

저압 분사시 캐비테이션에 의한 단공 노즐의 미립화 향상

손종원* · 차건종** · 김덕줄**

The Enhanced Atomization of Single Hole Nozzle by Cavitation at The Low Pressure Injection

Jong-Won Son , Keun-Jong Cha and Duck-Jool Kim

Key Words: Cavitation(공동현상), Single Hole Nozzle(단공 노즐), Phase Doppler Anemometer(위상 도플러 입자분석기), Particle Motion Analysis System(입자 운동 분석 시스템)

Abstract

The objectives of this investigation were to obtain an excellent spray by cavitation under the low injection pressure. When cavitation occurs in the nozzle hole, the atomization of the liquid jet enhanced considerably. In this experiments, a acrylic nozzle made the gap and installed the bypass in the nozzle hole was used to enhance the atomization of the liquid jet at the low injection pressure. The liquid flow in the nozzle hole was photographed by a transmitted light using a micro flash. The spray angle was measured macroscope images of PMAS and the Sauter mean diameter was measured PDA system. To measure the pressure of the nozzle hole, pressure transducer was used. The results of this study indicated that enhanced atomization of the liquid jet at the low injection pressure was obtained by making the gap and installing the bypass at the single hole nozzle.

기호설명

D_u : Upstream chamber diameter
 L/D : Hole length-to-diameter ratio
 ΔP_i : 분사압력
 P_o : 분위기압
 K : 캐비테이션수
 θ : 분무각
 SMD : Sauter mean diameter

1. 서론

압력식 단공노즐은 액체를 단순한 오리피스를 통하여 높은 압력으로 가압 분사시키는 분무장치이다. 이 노즐로부터 형성되는 분무각은 매우 작으며 노즐 오리피스의 크기가 작을수록 미세한 분무 액적을 얻을 수 있고 노즐 오리피스의 형상이나 길이는 연료의 미립화에 크게 영향을 준다⁽¹⁾. 이 노즐은 주로 디젤 엔진의 분사 노즐로 사용되며 디젤 분사 노즐 성능에 관한 연구로 분사 노즐 내부 유동의 관측을 위해 단순 형상의 홀형 노즐을 이용한 분공내의 유동과 미립화에 관한 기초적인 연구⁽²⁻⁴⁾와 실제 디젤노즐과 동일한 형상의 가시화 노즐을 이용한 분공내의 가시화 관

* 부산대학교 대학원

** 회원, 부산대학교 기계공학부

찰 등의 연구⁽⁵⁾, 분공의 형상 변화와 분공내에 발생하는 캐비테이션의 영향이 액체의 미립화에 미치는 효과에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^(6~8). 특히 분공 내의 캐비테이션의 영향은 액체의 미립화에 크게 작용하고 있다. 그러나 이러한 연구는 고압분사 조건에서 이루어 졌으며 저압분사에서의 미립화 향상을 위한 연구는 미흡하다. 그러므로 본 연구에서는 고압의 조건에서만 미립화가 이루어지는 단공 노즐을 저압분사에서도 고압분사에서와 같은 효과를 얻을 수 있도록 노즐의 형상을 설계하여 단공노즐의 미립화를 향상시키는 연구를 하였다.

실제 노즐 분공의 10배 크기로 제작한 단순 형상의 아크릴 노즐을 이용하여 내부 유동을 가시화하고 분공에 gap과 바이패스를 설치하여 캐비테이션을 발생시키고 gap과 바이패스의 크기 그리고 gap의 위치변화에 따른 분공내의 압력을 구하고 노즐 분공 내부와 외부 분무 특성을 파악하여 실제 디젤 분사 노즐에 적용하기 위한 기초적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이다. 실험장치는 분사계, 액적의 크기를 측정하기 위한 PDA 시스템 및 가시화 장치로 구성된다. 분사계는 펌프와 대형수조를 배관으로 연결하여 순환식으로 작동유체인 물을 공급하도록 설치하였으며 가시화를 위한 acrylic 노즐, 압력계, 정수필터, 분사압 조절을 위한 밸브 그리고 온도를 상온으로 일정하게 유지하기 위한 냉각시스템 등으로 구성되어 있다.

PDA 시스템은 레이저, 송광부, 수광부, 신호처리기, 3D Traverse, PC 등으로 이루어져 있다. PDA 시스템에서 레이저는 Ar-ion 레이저(최대 출력 5W)가 사용되었고, 측정시 출력은 2W로 하였다. 또한 신호처리계의 고전압은 1000~1400V로 하였고, 밴드폭은 4~12MHz로 측정하였다.

가시화 장치는 내부 가시화를 위해 Micro lens를 부착한 카메라를 사용하여 분공 내부를 6배로 확대하여 이미지를 취득하였으며 광원으로는 Stroboscope를 사용하였다. 그리고 분무의 거시

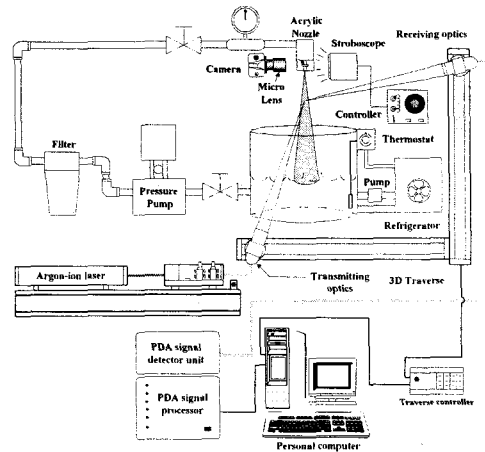


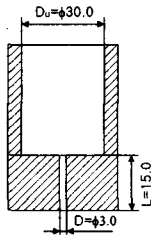
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

적 특성을 해석하기 위해서 PMAS(V-tek, Mx-II)를 사용하였고 CCD 카메라에 초점 105mm의 렌즈를 부착하고, 카메라와 측정영역 사이에 볼록렌즈(초점 600mm, 직경 135mm)를 사용하여 분무 이미지를 확대시킨 후, 프레임그래버를 거쳐 컴퓨터에서 이미지를 취득하였다.

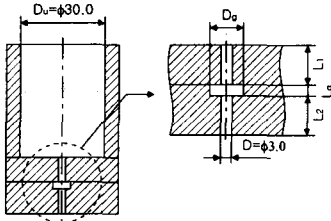
분공 내부의 압력측정을 위해 압력 transducer에 어댑터를 장착하여 분공 내부에 설치하였다. 본 실험에 사용된 압력 transducer(모델명:PSHK0005KAAG)의 측정 압력범위는 0-500 kPa까지 측정 가능하다. 입력전압은 12V로 하였으며 출력값은 0.001-10V로 직류전압으로 출력이 되며 오실로스코프를 이용하여 전압값을 측정하였다.

2.2 실험방법

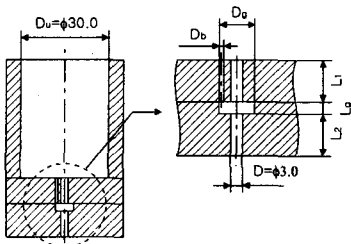
Fig. 2는 실험에 사용된 노즐의 내부도이다. 테스트 노즐은 3가지 형태로 만들어 졌으며 L/D비를 동일하게 하였고 분공 내부의 캐비테이션 버블 이미지를 얻기 위해서 가시화가 가능한 아크릴로 제작하였다. 외부 분무 특성을 파악하기 위해서 PMAS를 이용해 얻은 거시적인 이미지를 취득하여 분무각을 측정하고 PDA 시스템을 이용하여 SMD를 축하방향 50mm부터 20mm 간격으로 측정하여 각 노즐의 분무 특성을 비교하였다. 내부 캐비테이션의 정량화를 위해 분공에 압력 transducer를 설치하여 캐비테이션수를 구하여 테스트 노즐들을 비교하였다. 캐비테이션수 K는



(a) Nozzle-S (Single hole nozzle)



(b) Nozzle-G (Without bypass)



(c) Nozzle-B (With bypass)

Fig. 2 Test nozzles ($L/D=5$)

다음과 같이 구하였다.

$$K = \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_v}$$

여기서, P_1 은 상류측 분사압력, P_2 는 하류측 압력, P_v 는 액체의 증기압력으로 사용액체는 물을 사용하였으며 물의 증기압력은 20℃일 때 2337 Pa이다. 캐비테이션수 K 가 클수록 캐비테이션 버블이 많이 확산됨을 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

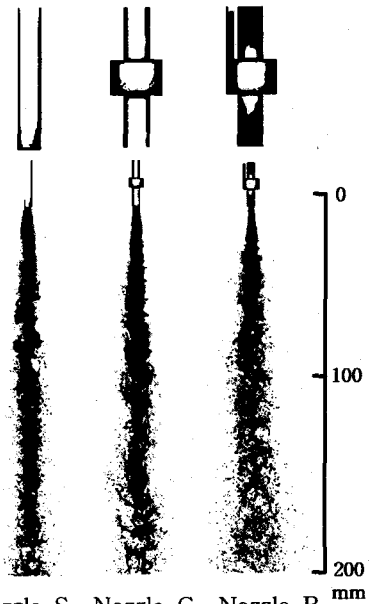
3.1 바이패스의 영향에 의한 미립화

노즐에 바이패스를 설치했을 경우 미립화 향상에 미치는 영향을 단공 노즐과 비교하였다.

Fig. 3은 단공, 바이패스가 없는 분공, 바이패

스가 설치된 분공의 분무 거동을 비교한 사진이다. 분공 내부의 배경과 캐비테이션 버블을 구별하기 위해서 이진화하여 이미지를 처리하였다. 검은색 부분은 캐비테이션 버블, 분공벽을 나타낸다. 분사압은 1.0 MPa로 하였으며 대기압에서 분사하였다. Fig. 4는 분사 압력 변화에 따른 캐비테이션수와 SMD를 나타낸다. Fig. 3과 4에서 바이패스가 설치되지 않은 S, G 노즐은 분무각이 작고 캐비테이션이 일어나지 않으며 SMD가 크다. 반면에 바이패스가 설치된 B 노즐은 캐비테이션수가 크고 분무각이 크며 SMD가 작다. 이것으로 바이패스가 분공내에 설치되었을 경우 양호한 미립화를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 바이패스가 설치된 nozzle-B의 분사 압력 증가에 따른 분공 내부 이미지와 분무 형태를 보여주고 있다. Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 ΔP_1 가 증가함에 따라 미립화가 잘 되며 분무각 또한 커지고 있음을 알 수 있다. 그림에서 $\Delta P_1=2.0$ MPa일 때 캐비테이션이 버블이 발생하기 시작하고 이때의 캐비테이션수 K 는 1이며 분사 압력이 증가함에 따라 캐비테이션 버블이 확산되고 있으며 이로 인해 양호한 미립화가 이루어짐



Nozzle-S Nozzle-G Nozzle-B
 $\Delta P_1=1.0$ MPa, $P_a=0.1$ MPa

Fig. 3 Photographs of the nozzle internal flow and the spray(Effect of the bypass)

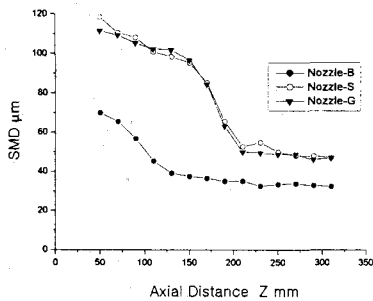
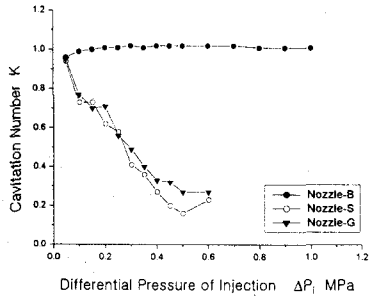


Fig. 4 Variation of the cavitation number and SMD as the differential pressure ΔP_i

을 볼 수 있다. 또한 $\Delta P_i=0.3$ MPa 이상부터는 $\Delta P_i=1.0$ MPa일 때와 분무형태와 분무각이 거의 비슷하게 나타나고 있다.

위 결과에서 바이패스의 설치로 인해 분공 내부에 캐비테이션 버블이 발생하고 이 캐비테이션이 분무의 미립화에 많은 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있었다.

3.2 Gap의 크기에 따른 미립화 특성

Gap의 크기가 미립화에 미치는 영향을 조사하

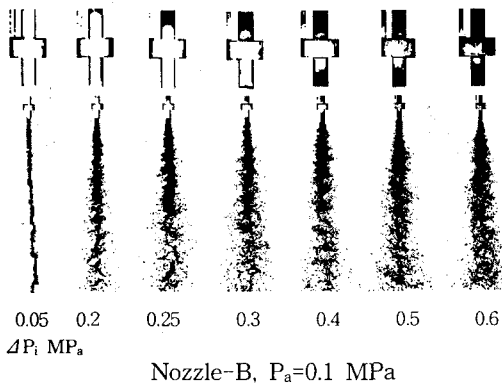


Fig. 5 Photographs of the nozzle internal flow and the spray as the differential pressure ΔP_i

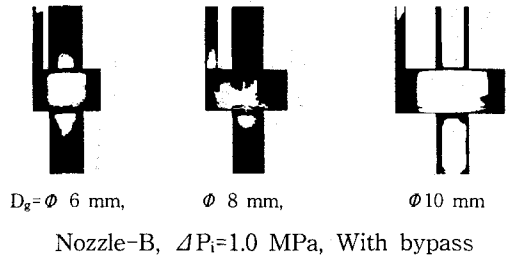


Fig. 6 Photographs of the nozzle internal flow and the spray (Effect of the sizes of the gap)

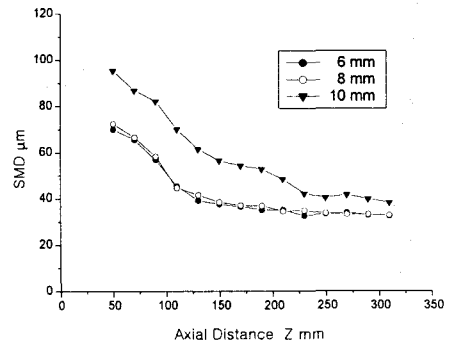
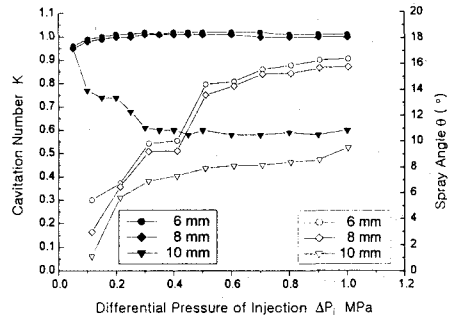


Fig. 7 Variation of the cavitation number, Spray angle and SMD as the differential pressure ΔP_i (Effect of the sizes of the gap)

기 위해 gap의 크기에 따른 분공 내부와 분무 특성을 비교하였다. Fig. 6은 $\Delta P_i=1.0$ MPa에서 gap 크기에 따른 분공 내부의 형태를 보여주고 있다. Fig. 7은 gap의 크기에 따른 캐비테이션, 분사각, 그리고 SMD를 나타내고 있다. Fig. 6과 7에서 보여지는 바와 같이 D_g 가 6mm, 8mm일 때는 분공 내부에 확산된 캐비테이션 버블이 나타나며 분무각과 SMD가 거의 비슷하였고 양호한 미립화를 얻을 수 있었다. 그러나 D_g 가 10mm일 때는 다른 두 노즐에 비해 분무각이 작고 캐비테이션 버블이 생성되지 않았으며 분무각과

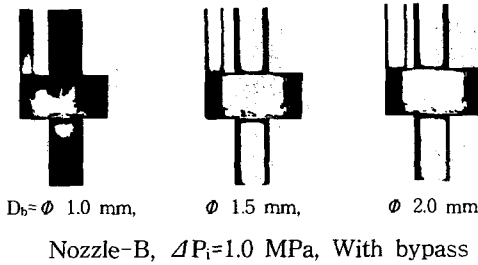


Fig. 8 Photographs of the nozzle internal flow and the spray(Effect of the sizes of the bypass)

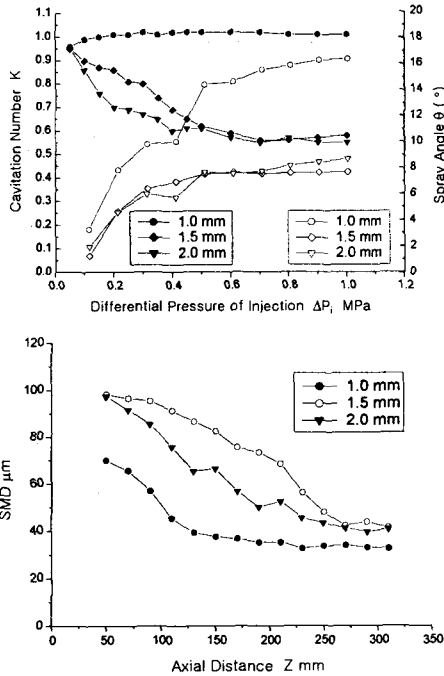


Fig. 9 Variation of the cavitation number, Spray angle and SMD as the differential pressure ΔP_i (Effect of the sizes of the bypass)

SMD가 크게 나타났다. 캐비테이션수에서 차이가 크게 나타나는데 이것은 8mm와 10mm 사이에 미립화 특성이 나빠지는 gap의 크기가 존재함을 알 수 있었고 그 한계점 이상으로 gap의 크기가 커짐에 따라서 캐비테이션 버블이 발생하지 않으며 양호한 미립화를 얻을 수 없는 것으로 사료된다.

3.3 바이패스의 크기에 따른 미립화 특성

바이패스의 크기가 미립화에 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 8mm gap에 바이패스 크기

를 1.0, 1.5, 2.0mm로 변화시켜 분공 내부와 분무 특성을 조사하였다. 여기서 8mm gap을 사용한 이유는 바이패스가 2.0mm일 경우 6mm gap에서의 설치가 불가능하고 6mm, 8mm gap의 분무 특성 차이가 거의 없기 때문에 8mm gap에 바이패스를 설치하여 각 노즐을 비교하였다.

Fig. 8은 바이패스 크기에 따른 $\Delta P_i=1.0$ MPa에서 노즐 분공 내부를 보여주고 있다. Fig. 9는 바이패스 크기에 따른 캐비테이션수, 분사각, 그리고 SMD를 나타내고 있다. 먼저 Fig. 9의 분공 내부를 보면 바이패스 크기가 커짐에 따라 캐비테이션 버블이 생성되지 않고 있음을 보여준다. 또한 바이패스 크기가 커짐에 따라 캐비테이션수와 분무각이 작아지고 SMD는 증가하였다. 그러므로 바이패스의 크기가 작을수록 미립화가 양호해 짐을 알 수 있었다.

3.4 Gap 위치 변화에 따른 미립화 특성

Gap의 위치 변화에 따른 분무 특성을 조사하였다. Fig. 10은 $\Delta P_i=1.0$ MPa에서 L_1, L_2 길이 변화에 따른 분공 내부를 보여주고 있다. Fig. 11은 gap의 위치에 따른 캐비테이션수, 분사각 그리고 SMD를 나타내고 있다. ①번 노즐은 $L_1=6.0$ mm, $L_2=6.0$ mm이며 gap이 분공 가운데 위치해 있는 노즐이다. ②번 노즐은 $L_1=10.0$ mm, $L_2=2.0$ mm이며 gap이 분공 하부에 위치해 있는 노즐이며 ③번 노즐은 $L_1=2.0$ mm, $L_2=10.0$ mm이며 gap이 분공 상부에 위치하고 있는 노즐이다. 먼저 gap이 분공 하부에 위치한 ②번 노즐을 보면 캐비테이션 버블이 분공 하부에 많이 생성되어 있고 ③번 노즐과 비교해 분무각이 크고 SMD가 작다. 반면 gap이 분공 상부에 위치한 ③번 노즐은 다

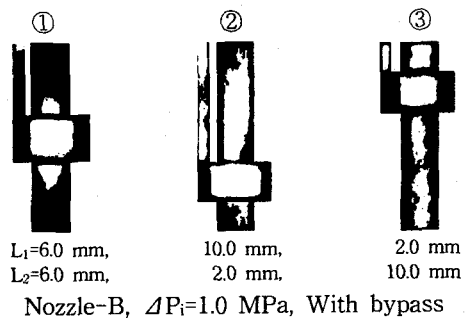


Fig. 10 Photographs of the nozzle internal flow and the spray(Effect of the position of the gap)

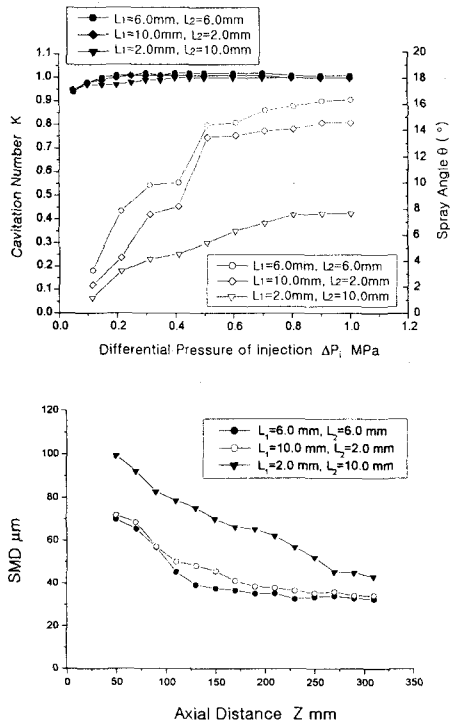


Fig. 11 Variation of the cavitation number, Spray angle and SMD as the differential pressure ΔP_i (Effect of the position of the gap)

큰 두 노즐과 비교해 분무각이 매우 작고 SMD가 상대적으로 크다. 이것은 gap의 위치가 분공 상부에 위치할수록, 즉 L_2 의 길이가 길어짐에 따라 캐비테이션 버블이 분공 내부의 마찰로 인해 노즐 외부로 분사되기 전에 소멸되기 때문이다. 그러나 Fig. 11에서 캐비테이션수는 거의 비슷하게 나타나고 있는데 이것은 세 노즐의 압력값의 차이가 계산식에서 비슷한 값을 가질 정도로 차이가 많이 나지 않기 때문이다. 위 결과로 L_2 의 길이는 분공 내부의 액체 분열에 많은 영향을 미치며 길이가 커짐에 따라 양호한 미립화를 얻을 수 없음을 알 수 있었다.

4. 결론

Gap과 바이패스를 설치한 아크릴 노즐을 제작하여 분공내부를 가시화와 하고 PMAS와 PDA 시스템으로 분무특성을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단순형상의 단공노즐에서 분공내부에 gap

과 바이패스를 설치함으로써 미립화를 크게 향상시킬 수 있었다.

(2) Gap의 크기가 단공노즐의 미립화에 미치는 영향을 조사한 결과 gap의 크기가 작을수록 양호한 분무특성을 얻을 수 있었다.

(3) 바이패스의 크기가 단공노즐의 미립화에 미치는 영향을 조사한 결과 바이패스가 작을수록 미립화가 향상되었다.

(4) Gap 하부의 분공길이 L_2 의 길이는 액체 분열에 크게 영향을 미치며 길이가 길어질수록 분공 하부에서 캐비테이션 버블이 소멸되므로 양호한 미립화를 얻을 수 없었다.

참고문헌

- (1) Lefebvre, A. H., 1929, "Atomization and Spray", Hemisphere publishing Co. and
- (2) M. Arai, M Shimizu and H. Hiroyasu, 1991, "Similarity Between The Break-up Lengths of a High Speed Liquid Jet in Atmospheric and Pressurized Conditions", ICLASS-91.
- (3) H. Hiroyasu, M. Arai and M. Shimizu, 1991, "Break-up Length of a Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle", ICLASS-91.
- (4) N. Tamaki K. Nishida, H. Hiroyasu and M. Shimizu, 1997, "Effects of the Internal Flow in a Nozzle Hole on th Breakup Processes of a Liquid Jet", Proceedings of ICLAss-97.
- (5) C. Soteriou, R. Andrews and M. Smith, 1995, "Direct Injection Diesel sprays and the Effect of Cavitation and Hydraulic Flip on Atomization", SAE 950080.
- (6) F. Ruiz, 1991, "A Few Useful Relations for Cavitating Orifices", ICLASS-91.
- (7) N. Tamaki and M. Shimizu, 1998, "Effect of Cavitation and Internal Flow on Atomization of a Liquid jet" Atomization and Sprays. vol. 8, 99. 179-197.
- (8) N. Tamaki, M. Shimizu and H. Hiroyasu, 2000, "Enhanced Atomization of a liquid Jet by Cavitation in a Nozzle Hole", ICLASS-2000.