	0	2	4
	C_d		0.93	0.91

$$Q_{act} = C_d A_o \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

이는 노즐 팁 길이(l)의 증가가 곧, 노즐 내부 유체의 분사를 지연시키는 마찰로 작용함을 알 수 있다. Fig. 5는 노즐 챔버 압력에 대한 확산각(Diffusion angle)을 나타낸 것이다. 일반적으로 확산각은 노즐 출구로부터 $60d_o$ 거리에서 노즐 출구 직경에 대한 분무의 직경의 비에 의해 mg 하는 것이다. Fig. 5에서 보듯이 형상비의 증가에 따른 확산각의 증가를 확연히 볼 수 있다.

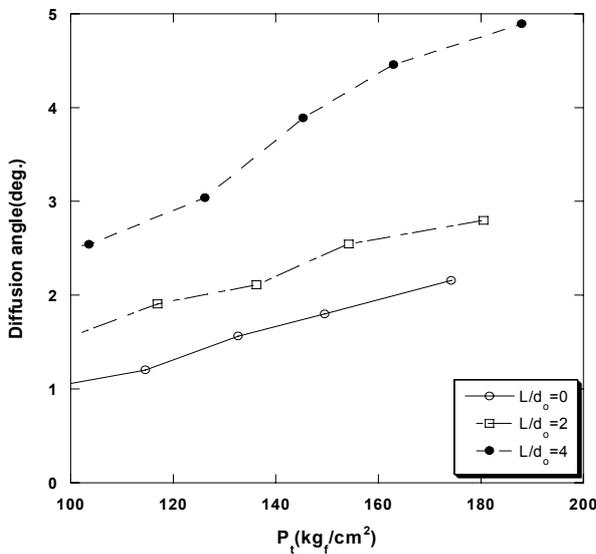


Fig. 5 Diffusion angle with aspect ratio

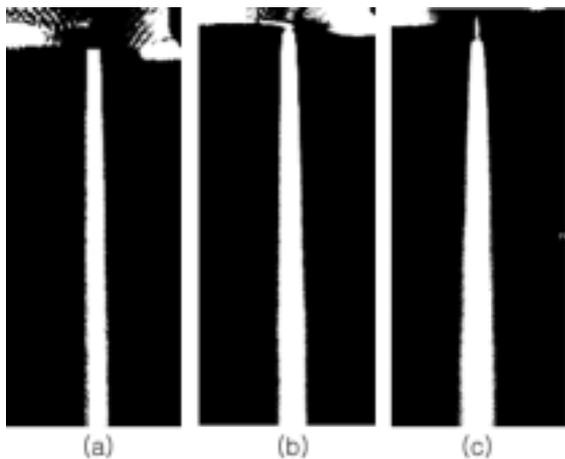


Fig. 6 Visualization of Diffusion angle with aspect ratio($Q_i = 11.6L/min$);

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

특히 형상비가 0에서 4로 증가할 때, 확산각이 거의 2배로 커짐을 알 수 있는데, 이는 11.6L/min의 공급유량을 가질 때, $60d_o$ 의 거리에서 촬영한 분무 이미지를 통해서도 알 수 있다.

이상의 공급유량과 공급압의 관계, 형상비에 따른 유량계수, 초기 분무의 확산각을 통해 형상비의 증가가 초기 분무에 대한 마찰로 작용함을 알 수 있다.

3.2 Pressure Distribution

Fig. 7, 8은 분무 중심에서 얻어진 평균 압력을 나타낸 그림이다. Fig. 7은 동일 형상비에 대해 공급 유량을 변화시켰을 때, 분무의 압력 분포가 공급 유량이 증가함에 따라 증가하는 현상을 나타내고 있는 것이다. Fig. 7, 8에서 공통적으로 나타나는 현상은 분무 초기 즉, 노즐 출구 가까운 영역에서 압력 분포가 일정한 구간이 형성되는 것이다. 이는 일반적으로 $100d_o$ 즉, 노즐 출구 직경의 100배까지는 노즐 팁에서 분무가 가지는 에너지의 95%를 유지하는 영역(퍼텐셜 코어, Potential core)이 존재한다는 연구 결과에 부합되는 것이다. 그림에서 유동은 크게 세 부분으로 나눌 수 있는데, 먼저 0-120mm($100d_o$)구간은 앞서 언급했던 것처럼 퍼텐셜 코어 영역으로 분무 초기의 압력이 거의 일정하게 유지되는 영역이다.

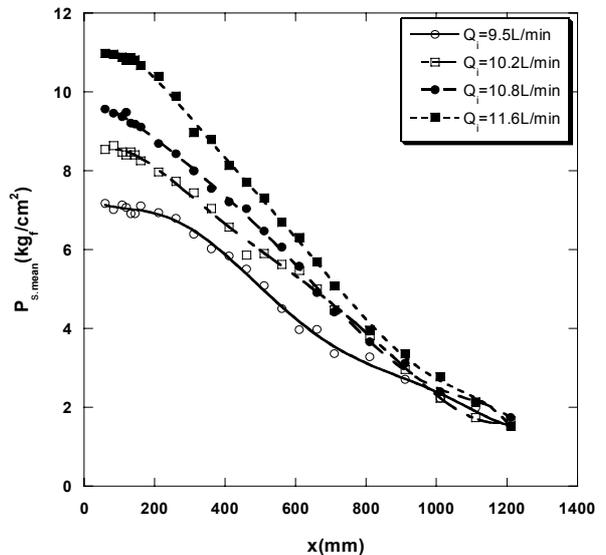
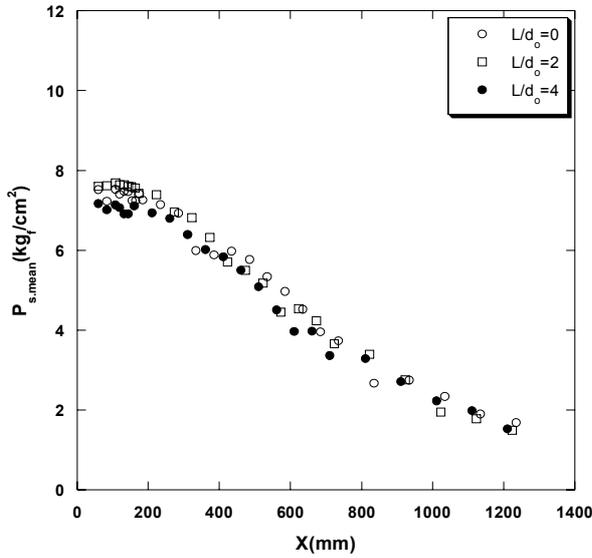
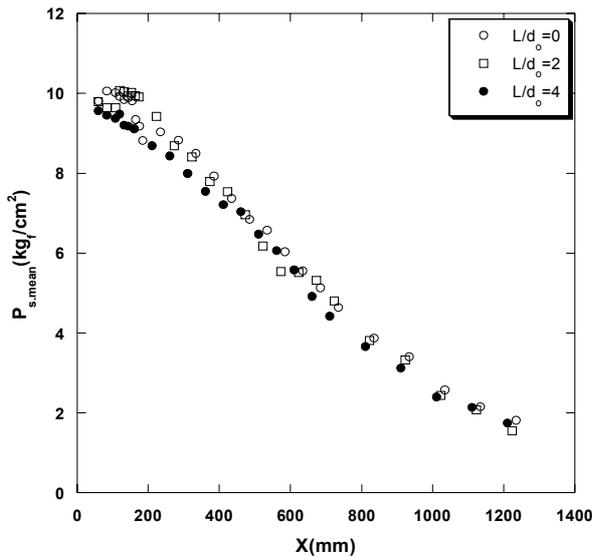


Fig. 7 Pressure distribution with inlet flow rate



(a) $Q_i = 9.5 L/min$



(b) $Q_i = 10.8 L/min$

Fig. 8 Pressure distributions with aspect ratio

200-800mm구간은 그림에서 기울기가 가장 급격한 구간으로, 이 구간에서는 분무 초기의 액주 상태에서 공기와의 마찰에 의해 액적 상태로 변화되는 단계로 에너지의 손실이 가장 많이 발생하는 구간이다. 그리고 800-1200mm구간은 전구간에 비해 완만한 압력 감소 기울기를 보이는데, 이는 분산된 액적이 외부 공기와의 접촉을 차단하는 효과를 주어 중심영역에서는 오히려 마찰에 의한 손실이 감소하기 때문으로 보인다.

3.3 Energy Distribution

Fig. 9, 10은 형상비에 따른 운동량과 운동에너지를 노즐 팁에서의 운동량과 운동에너지와 노즐 직경으로 무차원화 시킨 그림이다. 약간의 차이는 있지만, 형상비에 따른 모멘텀과 운동에너지는 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 대체로 형상비가 작을 때, 큰 값을 나타내고 있고, 형상비가 클수록 작은 값을 나타내고 있다. 이 현상은 분무 압력변화에서도 볼 수 있는데, 노즐부에서의 형상비가 큰 노즐이 큰 공급압력을 갖기 때문에, 실제로 동일한 공급압의 경우, 차이

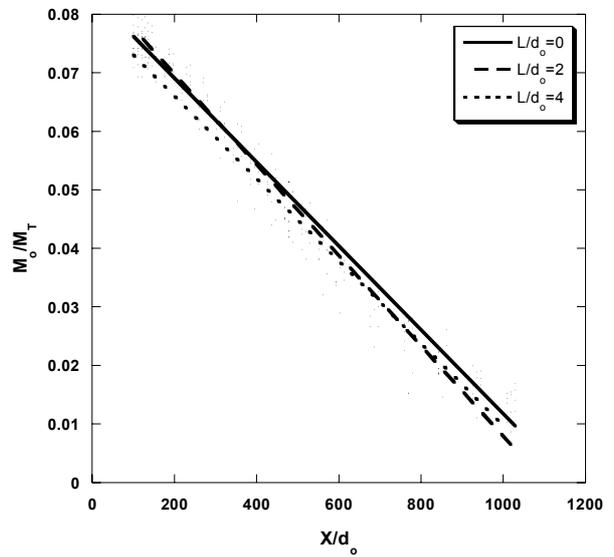


Fig. 9 Non-dimensional momentum distribution with aspect ratio

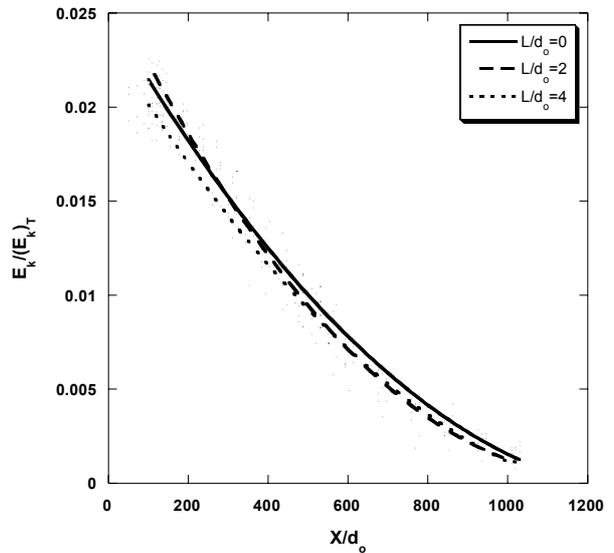


Fig. 10 Non-dimensional kinetic energy distribution with aspect ratio

는 현저해질 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 실험은 형상비에 따른 고압 분사 노즐이 성능을 평가하고 최적의 고압 분사 노즐 개발을 위한 기술적 데이터 획득을 목적으로 수행된 것이다. 실험을 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 형상비의 증가는 분무에 대한 분무 초기 마찰력을 증가시켜 내부 압력의 상승과 유량계수의 감소, 초기 확산각의 증가를 나타냈다.

2. 공급 유량의 증가는 분무 초기 압력을 증가시키지만, 외부 공기와의 마찰에 의한 분무의 거리에 대한 압력 감소 기울기가 증가하는 경향을 보인다. 본 실험에서는 1200mm이상의 거리에서 공급유량에 관계없이 거의 같은 분무 압력을 가졌으며, 형상비의 변화에 대해서도 분무 압력의 변화는 동일 유량에 대해 같은 경향을 보였다.

3. 형상비의 증가는 모멘텀, 에너지 손실을 증가시키고 노즐 내부 압력의 증가를 초래하여 노즐의 기계적 효율을 감소시킨다.

후 기

본 연구는 “랜싱 장비용 고압 분사 노즐 개발”의 일환으로 한국전력 연구원의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이데 대하여 관계자 여러분께 감사드립니다.

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. Ohrn, 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 - D2-35.
- (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. Suganuma 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