

수소/산소/TEOS 확산화염 중 직접포집을 이용한 실리카 입자의 성장특성에 관한 연구

정창훈*·안강호**·최만수·이준식***

Growth Characteristics of Silica Particles Using *In situ* Sampling from H₂/O₂/TEOS Diffusion Flame

Changhoon Jung, Kang-Ho Ahn, Mansoo Choi and Joon Sik Lee

Key Words: Diffusion flame(확산화염), TEOS, *In situ* sampling(직접포집), silica particle(실리카 입자), thermophoretic sampling(열영동 포집)

Abstract

Growth characteristics of silica particles have been studied experimentally using *in situ* sampling technique from H₂/O₂/TEOS diffusion flame with carefully devised sampling probe. Verification of sampling result was done through new method and effects of flame condition and TEOS flow rate on growth characteristics of silica particles were investigated. By comparing particles sampled by thermophoretic sampling in flame with those by collector sampling after probe, particles do not change before and after probe sampling, which was clearly proved from the fact that the result of TEM image analysis makes good agreement with that of SMPS measurement. As flame temperature increases, the effect of coalescence or sintering becomes important mechanism during growth of silica particles, resulting in canceling the effect of coagulation, which makes mean diameter of silica particles increase slowly. With increase in TEOS flow rate, the number concentration of generated silica particle increases but residence time of particles in flame decreases. As a result, there exists upper limit to which the diameter of silica particle increases under same flame condition.

기호설명

여기에 기호 설명을 입력하십시오

1. 서론

화염을 이용한 입자 제조공정은 화염 중에서 기체로부터 입자를 제조하는 방법으로서 특히 세라믹 산화물 입자의 제조에 널리 이용되고 있다. 최근에는 입자의 직경이 나노미터 크기 수준으로 작아질수록 기계적, 화학적, 광학적 성질이 향상

되는 특성이 발견되고 이러한 입자로 이루어진 물질이 우수한 성질을 갖는다는 사실에 주목하여 미세한 입자를 제조하는 방법으로서 새로이 각광을 받고 있다.⁽¹⁾

입자를 이용하여 제조된 물질의 물성치는 입자의 성장특성을 결정하는 입자의 크기, 크기분포, 형태, 집합의 정도, 화학조성 및 상의 조성에 의존하므로 입자의 성장특성을 제어함으로써 고품질의 물질을 제조할 수 있다.⁽²⁾ 그러므로, 화염에 존재하는 입자의 성장특성을 파악하고자 입자의 크기, 크기분포, 형상을 정확히 측정하는 것은 매우 중요하다.

화염에서 입자를 측정하는 방법은 광학적 방법과 흡입프로브를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 광학적 방법은 레이저와 같은 광원을 이용하여 화염에 광선을 조사시키고 입자로부터 흡수,

* 서울대학교 대학원
** 한양대학교 기계공학과
*** 서울대학교 기계공학과

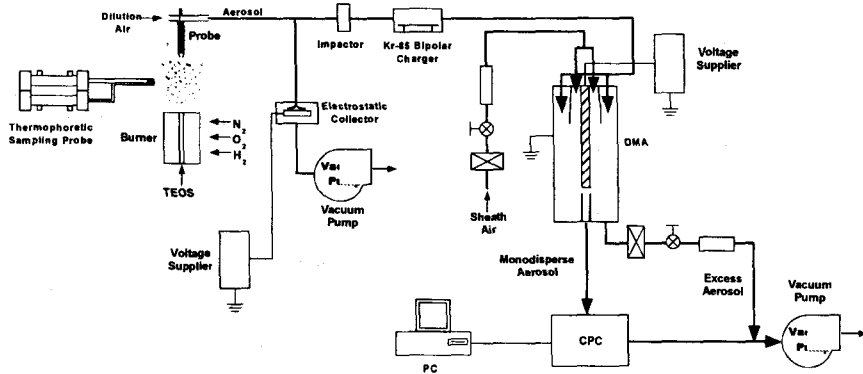


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

산란된 광선을 측정하여 입자의 농도 및 크기분포를 측정하는 방법이다.⁽³⁻⁶⁾ 이 방법은 화염을 교란시키지 않는다는 장점이 있으나 미세한 입자로부터 얻을 수 있는 신호가 약하고 크기분포를 미리 가정하여야만 정량적인 결과를 얻을 수 있다. 흡입프로브를 이용한 방법은 화염에 프로브를 직접 삽입한 후 입자를 함유한 고온의 기체를 흡입하여 측정한다. 흡입프로브에서 흡입된 고온의 기체는 다량의 희석기체와 혼합되어 신속한 냉각이 이루어지도록 하여서 화학반응을 동결시킨다. 화염뿐만 아니라 고온의 반응로에서 발생한 입자를 측정하는 방법으로도 흡입프로브를 이용한 방법이 많이 응용되고 있으며 필요에 따라서는 여러번의 희석과정을 거친다.⁽⁷⁻¹²⁾ 광학적 방법과는 달리 입자의 크기분포를 직접 구할 수 있고 이로부터 정량적인 결과를 얻을 수 있는 장점이 있지만 흡입프로브를 화염에 삽입하므로 화염을 교란시키고 희석된 후의 크기분포가 화염에서의 크기분포와 동일하도록 흡입프로브에서 화학반응이 신속히 동결되고 입자의 응집과 흡착이 발생하지 않아야 한다.⁽¹²⁾

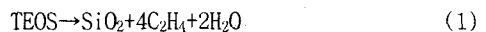
고온의 반응로에서 흡입프로브를 이용하여 입자의 특성을 파악하고자 하는 연구는 fluidized bed에서의 석탄연소시 발생하는 입자들을 흡입하는 연구와⁽⁷⁾ 1단 및 다단의 반응로에서 발생시킨 실리카 입자의 크기분포를 구하고자 하는 연구⁽⁸⁻¹⁰⁾ 등에서 찾을 수 있으며 화염에서 입자의 특성을 연구한 경우는 메탄 예혼합화염과⁽¹¹⁾ 증류메탄화염의 경우에서^(12, 13) 찾을 수 있다.

본 연구에서는 수소/산소/화산화염에서 TEOS로부터 실리카 입자를 발생시키고 흡입프로브로

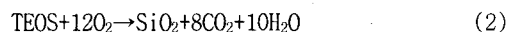
흡입한 후 SMPS를 이용하여 크기분포를 측정하였고 열영동 포집장치 및 입자채집기에서 구한 입자의 투과전자현미경 사진으로부터 실리카 입자의 성장특성을 파악하였다. 아울러 흡입프로브에 의한 화염의 교란이 포집된 입자에 미치는 영향을 파악하기 위한 새로운 방법으로서 투과전자현미경 사진의 화상분석과 SMPS 측정결과와의 비교를 통하여 흡입프로브 전후의 입자를 비교하는 방법을 이용하였으며 본 연구에서 수행한 직접포집을 이용한 입자의 측정방법이 유용하다는 점을 검증하였다.

2. 실험방법

수소/산소 동축화산화염에서 TEOS의 화학반응에 의하여 형성된 실리카 입자를 측정하는 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 상온에서 액체인 TEOS는 증기압이 낮으므로 버블러를 이용하여 버너에 공급하였으며 이송기체로는 질소를 사용하였다. 수소, 산소, 그리고 차단기체로 질소가 버너로 공급되고 유량을 MFC를 사용하여 조절한다. 버너의 중심으로부터 바깥으로 TEOS, 차단기체, 수소, 산소가 분사되며 이러한 버너의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 버너로 주입된 TEOS는 다음과 같이 수소/산소 동축화산화염에서 열분해반응을 하여 실리카 입자를 발생시킨다는 보고와,⁽¹⁴⁾



다음과 같이 산소와 반응하여 실리카 입자를 발생시킨다는 보고가 있다.⁽¹⁵⁾



중앙의 분사구 주위로 분사되는 차단기체인 질소는 중앙의 분사구에서 입자가 생성되어 부착되는 것을 방지하는 역할을 한다. 생성된 화염은 부력으로 인하여 불안정하므로 화염 주위로 깨끗한 공기를 불어주는 화염안정기를 부착하여 안정된 화염을 유지하였다. 본 연구에 사용된 측정된 측정좌표는 버너출구로부터 높이방향으로 축방향

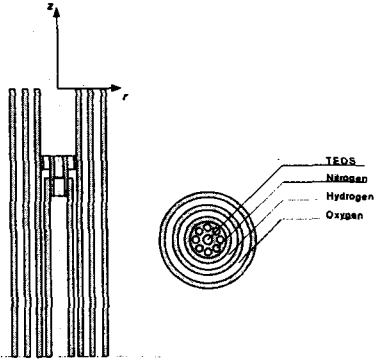


Fig. 2 Burner configuration

좌표 z , 버너중심으로부터 반경방향좌표 r 로 정의하였으며 Fig. 2에 나타내었다. 화염 내에서 입자를 함유한 고온의 기체를 흡입할 프로브는 재질이 스테인레스인 두개의 동축관으로 이루어졌으며 회석기체가 내관과 외관사이를 흐르면서 프로브를 냉각시키도록 하여 고온에서 견딜 수 있도록 하였다. 프로브의 흡입구는 벤츨리관을 응용한 형태로서 회석기체가 통과하면서 대기압보다 낮은 기압을 유지하도록 하여 고온의 기체를 흡입한다. 흡입과 동시에 냉각 및 1차 회석이 이루어지고 회석이 이루어진 고온의 기체는 내관의 중심부를 지나서 2차 회석을 거친다. 1차 및 2차 회석을 거쳐서 충분히 냉각되고 입자의 농도가 낮아진 기체의 일부를 입자채집기로 보내어 입자를 포집하여 투과전자현미경으로 관찰하고 일부는 측정범위에 맞도록 다시 회석된 후 측정부(TSI Model 3934 SMPS)에서 입자의 크기분포가 구하여진다. 두개의 공압실린더로 구성된 열영동 포집장치를 이용하여 화염 내의 지정된 위치에서만 입자의 포집부가 노출되도록 하여 입자를 포집하였다. 타이머로 노출시간을 조절하여 적절한 개수의 입자가 부착되도록 하였으며 포집된 입자는 투과전자현미경으로 관찰하였다.⁽¹⁶⁾

3. 화염온도분포

화염의 온도분포는 입자의 특성에 가장 큰 영향을 주는 요인으로 이에 대한 측정은 매우 중요하다. 본 연구에서는 B-type 열전대로 온도를 측정하였으며 열전대의 표면과 대기 사이에서 발생하는 복사열전달의 효과를 고려한 보상된 온도를 구하였다.⁽¹⁷⁾

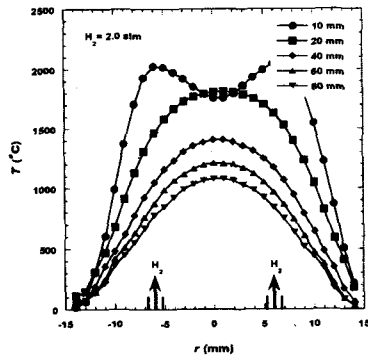


Fig. 3 Radial flame temperature

Fig. 3에 반경방향 및 버너의 중심에서 축방향으로의 온도분포를 나타내었으며 $O_2 = 1.5$ slm, shield $N_2 = 0.5$ slm으로 고정시키고 수소의 유량에 따른 온도분포의 차이를 살펴보았다. Fig. 3에 $H_2 = 2.0$ slm이고 $z = 10, 20, 40, 60, 80$ mm인 위치에서 반경방향으로의 온도분포를 나타내었다. $r = 0$ 인 중심축을 중심으로 반경방향으로의 온도분포가 대칭을 잘 이루고 있음을 알 수 있다. $z = 10$ mm인 경우에는 버너의 중심부가 아닌 수소가 분사되는 위치, 즉, 화염이 형성되는 곳에서 최고온도를 나타내고 있으며 $z = 20$ mm 이후에서는 중심부의 온도가 가장 높다. 낮은 위치에서는 수소와 산소의 연소로 인하여 화염이 형성된 위치에서 생성된 고온의 기체가 중심부로 확산되는 것이 지연되므로 중심부가 아닌 지점에서 온도가 가장 높지만 이후 높이가 증가할수록 주위공기의 유입으로 인하여 점차 중심부에서 가장 높은 온도를 갖는 형태가 된다. 이로 인하여 중심부의 온도가 높이가 증가할수록 증가하다가 감소하는 경우가 존재하는데 이를 Fig. 4에서 확인할 수 있다. Fig. 4에 버너의 중심에서 축방향으로의 온도분포를 $z = 10$ mm인 지점부터 나타

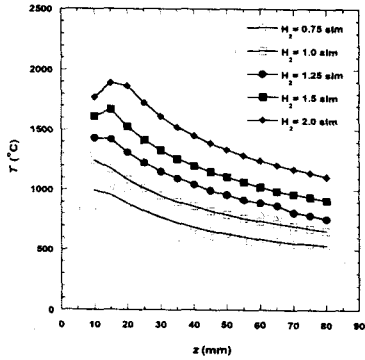


Fig. 4 Axial flame temperature

내었다. 수소유량이 증가할수록 전체적인 화염의 온도가 증가하므로 축방향으로의 온도분포가 전반적으로 상승한다. $H_2 = 1.25 \text{ slm}$ 이하인 경우는 버너의 출구로부터 멀어질수록 단조감소하지만 $H_2 = 1.5 \text{ slm}$ 이상인 경우는 Fig. 3에서 언급하였듯이 초기에 온도가 증가하여 최고온도를 나타낸 후 단조감소한다. $H_2 = 1.5 \text{ slm}$ 이상인 경우에는 화염의 낮은 위치에서는 중심부가 아닌 화염이 형성되는 수소의 분사위치에서 최고온도를 나타내고 높이가 증가하면서 고온의 기체가 중심부로 확산하면서 점차 중심부의 온도가 상승한다. 주위 공기가 유입하여 전체적인 화염의 온도는 감소하므로 중심부에서의 온도는 증가하다가 감소한다.

4. 흡입프로브의 검증과 실리카 입자의 성장특성

Fig. 5에 같은 조건에서 화염에서 열영동 포집을 수행하여 얻어진 입자와 흡입프로브 흡입 후 입자채집기에서 얻어진 입자의 투과전자현미경 사진을 나타내었다. 사진을 비교하여 보면 입자의 형상이 같음을 알 수 있어서 흡입프로브가 화염을 교란시키므로 인하여 생기는 영향이 작음을 알 수 있다. 정량적으로 비교하기 위하여 투과전자현미경 사진들을 화상처리하여 입자직경을 구한 후 이를 통계적으로 처리하여 SMPS 측정결과와 비교하였다. 투사면적등가직경은 electrical mobility 등가직경과 동일하므로 두 값이 일치하면 동일한 크기를 가지는 입자로 볼 수 있다.⁽¹⁸⁾

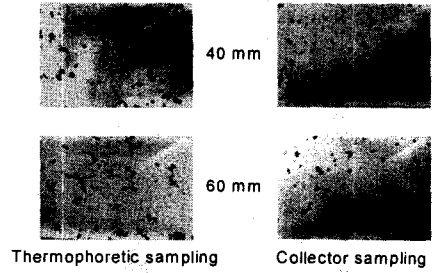


Fig. 5 TEM photographs

화상처리로부터 구한 입자의 직경은 다음 식으로부터 구한 값이다.

$$A_p = (\pi/4) d_p^2 \quad (3)$$

통계적으로 처리하기 위하여 화상처리를 수행한 입자의 개수는 250~500개이며 평균직경 및 기하표준편차를 구하였다. Fig. 6에 입자의 평균 직경을 비교한 결과를 나타내었다. 이상적인 경우라면 모든 결과가 직선에 존재하지만 실제로는 어느 정도 편차를 가지고 있는 것을 알 수 있으나 전반적으로 결과가 일치한다. 물론 열영동 포

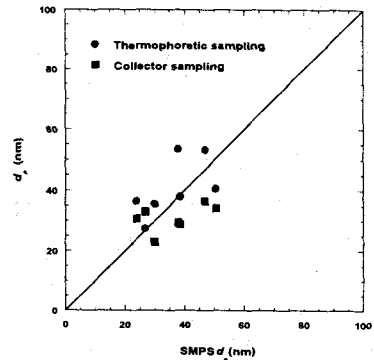
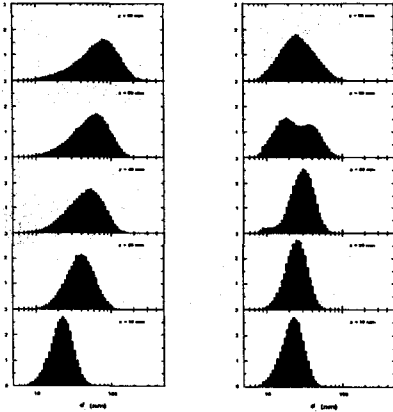


Fig. 6 d_p Comparison

집장치와 흡입프로브가 모두 화염을 교란시키므로 두 경우가 같은 결과를 제시하면 흡입프로브에 의한 교란을 무시할 수 있다는 결정에 의문을 가질 수도 있다. 그러나 열영동 포집장치는 화염에 삽입되어 입자를 부착시키는 시간이 매우 짧고(수십 밀리 초), 입자채집기로 입자를 부착시키는 동안 흡입프로브가 화염에 존재하는 시간은 매우 길어서(수분) 훨씬 크게 화염을 교란시키고



$H_2 = 1.0 \text{ slm}$

$H_2 = 2.0 \text{ slm}$

Fig. 7 SMPS measurement

영향이 매우 크다. 특히 오랜 시간 화염에 존재하므로 화염이 흡입프로브가 존재하는 상황의 정상상태에 도달하여 원래 화염의 모습과 완전히 달라지지만 이러한 영향이 화염의 상류에 도달하지 않으므로 같은 결과를 보여준다고 생각한다면 흡입프로브에 의한 교란은 열영동 포집장치가 화염을 교란하는 정도로 생각할 수 있을 것이다.

Fig. 7에 SMPS로 측정된 크기분포의 한 예를 나타내었다. 축방향으로의 높이에 따른 다음과 같이 정의한 무차원 크기분포의 변화를 보여주고 있다.

$$f(d_p) = dN/Nd(\log d_p) \quad (4)$$

온도가 낮은 $H_2 = 1.0 \text{ slm}$ 의 경우에는 응집효과가 지배적이어서 평균입자의 크기가 커지면서 입자가 존재하는 크기범위가 증가한다. 온도가 높은 $H_2 = 2.0 \text{ slm}$ 의 경우는 융합 및 소결의 영향이 크므로 응집효과를 상쇄시켜 평균입자의 크기가 크게 증가하지 않는다. 또한 성장과정에 bimode를 갖는 분포를 나타내는데 이는 앞에서 언급하였던 TEOS의 반응특성에 기인한 현상으로 새로운 반응이 일어나 작은 입자가 발생하는 구간이다. Fig. 8에 수소유량에 따른 축방향으로의 입자의 평균크기분포를 나타내었다. $H_2 = 2.0 \text{ slm}$ 의 경우를 제외하고는 입자의 평균직경이 높이에 따라 증가하고 있으며 이는 응집효과에 의한 것이다. 평균직경이 높이에 따라 증가하는 정도는 수소유량이 증가할수록 온도가 증가하여 융합 및 소결이 활발하여 응집효과를 상쇄하여 감소한다.

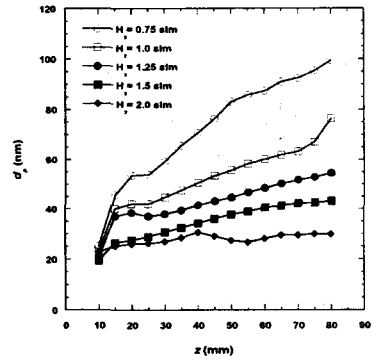


Fig. 8 Size distribution with H_2

$z = 10 \text{ mm}$ 에서는 입자의 평균직경이 거의 같은 값을 나타내며 초기의 입자발생위치에 가까운 지점에서 비슷한 크기의 입자들이 존재하기 때문이다. $z = 20 \text{ mm}$ 까지는 입자의 발생으로 인한 수농도의 증가로 활발해진 응집효과로 크기가 급격히 증가한다. $H_2 = 2.0 \text{ slm}$ 의 경우는 온도가 제일 높은 경우로 융합 및 소결이 가장 활발하게 일어나므로 평균직경의 변화가 크지 않는다. 더구나 새로운 입자가 발생하는 구간에서는 오히려 평균입자의 직경이 감소한다.

Fig. 9에 TEOS유량의 변화에 따른 축방향으로의 입자의 평균크기분포를 나타내었다. TEOS유량이 증가하면 초기에 발행한 입자의 농도가 커지만 입자가 화염에 잔류할 시간이 감소하여 응집체로 이르기까지의 시간이 짧아져서 서로 상쇄되는 효과를 나타낸다. 즉, TEOS = 0.25, 0.3 slm

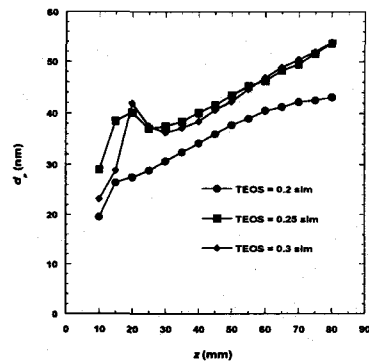


Fig. 9 Size distribution with TEOS

은 상쇄효과로 인하여 초기의 입자발생위치를 제외하고는 비슷하게 성장하여 가는 과정을 보여주며 이는 본 논문에 나타내지는 않았으나 투과전자현미경 사진에서도 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 수소/산소/TEOS 확산화염에서 형성된 실리카 입자를 직접포집하여 측정하는 실험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 본 연구에서 사용한 새로운 형태의 프로브는 화염에서 직접포집을 수행하여 입자의 성장특성을 연구하는데 유용하였다.

(2) 흡입프로브의 삽입이 화염에 주는 영향을 확인하기 위하여 열영동 포집장치와 입자채집기에서 얻어진 입자의 투과전자현미경사진을 분석한 결과와 SMPS측정결과를 비교하는 새로운 검증방법을 제시하였고 그 영향이 본 연구에서는 작았다.

(3) 화염의 온도가 낮은 경우는 응집이 입자의 성장에 지배적이어서 mobility 증가직경이 증가하였고 반대로 화염의 온도가 높은 경우는 용합 및 소결의 효과가 커져서 응집효과를 상쇄시키고 직경의 증가가 둔화된다.

(4) TEOS유량이 증가하면 발생되는 입자의 수는 증가하지만 분사되는 속도가 증가하면서 입자가 화염 내에 잔류하는 시간이 감소하고 응집시간이 단축되어서 직경의 증가에는 한계가 존재한다.

후기

이 연구는 과학기술부가 지원하는 창의적 연구진흥사업(나노입자제어기술연구단)에 의해 이루어졌음을 밝힌다.

참고문헌

(1) Wooldridge, M. S., 1998, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 24, pp. 63-87.
 (2) Pratsinis, S. E., 1998, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 24, pp. 197-219.
 (3) Ulrich, G. D., and Riehl, J. W., 1982, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 87, No.

1, pp. 257-265.
 (4) Hurd, A. J., and Flower, W. L., 1988, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 122, No. 1, pp. 178-192.
 (5) Zachariah, M. R., Chin, D., and Semerjian, H. G., 1989, *Combustion and Flame*, Vol. 78, pp. 287-298.
 (6) Chang, H., and Biswas, P., 1992, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 153, No. 1, pp. 157-166.
 (7) Newton, G. J., Carpenter, R. L., Yeh, H., and Peele, E. R., 1980, *Environmental Science and Technology*, Vol. 14, No. 7, pp. 849-853.
 (8) Alam, M. K., and Flagan, R. C., 1986, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 5, pp. 237-248.
 (9) Wu, J. J., and Flagan, R. C., 1987, Onset of Runaway Nucleation in Aerosol Reactors, *Journal of Applied Physics*, Vol. 61, No. 4, pp. 1365-1371.
 (10) Biswas, P., Li, X., and Pratsinis, S. E., 1989, *Journal of Applied Physics*, Vol. 65, No. 6, 2445-2450.
 (11) Lin, W. Y., Sethi, V. S., and Biswas, P., 1992, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 17, pp. 119-133.
 (12) Kasper, M., Siegmann, K., and Sattler, K., 1997, *Journal of Aerosol Science*, Vol. 28, No. 8, pp. 1569-1578.
 (13) Skillas, G., Burtscher, H., Siegmann, K., and Baltensperger, U., 1999, *Journal of Colloids and Interface Science*, Vol. 217, pp. 269-274.
 (14) Seto, T., Hirota, A., Fujimoto, T., Shimada, M., and Okuyama, K., 1997, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 27, pp. 422-438
 (15) Jang, H. D., 1999, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 30, pp. 477-488.
 (16) Megaridis, C. M., and Dobbins, R. A., 1990, *Combustion Science and Technology*, Vol. 71, pp. 95-109.
 (17) Chung, S. L., and Katz, J., 1985, *Combustion and Flame*, Vol. 61, pp. 271-284.
 (18) Rogak, S. N., Flagan, R. C., and Nguyen, H. V., 1993, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 18, pp. 25-57.

고온 분위기에서 디젤 분무의 거동에 관한 연구

류호성* · 정임권* · 송규근** · T.YANO***

A Behavior Study of Diesel Spray on High Temperature

Ryu H.S*, Chong I.G*, Song K.K**, T.YANO***

Key Words: environmental temperature(분위기 온도), impinging spray(충돌 분무), free spray(자유 분무), axial distance(축 방향 분무 도달거리), spray thickness(분무 두께)

Abstract

A diesel engine is one of the major prime movers to its high thermal efficiency. But due to the recent attention for the environmental pollution, the emissions of diesel engine became to a important problem. So it is needed to understand the characteristics of diesel spray injected into a combustion chamber.

The factor which controls the diesel spray are the injection pressure, the nozzle diameter, the impinging angle and the variation of pressure and temperature. In this paper, experiments were conducted for the variation of the environmental temperature(273K, 373K, 573K), free spray and impinging spray. And the notions of penetration, spray angle, axial distance for free spray, and axial distance, spray thickness from impinging wall for impinging spray.

1. 서론

기호설명

- θ : Spray Angle, degree
- h_1 : Spray Tip Penetration, mm
- r_1 : Radial Distance, mm
- H_1 : Distance from Nozzle to Impinging Disk, mm
- h_2 : Spray Thickness, mm
- r_2 : Radial Distance(Impinging Spray), mm

최근 들어 환경 오염에 대한 우려와 환경 보호의 필요성이 널리 인식됨에 따라 자동차 기관으로부터 배출되는 오염물질을 저감시키려는 법적 규제는 날로 엄해지고 있다.

디젤기관에 있어서 연료 분무의 미립화 및 유동특성에 관한 연구는 배기가스 저감과 엔진성능 향상 측면에서 매우 중요한 의미를 갖으며, 청정 엔진 개발을 위해 이에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다. 특히 최근 들어 수치 해석적 연구가 활발히 진행되면서 해석결과를 검증할 수 있는 실험적으로 규명된 데이터의 확보가 요구되고 있다.

본 실험에서는 디젤 분무의 형성에 크게 영향을 미칠 것으로 판단되는 분사압력, 회전수, 분위

* 전북대학교 대학원

** 전북대학교 자동차신기술연구소

*** Kagoshima University

기 압력, 분위기 온도 중에서 분위기 온도를 변화시켜가면서 디젤분무과정을 촬영하였다. 이 촬영된 결과를 바탕으로 자유분무 및 벽면과의 상호작용에 의해 생성된 연료충돌분무의 분산과정을 파악하여, 소형 직접분사식 디젤기관의 혼합기 형성 구조를 해명하고자 하였다.

2. 실험장치

여기에 분사된 디젤 기관의 충돌 분무를 관찰하기 위해서 본 연구에서 사용한 실험장치는 가시화장치, 연료분사장치, 고온·고압용기로 이루어져 있다.

그림 2.1은 본 실험에서 사용된 실험장치의 개략도를 나타낸다.

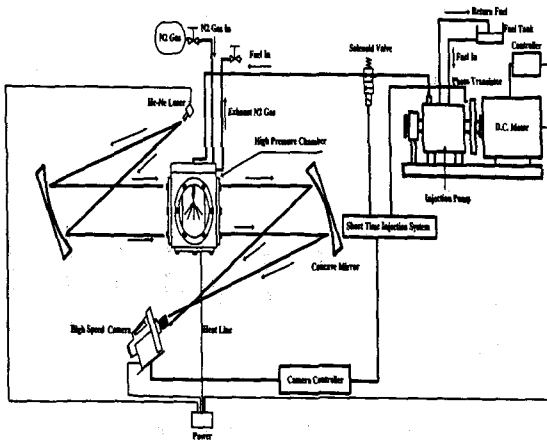


Fig. 2.1 Apparatus of Experimental system

실험에서 사용된 노즐은 분공경 0.2mm, 분공장 0.4mm의 형상비가 2인 단공 홀 노즐이고 노즐 개변압은 19.6MPa로 고정하였다.

본 실험에서는 고온·고압용기를 사용해 실제기관의 연료분사 시 연소실내 분위기에 가까운 상태를 재현하고, 고온·고압 실험용기의 온도는 상온(293K), 373K, 573K로 변화시켰으며, 실험용기 내 분위기 가스로는 N_2 가스를 사용하였다. 고온·고압 실험용기내에서 분위기 온도를 변화시키더라도 분위기 압력은 2MPa로 일정하게 유지시켰다.

D.C. 모터의 회전수는 600rpm을 유지하고, 충돌분무 시 충돌판은 노즐 팁수직 하방향 30mm 위치에 설치하였다.

분무 형상 촬영은 슈릴렌 촬영법으로 촬영하였다. 이때의 광원은 He-Ne 레이저를 사용하였고, 반사경으로는 $\varnothing 300\text{mm}$ 의 슈릴렌 Concave Mirror를 사용하였다. 각 분무 형상은 고속카메라를 이용하여 5,000FPS의 속도로 촬영하였다.

3. 실험 결과 및 분석

본 실험은 고온 분위기에서 자유분무, 수직 충돌분무 시 분무의 형상을 촬영하여 분무 도달거리, 분무각, 분무반폭, 분무두께 등을 측정하였다. 그림 3.1은 자유분무 시 측정 변수를 나타낸 것이다. 분무각 θ 는 분무 도달거리가 30mm인 곳에서 측정하였고, 분무 도달거리는 h_1 은 사전에 촬영된 스케일과 분무의 사진을 비교하여 노즐 팁으로부터 수직 하방향으로 측정하였다. 그리고 분무 반폭 r_1 은 분무 축 중심으로부터 반경방향으로 측정하였다.

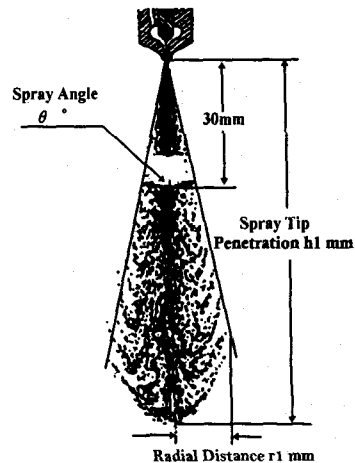


Fig. 3.1 Schematic Diagram of Free Spray

그림 3.2는 수직 충돌분무 시 측정 변수를 나타낸 것이다. 충돌판은 노즐 팁 선단으로부터

30mm인 거리에 설치하였고, 분무가 충돌판에 충돌 후 충돌판의 반경방향 도달거리는 r_2 mm, 충돌 후 충돌판으로부터 분무 두께는 h_2 로 나타내었다.

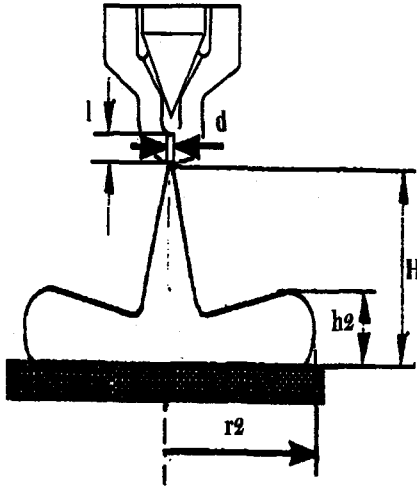


Fig.3.2 Schematic Diagram of Impinging Spray

3.1 자유 분무에 미치는 주위 온도의 영향

그림 3.3~3.5는 온도 변화에 따른 자유분무 시 분무 형상을 0.2ms 간격으로 총시간 1.8ms동안의 고속카메라로 찍은 분무사진을 나타낸다. 그림 3.3은 주위온도가 상온, 그림 3.4는 100℃, 그림 3.5는 300℃에서의 사진으로 분무도달거리는 어느 경우나 시간이 증가함에 따라 증가하고 있으며, 분무팁 부분에서 연료가 미립화, 분산, 확산, 활발해지고 있음을 알수 있다. 이는 상온 분위기에서 자유분무는 시간이 경과함에 따라 연료와 분위기 가스와 혼합이 활발히 이루어지기 때문이고, 고온 분위기의 경우는 높은 분위기 온도의 영향으로 미세한 액적들의 증발이 활발하기 때문으로 생각된다.

또한 사진에서 나타난 바와 같이 분무의 성장 속도는 분위기 온도가 높아질수록 작아지고 있고, 분사시간 전반에 걸쳐 그 경향이 현저히 나타난다. 특히 분위기 온도가 높을수록 분무 선단은 크게 분열된 형상을 나타내는데 이는 분무가

갖는 운동량이 감소하여 연료 증기가 부유하므로 분무 선단이 분열되어 반경방향으로 퍼짐이 심화된 것으로 생각된다.

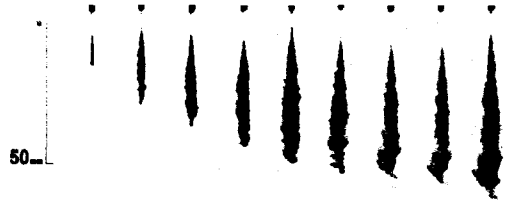


Fig.3.3 Photo of Free Spray(293K)



Fig.3.4 Photo of Free Spray(373K)

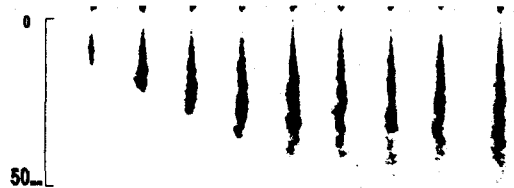


Fig.3.5 Photo of Free Spray(573K)

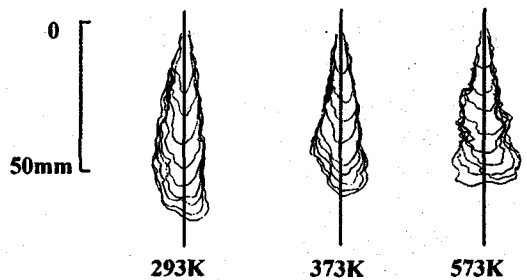


Fig.3.6 The Shape of Free Spray with Temperature(293K, 373K, 573K)

그림 3.6는 분무시간 경과에 따른 분무 외곽 형상을 표시한 것이다. 즉 그림 3.2, 3.4, 3.5에서 얻어진 분무사진을 0.2ms 간격으로 하여 그 외곽 분무 형상을 표시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 분무 성장속도는 분위기 온도가 높아질수록 작아지고 있고, 분사시간 전반에 걸쳐 그 경향이 나타나고 있다. 또한 분위기 온도가 높을수록 분무선단의 분열이 심화되는데 이는 분사시기 후반에 연료 증발이 발생하여 부유하고, 분무가 갖는 운동량이 감소하면서 분열이 일어나 분무 선단이 부서져 반경방향으로 퍼지는 것으로 생각된다.

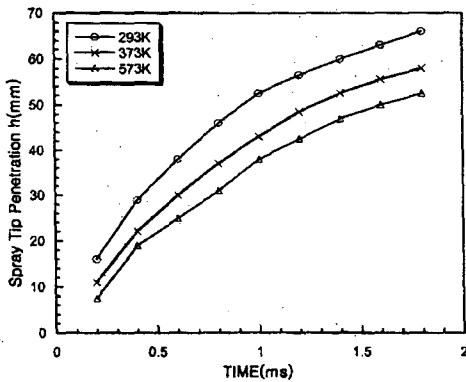


Fig.3.7 Variation of Spray Tip Penetration with Temperature

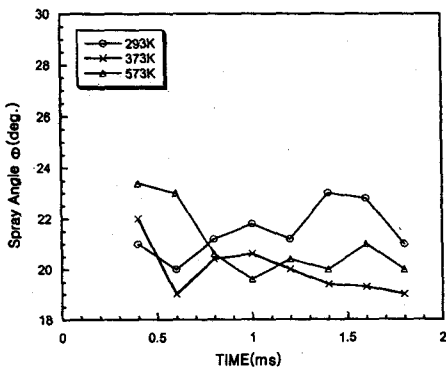


Fig.3.8 Variation of Spray Angle with Temperature

그림 3.7과 그림 3.8은 온도 변화에 따른 분무

도달거리와 분무각의 변화를 나타낸 것이다. 이때 온도변화는 293K, 373K, 573K이다. 그림 3.7의 분무도달거리 그래프에서 시간이 경과함에 따라 분무 성장속도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 주위 기체와의 전단층에서의 마찰로 분열이 일어나고 혼합이 심화됨으로써 성장속도가 둔화되기 때문이라 생각한다. 또한 고온의 경우는 액적 증발의 영향으로 인해 더욱더 성장속도 둔화가 심화된 것으로 생각된다. 그림 3.8의 분무각 변화는 분사초기에는 분위기 온도가 높은 쪽에서 분무각이 커지는 경향이 있고, 그 이후로 분무가 분열하기 시작하면서, 분무각은 상온에서 크게 나타나고 있다. 이는 상온에서는 미립화되어 매우 가는 액적으로 연료가 존재하지만 고온분위기에서는 증발로 인한 증기로 연료가 존재하기 때문에 액적에 비해 증기가 공간으로 진행하는 운동량이 작기 때문에 이러한 경향이 나타나는 것으로 생각된다.

3.2 수직충돌 분무에 미치는 주위 온도의 영향

그림 3.9~3.11은 온도 변화에 따른 충돌분무시 분무 형상을 촬영하여, 0.2ms간격으로 1.8ms까지 나타낸 것으로, 노즐 선단으로부터 충돌판까지의 거리는 30mm이다. 이때 온도변화는 293K, 373K, 573K이다. 자유 분무에서 나타난 바와 같이 충돌분무에서도 시간이 경과함에 따라 분무 외곽 형상이 흩어짐을 알 수 있으나, 흩어짐 즉, 분열 미립화가 활발하여짐에 따라 명확한 형상을 구분하기는 어려워지고 있으며, 분무가 충돌판에 충돌 이후 2차 분열이 발생함을 알 수 있다. 사진에 나타난 바와 같이 상온에서 분무와 고온 분무 양쪽 모두 분사 개시 후 시간이 경과함에 따라 분무의 형상 관측이 곤란해짐을 알 수 있다. 이는 상온 자유분무의 경우 시간이 경과함에 따라 연료와 분위기 가스의 혼합이 활발히 이루어지기 때문이다. 특히 그림 3.11 고온의 경우에는 연료와 분위기 가스와 혼합뿐만 아니라 고온으로 인한 미립자의 증발확산이 활발하게 진행하기 때문이라 생각된다.

그림 3.12는 분사 개시 후 시간 경과에 따른 충돌 분무의 외곽 형상을 나타낸 것이다. 시간

간격은 0.2ms간격으로 나타냈다. 그림에 나타난 바와 같이 벽면에 충돌하기 전의 분무에서는 자유분무의 경우와 같이, 고온이 될수록 선단 형상이 분열되고 있다. 또한 벽면에 충돌한 후의 분무에서는 상온하의 분무에 비해 고온하의 분무의 외형이 분열되고 있고, 분위기 온도가 높아질수록 그 분열되는 정도가 커지고 있다. 이것은 본 실험에서 사용한 고압용기에서는 충돌벽면의 온도 제어가 불가능하므로, 고온 하에서의 벽면의 온도가 높기 때문으로 생각된다. 벽면부터 분무의 증발의 영향이 분무의 외형에 영향을 미치는 것으로 보여진다.

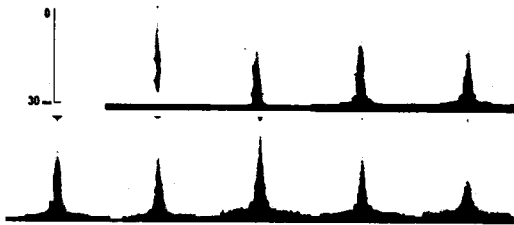


Fig.3.9 Photo of Impinging Spray(293K)



Fig.3.10 Photo of Impinging Spray(373K)

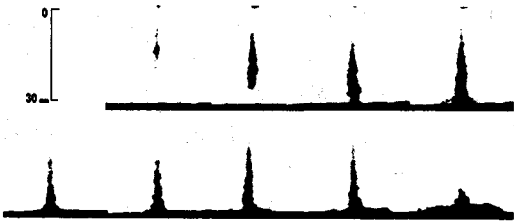


Fig.3.11 Photo of Impinging Spray(573K)

그림 3.13과 그림 3.14는 충돌이후 온도 변화에 따른 반경방향 분무 도달거리와 분무 두께를 나타낸 것이다. 그림 3.13에서 반경방향 분무 도달거리는 상온에서 가장 크게 나타나는데 이는 상

온의 경우 분무 성장 속도가 가장 크고, 373K와 573K의 경우 분위기 온도의 영향으로 분무의 운동량이 감소한 것으로 생각된다.

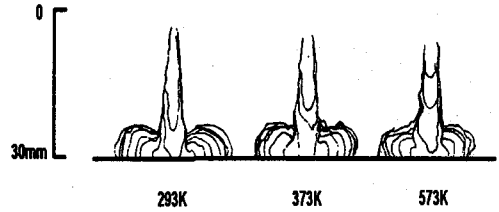


Fig.3.12 The Shape of Impinging Spray with Temperature(293K, 373K, 573K)

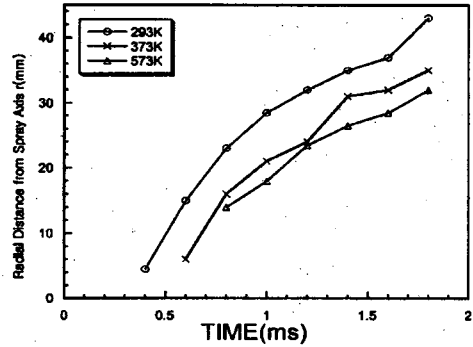


Fig.3.13 Variation of Radial Distance with Temperature

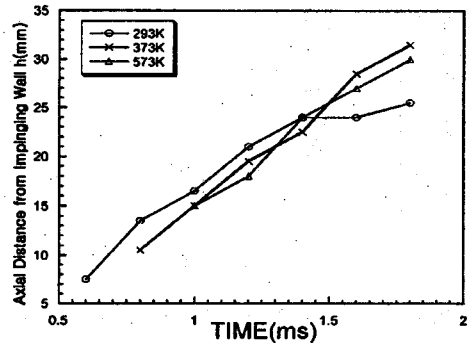


Fig.3.14 Variation of Axial Distance with Temperature

그리고 충돌 이후 분무 두께는 분사 초기부분에서는 상온의 경우가 크게 나타나지만, 분무 후반기에는 고온분위기에서 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 고온 분위기에서 분무 축 방향의 운동량이 작기 때문에 충돌 초기 반경방향 도달거리와 분무두께가 작게 나타난 것으로 생각된다.

4. 결론

본 실험에서는 고온·고압 용기를 사용해 실제 기관의 연료 분사 시 연소실 내 조건에 가까운 상태를 재현하여 직접 분사식 디젤 기관의 분무 거동에 미치는 주위온도의 영향을 밝히고자 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 자유 분무 시 분위기 온도가 높을수록 분무 도달거리가 작고, 분무 선단의 분열이 심화된다.
 2. 분위기 온도가 높을수록 벽면에 충돌 후에도 분무반쪽, 분무 두께 모두에 대해서 성장속도가 늦어졌다.
 3. 충돌 초기에는 분무의 성장속도에는 변화는 보이지 않지만, 분무두께에 대해서는 오히려 고온쪽이 상온보다 커짐을 알 수 있다.
- 앞으로 분위기 온도 변화뿐만 아니라 분위기 압력변화를 적용한 실험을 통하여 실제 분무에 근사한 자료를 분석하여, 디젤 기관에서의 분무특성, 연소 특성, 배기 특성을 규명하는 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- (1) Kyu-Keun Song, Hiroyuki Hiroyasu, and Takuo Yoshizaki, "Three-Dimensional Spray Distributions in a Direct Injection Diesel Engine", SAE Paper 941693.
- (2) H. Hiroyasu, T. Kadota and S. Tasaka, "Peneration of Diesel Fuel Sprays", Trans. of JSME, Vol 44, No. 385 (1978)
- (3) H. Hiroyasu and T. Kadota, "Droplet Size Distributions in Diesel Engines" Trans SAE, Vol. 41, No. 342 (1975), pp. 672-684
- (4) J. C. Dent, "A Basis for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying

- Spray Penetration". SAE Trans, Part 3J(1970), pp67-76
- (5) Arthur H. Lefebvre, "Atomization and Sprays". Purdue University, Hemisphere Publishing Coporation, 1989.
- (6) Hosoya M., Nakahira T., Komori M. and Tsujimura K., Yamaguchi I., "Observation of High Pressure Fuel Spray with Laser Sight Sheet Method", SAE 920459.
- (7) 이창식, 이기형, 전문수, 최수천, 김민규
대한기계학회B 23권 12호 pp1555-1561, 1999
"고압가솔린 인젝터의 분무 거동 및 미립화 특성"
- (8) 차건중, 서경일, 김덕줄
대한기계학회B 21권 11호 pp1459-1465, 1997
"충돌분무의 성장에 미치는 분사압과 배압의 영향에 관한 연구"
- (9) 양희천, 유홍선, 정동화
대한기계학회B 22권 5호 pp661-671, 1998
"벽에 충돌하는 디젤분무의 특성에 대한 수치적 연구"
- (10) 김강출, 안진근, 송규근
자동차공학회논문집 5권6호, pp120-127, 1997
"디젤노즐의 분무 거동에 관한 연구"