

층상연료분사(경유/메탄올)를 이용한  
디젤엔진의 NO<sub>x</sub>와 Soot 동시 저감에 관한 연구  
(제2보 : 층상분사 연소특성 및 배기 특성)

A Study on the Simultaneous Reduction of NO<sub>x</sub> and Soot  
with Diesel-Methanol Stratified Injection System  
in a Diesel Engine

( Part II : Combustion and Exhaust Characteristics of Stratified Injection)

강 병 무\*    이 태 원\*\*    정 성 식\*\*\*    하 종 료\*\*\*  
B. M. Kang    T. W. Lee    S. S. Chung    J. Y. Ha

Abstract

This paper is study on simultaneous reduction of NO<sub>x</sub> and soot for direct injection diesel engine using high and low cetane fuels. The stratified injection system was applied for diesel engine to use high and low cetane fuel. In this study, diesel fuel was used as high cetane fuels, methanol was used as low cetane fuels.

Some parts of the injection system, ie. Nozzle holder, delivery vale, was remodeled to inject dual fuel sequentially from one injector. The real injection quantity ratio of dual fuel was certificated by volumetric ratio at injection quantity experiment.

According as concentration of low cetane fuel was varied, combustion experiment was performed using Toroidal and Complex chamber. Also, exhaust gas and fuel consumption were measured at the same time.

Simultaneous reduction of NO<sub>x</sub> and soot was achieved at complex chamber regardless of concentration of low cetane fuel. However, according as concentration of low cetane fuel was increased, THC and CO was increased.

**Key Words** : Dual fuel, Stratified injection, NO<sub>x</sub>, Soot, Toroidal cavity, Complex cavity

1. 서 론

디젤엔진에서 배출되는 주된 유해 배출가스인 NO<sub>x</sub>와 soot는 trade off 관계에 있기 때문에 연소과정에서 두 물질의 생성을 동시저감

하는 데에는 많은 어려움 있다.

최근에 디젤엔진에 적용한 고압 분사 시스템은 soot의 배출을 현저하게 저감을 가능하게 하였지만 NO의 배출이 증가하고<sup>(1)</sup>, EGR를 통한 NO<sub>x</sub> 저감방법은 EGR량이 제한적이고 연소효율이 저하되는 문제점이 있다. 근래에는 기존의 디젤엔진에 경유와 연료특성이 다른 이중연료(합산소 연료)를 사용하여 NO<sub>x</sub>와 soot의 동시저감 시키는 연구가 활발히 이루어지고

\* 동아대학교 기계공학과 대학원  
\*\* 정회원, 창원전문대학 자동차과  
\*\*\* 정회원, 동아대학교 기계공학과

있다.

물 에멀전 연료와 같은 물의 이용<sup>(2)</sup>, 연료에 합산소 연료를 첨가하는 방법<sup>(3)</sup>, 흡기 포트에 물 또는 물과 합산소 연료의 혼합 연료 분사<sup>(4~5)</sup>, 경유-물 층상분사<sup>(6~8)</sup> 등이 현재 실험 중에 있고 특히 새로운 방식의 연료 분사시스템인 층상분사에 대한 연구는 경유와 물을 하나의 인젝터를 통해 층상으로 연소실에 공급하기 때문에 에멀전을 위한 계면활성제의 사용과 흡기 포트에 합산소 연료를 공급하는 방법에 비해 많은 장점을 가진다. 또한 선행 연구자들이 NOx, PM을 장기적 배출가스 규제치에 도달하는 범위까지 크게 저감됨을 확인하였으며, 물/경유 체적비에 대한 NOx 저감 비율은 선형적 관계이며, 연비도 함께 향상됨을 보고하였다.

그러나 물의 공급량에 한계가 있고 공급량이 증가할수록 연비 및 출력이 저하되는 단점을 가질 수 있다. 층상분사의 장점을 최대한으로 이용하기 위해서는 물과 같이 증발잠열이 크고 산소를 다량으로 함유하고 있는 연료를 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

메탄올은 합산소 연료중에서도 합산소 비율이 높고 증발잠열이 크며, 천연가스, 석탄, 생물자원과 같은 풍족히 사용 가능한 원료로부터 합성이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

메탄올의 층상분사 시스템 적용은 국부 농후 영역을 저감시켜 soot 생성을 억제하고 경유의 에혼합연소시 메탄올의 증발잠열에 의해 연소 온도 저하시켜 NOx 저감이 가능할 것으로 생각되며 물의 공급량 증대에 따른 출력 및 연비가 저하되는 현상을 개선할 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 메탄올을 층상분사시스템에 적용하고 동일출력을 유지한 상태에서 경유와 메탄올의 공급비율 변화에 따른 연소 특성과 배기특성을 확인하였고 피스톤의 유동 특성이 상이한 피스톤 캐비티에서의 실험을 통해 이중연료 층상분사시의 유동특성이 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 경유/메탄올 층상분사 원리

Fig. 1에 층상분사장치의 개념도를 나타낸다. 경유와 메탄올을 하나의 인젝터에서 층상으로 분사하기 위하여 두 개의 분사펌프를 사용하였고 하나의 캠에 의해 순차적으로 연료를 공급한다. 이때 메탄올 분사 펌프는 메탄올을 인젝터 내부로 공급하는 역할만 하게되고 경유 분사펌프에 의해 인젝터 내부에서 층상으로 있는 경유/메탄올을 분사하게 된다. 경유/메탄올이 층상 분사된 후 인젝터에는 경유만이 잔류하게 되고 이 후 메탄올 펌프에 의해서 인젝터 내부로 메탄올이 공급되면 인젝터 내부의 메탄올 공급위치에서부터 위쪽에 존재하는 경유를 경유 분사펌프의 정압식 달리버리 밸브를 통해 밀어내어 경유/메탄올이 층상으로 인젝터 내부에 존재하게 된다. 매 사이클마다 확실한 층상 분사를 위해서는 인젝터 내부로 공급된 메탄올을 모두 분사해야만하기 때문에 경유 분사펌프에서 공급되는 경유량을 메탄올 공급위치에서부터 아래쪽의 경유량과 공급된 메탄올양보다 다소 많이 공급하여 경유/메탄올/경유 순서로 분사되도록 하였다.

경유 및 메탄올 공급량을 정밀하게 제어하기 위하여 펌프의 제어랙에 마이크로미터를 설치하여 마이크로 미터를 회전함에 따라 제어랙이 이동될 수 있도록 제작하였다. 제어랙의 이동량을 마이크로 미터의 스케일을 통해 확인하는 방법으로 공급 연료량을 증감 시켰다.

층상 분사량의 제어는 전보<sup>(9)</sup>에서 층상 분사량 측정 결과를 보고하였고 제작된 층상분사시스템으로 경유-메탄올 층상분사가 가능함을 알 수 있었다.

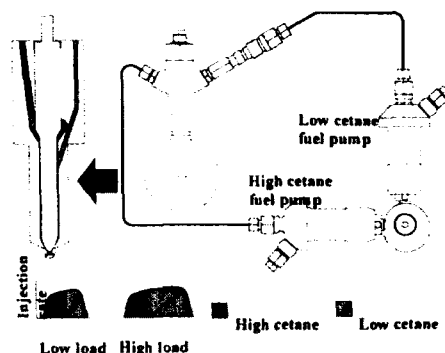


Fig. 1 Schematic of stratified injection system

2.2 실험장치 및 변수

본 연구에 사용된 엔진은 단기통 4사이클 직분식 디젤엔진(ND80, 대동 :배기량631cc)으로, 연소실은 토로이달(Toroidal) 형식을 사용하였으며 엔진의 부하조절은 와전류식 동력계를 사용하였다. 배기가스 분석기(Horiba EXA-1500)를 사용하여 CO, CO<sub>2</sub>, NOX, THC, O<sub>2</sub>를 측정하였다. Soot의 농도측정을 위해 사용된 디젤 스모크 미터(필터 광반사 방식) 사용하였다.

직접분사 디젤엔진에서 연소실 형상은 복잡하며 또한 그 형상에 따라서 연료분무의 분포와 연료-공기의 혼합상태, 공기의 유동특성은 크게 달라진다. 실험엔진에 장착되어 일반적으로 사용되고 있는 Toroidal 연소실의 형상을 변경하여 초기 예혼합이 뛰어난 것으로 알려져 있고 Squish 유동이 강화된 기본형태의 Reentrant Cavity 바닥면에 Projection이 부착된 복잡한 형상의 Complex 연소실을 제작하여 실험하였다. Squish 유동의 강도를 좌우하는 직경비 B/D는 Toroidal이 0.5, Complex 연소실은 Squish 유동이 강화된 0.38이다.

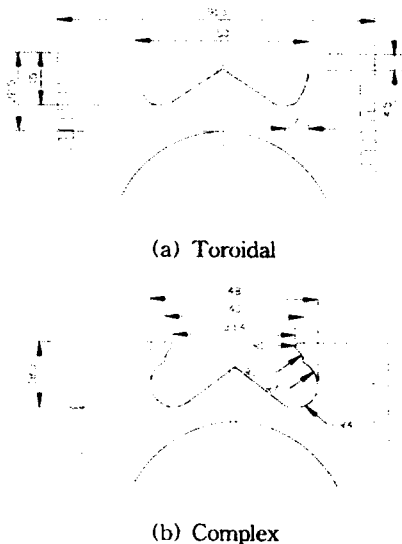


Fig. 2 Combustion Chamber Shapes

Table 1에 연소실험의 조건을 나타낸다. 동일 출력조건에서 공급연료의 층상 비율을

변화에 따른 연소특성을 비교하기 위해 각 조건에서 엔진회전수 1000 rpm, 동력계 부하를 29.4N·m로 일정하게 유지하면서 연소실험과 배기가스분석을 동시에 행하였다. 층상분사에 사용된 메탄올은 증류수를 혼합하여 100, 66, 50, 33% 농도의 메탄올을 사용하였다.

Table 1. Experimental conditions.

|              |  |
|--------------|--|
| Engine speed | 1000 rpm   |
| Torque       | 29.4 N·m   |
| CWT          | 75℃  |
| Used Fuel    | Diesel<br>Diesel+Methanol<br>(Methanol : 100, 66, 50, 33%) |

3. 결과 및 고찰

3.1 층상분사시 연소 특성

Toroidal과 Complex Cavity를 사용하여 이중연료의 공급비율 변화시키면서 연소실험을 행하였고 그 중 공급된 이중 연료량의 비율이 일정한 경우의 연소특성과 배기특성을 비교 분석하였다. Fig. 3은 연소 및 배기특성 비교에 사용된 조건에서의 이중연료 공급량의 비율을 나타낸 것이다.

각 조건에서 이중연료의 공급량 비율은 약 36~39% 공급된 경우이고 DM100, DM66, DM50, DM33은 공급된 메탄올의 농도가 100, 66, 50, 33%인 경우이다. 이 조건에서 공급된 전체 연료의 저발열량은 10~20cal 정도의 차이를 나타내었다.

Fig. 4는 Fig. 3에서 나타낸 조건에서 채취한 연소압력을 이용하여 연소해석을 행한 결과이다. 연소압력은 두 조건 모두에서 공급된 메탄올의 물 혼합량이 많아질수록 착화시점이 지연되고 연소압력이 감소하는 현상이 나타나고 Toroidal Cavity 사용의 경우에 현저하게 나타난다. 메탄올의 물 혼합량이 증가할수록 증발 잠열효과 커지는 결과에서 기인하는 것으로 생각된다. 경유만을 연소한 결과를 비교하면

Complex Cavity를 사용한 경우에 착화시기가 다소 진각됨을 알 수 있다. 이는 초기 분무의 예혼합 특성이 Toroidal Cavity의 경우 보다 Complex Cavity의 경우가 양호하기 때문에 분사된 경유의 착화가능한 예혼합기 형성이 빨리 이루어졌기 때문이라 생각된다.

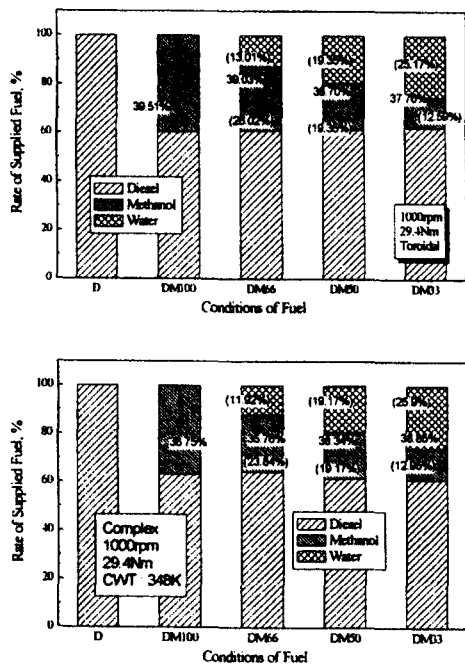


Fig. 3 Rate of supplied fuels at each condition

층상분사의 결과를 비교하면 Complex Cavity의 경우 Toroidal Cavity의 경우보다 메탄올의 물 함유량이 연소압력에 크게 영향을 미치지 않고 있다. 압력상승률의 결과로부터 Complex Cavity경우에 착화시기는 Toroidal Cavity의 경우에 비해 다소 진각 되었으나 압력상승이 초기에 완만하게 이루어짐을 알 수 있다. 특히 DM100의 경우의 압력상승률이 완만한 것을 볼 수 있다.

경유에 뒤이어 층상으로 분사되는 메탄올이 초기에 분사된 경유의 착화 분위기에 많은 영향을 미친다는 것을 알 수가 있다. Complex Cavity의 경우 초기 예혼합 특성이 좋기 때문

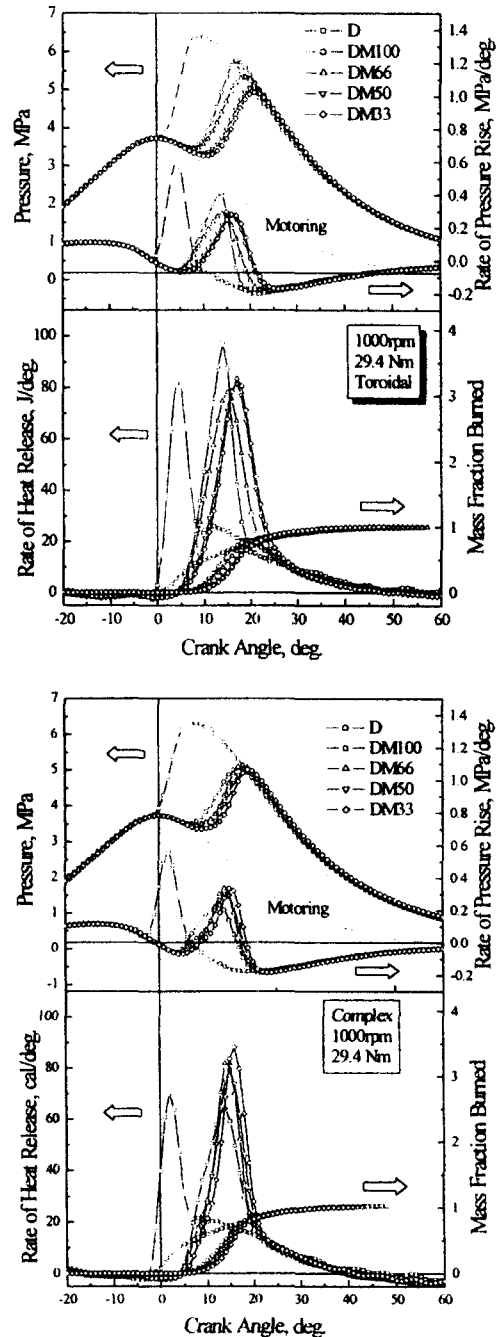


Fig. 4 Pressure, Heat Release Rate, Mass Fraction Burned at combustion by Stratified Injection

에 착화가 빨리 이루어지고 이 후 분사된 메탄올이 예혼합된 혼합기에 공급되어 메탄올의 증발잠열로 급격한 예혼합연소를 억제하는 것은

로 고려되고 Toroidal Cavity의 경우 분사된 메탄올에 의해 착화시기가 지연되어 많은양의 예혼합기가 동시에 급격한 연소를 이루는 것으로 보인다. 이러한 현상은 열발생률 결과에서도 확인 할 수 있다.

질량연소율의 결과를 살펴보면 층상분사시 착화지연으로 인해 예혼합연소량이 많아지고 확산 연소량이 상대적으로 감소하기 때문에 연소기간이 경유만 연소한 경우보다 단축됨을 볼 수 있다.

### 3.2 층상분사시 배기 특성

Fig. 5는 Fig. 4에서의 실험조건에 대한 각 조 NOx, soot, THC의 배출농도를 비교하여 나타낸 것이다.

NOx의 배출농도는 모든 조건에서 공급된 메탄올의 물 혼합량이 많아질수록 Complex의 경우 최대 43%, Toroidal의 경우 최대 20% 까지 저감되고 있으나 Toroidal DM100의 경우에는 오히려 증가하는 경향을 보인다. Complex Cavity경우와 Toroidal Cavity경우를 비교했을 때 경유만을 연소한 경우에는 초기 예혼합량 증가로 인해 다소 증가하지만 층상분사시 약 100ppm정도 NOx의 배출량이 저감된다. 이러한 NOx 배출 결과는 Fig. 4의 결과에서 언급했듯이 층상으로 공급된 연료의 증발 잠열이 커질수록 예혼합 연소시 화염 온도를 저하시켜 NOx의 배출농도가 감소하는 것으로 생각된다. 하지만 Toroidal cavity의 경우 NOx배출농도가 상대적으로 증가하고 DM100의 경우에는 Cavity에 따라 NOx의 배출 경향이 상이하게 나타나는 현상을 볼 때 유동특성에 따른 초기의 예혼합량과 착화시기 그리고 메탄올이 공급되는 시기 등이 NOx의 배출에 큰 영향을 미치는 것으로 생각되고 더욱 확실한 결론을 얻기 위해서는 연소실내의 화염온도를 측정결과와 비교 분석하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

Soot의 배출농도는 층상분사함에 따라 Complex Cavity 경우 최대 88%, Toroidal Cavity의 경우 최대 71% 까지 저감되고 공급된 메탄올의

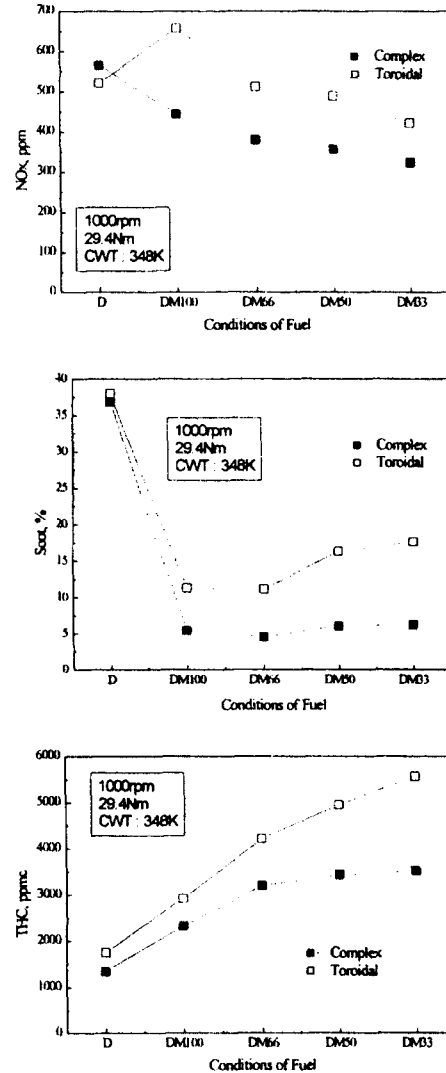


Fig. 5 Characteristics of exhaust of NOx, soot and THC at each conditions of used fuel

물 혼합량이 일정 비율(DM66) 이상이 되면 다소 증가하는 경향을 보인다. 이러한 결과의 원인은 층상분사를 통해 연소기간이 단축되는 결과에서도 알 수 있었듯이 초기분사된 경유의 예혼합 연소량이 많아질수록 확산 연소량이 감소한 영향과 후기에 분사된 경유의 확산연소시 메탄올에 의한 연소촉진 효과로 판단된다.

THC 배출 농도는 두 Cavity 조건에서 공급

된 메탄올의 물 혼합량이 증가할수록 비례하여 증가하는 경향을 보이며 Complex Cavity 경우가 Toroidal Cavity의 경우 보다 배출 농도와 증가율이 낮은 경향을 보인다.

일반적으로 디젤엔진에서는 착화시기가 지각되어 예혼합량이 많아질수록 과회박 영역이 많아지기 때문에 THC 배출농도가 증가한다. Complex Cavity의 경우에 초기 예혼합 특성이 좋아 예혼합량이 증가하지만 팽창행정시 캐비티 내부에 화염이 머무르는 현상이 발생함으로 연소실 벽면으로의 소염현상이 억제되는 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

메탄올과 메탄올+물의 혼합 연료물 경우와 충상 분사하여 연소 및 배기 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 충상분사시 Complex Cavity의 경우 Toroidal Cavity의 경우보다 메탄올의 물 함유량이 연소압력에 크게 영향을 미치지 않고 압력상승률의 결과로부터 Complex Cavity 경우에 착화시기는 Toroidal Cavity의 경우에 비해 다소 진각 되었으나 압력상승이 초기에 완만하게 이루어짐을 알 수 있다.

(2) NOx의 배출농도는 모든 조건에서 공급된 메탄올의 물 혼합량이 많아질수록 Complex의 경우 최대 43%, Toroidal의 경우 최대 20% 까지 저감되고 있으나 Toroidal DM100의 경우에는 오히려 증가하는 경향을 보인다

(3) Soot의 배출농도는 충상분사함에 따라 Complex Cavity 경우 최대 88%, Toroidal Cavity의 경우 최대 71% 까지 저감되고 공급된 메탄올의 물 혼합량이 일정 비율(DM66) 이상이면 다소 증가하는 경향을 보인다.

(4) THC 배출 농도는 두 Cavity 조건에서 공급된 메탄올의 물 혼합량이 증가할수록 비례하여 증가하는 경향을 보이며 Complex Cavity 경우가 Toroidal Cavity의 경우 보다 배출 농도와 증가율이 낮은 경향을 보인다.

#### 후 기

본 연구는 2002학년도 동아대학교 교내 학술 연구 조성비에 의해 수행되었으며 학교 당국에 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고 문헌

1. Jiro SENDA, Isamu HOTTA, Daisuke KAWANO, Hajime FUSIMOTO, 1999, "Fuel Design Concept for Low Emission in Engine Systems", Proceeding of The 15th Internal Combustion engine Symposium(international), pp99~pp103.
2. Tsukahara, et al., 1995, "Effect of cooling loss reduction on reducing BSFC of a diesel engine fueled by emulsified fuel", trans. JSME, 61-590, pp.3561-3566.
3. N. Miyamoto, et al., 1999, "Ultra Low NOx and Smokeless Diesel Combustion with Highly Oxygenated Fuel". Proceedings of The 15th Internal Combustion Engine Symposium (International), Seoul, Korea, July 13~16. pp. 81-86.
4. Ishida, et al., 1998, " Significant NOx Reduction Diesel Engine Based on Electronically Controlled Port Water Injection", Proceedings of the 22nd CIMAC, vol.4, pp. 879-893.
5. H. Imaji et al., "Simultaneous Reduction of NOx and Smoke by Port Injection of Methanol/Water Blend in a DI Diesel Engine" Proceedings of The 15th Internal Combustion Engine Symposium (International), Seoul, Korea, July 13~16. pp. 93-98.
6. Takasaki, K. et al., 1998, "Improvement of Diesel Combustion with Stratified Fuel/Water Injection System", Proceedings of the 4th COMODIA, pp.57-62.
7. Susumu, K. et al., 1996, " Reduction of Exhaust Emission with Fuel-Water Stratified

Injection System in a Diesel Engine", 第13  
回 内燃機關Symposium 講演論文集, pp.  
465~470.

8. Yozo T, et al., 1992, "Stratified Fuel-Water  
Injection for Low-NOx Diesel Combustion  
", 第10回 内燃機關 Symposium 講演論文集,  
pp. 247~252.
9. 강병무, 김종률, 이선봉, 이태원, 하종률,  
2000, "충상연료분사(경유/메탄올)를 이용한  
디젤엔진의 NOx와 Soot 동시 저감에 관한  
연구(제1보 : 충상분사장치의 설계 및 충상  
분사 연소특성), 한국액체미립화학회지, 제5  
권 제1호, pp28~34.