

## 선택적 촉매 환원법을 위한 외부 혼합형 이류체 노즐 개발에 대한 실험적 연구

Development of an external twin-fluid nozzle for Selective Catalytic Reduction

박정근\*, 이충원\*\*

J.K. Park, C.W. Lee

### Abstract

The effect of the working fluid flow conditions and nozzle geometry on the spray performance of a twin-fluid nozzle used in Selective Catalytic Reduction is investigated experimentally. The liquid pressure is varied in the range of 0.3atm to 1.5atm and the air pressure is varied from the 0.5atm to 3.0atm. relative position between liquid nozzle(internal nozzle) and air nozzle(external nozzle) tip changes from 1mm inside the air nozzle to 1mm outside the air nozzle. The orifice diameter of the air nozzle is varied with 5mm, 6mm and 7mm. Spray visualization is realized with CCD-Camera. SMD(Sauter Mean Diameter) and mean particle velocities are measured by PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) under various experimental conditions. The measuring point is 300mm away from the nozzle tip in the downstream spray. The experimental results are that spray angle is depended air flow rate because nozzle diameter, air pressure and nozzle tip relative positions are related air flow rate. SMD is depended air flow rate and water flow rate. Also, SMD is increased when water flow rate is bigger. SMD is decreased when Air flow rate is bigger.

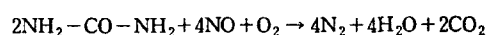
주요기술용어(Key Words): Atomization, NOx, Twin-fluid nozzle, SMD, SCR

### 1. 서론

#### 1.1 연구 배경

최근 환경에 대한 인식이 높아지는 가운데 폐기물을 소각하는 소각로에서 발생하는 배가스 중에는 질소산화물(NOx), 염화수소(HCl), 다이옥신(Dioxin), 분진(Dust)등 유해한 대기오염물질이 포함되어 있다. 따라서 폐기물 소각 시스템에서 이러한 오염물질을 효과적으로 저감할 수 있는 방법들이 연구 중이다. 이들 중 HCl은 습식 세정장치로, 분진은 백 필터(Bag

Filter), 전기 집진기 등의 설비에 의해 제거한다. 또한 이번 연구의 관심사인 질소산화물(NOx)의 제거를 위해서는 주로 선택적 촉매 환원법(SCR)과 비 선택적 촉매 환원법(NSCR)등의 설비에 의해 제거한다. 특히 SCR은 질소산화물을 환원하기 위해 암모니아와 같은 유독가스를 환원제로 사용하게 되는데 암모니아는 저장, 수송에 용이하지 않고 유독성, 폭발성으로 인해 문제점이 많은 실정이다. 그래서 요즘은 요소(Urea)를 물에 녹인 수용액을 소각로 내에 분사시켜 배가스들과 혼합되어 아래와 같은 화학반응을 통하여 질소(N<sub>2</sub>)로 환원시킨다.



\* 경북대학교 대학원 기계공학과

\*\* 경북대학교 기계공학부

이 연구는 이와 같이 소각로 내에서 생성되는 질소 산화물을 저감시키는 SCR 설비의 핵심 기술이 되는 분사노즐의 특성을 분석하고자 두 유체가 지나는 통로에 선회기가 달린 외부 혼합형 이유체 노즐을 선정하여 물과 공기의 유량 및 압력 변화를 주었으며 외부노즐의 오리피스 직경의 변화와 두 노즐 선단부의 상대적인 변화를 주었다. 실험 변수에 대한 설명은 실험조건에 나타내었다.

### 1.2 외부 혼합형 이유체 분무장치

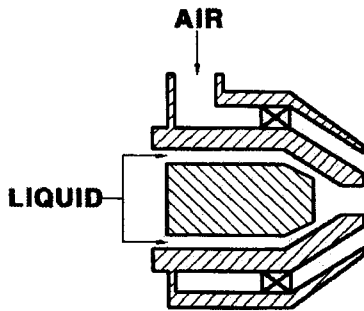


Fig 1. External mixing air-assist atomizer of Ideal type

Fig 1은 실험에 사용될 외부 혼합형 공기보조 미립화기(external mixing air-assist atomizer)의 간단한 모형이다. 이와 같은 외부 혼합형 이유체 노즐의 장점은 다른 종류의 노즐을 사용할 때보다 더욱 미세한 액적을 얻을 수 있으며 액체의 유량이 변해도 일정한 형태의 분무각을 유지시켜 준다. 또한 액체의 압력이 기체의 압력보다 높은 경우에도 액체노즐에서 분사되는 액적이 기체 공급관으로 역류하는 일이 없으며, 기체의 압력이 액체의 압력보다 높아도 액체의 분사특성에 거의 영향을 주지 않는다. 그리고 공기가 선회기를 지나서 분사되기 때문에 더욱 활발한 와류가 생성된다. 따라서 분사 액적과 공기와의 혼합이 더욱 잘 이루어지리라 예상된다. 또한 거의 모든 분사압력범위에서 미립화가 잘 이루어지기 때문에 저압에서 고압으로 압력에 따른 분무 특성을 연구하기에도 적합하며 점도가 있는 물질의 분사에 특히 유효하므로

SCR 설비에 적합한 노즐로 사료된다.

그러나 현재 외부혼합식 2유체 분사 노즐의 경우 액주의 분열기구를 지배하는 액체의 분출 속도와 기류와의 상관관계를 규명한 연구의 대부분이 기초적인 연구 자료에 그치고 있는 실정이며, 액주의 분열기구와 밀접한 관련이 있는 액주의 속도, 계속하여 액적으로 분열되는 과정 등에 관한 체계적인 연구나 데이터가 없기 때문에 응용, 설계가 힘들고 특히 노즐 형상변화에 따른 분열현상과 분무특성과의 관계에 대한 연구는 단지 경험적인 데이터에 의존하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 이유체 분사노즐의 한 종류인 선회기가 달린 이유체 노즐의 분사특성과 미립화 성능을 SMD와 분무각, 분사형태의 변화 등을 토대로 보다 체계적으로 외부혼합형 이유체 노즐의 특성을 분석하고자 한다.

## 2. 실험 장치

### 2.1 실험 개략도

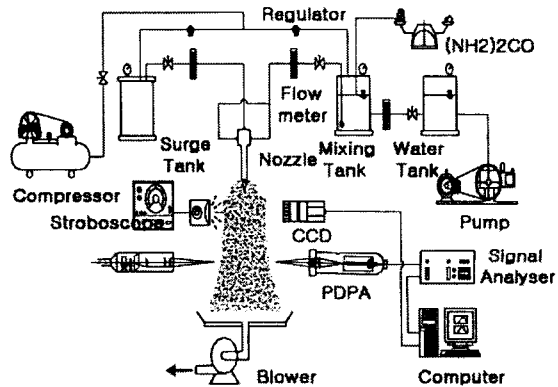


Fig 2. Ideal measurement of experiment

### 2.2 유체 공급부

공기압축기에 의해 10atm로 가압된 공기는 수분이 제거된 다음 사용된다. 미립화용 공기는 공기 분사 압력에 따라 유량 변화가 심하여, 액체의 미립화 특성에 심각한 영향을 미친다. 따라서 일정 유량이 공급될 수 있도록 공기 서지 탱크에서 맥동현상을 줄여서 사용하였다. 서지 탱크에 공급된 미립화용 기체는 Regulator를 거쳐서 노즐로 공급된다.

분무액체로는 상온의 수돗물을 사용하였고, 요구되는 분사압력을 얻기 위해서 물 서지탱크를 사용하여 탱크에 10atm의 압축공기로 압력을 부여하였다. 또한 공급되는 액체는 일정압력을 유지하기 위한 Regulator를 통해서 노즐로 공급된다.

2.3 이류체 분사노즐

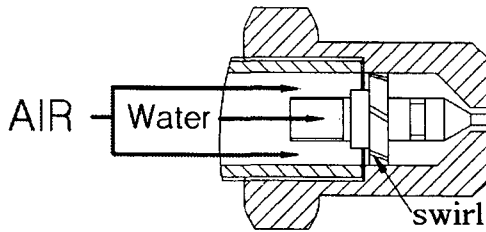


Fig 3. A picture of experimental nozzle combination

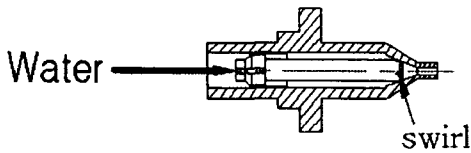


Fig 4. A picture of experimental inner nozzle

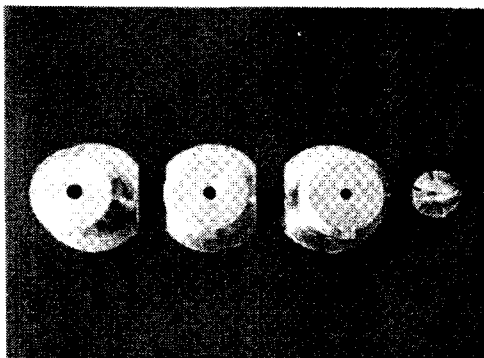


Fig 5. A picture of external nozzle and inner nozzle

Fig 3은 실험에 사용된 외부 노즐과 내부 노즐의 조립도 및 공기 선회기를 나타냈으며, Fig 4는 내부노즐의 단면과 액체 선회기를 나타낸 것이다. 그리고 Fig 5는 실제 노즐을 Digital Camera로 찍은 사진이다.

2.4 PDPA(phase doppler particle analyzer)

분무 액적들의 평균입경과 속도는 신호의 위상차를 이용하여 입자의 평균입경과 속도를 측정할 수 있는 위상 도플러 입자 분석기(PDPA; Phase Doppler Particle Analyzer)를 사용하여 측정한다. Fig. 6은 본 실험에 사용할 PDPA를 이용한 평균입경의 측정 방법의 개략도를 나타낸 것이다.

He-Ne laser로 beam을 만드는 Bragg Cell Transmitter를 통해 초점거리 500mm에서 산란광은 교차하게 된다. 이 교차 지점이 측정부가 되고, 분사된 액적은 측정부를 통과하게 된다. 이때 구형 액적의 굴절에 의해 산란된 빛은 레이저 빔과 30°의 편향각을 가지고 초점거리가 500mm인 수광부(Receiver)에서 받아들인다. 수광부에서의 광은 3개의 광 증폭관(photo-multitube)을 통과하게 되고, 증폭관으로부터의 신호는 RSA (Real-Time Signal Analyzer)를 통해 입력된 신호를 시간의 함수로 나타내게 된다. 이 시간의 함수로 조합된 데이터는 컴퓨터에 입력이 되고 입력된 신호는 평균입경 및 속도 분포를 히스토그램(histogram)과 상호관계(correlation)로 화면에 출력하게 된다.

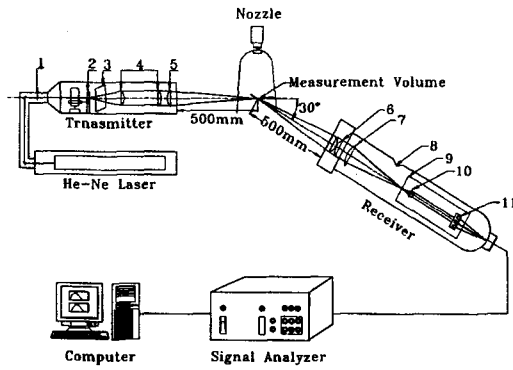


Fig 6. Schematic diagram of SMD and velocity measurement by PDPA System

Bragg Cell Transmitter	
1. Grating lens	
2. Rotating diffraction grating	
3. Mask	
4. Interchangeable collimating Lenses	
5. Output lens	
Receiver	
6. Doublet	
7. Triplet	
8. Viewing port	
9. Spatial filter	
10. Collimating lens	
11. Photomultiplier tubes	

2.5 CCD-Camera

분무각 측정을 위해 사진촬영법을 이용하였고 화상처리는 Strobe Light Source와 수광부에는 105mm 마이크로렌즈가 부착된 CCD Camera(Kodak Megaplus, ES 1.0)를 사용하여 image를 분석하였다. 그 재원은 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. The Specification of CCD Camera

Specification	Description
Pixel Number	1024 × 1024
Exposure Time	100 $\mu$ s ~ 33ms
Frame Number	15 Frame/s
Data Rate	33 Mega pixel/s

3. 실험 조건

노즐 특성을 파악하기 위한 실험 조건은 Table 2에 나타내었고 노즐 선단부(Tip)의 상대적인 위치의 변화는 Fig. 7에 나타내었다.

Table 2. Experimental Condition

Experimental Condition	Experimental Variable
Water Pressure Variable	0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5 (atm)
Air Pressure Variable	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 (atm)
External Nozzle orifice Variable	$\varnothing$ 5, $\varnothing$ 6, $\varnothing$ 7 (mm)
Nozzle tip relative position Variable	-1, 0, +1 (mm)

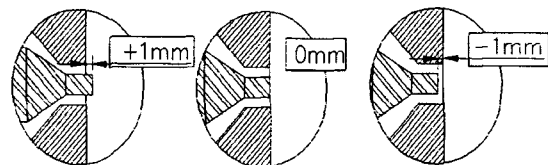


Fig 7. Relation positions of Nozzle Tip

4. 실험결과 및 고찰

4.1 액체유량 측정과 보정

액체유량을 측정하여 보정하게 된 이유는 사용된 상용 액체유량계의 정확성에 차이가 있기 때문이다. 이에 따라 각 액체유량에 따른 압력을 측정하여 보다 정확한 유량을 측정하고 Table 3에 표시하였다. Table 3을 바탕으로 액체유량과 액체압력간의 관계를 Fig. 8에 그래프로 나타내었다.

Table 3. Measurement of flow rate

water test data(ml/min)								
횟수/ 압력	1atm	2atm	3atm	4atm	5atm	6atm	7atm	8atm
1	359	432	648	756	888	924	1020	1104
2	372	420	672	792	840	936	1008	1092
3	360	456	696	816	804	900	1044	1080
4	361	408	672	792	864	936	1044	1056
5	360	444	672	792	840	972	996	1116
평균 (l/hr)	21.74	25.92	40.32	47.38	50.83	55.73	61.34	65.34

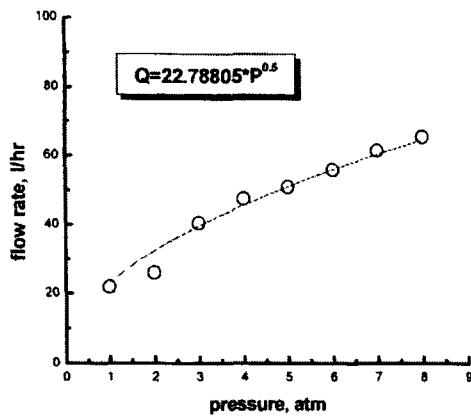


Fig 8. Curve of flow rate

4.2 실험조건에 따른 분무각의 변화

분무각 측정은 사진촬영을 하여 측정하였으며 사진에 나타난 분무외곽선을 설정하여 분무각을 측정하였다.

분무각(spray angle)은 액체분무가 노즐에서 분사되는 지점에서의 분무 외곽선을 따른 분사각도  $2\alpha_s$ 를 의미한다. 그러나 미립화 되기 이전에는 노즐 근처의 액막이 표면장력에 의해서 안쪽으로 수축되는 효과가 있으며, 미립화 된 이후의 하류에서도 주위기체의 반경방향 유입에 의해서 액적의 궤적이 안쪽으로 휘어들어오는 효과가 있기 때문에 실제 분무면적은 줄어들게 된다. 따라서 적절한 측 방향 위치에서 분무의 양측 외곽지점과 노즐 출구를 이은 두 직선사이의 각도  $2\alpha_s$ 를 분무각으로 정의하기로 한

다.

이 실험에서는 분무각을 측정하기 위하여 후광(back light)촬영법으로 분무각을 측정하였다.

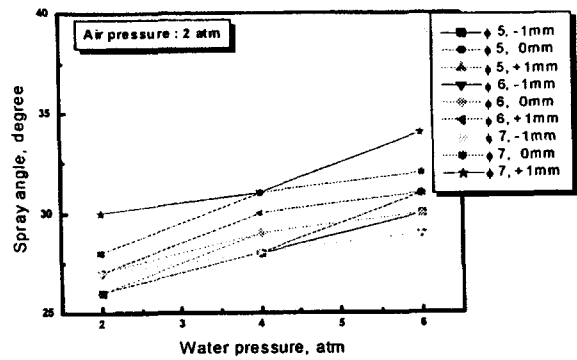


Fig 9. A picture of spray angle

분무각은 물의 분사압력변화와 내부 노즐의 위치변화(nozzle tip), 그리고 노즐 orifice의 크기의 영향을 받고 있다. 물의 분사압력이 증가할수록 분무각이 커지고 또한 내부노즐의 변위가 증가할수록 분무각이 커지며 노즐 홀의 크기가 커질수록 분무각이 커지는 것을 확인할 수 있다.

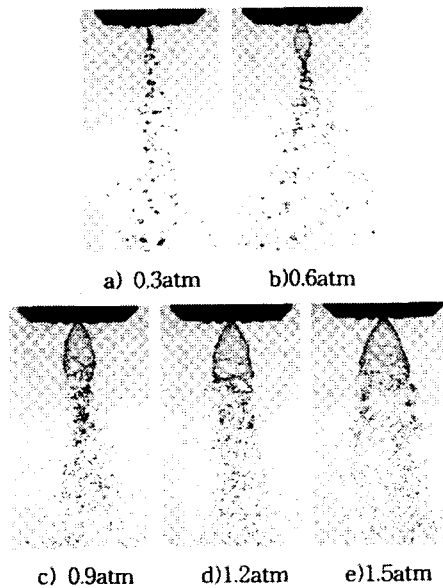


Fig 10. Spray Angle of the water pressure change for no air pressure

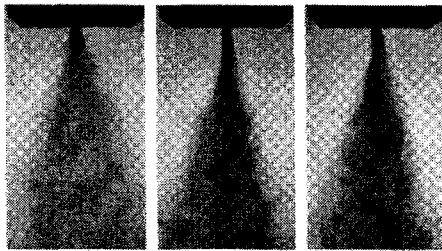
Fig 10에서는 공기압력이 없이 물의 분사사진을 촬영한 것으로서 분사압력이 높아질수록 선

회기의 영향에 따라 환형 액막(liquid film)이 점차 증가되고 분사각이 넓어진다. 그리고 분사압력이 높아짐에 따라 액적의 tangential 성분 운동량이 증가하므로 액막이 아래로 갈수록 점차 분열되다가 미세한 액적으로 되어 감을 파악하였다. 내부 액체 선회기에 의해 이러한 분사특성을 파악한 가운데 외부 공기 선회기가 포함된 외부 노즐에 공기를 공급하였다.

i) 공기 분사압력에 따른 분무각의 변화

통제변인: Nozzle Dia.=5mm,  $P_{water} = 0.5atm$

Nozzle tip = 0mm



a) 1.0atm b) 2.0atm c) 3.0atm

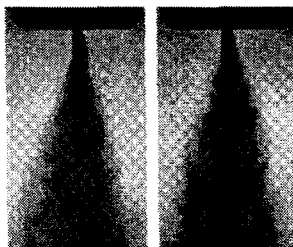
Fig 11. Spray Angle of the Air pressure Change

촬영된 사진과 그래프로 확인한 결과, 공기 분사압력이 높을수록 노즐에서 빠져나오는 공기의 운동량이 커지고 분출속도가 빨라짐에 따라 분무각이 좁아진다.

ii) 물 분사압력이 다를 때 분무각의 변화

통제변인: Nozzle Dia.=5mm,  $P_{air} = 2.0atm$

Nozzle tip = 0mm



a) 0.5atm b) 1.5atm

Fig 12. Spray Angle of the Water pressure Change

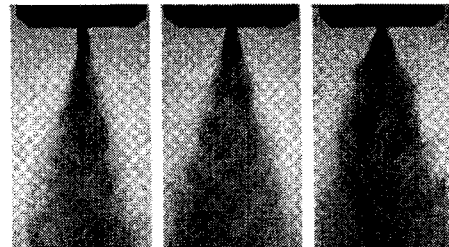
물의 분사압력의 변화에 따라라도 약간의 분무각의 변화가 있는 것으로 판명되었다. 공급해

주는 물의 분사압력이 높을수록 외부로 분사된 액적의 운동량이 커짐에 따라 주위로 확산하려는 액적에 의해 분무각의 변화를 보이고 있다. 그러나 그 변화가 크게 차이가 나지 않음은 외부혼합형 이유채 노즐의 특징이라 할 수 있다.

iii) 노즐 orifice의 직경이 다를 경우의 분무각의 변화

통제변인:  $P_{water} = 0.5atm$ ,  $P_{air} = 2.0atm$

Nozzle tip = 0mm



a) 5mm b) 6mm c) 7mm

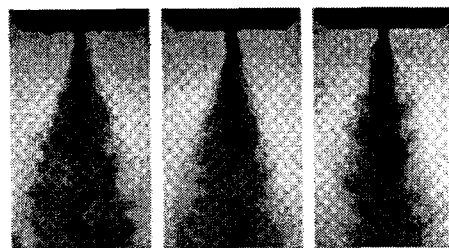
Fig 13. Spray Angle of the Nozzle Diameter Change

촬영된 사진과 그래프로 확인한 결과 노즐의 직경이 커질수록 보다 넓은 범위에서 공기와 물이 충돌하게 되므로 분무각이 커진다.

iv) Nozzle tip의 상대적인 위치변화에 따른 분무각의 변화

통제변인:  $P_{water} = 0.5atm$ ,  $P_{air} = 2.0atm$

Nozzle Dia. = 5.0mm



a) -1mm b) 0mm c) +1mm

Fig 14. Spray Angle of the Nozzle Diameter Change

촬영된 사진과 그래프로 확인한 결과, 액체 노즐 선단부의 위치 변화가 공기 노즐 내부로 들어갈수록 분사되는 공기의 영향을 많이 받아서 노즐의 분무각이 적어진다.

4.3 실험조건에 따른 SMD의 변화

① 공기 분사압력의 변화와 SMD, 노즐 orifice의 크기와 SMD, 노즐위치와 SMD의 관계

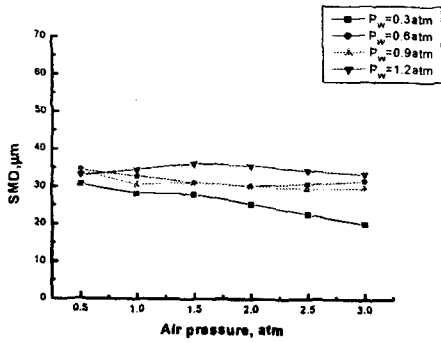


Fig 15. Nozzle Dia.= 5mm,  
Nozzle tip position = -1mm

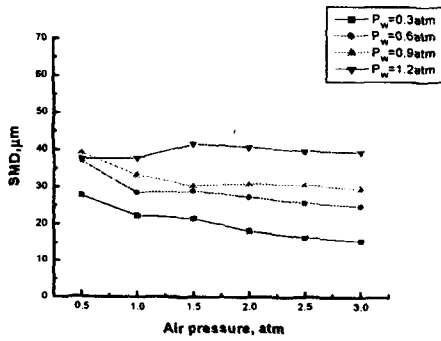


Fig 16. Nozzle Dia.= 5mm,  
Nozzle tip position = 0mm

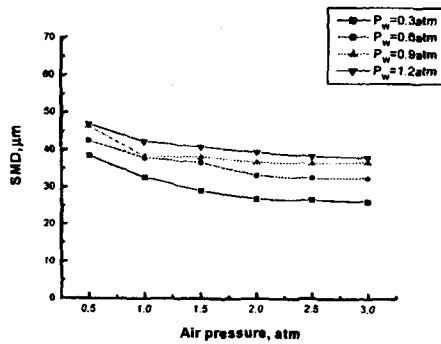


Fig 17. Nozzle Dia.= 5mm,  
Nozzle tip position = +1mm

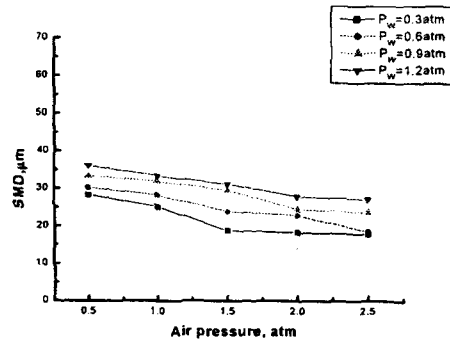


Fig 18. Nozzle Dia.= 6mm,  
Nozzle tip position = -1mm

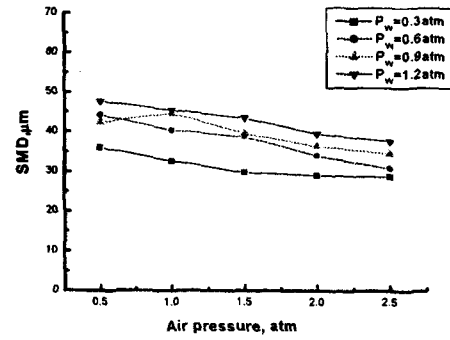


Fig 19. Nozzle Dia.= 6mm,  
Nozzle tip position = 0mm

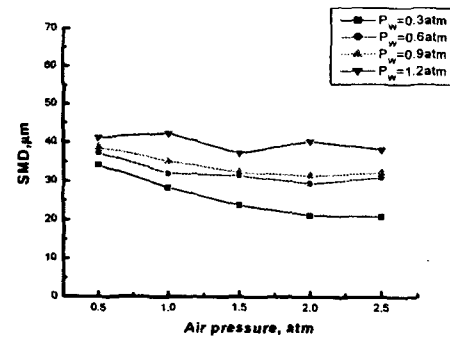


Fig 20. Nozzle Dia.= 6mm,  
Nozzle tip position = +1mm

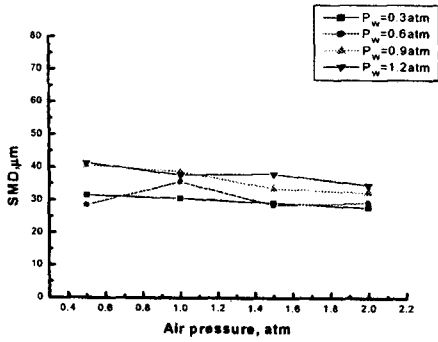


Fig 21. Nozzle Dia.= 7mm,  
Nozzle tip position = -1mm

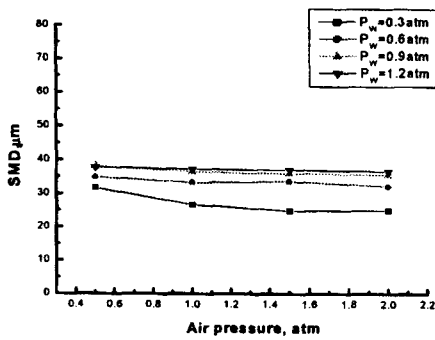


Fig 22. Nozzle Dia.= 7mm,  
Nozzle tip position = 0mm

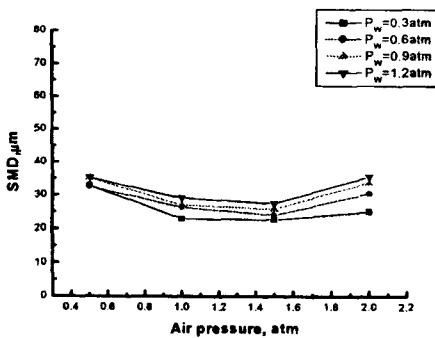


Fig 23. Nozzle Dia.= 7mm,  
Nozzle tip position = +1mm

위 그래프들에서 보이는 것과 같이 물의 분사 압력이 고정되어 있다면 공기 분사압력이 높아

질수록 SMD의 값은 작아져야 한다. 그리고 (Fig 15, Fig 18, Fig 21), (Fig 16 Fig 19, Fig 22), (Fig 17, Fig 20, Fig 23)에서 보듯이 노즐 hole이 작을수록 전체적인 SMD의 크기도 작게 나온다. 그리고 (Fig 15, Fig 16, Fig 17),(Fig 18, Fig 19, Fig 20), (Fig 21, Fig 22, Fig 23)을 비교하면 노즐 Tip의 상대적인 위치가 -1mm에서 가장 작은 SMD를 가지고 그 다음이 0mm, +1mm 순서로 SMD의 크기가 증가한다. 한 가지 덧붙여서 물의 분사압력이 변하고 공기 분사압력이 일정할 때에는 SMD가 물의 분사압력에 따라 변한다. Fig 24를 참고하면 물의 분사압력이 증가할 때 SMD도 증가한다는 것을 알 수 있다.

② 물의 분사압력과 SMD의 관계

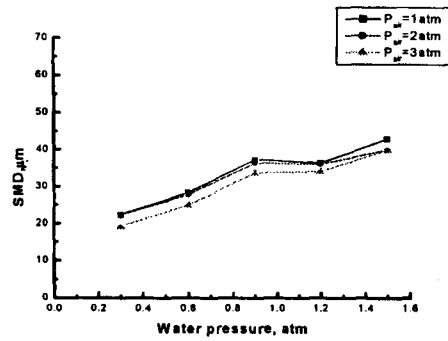


Fig 24. Water pressure VS. SMD  
(Nozzle Dia.= 5mm., Nozzle tip position= -1mm)

③ 물의 분사압력과 분무 액적들의 평균속도와 의 관계

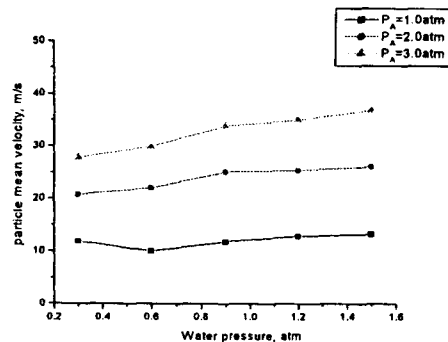


Fig 25. Water pressure VS Particle velocity



Fig 25에서 물 분사압력이 클수록 액적들의 속도가 증가하는 경향이 있지만 공기의 분출속도가 크기 때문에 공기의 분사압력이 일정할 때 물의 압력에 따른 액적들의 속도의 변화는 크지 않다.

④ 공기분사압력과 분무액적들의 속도와의 관계  
 Fig 26에서 공기의 분사압력이 클수록 빠져나 가려는 공기의 속도가 크므로 분무되는 액적들도 평균속도가 빨라진다.

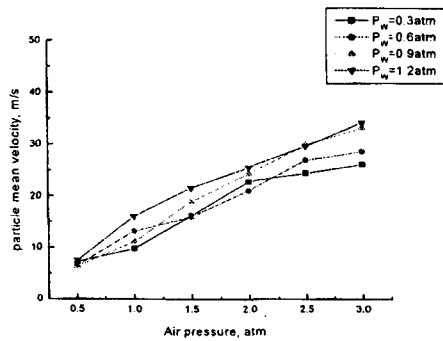


Fig 26. Air pressure VS particle velocity

⑤ 중심에서 Radial distance에 따른 SMD

Fig 27에서 축 중심에서 부터의 반경방향 으 로 이동하며 측정 한 SMD 분포이다. SMD의 분포는 전반적으로 균일하다고 할 수 있다. 즉 액체만 분사하였을 때와 같은 중공원추형 분무 형상을 가진 게 아니라 분포도가 어느 정도 일정한 full cone 형태의 분무형상을 나타낸다.

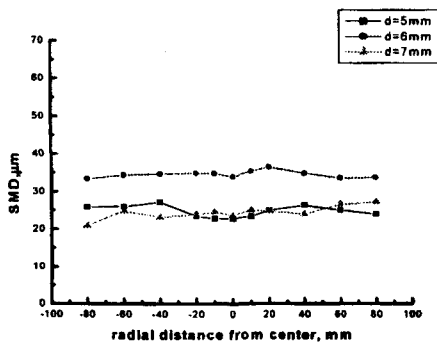


Fig 27. Relationships between radial distance from center and SMD

### 5. 결론

이번에 연구한 SCR용 외부 혼합형 이유체 노즐의 분무특성은 압축공기와 상온의 수돗물의 분사압력으로 측정된 유량의 변화와, 노즐 직경비, 그리고 노즐 선단부의 상대적인 위치차이에 의한 분무각, SMD, 액적 속도의 상관관계를 규명하고자 하였다.

(1) 분무각은 물의 압력이 증가할수록 공기의 압력이 감소할수록 분무각이 커지며, 또한 노즐 선단부의 상대적인 위치차이가 -1, 0, +1mm 같 수록, 외부 노즐 직경비가 커질수록 분무각이 커지는 것으로 조사되었다.

(2) SMD는 물의 압력이 증가할수록, 즉 물의 유량이 많을수록 SMD는 증가하였고, 공기의 압력이 작아질수록, 노즐 직경비가 커질수록, 노즐 선단부의 위치가 외부 노즐 밖으로 나올 수록 (-1, 0, +1mm) SMD가 증가된다.

(3) 노즐에서의 액적의 평균속도는 액체의 분사 속도에 비해 공기의 분사속도에 더 큰 영향을 받고 있음을 파악할 수 있다.

후기 :

이 연구는 삼성엔지니어링의 선택적 촉매환원법의 차세대 핵심 환경기술 개발 과제 중에서 요소수용액 분사 노즐 개발 과제의 일부분으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- 이상용 "액체의 미립화" 민음사, 1996
- 이충원, 김혁주, 시성규 "이유체 노즐 내부 유동현상에 대한 연구", 액체 미립화 학술 강연회 논문집, 1993, pp. 48~57
- 이상용, 고광웅, "단순 와류 분무 노즐에서 분사되는 중공 원추형 액막의 분무각". 액체 미립화 학술 강연회 논문집, 2002, pp. 94~100

4. B. C. Knkel, and C. U. I. Odenbrand, SCR catalysts for bio fuels and waste incineration applications. Deactivation by salts, Proceedings of 3rd Nordic SOx-NOx Conference, No. 9610, pp. 43-48, March 13-14, 1996
5. Staudt, J.E., and Amar, P.K., " NESCAUMs Status Report on NOx: Post-RACT Control Technologies and Cost Effectiveness", DoE Conference on SCR and SNCR, Pittsburgh, May 21-22. 1998
6. H. T. Hug, A. Mayer, A. Hartenstein, Off-highway exhaust gas aftertreatment: combining urea-SCR, oxidation catalysis and traps, SAE Technical Paper Series 930363, Detroit, March 1-5, 1993
7. M. Koebel, M. Elsener, T. Marti, NOx-reduction in diesel exhaust gas with urea and selective catalytic reduction , Combust. Sci. Tech. 121, pp. 85-102, 1996
8. M. Koebel, M. Elsener, M. Kleemann, Urea-SCR: a promising technique to reduce NOx emissions from automotive diesel engines , Catalysis Today 59, pp. 335-345, 2000
9. H. Lefebvre, Atomization and Sprays, pp. 105-106, 1989
10. H. Lefebvre, Atomization and Sprays, pp. 201-202, 1989