

충돌분류에 의한 액적의 크기 및 속도특성에 관한 실험적 연구

An Experimental study on the drop size and velocity characteristic of drop by impinging jets

한재섭*, 김선진**
Han, Jae-Seob, Kim, Seon-Jin**

ABSTRACT

The breakup characteristics of liquid sheet formed by the liquid rocket injector has a close relation with the combustion efficiency. In this paper, basic characteristics of droplet size and velocity distribution were measured with PDPA for the Like Doublet Impinging Injector. Test variables were the angle of impact, the diameter of orifice and jet velocity. Water was used as test fluid.

As a result, for impingement angle less than 90 degree, following correlations were obtained between drop size and design parameters : $D_{32}(\mu m) = 295.0 \times V^{-0.09} \times (2\theta)^{-0.1} \times d^{0.072}$.

For impingement angle greater than 100 degree, drop sizes were increased but eventually converged to a certain limiting value.

주요기술용어

breakup characteristic(분열특성), impingement angle(충돌각), jet velocity(분류속도), D_{32} (평균입경)

1. 서 론

가스터빈이나 로켓은 왕복엔진에서와 같이 간헐적인 연료공급에 의한 연소가 아니라 안정한 미립화 및 잘 혼합된 연속적인 연료공급에 의한 연소를 요구한다. 액체연료의 안정한 미립화 및 혼합은 엔진성능에 매우 중요한 요소 중 하나인 연소안정성에 중요한 영향을 미친다^{(1),(2),(3)}. 따라서, 추진기관의 개발을 위해서는 일반적으로 이론적 성능해석과 더불어 반드시 그에 대한 성능해석이 병행되어야 한다. 실제로 추진기관의 설계단계에서는 많은 부분이 이론적으로 우선

접근되고 이를 검증하는 절차를 따르게 된다. 이때 추진기관의 성능에 직접적으로 영향을 미치는 부분은 기관의 연소실에서 일어나는 유체 역학적 그리고 열역학적 거동이 된다. 즉, 연소실의 연소성능이 추진기관의 자체성능에 절대적 역할을 하게 되기 때문에 추진기관의 개발을 위해서는 기관의 연소실에 대한 성능을 정확하게 평가할 수 있어야 하고 이를 바탕으로 섬세한 연구가 이루어져야 한다. 이때 연소실의 연소성능과 가장 밀접한 관계가 있는 설계요소로는 추진제의 분사기가 된다. 분사기는 연소실내 추진제의 혼합특성과 미립화 그리고, 공간상의 분포를 지배하기 때문이다. 따라서, 추진기관의 연소

* : 충남대학교 기계공학과

** : 청양대학 소방안전관리과

실에 대한 정확한 성능예측을 위해서는 추진제 분사기의 액적크기를 예측하여야 할 필요성이 있다⁽¹⁾⁽⁵⁾.

추진제분사기의 액적크기를 예측하기 위한 실험적 방법으로는 국내외에서 많은 연구자들에 의하여 수행되어졌다. 특히, Ibrahim등은 같은 운동량을 갖는 두 원주형 분류의 충돌에 의해서 형성된 액막의 분열과 형상에 대한 연구를 통하여 액적의 크기를 예측하여 액막의 분열은 We 수에 따라 두 분열영역($We < 500$, $We > 2000$)이 존재함을 제안하였으며, 낮은 We수 영역에서 액막의 형상과 두께를 예측할 수 있는 이론적 모델을 제안하였다. 또한, Kuykendal은 Like Impinging doublet 인젝터에서 인젝터의 설계변수가 액적의 크기에 미치는 영향을 실험적으로 연구하여 오리피스 길이/지름비 및 오리피스의 표면 거칠기에 대한 영향은 실험범위($V = 38 \sim 200\text{ft/s}$, $d = 0.029 \sim 0.155\text{ in}$, $\alpha = 20 \sim 120\text{ deg}$)에서는 나타나지 않았다고 보고하였다. 또한, 액적의 크기는 오리피스의 형상, 분류의 동특성(분류속도, 난류수준 등), 유체의 물리적 특성 및 충돌점에서의 기체역학적 분위기에 대한 함수라는 사실을 실험적으로 밝히기도 하였다.

본 연구에서는 최근 연구결과로부터 얻어진 기초자료들을 바탕으로 최근 들어 가장 많이 이용되는 레이저 장비 중 하나인 PDPA를 이용하여 충돌분류를 가진 인젝터 설계시 성능을 크게 좌우하는 중요한 조건으로 사용되어지고 있는 충돌각, 오리피스 지름, 분류속도에 대하여 분무유동장의 보다 상세한 미시적 평가를 위한 액적크기에 대한 기초자료를 획득하고, 이들의 상관관계를 분석해 봄으로서 인젝터의 분무구조를 실험적으로 규명해 보고자 하였다. 사용된 인젝터 형태는 Like Doublet Impinging Injector 이다.

2. 실험

2.1 실험장치

분사액체의 입경, 속도 등과 같은 분무특성을 측정하기 미립화 및 혼합시키는 가변형 인젝터, 고압탱크에 저장된 분사액체를 가변형 인젝터로 공급하는 공급장치, 액적의 크기, 속도를 측정하는 PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer)등으로 실험장치를 구성하였다.

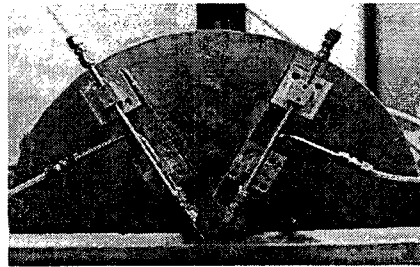


Photo.1 Photograph of Injector assembly

가변형 인젝터는 Photo.1에 보이는 바와 같이 액체를 분사하는 인젝터의 기하학적 변수로 고려되는 충돌각, 충돌점 거리, 오리피스 지름을 쉽게 교환할 수 있도록 설계하여 제작하였다. 추진기관의 분사기 설계에서 오리피스는 길이 대 지름 비를 통상적으로 3 ~ 6의 범위로 사용하나, 본 연구에서는 오리피스내에서 완전히 난류유동을 생성시킬 수 있으며 제작 및 오리피스 교환의 용이성을 고려하여 길이 대 지름비를 60으로 제작되어 있는 SUS판을 절단하여 사용하였다. 또한, 지지대를 받치고 있는 부분은 5° 간격으로 눈금이 새겨있는 반원형 밀판의 중심부에 회전이 가능하도록 하여 충돌각을 변화시킬 수 있도록 하였다.

분사액체는 가연성이 없는 질소가스로 압축하였고 압력용기는 100atm까지 견딜 수 있는 특수용기를 사용하였으며, 인젝터로 분사액체를 공급하기 위한 실험장치는 Fig.1과 같다.

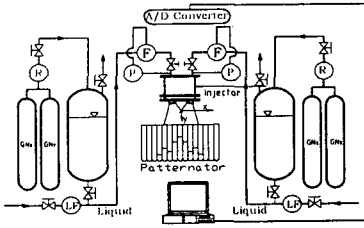


Fig.1 Experimental set-up for measuring mass distribution

액적의 속도 및 크기를 측정하기 위한 실험에 사용된 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)는 Photo. 2와 같다.



Photo. 2 Experimental set-up for measuring droplet velocity/Size

2.2 실험방법

두 개의 오리피스로부터 분사되는 동일 유체의 충돌로 형성된 액적의 크기 및 속도가 수직방향거리, 수평방향거리 변화에 대한 분포를 연구하기 위해 오리피스 지름은 0.98mm, 분사속도는 16m/s, 충돌각 60°로 고정하고, 축방향거리는 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80mm, 수평방향거리는 0, 10, 20, 30, 40, 50 mm로 변화시켰다. 또한, 수직방향거리 60, 80mm에 대해서는 분포가 좌우 대칭성인지에 대한 연구를 위해 음의 수평방향위치에 대해서도 측정하였다. 충돌각과 분류속도에 대한 영향고찰시에는 오리피스지름을

0.98mm, 수직방향거리 80mm, 수평방향거리 0mm 로 고정하고, 충돌각은 30°, 60°, 60°, 100°, 110°, 120°, 분사속도는 12, 16, 20m/s로 변화시켰다. 또한, 충돌각에 대해서는 분사속도 12m/s로 고정하고 충돌각 130°, 140°, 150°에 대한 영향도 고찰하였다. 오리피스 지름에 대한 영향고찰시에는 분류속도는 16m/s, 충돌각은 60°, 90°로 고정하고 오리피스 지름 0.61, 0.98, 1.55mm에 대한 영향을 고찰하였다.

PDPA 사용시 레이저광은 Spectra -physics사의 Model 2017-04S의 Ar-Ion Laser발생기를 이용하여 500mW 광을 이용하였고, 입자에 의해서 산란된 광을 감지하여 광전관에 의해서 전기적인 신호로 변화하는 Receiver는 광학 측정 방법에서 전방 산란방법으로 Transmitter와 30°를 이루도록 설치하여 사용하였다. 입자에 의해서 산란된 광의 세기가 실험조건에 따라 달라지는 것을 방지하기 위해 조건이 변할 경우에는 항상 예비실험을 통하여 광전관의 증폭도를 조건에 맞게 조절하였다. 자료획득은 한 조건에 대해 10,000개의 입자를 측정하여 평균값을 구하도록 하였는데, 속도는 9840의 유효개수, 입경은 7208의 유효개수를 사용하여 평균 입경 및 속도를 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

충돌분류에 의해서 형성된 액막의 분열은 개략적으로 Fig. 2와 같고 이를 영상화 장치를 이용하여 가시화하여 보면 대표적으로 Photo. 3과 같다. 본 연구에서는 두 원주형 분류의 축을 포함하고 있는 평면에 수직인 평면에서 결과를 고찰하였다.

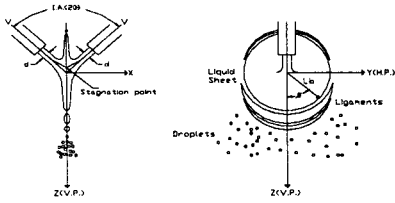
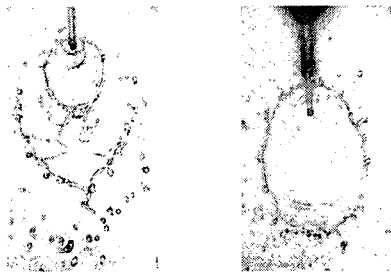


Fig. 2 Schematic diagram of atomization process during impingement of two jets



(a) Impingement Angle=90° (b) Impingement Angle=120°

Photo. 3 The image of the spray pattern formed by impinging jets ($d_o=0.98mm$, $V_j=4m/s$).

3.1. 수직 및 수평방향 거리변화에 따른 영향

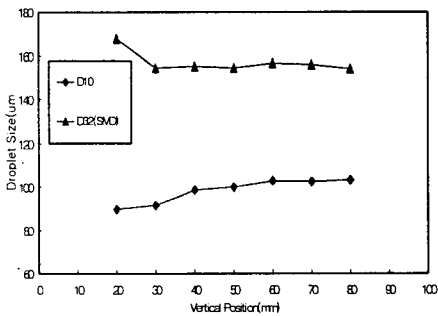


Fig.3 Effect of vertical distance on droplet size

Fig. 3은 분류속도는 16m/s, 충돌 각은 60°, 오리피스 지름은 0.98mm일때의 충돌 점으로부터

터 수직방향(z축)의 거리 변화에 따른 액적의 크기를 측정된 결과이다.

평균액적크기 D_{32} 는 약 30mm 이상에서는 일정한 값에 수렴하여 수직거리가 증가하여도 액적의 크기는 거의 변화하지 않음을 보이고 있으며, 계산적 평균직경 D_{10} 은 약 60mm정도에서 일정한 값에 수렴하고 있음을 보이고 있다. 즉, 미립화 과정은 60mm정도에서 끝남을 알 수 있다.

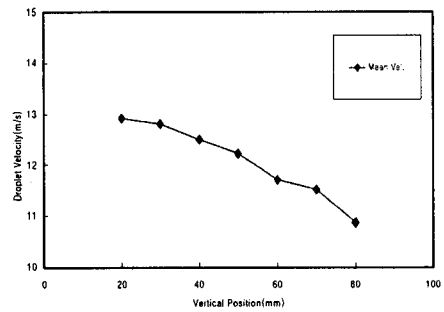


Fig.4 Effect of vertical distance on droplet velocity

Fig.4는 수직방향 거리가 증가함에 따른 액적의 축방향 평균 속도변화를 보여주는 그림으로서 수직방향 거리가 증가할수록 액적 속도는 감소함을 보여주고 있다. 이러한 원인은 구형 액적이 공기중을 운동 할 때 생성되는 마찰저항으로 에너지 손실이 발생하고 이 손실은 이동 경로가 길어짐에 따라 증가하기 때문으로 사료된다.

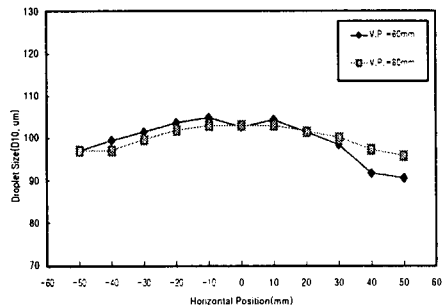
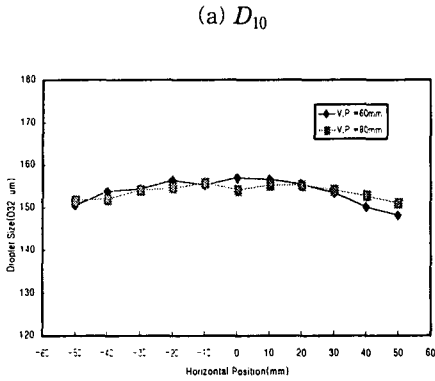


Fig. 5 Effect of horizontal distance on droplet size



(b) D_{32}

Fig. 5 Effect of horizontal distance on droplet size

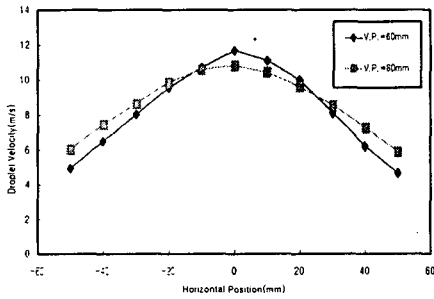
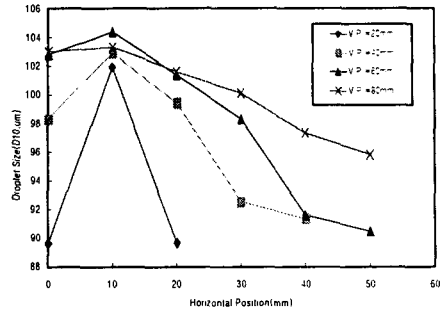
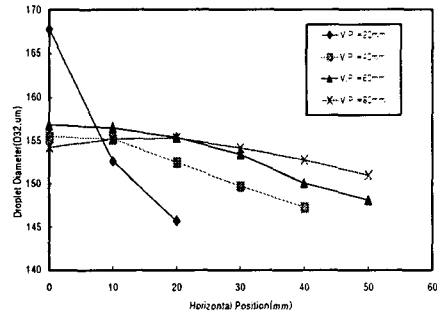


Fig. 6 Effect of horizontal distance on droplet velocity

Fig. 5와 6은 동일 지름과 동일 속도로 분출되는 원형분류의 충돌에 의해서 형성되는 액적의 크기 및 축방향 평균속도에 대한 수평방향(y축) 분포도로, 분류속도 16m/s, 충돌 각 60°, 오리피스 지름 0.98mm의 조건하에서 수직방향 거리 60mm, 80mm에서 측정하였다. D_{10} 과 D_{32} 는 중심부분에서 크고 수평방향거리가 증가할수록 작아지는 경향을 나타내며 수직방향(z축)을 중심으로 좌우 대칭성을 보이고 있다. 그리고, 액적의 속도도 좌우 대칭성을 잘 나타내고 있고, 수평방향거리가 증가할수록 작아지는 경향을 나타내고 있다.



(a) D_{10}



(b) D_{32}

Fig. 7 The spatial distribution of droplet size

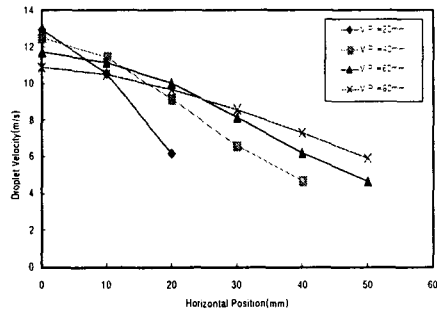


Fig. 8 The spatial distribution of droplet velocity

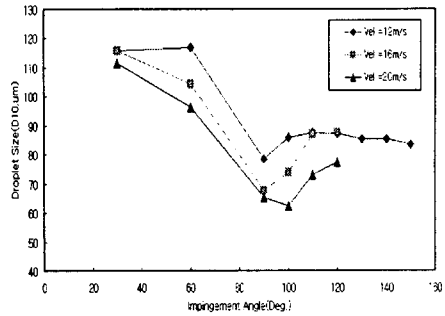
Fig. 7과 8은 분류속도 16m/s, 충돌각 60°, 오리피스 지름 0.98mm에서 수직방향(z축) 거리 및 수평방향(y축) 거리를 변화시켜 충돌로 형성된 액적의 크기 및 속도분포를 양의 y축 상에서

측정한 결과로서 액적의 크기(D_{10} , D_{32})와 속도는 수평방향거리가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 현상은 두 분류의 충돌시 형성되는 액적의 크기에 직접적인 영향을 미치는 액막의 두께가 회전각 ϕ 에 따라 다른 분포를 보이고 있기 때문으로 사료된다.

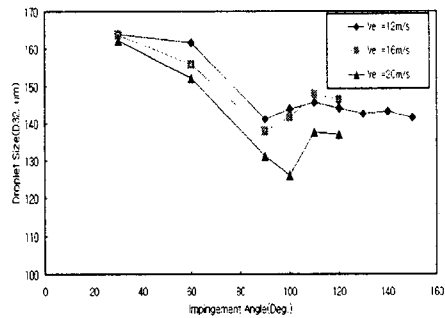
두 분류의 충돌시 형성된 정체점을 중심으로 회전각 ϕ 가 증가함에 따라 액막두께는 얇아지고, 이러한 액막두께의 감소가 액적의 크기를 감소시키는 원인으로 사료된다. 이러한 현상은 분열길이에서 나타난 결과와 같은 현상을 보이고 있다. 또한, 수평방향거리 변화에 대한 크기 분포는 속도분포와 같은 경향을 보이고 있고, 이것은 크기가 다른 액적이 같은 초기속도로 운동을 할 때 초기 운동에너지의 차이 때문에 작은 액적이 큰 액적에 비해 속도가 빨리 감소하기 때문으로 사료된다. 이러한 액적의 크기 및 속도분포에 대한 연구로부터 두 분류의 충돌에 의해서 형성되는 질량분포를 예측할 수 있고 이러한 분포는 중심에 집중되고 수평방향으로 갈수록 점점 감소할 것으로 예측되었으며 질량분포 측정을 통하여 확인할 수 있었다.

3.2 충돌각/분류속도/오리피스 지름변화에 따른 영향

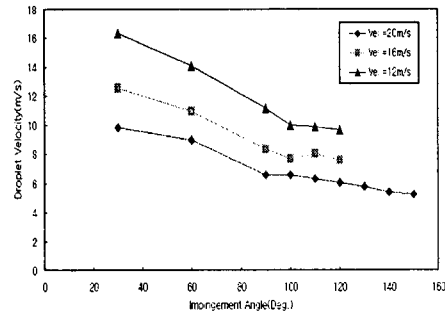
Fig. 9는 오리피스 지름을 0.98mm로 고정하고 분류속도는 12m/s, 16m/s, 20m/s에 대하여 수직방향 거리 80mm위치에서 충돌각을 변화할 때 입경의 크기 및 속도분포이다.



(a) D_{10}



(b) D_{32}



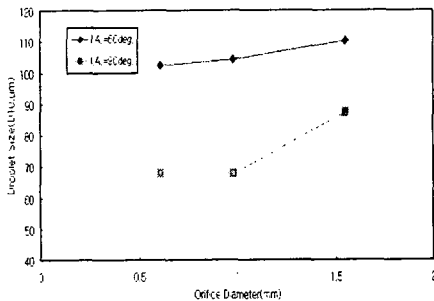
(c) Droplet Velocity

Fig. 9 Effect of impingement angle and jet velocity on droplet size and velocity

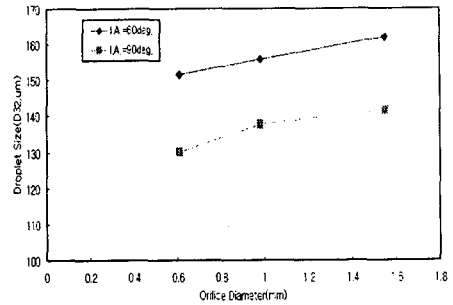
D_{10} 과 D_{32} 는 분류속도가 증가함에 따라 작아지는 경향을 보이고 있고, 충돌각이 90°까지 증가함에 따라 감소하다가 90°에서 충돌각을 더

증가시킬 경우 액적의 크기는 더 이상 감소하지 않고 약간 증가하다가 일정한 크기로 수렴함을 보이고 있다. 충돌각 변화 시 발생하는 액적 크기의 수렴현상을 확인하기 위해 분류속도 12m/s의 경우 충돌 각을 150°까지 변화하였으나, 여전히 액적의 크기는 거의 변화하지 않았다. 또한, 이러한 천이점은 분류속도가 클 수록 충돌각이 더 큰 영역으로 약간씩 이동됨을 보이고 있다. 충돌각과 분류속도가 천이점에 도달하기 전까지 증가함에 따라 액적크기가 감소하는 원인은 충돌각이 증가함에 따라 수직방향(z축)의 액막두께가 얇아지고, 분류속도의 증가는 공기역학적 또는 수력학적 분열을 촉진하기 때문으로 사료된다.

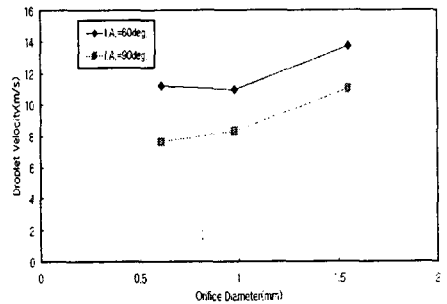
결과적으로 액적의 크기는 조건에 따라 다르지만 충돌각이 약 90°부근에서 가장 작게 나타났으며 이러한 천이점은 분류속도가 증가함에 따라 충돌각이 증가하는 쪽으로 약간씩 이동함이 나타났다. 한편, 액적의 속도도 충돌각이 증가함에 따라 거의 일정한 감소율로 감소하다가 Fig.9 (a), (b)에서 나타난 천이점에서 충돌각 증가에 대한 액적속도의 감소율이 줄어드는 불연속성을 나타내었다. 위의 결과로부터 액적속도는 액적크기에 의해서 지배된다는 앞의 고찰내용과 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.



(a) D_{10}



(b) D_{32}



(c) Droplet velocity

Fig.10 Effect of orifice diameter on droplet size and velocity ($V_j = 16m/s$)

Fig.10은 오리피스 지름이 액적의 크기 및 속도에 미치는 영향으로 분류속도는 16m/s로 고정하고, 충돌각 60°, 90°에 대해 수직방향 거리 80mm에서 측정된 결과로서 Fig.10 (a)와(b)는 액적크기 D_{10} , D_{32} 로 오리피스 지름이 증가하면 액적의 크기는 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 오리피스 지름의 증가는 액막두께의 증가를 초래하고 결국 큰 액적을 형성하는 것으로 사료된다. 또한, Fig.10 (c)는 액적의 속도가 지름의 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으나, 이것은 지름의 증가가 초기에 형성되는 액적의 속도는 변화시키지 못하지만, Fig.10 (a)와 (b)의 결과에서 나타난 것처럼 오리피스 지름의 증가는 액적크기의 증가를

초래하고, 분열 후 같은 초기속도를 갖는 액적이 수직방향으로 이동할 때 지름이 작은 액적이 속도가 훨씬 빠르게 감소하였던 앞의 결과 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 따라서, 오리피스 지름의 증가는 초기 액적의 속도에는 영향을 주지 못하였지만, 분열후 액적이 어느 정도 이동한 경우에는 오리피스 지름이 큰 것에서 형성된 액적이 더 빠른 속도를 유지할 수 있었다. 이러한 결과로부터 액적의 크기를 분류속도, 충돌각, 오리피스 지름의 함수로 표현하기 위해 최소자승법을 이용하면 다음과 같다.

분류속도: $D_{32}(\mu m) = 217.152 \times V^{-0.119}$, (V:m/s)

충돌각: $D_{32}(\mu m) = 274.954 \times (2\theta)^{-0.148}$, (θ :deg)

오리피스 지름 :

$$D_{32}(\mu m) = 156.693 \times d^{0.072}, (d:mm)$$

또한, 이러한 함수를 기초로 하여 Fig. 11과 같이 $D_{32}(\mu m) = 295.0 \times V^{-0.09} \times (2\theta)^{-0.1} \times d^{0.072}$ 라는 관계식을 얻을 수 있을 수 있었다.

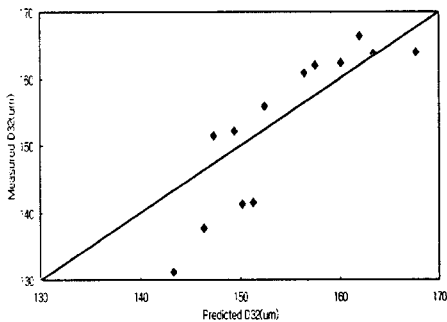


Fig. 11 Predicted versus measured droplet size (Predicted)

4. 결 론

충돌분류에서 생성된 액적의 분열특성을 알아보기 위해 본 연구에서는 충돌각 90°이내에서 액

적의 크기는 설계변수에 따라 얻어진 결과는 다음과 같다.

$$D_{32}(\mu m) = 295.0 \times V^{-0.09} \times (2\theta)^{-0.1} \times d^{0.072}$$

또한, 충돌각이 100도 이상인 경우에는 액적의 크기는 다시 증가하다가 일정한 크기로 수렴하였다.

이러한 결과는 기존 연구결과와의 정확한 비교 분석은 어려우나 multi-element 형태의 인젝터를 사용하는 실용 액체로켓에서의 인젝터 설계 및 분무특성을 이해하는데 상당히 유용하리라 판단되며, 추후 유사실험에 대한 더욱 많은 보충실험의 필요성이 있으리라 판단된다.

5. 참고문헌

1. E.A. Ibrahim and, A.J. Przekwas, "Impinging Jets Atomization", Phys. Fluids A, Vol. 3, No. 12, Dec. 1991
2. Anonymous, " Liquid Rocket Engine Injectors ", NASA SP-8089, 1976
3. M.F. Heidmann, " Fluctuations in a Spray Formed by Two Impinging Jets", Jour. Am. Rocket Soc., Vol. 22, 1952
4. 이 상용, " 액체의 미립화 ", 민음사, 1996.
5. G. P. Sutton, "Rocket Propulsion Elements", 6th ed., John Wiley & Sons, Inc., 1992