

〈技術論文〉

CWM의 미립화특성에 대한 실험적 연구

김운태* · 전영남* · 채재우**

(1990년 4월 16일 접수)

An Experimental Study on the Atomization Characteristics of Coal-Water-Mixture

Yoon-Tae Kim, Yong-Nam Chun and Jae-Ou Chae

Key Words : CWM(석탄-물 혼합물), Atomization(미립화), Internal Mixing Type Atomizer (내부 혼합식 미립화기구)

Abstract

The factors to act on atomization of liquid fuel are viscosity, geometric shape of nozzle, atomizing pressure, etc. Most of high viscous liquid fuels show decrease in viscosity by raising the preheat temperature, but the viscosity of liquid fuel like CWM does not readily change with fuel temperature. As an experimental study to investigate the atomizing characteristics of CWM, CWM fuel is atomizing with a twin-fluid atomizer, and the effects of the geometric shape of spray nozzle on atomization are investigated by measuring the Sauter's Mean Diameter (SMD) of CWM. The summerized results obtained in this study are as follows; (1) As the ratio of the mass flows of atomizing air to that of fuel (W_a/W_f) increases, SMD decreases when fuel temperature is constant. (2) At the ratio (t/d) 4 of thickness (t) of spray nozzle hole to the diameter (d) of the hole, there is the best atomization. And SMD decreases when t/d is between 1 to 4 and increases when $t/d > 4$.

기 호 설 명

- d : 노즐 공경 (mm)
- t : 노즐 하단부 두께 (mm)
- D : 평균 입경 (μm)
- d_i : 임의 입경 (μm)
- n_i : 임의 입경 개수
- W_a : 미립화용 매체 (공기)의 질량 (g/min)
- W_f : 연료(CWM)의 질량유량 (g/min)

1. 서 론

1970년대의 유류파동과 급격히 증가하는 연료 소

비에 대응하여 유류의존도를 줄이기 위한 대체 연료 개발과 연료의 효율적인 활용 방안의 하나로 석탄자원을 활용하는 COM(Coal-Oil Mixture) 및 CWM(Coal-Water Mixture) 등의 개발을 들 수 있다.

COM 이나 CWM은 기존 벙커 C유를 사용하고 있는 보일러의 대체연료로서 개발되었기 때문에 기존 벙커 C유 보일러의 분사 계통만 수정하여 사용할 수 있는 장점이 있다. 이중 CWM은 석유류를 전혀 사용하지 않는 연료로서 COM보다 경제적 우위성을 지니고 있어 현재 국내외적으로 널리 연구 개발이 이루어지고 있다.

특히 CWM은 석탄의 낮은 연소성으로 인하여 무화도가 연소성을 지배하는 가장 큰 인자이다^(1,11). 예를 들면 벙커C유는 온도의 증가에 따라

* 인하대학교 대학원

** 정희원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

연료의 점성이 낮아짐을 이용하여 분무 시킬수 있으나 CWM은 온도에 민감하지 못하다.

그러므로 연소성을 지배하는 CWM의 무화도에 관한 연구는 석탄 에너지의 효율적인 활용면에 크게 기여하게 될 것이다.

고점도 슬러리를 분사시켜 그 분무입경, 분포도 등에 관한 수 많은 연구가 이루어졌다. 그 중에서도 CWM의 분무에 관한 연구^(4~10)를 살펴 보면 사용 CWM에서 석탄의 농도가 50wt.% 정도에 이르고 있으나 기존 유류 보일러의 대체연료로 개발된 CWM은 연소의 난이성 때문에 CWM중의 수분함량이 약 30wt.% 정도이다.

현재 국내에서 개발하여 사용중인 CWM은 석탄의 농도가 60wt.% 이상인 고농도로서 그 무화특성이 달라질 것이다.

따라서 본 연구는 석탄을 대체에너지로 활용하기 위해 개발된 고농도의 국산 CWM을 사용하기 위한 분무기 설계에 기초자료를 제공하기 위한 연구로서 실제 산업체에 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

NE06H2, Monyo pump, Heishin 社, Japan)가 이용되며 펌프의 회전속도를 조절하기 위해 조절용 가변전동기를 사용한다.

그리고 노즐의 구멍이 막힐 경우 CWM 이송펌프 측에 높은 압력이 걸리게 되므로 이송펌프보호

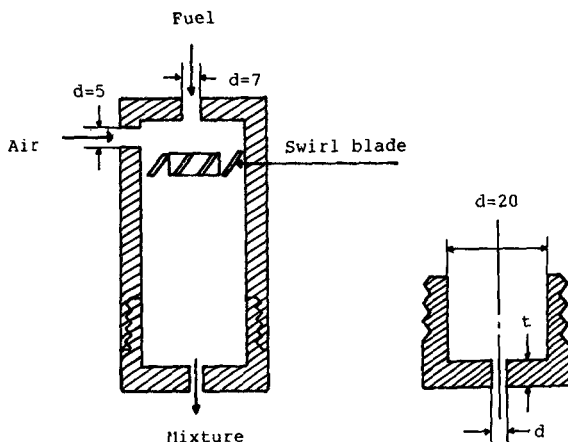


Fig. 2 Atomizer

2. 실험 장치

CWM연료를 미립화용 매체를 이용하여 이류체 분무하기위한 실험장치는 연료공급장치, 무화용 공기 공급장치 그리고 미립화기구로 구성되어 있다.

2.1 실험 본체

Fig. 1는 실험장치의 개략도이다, CWM 공급장치는 교반기가 장착된 CWM 탱크와 CWM을 미립화 기구(atomizer)로 공급 하는데는 정량펌프(3

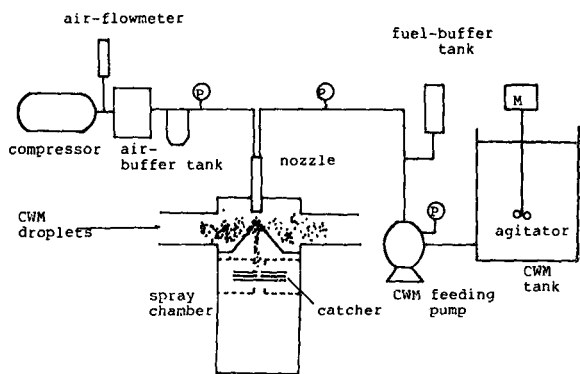


Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1 Nozzle size

Diameter of nozzle (d)	Thickness of nozzle (t)	(t/d)
1.5	1.5	1
1.5	3.0	2
1.5	4.5	3
1.5	6.0	4
1.5	7.5	5
2.0	2.0	1
2.0	4.0	2
2.0	6.0	3
2.0	8.0	4
2.0	10.0	5
3.0	3.0	1
3.0	6.0	2
3.0	9.0	3
3.0	12.0	4
3.0	15.0	5

Table 2 Physical properties of CWM

Component	60, 75wt% : coal 39, 27wt% : water
Viscosity	580cp
Particle size	280 mesh pass 72.0% 325 mesh pass 59.2%

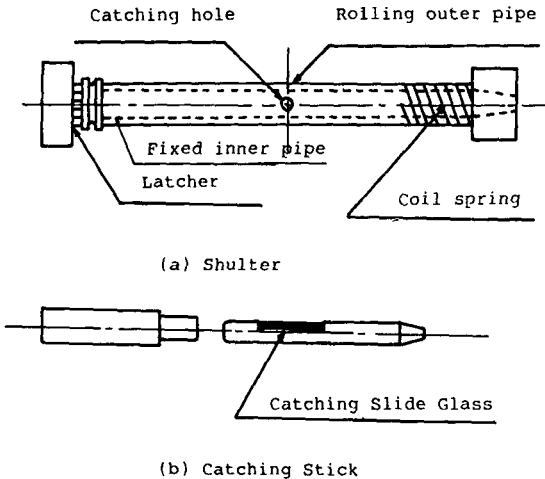


Fig. 3 Catcher

를 위하여 압력센서(Pressure Control Furnas, U. S.A.)를 분사노즐과 펌프사이에서 설치하여 7kg/cm² 이상의 압력이 CWM 연료 이송용 펌프 토출측에 걸릴 경우 펌프 회전속도 조절용 가변전동기의 작동전원의 공급이 단절되게 하였다.

그리고 무화용 공기공급은 공기압축기를 사용하며 공기압축기로부터 공급되는 공기는 공기의 맥동(fluctuation)을 방지하기 위하여 서지탱크(surge tank) 2개를 설치 하였으며 압력조절기(regulator)와 공기 유량계(flow meter)를 거쳐 노즐로 유입된다.

2.2 노즐설계

본 실험에서 사용된 미립화기구는 Fig. 2와 같은 형태를 가지는 내부혼합식(internal-mixing type) 미립화기구이다.

실험조건에 따라 노즐몸체 (nozzle body)와 노즐끝 부분을 분리, 교체할 수 있게 노즐 끝부분의 형상을 달리하여 만들었으며 그 규격은 노즐구멍

크기(d)가 각각 1.5, 2.0, 3.0 mm 일때 노즐 끝부분의 두께(t)와 노즐공경(d)의 비(t/d)가 1에서부터 5까지가 되게 5개씩 총 15개를 제작하였으며 실험노즐 규격은 Table 1과 같다.

무화용매체(공기)가 선회를 일으킬 수 있도록 30도의 각도를 가진 선회용 날개(blade)를 설치했다. 본 연구에 사용된 CWM은 한국동력자원연구소의 연료개발실로부터 공급받은 것으로서 중국 Pin Shuo에서 생산된 고발열량 6810 kcal/kg인 석탄이 63.5wt.%와 물 36.5wt.%가 혼합된 것이며 Table 2는 CWM의 물성치이다.

2.3 포집기(Catcher)의 설계

미립화된 CWM 액적을 측정하고자 기계적인 방법으로 널리사용되고 있는 액침법(immersion liquid method)⁽¹²⁾을 사용하였다. 액적입자 포집장치의 구성은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3의 (a)는 지름이 5.5mm의 포집창(catching hole)을 가지는 고정내통(fixed inner pipe)과 같은 크기의 포집창을 가지고 회전하는 외통(rolling outer pipe)이 동축(co-axial)으로 제작된 shutter부와 (b)와 같이 포집된 silicon oil이 도포된 액적포집용 유리막대(catching slide glass)를 고정하는 포집막대(catching stick)로 구성 되어 있다.

2.4 Sauter's Mean Diameter(SMD)

분무특성의 기본형태는 연료의 분무평균입경으로 나타낼 수 있다. SMD(Sauter's Mean Diameter)는 여러가지 입경을 갖는 입자군을 동일한 총표면적 및 총체적을 갖는 균일한 입경으로 나타낼 때의 입경을 의미하며 다음의 식으로 표시한다⁽¹¹⁾.

$$SMD(D_{32}) = \frac{\sum(di^3 \times ni)}{\sum(di^2 \times ni)} \quad (1)$$

여기서 di 는 입의 입경, ni 는 입의입경의 갯수이다.

3. 실험방법

실험은 15개의 노즐(Table 1 참조)을 이용하였으며, 각 경우마다 미립화용 매체(공기)의 질량유량(W_a)을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다.

미립화 기구로부터 분무된 CWM 액적의 포집은 Fig. 3의 포집기를 이용하였다. 점도 1,000 cst의 실리콘 오일이 도포된 slide glass

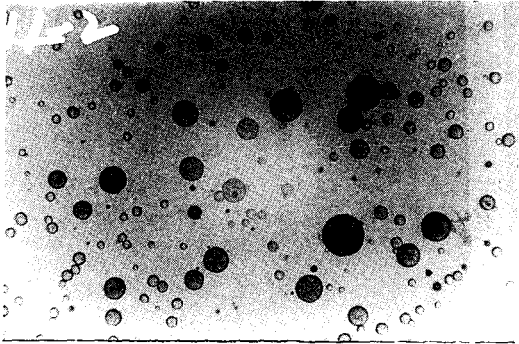


Fig. 4 Photographs of CWM droplets

를 포집막대에 고정시킨후 고정내통으로 삽입한다. 고정내통과 외통의 포집창을 일치하지 않은 상태에서 노즐분사구에서 분출되는 분부류와 수직방향으로 고정시킨 후 순간적으로 회전 외통을 회전시킴으로써 포집창이 일치하게 되는데, 이때 CWM 액적이 slide glass에 포집되게된다. 포집된 분무 액적군은 배율이 10배인 금속현미경($\times 10$)으로 확대하여 사진 촬영하였다. Fig. 4는 CWM액적 분부 사진이다.

CWS액적 사진으로 부터의 SMD측정은 일정한 배율과 동일한 위치에서 고정된 카메라로 촬영된 사진이므로 입자의 직경을 구할 수 있다.

따라서 Fig. 4에서 여러 입경에 대하여 동일한 입경을 갖는 각각의 입자군에 대하여 입경의 갯수를 구하여 식 (1)로 부터 SMD를 구할 수 있다.

위에 언급한 SMD 측정은 다소 측정상의 불확실성(uncertainty)이 수반되므로 반복 실험 및 측정을 하여 구하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 이류체분사노즐의 구멍이 1.5mm이고 노즐 끝부분의 두께와 노즐의 분사구멍과의 비(t/d)가 1에서 부터 5까지 일때, 미립화용 매체(공기)의 질량유량(W_a)이 65g/min일때 연료의 질량유량(W_l)을 변화시키며 상온, 대기압상태로 분사시켰을 때, 분무평균입경(SMD)과 연료의 질량유량(W_l) 그리고 노즐의 t/d 의 관계를 표시한 선도이다.

그림에서 볼 수 있듯이 t/d 가 1~5일때 W_a 를 고정시키고 W_l 을 감소 시킴에 따라 SMD는 감소하였다.

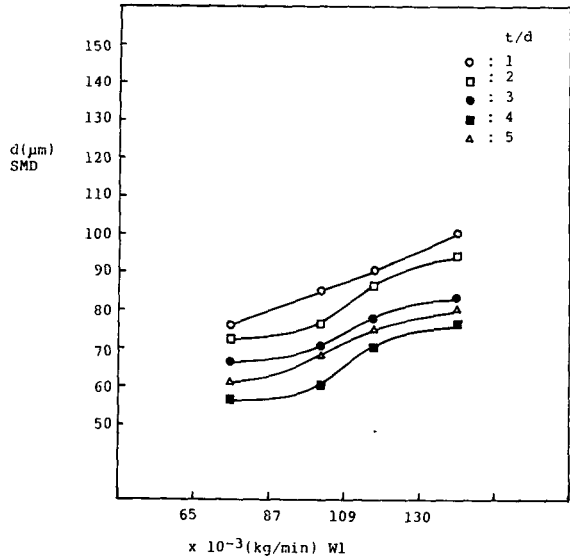


Fig. 5 Effect of spray nozzle shape on atomization ($W_a=65g/min, d=1.5mm$)

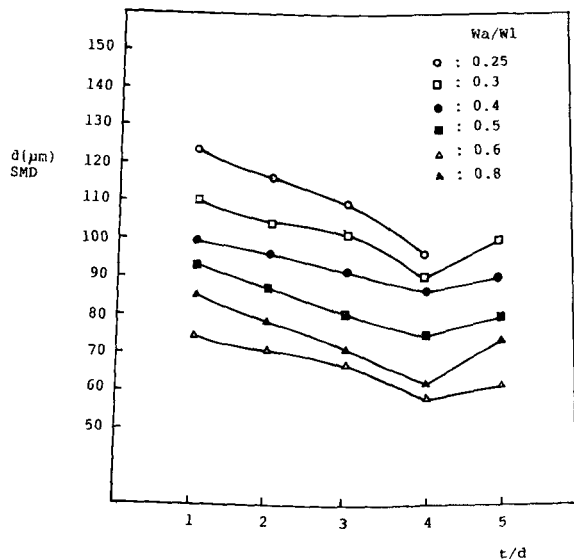


Fig. 6 Effect of spray nozzle shape on atomization($d=1.5mm$)

이는 이류체 미립화기구⁽¹³⁾에서 알 수 있듯이 이류체노즐의 분사압력에 비례하는 공기의 양이 증가할수록 연료유량과 마찰전단력이 더욱 세게 일어나므로 연료가 더 잘게 부서진다. 또한 W_a 가 26, 39 g/min인 경우에도 65g/min일때와 같은 현상을 볼 수 있었다.

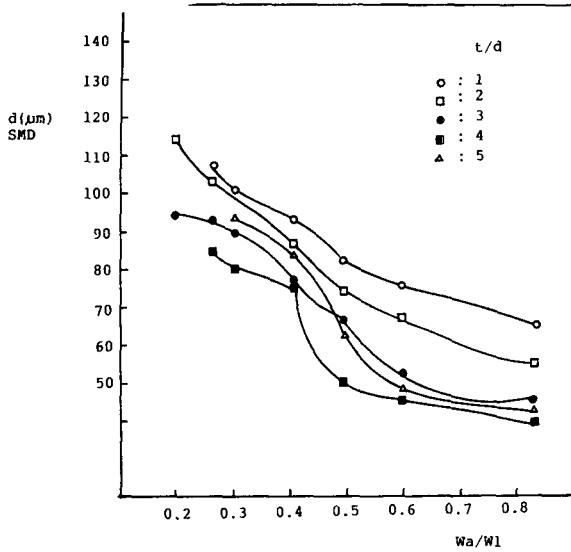


Fig. 7 Effect of spray nozzle shape on atomization ($d=1.5\text{mm}$)

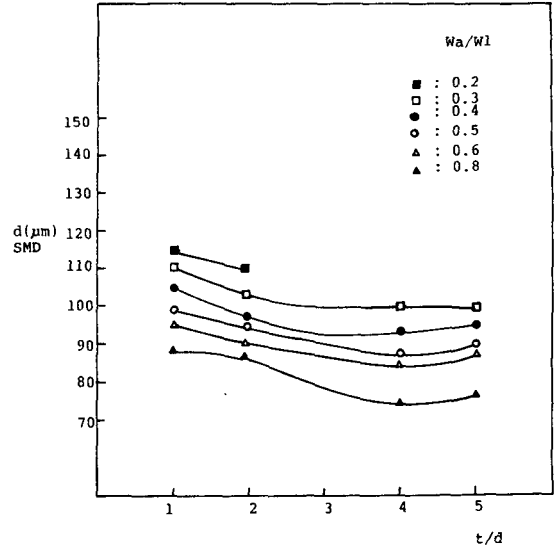


Fig. 9 Effect of spray nozzle shape on atomization ($d=3.0\text{mm}$)

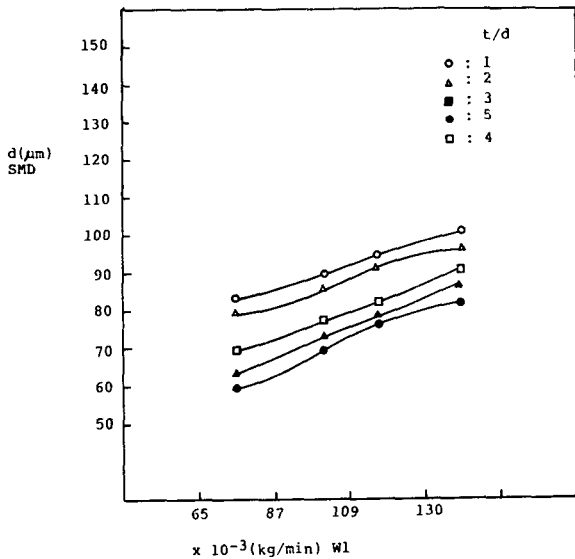


Fig. 8 Effect of spray nozzle shape on atomization ($W_a=65\text{g/min}$, $d=2.0\text{mm}$)

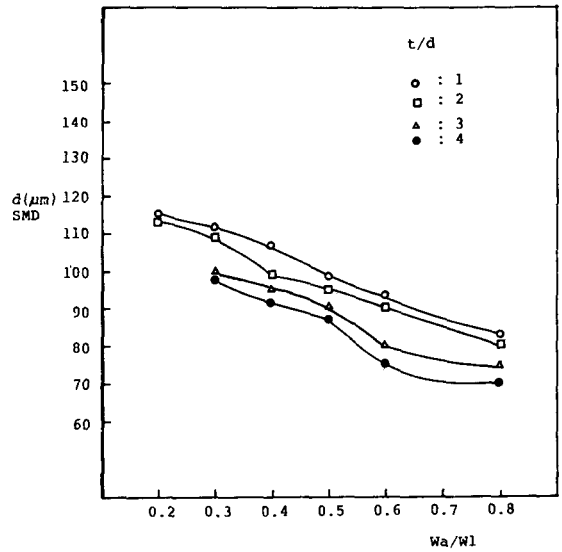


Fig. 10 Effect of spray nozzle shape on atomization ($d=3.0\text{mm}$)

또한 Figs. 6, 7은 d 가 1.5mm 일때 연료와 공기의 질량유량비 (W_a/W_1)를 변화시키면서 노즐의 형상 (t/d)이 1에서 5까지 변화함에 있어서 분무평균 입경 (SMD)의 변화를 나타내주는 그림이다.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 SMD는 W_a/W_1 가 증가할수록 t/d 가 1에서부터 차차 감소하다가 t/d 가

4를 넘어서 부터 다시 증가하는 경향을 보였다.

이는 실험에 사용된 노즐의 형상에서 노즐두께 (t)가 두꺼울수록 노즐구멍벽과의 마찰로 인해 액체의 속도는 느려지며 또한 미립화용 기체(공기)와 속도차이는 커지게 되어 충분한 운동량을 가지고 분사되는 미립화용기체와 액체연료 사이에 마찰전

단력이 커지게되어 t/d 가 1에서 4의 영역에서는 SMD가 감소한다.

그러나 t/d 가 5에서와 같이 노즐의 두께(t)가 어느 정도 이상으로 커지게 되면 액체의 속도가 매우 느려져 액체의 유량이 일정한 조건에서 액체가 차지하는 단면적이 커지게 된다. 이는 미립화용 매체의 분출을 방해하고 압력손실을 초래하게되어 분무평균입경이 증가하는 효과를 주게된다^(2,3).

Fig. 7은 W_a/W_1 가 증가할 수록 SMD가 감소하는데 이는 실험에서 사용된 노즐이 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 내부 혼합식 노즐의 흐름형태를 갖는다고 할때 미립화용 기체와 액체가 혼합하여 높은 압력으로 분출되는데 액체연료보다 기체(공기)가 체적유량도 크고 속도 또한 매우 빠르기 때문이다. 또한 W_a/W_1 이 0.45 이하에서 t/d 가 3, 4, 5일때 불확실성(uncertainty)이 나타나는데 이는 실험방법에서도 언급된 바와 같이 측정상의 오차라고 사료된다.

Fig. 8은 노즐구멍크기(d)가 2.0mm이고 미립화용 공기(W_a)가 65g/min일때 SMD와 t/d 의 관계를 도시한 선도이다.

Fig. 5와 같이 노즐구멍크기가 1.5mm일때의 SMD와 같은 양상을 보였고, d 가 2.0mm일때가 더 안정된 분사가 되는 것을 실험중 관찰할 수 있었다.

Fig. 9, 10은 d 가 3.0mm일때 SMD와 t/d 의 관계를 미립화용 공기와 CWM유체와의 질량유량비(W_a/W_1)를 변수로 하여 도시한 선도이다. 여기에서도 d 가 1.5mm와 같은 경향을 보여주고 있다.

5. 결 론

내부 혼합식 2流體 미립화기구를 이용하여 고점도를 갖는 2相의 CWM을 상온, 대기압상태로 분사시킬 경우 분사노즐의 형상(t/d)이 CWM의 미립화도에 미치는 영향을 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) CWM은 온도가 일정할 경우 이류체 분사노즐로 들어가는 미립화용 공기와 CWM과의 질량유량비(W_a/W_1)가 증가함에 따라 분무평균입경은 감소하였다.

(2) 분사노즐의 분공경과 노즐하단부 분공의 벽두께와의 비(t/d) 1, 2, 3, 4, 5 중에서 $t/d=4$ 가 가장 좋은 미립화도를 나타냈으며 t/d 가 1에서부터

4까지는 분무평균입경(SMD)이 감소하다가 다시 증가현상을 보였다.

후 기

본 연구는 1989년도 동력자원부의 기초연구비(89-2302-351FG) 지원에 의한 결과로서 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

- (1) Sakai, T., etc., 1984, "Research and Development of CWM Combustion", 6th. Int. Coal Slurry Combustion and Technology, Orlando, Florida.
- (2) Sakai, T., etc., 1980, "Flow Characteristics of Internal Mixing Twin-Fluid Atomizer", 8th Japen Conference on Liquid Atomization and Spray System.
- (3) 한국동력자원연구소, 1986, "A Sthdy on Discharge Charac-teristis of Gas-Liquid Mixture in CWM Atomizer".
- (4) Hargrove, M.J., Levasseur, A. and Chow, O.K., 1984, "Combustion Characteristics of CWM", 6th International symposium on Coal-Slurry Combustion and Technology, Pittsburgh Energy Technology Center, Orlando, FL, June 25~27, pp. 127~142.
- (5) Rosfjord, T.J., 1985, "Atomization of Coal Water Mixtures: Evaluation of Fuel Nozzles and Cellulose Gum Silulant", Gas Thrbind Conference and Exhibit, ASME, Houston, TX, March 18~21, pp. 1~8.
- (6) Meger, P.L. and Chigier, N., 1986 "The Atomization Processin CWM Sprays", 8th International Symposium Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, pp. 145~1617.
- (7) Takahashi and Shoji, K., 1986, "A Stydy on Spray Combustion of CWM", 8th International Symposium Coal Slurry Fuel Preparation and Utilization, pp. 179~191.
- (8) Eatough, C.N., Germane, G.J., Smoot, L.D., 1986, "Lignite Slurry Atomizer Spray Distribution and Characterization Study 8th International Symposium Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization, pp. 193~203.
- (9) Kim, S.J., 1983, "Experimental Study of Slurry Atomization", M. S. Special Priject, W. S .U..
- (10) Norman Chigier, 1983, Energy Combustion and

Environment, McGraw-Hill.

- (11) Chae, J.O., etc., 1988, "The Effect of Liquid Viscosity on Atomization", Department of Mechanical Engineering, Inha Univ. The first KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Vol. 2, pp. 253~255.
- (12) Kurabayashi, T., 1976. "內燃機關技術者のための液體の微粒化", 日本機械學會論文集.
- (13) Gillberg, L., Larsson, Mathiesen, M., Nyström, O. and Persson, J., 1983, "Some Rheological Data and Atomization Behavior of CWM's Containing 68 to 83% Coal", Fifth International Symposium on Coal Slurry Combustion and Technology, Pittsburgh Energy Technology Center, Tampa, FL, April.