

연료 물성치 변화가 HCCI용 스월 인젝터의 분무특성에 미치는 영향

정해영[†]·이기형^{*}·이창식^{*}

An Effect of Fuel Property on the Spray characteristics of Swirl Injector for Use HCCI engine

Haeyoung Jeong, Kihyung Lee and Changsik Lee

Key Words: HCCI(균일 예혼합 압축 점화), Swirl injector(스월 인젝터), SMD(자우터 평균 입경)

Abstract

This paper describes spray characteristics of a swirl injector which is intended for use in a HCCI engine. Many optical diagnostics such as laser diffraction methods, and high speed camera photography are applied to measure the spray drop diameter and to investigate the spray development process. The effect of fuel properties on the spray characteristics was investigated using three different fuels because HCCI combustion is tolerant of the chemical composition of various fuels. From these results, the HCCI injector formed a hollow cone sheet spray rather than a liquid jet and the atomization efficiency is high for the low-pressure injector. The SMD of test injector was ranged from $15\mu\text{m}$ to $25\mu\text{m}$. We also found that the spray breakup characteristics were dependent on the fuel properties such as density, viscosity, and surface tension.

1. 서 론

현재 직접 분사식 디젤 엔진에 주로 사용되고 있는 고압 커먼 레일 분사 시스템은 분사된 연료의 연소실 표면 부착으로 인해 연소 성능에 악영향을 미친다. HCCI엔진의 경우에는 예혼합을 위하여 조기 분사를 수행하기 때문에 실린더 내 압력이 낮고 벽류 생성이 더욱 더 많아져 커먼 레일 분사 시스템을 적용하기에는 어려움이 따른

다. 이러한 분사 연료의 벽류 생성을 억제하기 위해서는 저압으로 연료를 분사시키면 되나, 이 또한 연료의 미립화 성능을 저하시킨다는 단점이 있다. 직접 분사식 예혼합 압축 점화 엔진에 커먼 레일 시스템을 적용하기 위해서는 분사 압력을 낮추어 분무 도달 거리를 줄이고, 스월 노즐을 장착함으로써 분사압 저하에 따른 미립화 성능 감소를 최소화 한 방식의 연료 분사 시스템이 필요하다.

본 연구에서는 HCCI 엔진 적용을 위하여 제작된 저압 스월 인젝터의 분무 특성을 다양한 광계측 방법을 이용하여 규명하고자 한다. 이를 위하여 레이저 회절법에 의한 입경 사이즈 측정 기술을 사용하여 스월 인젝터의 입경 분포를 파악하였다. 그리고, 현재 HCCI엔진이 다양한 연료를 적용하여 연구 중이므로 디젤, 솔벤트, 노말 헵탄의 세가지 연료에 대한 분무 특성의 차이점을 파

[†] 한양대학교 대학원 기계공학과

E-mail : haeyoung@ihanyang.ac.kr

TEL : (02)418-9293 FAX : (031)406-5550

^{*} 한양대학교 기계공학과

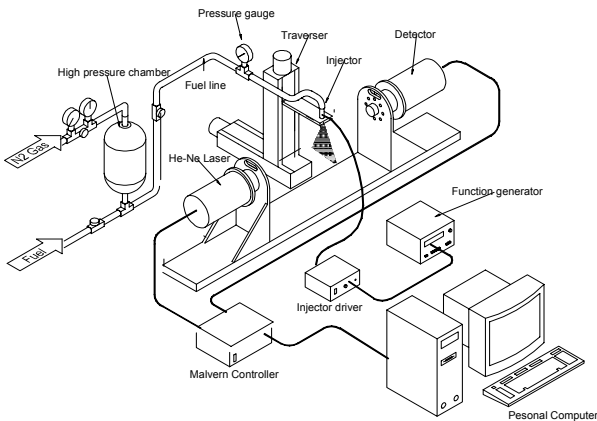


Fig. 1 Schematic diagram of drop size measurement system (Malvern system)

약하였다.

2. 실험 및 방법

일반적으로 분무 특성을 파악하기 위해서는 거시적인 방법과, 미시적인 관점을 통하여 분무 구조에 대한 고찰이 필요하다.

본 연구에서는 분무 도달 거리와 분무각 등의 거시적인 분무특성은 고속 카메라를 이용한 가시화 기법을 이용하였고, 분무 입경과 액적 속도 등의 미시적인 특성에 대해서는 레이저 회절법과 위상 도플러법을 이용한 레이저 계측 방법을 이용하였다.

2.1 분무 입경 측정

Fig. 1은 레이저 회절법을 이용한 입경 측정 시

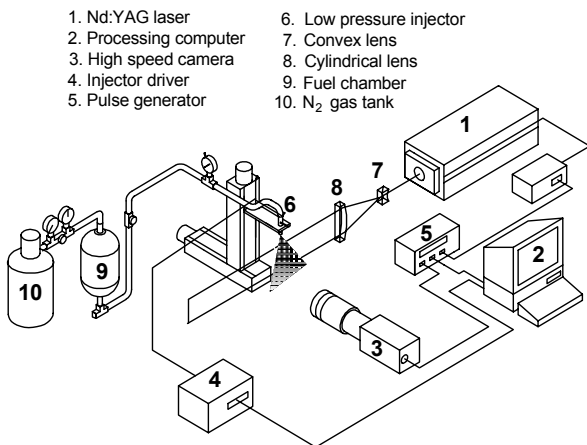


Fig. 2 Schematic diagram of spray visualization system

Table 1 Low-pressure swirl injector specification

| | |
|-----------------------|--|
| Injector Type | Electronically controlled Low-Pressure Common Rail Fuel Injector |
| Injection Pressure | 7, 8.5, 10MPa |
| Nozzle Type | Pressure Swirl Atomizer |
| Number of Nozzle Hole | 6 |
| Spray Geometry | Hollow Cone |
| Spray angle | 70 degree |

스템의 개략도를 나타낸 것이다. 분무의 미립화도를 평가하기 위해 이용되는 SMD (Sauter Mean Diameter) 값을 측정하기 위하여 Malvern사의 Spraytec RTS 5001 모델을 이용하여 레이저 빔 직경5mm 영역에서 액적들의 산란된 패턴을 초당 2500회씩 샘플링하여 SMD와 분포 밀도를 측정하였다.

2.2 분무 가시화 시스템

Fig. 2는 대기 분사시 분무의 성장 과정을 측정하기 위하여 구축한 가시화 시스템을 나타낸 것이다. 이 가시화 시스템은 파장 510.6nm (green)의 Nd:YAG 레이저를 이용하여 시트 빔을 형성하고 이를 고속 디지털 카메라와 동기시켜 분무 가시화 화상을 취득하였다. 사용된 고속 디지털 카메라는 Kodak사의 model 4540제품으로써 해상도 256x256 pixels, 8bit(gray level)을 가지며 분당4500프레임을 취득하였다.

2.3 연료 분사 시스템

본 실험에서 사용한 인젝터는 HCCI엔진에 적용하기 위하여 분사압이 최대 13MPa이며, 벽류 생성 저감을 위하여 스윙 노즐을 장착하여 중공형의 분무 구조를 가진다. 인젝터는 인젝터 드라이버에 의해 구동되며 드라이버에 입력되는 TTL 신호를 통하여 분사시기와 분사 기간을 제어할 수 있도록 구성하였다.

Table 1에 본 실험에 사용한 인젝터와 노즐에 대한 주요 제원을 나타내었다.

연료 분사압을 형성하기 위하여 고압의 질소 가스를 연료가 들어있는 용기에 주입하고 레귤레이터를 통하여 분사압을 유지할 수 있도록 하였으며, 실험은 분사압 7, 8.5, 10MPa에서 분사기간 8ms로 대기 중 분사를 통하여 수행하였고, 연료

Table 2. Comparison of properties between Stodded-solvent, diesel, n-heptane

| Injector Type | Gasoline | Diesel | n-heptane |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Liquid density(kg/cm ³) | 751 | 848 | 685 |
| Liquid viscosity (Ns/m ²) | 0.565x10 ⁻⁴ | 3.8x10 ⁻⁴ | 0.431x10 ⁻⁴ |
| Surface tension (N/m) | 1.997x10 ⁻² | 2.747x10 ⁻² | 2.094x10 ⁻² |

는 가솔린과 물성치가 유사한 Stodded Solvent와 디젤 및 노멀 헵탄을 이용하였다.

Table 2는 실험에 사용된 세가지 연료의 주요 물성치를 나타낸 것이다.

2.3 KIVA-3V를 이용한 수치해석

최근의 분무 해석의 경향은 1,2차 분열과정을 두가지 이상의 분열모델을 사용하여 정확한 해석을 시도하는 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서도 1차 분열모델로는 LISA 모델을 사용하고 2차 모델로는 TAB 모델을 적용한 복합모델을 KIVA-3V 코드에 구성하여 분무의 발달과정을 예측하였다.

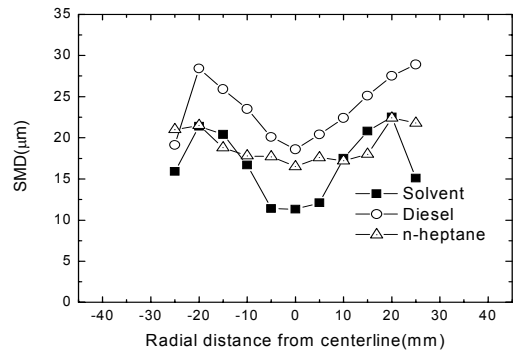
LISA(Linearized Instability Sheet Atomization) 모은 액막형성, 액막 분열, 미립화 3단계의 과정을 거쳐 분열이 일어난다고 가정한다. 액막형성 단계에서는 인젝터 내부의 원심력에 의하여 원추형 액막이 형성되며, 두 번째 액막 분열 단계에서는 주위 가스의 영향, 액막의 점성력 그리고 표면장력 등의 영향에 의해 형성된 액막에 불안정파가 성장하다 임계 진폭에 도달하게되면 띠 형태로 분열이 일어난다고 가정하고, 2차 미립화 과정은 기존의 테일러 상사모델(TAB)을 사용하였다.

3. 실험 및 방법

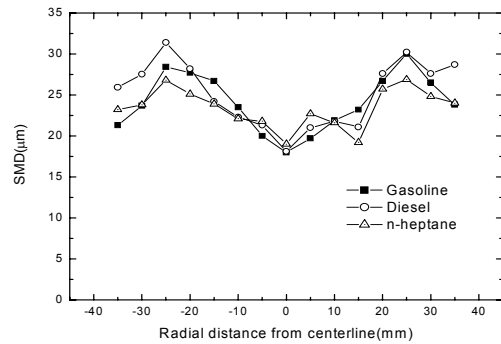
3.1 연료에 따른 미립화 특성

Fig. 3은 분사후 6ms 시간이 경과하였을때, 분무팁 하단 20, 40mm 지점에서의 각 연료에 대한 입경 분포를 나타낸 것이다.

노즐에서 20mm에서는 점도가 가장 큰 디젤의 평균 입경은 점도가 가장 낮은 노멀 헵탄보다 20% 정도 크게 측정되었다. 그러나, 40mm 지점



(a) 20mm



(b) 40mm

Fig. 3 Comparison of SMD between three different fuels

에서는 중심류 쪽에서는 솔벤트와 거의 비슷한 입도 분포를 보이고 있으나 가장자리 부근에서는 다소 큰 입경의 액적들의 관측 된다는 것을 알 수 있다.

20mm와 40mm 두 지점에서의 입경 분포를 비교해 보았을 때, 점도가 가장 낮은 노멀 헵탄이 평균 입경이 가장 작았으며, 이러한 결과로부터 연료의 물성치가 미립화에 영향을 미치는 중요한 요소라는 사실을 알 수가 있었다. 또한, 점성이 커질수록 액적들의 평균 입경 역시 커지는 경향을 나타내었다. 디젤의 경우에는 계산값이 실험치보다 입경 크기를 크게 예측하고 나머지 연료는 작게 예측하는 결과를 얻었다. 이는 계산 수행 조건에서 액적 분열시 액막 분열 과정만 고려하고, 분열된 액적들의 공기와의 상호 작용에 의한 2차 분열 과정에 대한 고려를 하지 않았기에 정확하게 예측하지 못한 것이라고 판단된다.

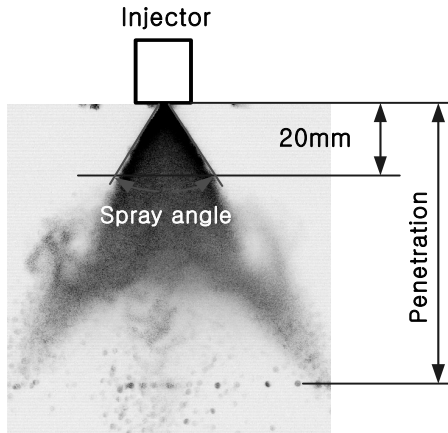


Fig. 4 Definition of penetration length and spray angle

3.4 연료에 따른 거시 분무 특성 비교

Fig. 4는 가시화된 이미지화상에서 이미지 처리법에 의하여 분무각과 분무 도달 거리를 구하기 위하여 본 연구에서 사용한 정의를 나타낸 그림이다.

최근 Arregle¹⁾등이 디젤 노즐 유동에서 베르누이 방정식의 무차원 해석을 통하여 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$S(t) \propto \rho_a^{-1/4} \cdot \Delta P^{1/4} \cdot t^{1/2} \cdot d_o^{1/2} \quad (1)$$

S : Spray Penetration Length (m)

t : Time after start of injection (sec)

ρ_a : ambient density, (kg/m³)

d_o : orifice diameter, (m)

ΔP : Pressure drop across the orifice, (Pa)

$$S(t) = a \cdot \Delta P^b \cdot t^c \quad (2)$$

식(1)은 디젤 단일 연료에 대해서 적용을 시킨 결과여서 서로 다른 이종 연료에 대한 파라미터가 고려되지 않았다. 본 연구에서는 인젝터에 디젤, 드라이 솔벤트, 노말 헵탄의 연료를 사용하여 분사압력을 7, 8.5, 10MPa로 달리하면서 분무 도달 거리를 측정하였다. 동일 인젝터에서 대기 분사로 측정된 결과이므로, 대기 밀도와 오리피스 직경은 고려하지 않고 식(1)을 식(2)와 같이 단순화 시켰으며, 이에 대하여 근사 해석을 통하여 a, b, c의 값을 구하였다.

Fig. 5는 디젤 연료를 시켰을 때, 분사압과 시간에 따른 분무도달거리의 특성과 근사 해석을

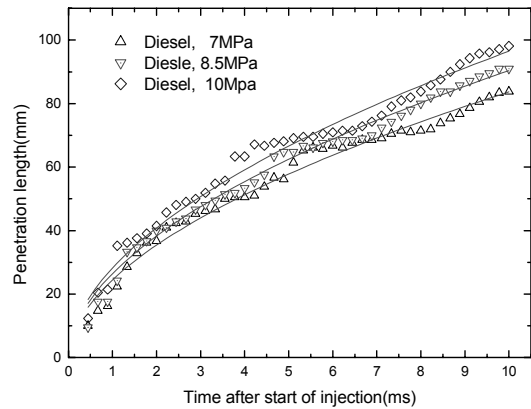


Fig. 5. Spray penetration length at different fuel pressure(Diesel)

통한 결과값을 나타낸 것이다.

Table 3은 실험 데이터를 모두 이용하여 압력과 시간 지수값을 근사 시켰을 때 구한 결과이다. 식(2)의 b값은 0.28022로 식(1) 0.25와 약 +0.03의 오차를 보였으며, c값은 0.51949로 식(1)의 0.5와 약+0.02 정도의 오차를 보였으며, Fig. 5에서와 같이 실험치와 근사해석 결과는 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

다만, 테이블에서와 보는 바와 같이 식의 계수값(a)은 동일 물질일 경우에는 거의 일정함을 알 수 있다. 이는, 특정 분사 연료의 계수값만을 측정하여 구한다면, 시간에 대한 분무 도달 거리의 관계를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

세가지 연료에 대하여 구한 분무 도달 거리에서 구한 근사식과 Arregle이 제안한 식과 비교를 해보면, t의 근사식 오더는 0.5와 아주 근사하다는 것을 알 수 있었다.

| | Pressure (MPa) | a | b | c |
|------------------|----------------|---------|---------|---------|
| Diesel | 7 | 0.01101 | 0.28022 | 0.51949 |
| | 8.5 | 0.01118 | | |
| | 10 | 0.0115 | | |
| Stodded -Solvent | 7 | 0.0092 | | |
| | 8.5 | 0.00977 | | |
| | 10 | 0.00918 | | |
| n-heptane | 7 | 0.01188 | | |
| | 8.5 | 0.01146 | | |

Table 3 Correlation parameter table

$$t_b = \frac{28.6 \cdot \rho_f \cdot d_0}{(\rho_g \cdot \Delta P)^{0.3}} \quad (3)$$

$$S = 0.39 \left(\frac{2\Delta P}{\rho_f} \right)^{0.5} \cdot t, \text{ for } t < t_b$$

$$S = 2.95 \left(\frac{\Delta P}{\rho_g} \right)^{0.25} \cdot (d_0 t)^{0.5}, \text{ for } t > t_b$$

식(3)은 1차 분열 과정에서 연료의 밀도에 대한 영향을 고려한 Hiroyasu와 Arai가 제안한 Two-zone penetration model²⁾이다. 이 식은 분무 분열 시점(Spray breakup time)을 기준으로 좀더 세분화시킨 것이다. 이 식을 실제 적용시킨 결과 본 실험 결과보다 상당히 크게 예측된 값을 나타내었다. 또한 초기 분무 도달 거리 관계식에서 분사 연료의 밀도를 고려 하여, 본 실험에서 사용한 세가지 연료의 밀도값을 파라미터로 추가하여 밀도항이 포함된 근사식을 찾고자 하였으나 만족할 만한 결과를 얻지 못했다.

일반적으로 분무 도달 거리는 분사 연료의 특성보다는 주위 기체의 물성치(온도, 압력, 밀도, 점도 등)에 크게 영향을 받는다고 알려져 있다. 그러나, 결과에서 알 수 있듯이 동일 분사 압력에서도 연료의 종류에 따라 분무 도달 거리가 상이하고, 또한 연료 밀도에 대한 영향뿐만 아니라 다른 물성치도 분무 성장에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6은 10MPa로 분사 시켰을 때 연료에 따른 분무 도달 거리를 비교한 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 시간이 경과할수록 밀도가 가장 작은 헵탄이 분무도달거리가 가장 길고 디젤과 솔벤트는 비슷한 경향을 나타내었다. LISA 모

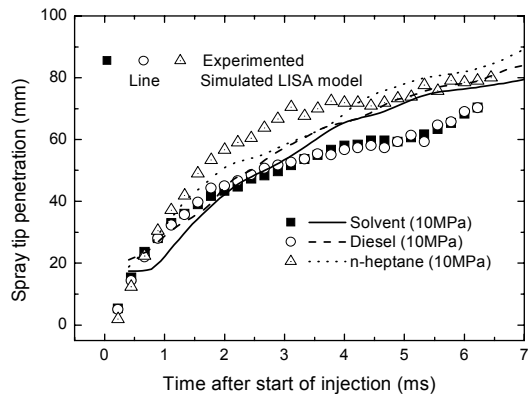


Fig. 6 Spray tip penetration length for three different fuels

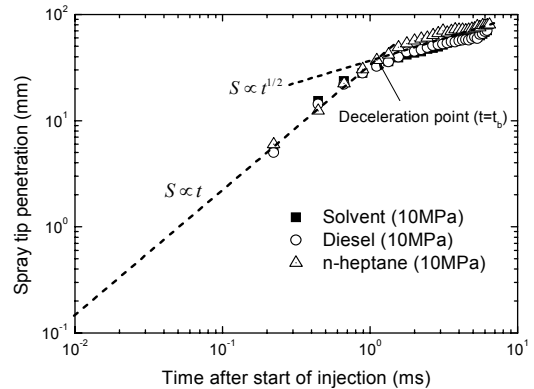


Fig. 7 Logarithmic chart of penetration

델을 이용한 수치해석 결과와 비교해 봤을 때, 실험 결과와 동일하게 헵탄, 디젤, 솔벤트의 순으로 도달거리가 길게 나타나고 있으며, 노말 헵탄은 실험치 보다 작게, 솔벤트와 디젤은 실험치 보다 큰 분무 도달 거리를 나타내었다.

Fig. 7은 시간에 따른 분무 도달 거리를 로그 스케일로 다시 변환시킨 것이다. 그림에서 점선은 분사 초기에는 분무 도달 거리가 시간 t에 비례하여 선형적으로 증가하다가 특정 시점(t_b)에 도달하면 시간의 1/2승에 비례하여 증가하는 시점이 존재한다.

Yoshinori Tanaka와 Takayoshi Takano등의 연구 결과에 의하면 연료가 분사되어 1차 분열 과정을 거친 후, 수많은 작은 액적으로 미립화되어 액적운을 형성하는 시점과 이 속도 감소 시점은 일치한다고 알려져 있다.³⁾

Fig. 8은 연료를 달리 했을 때, 시간이 경과함 따른 분사각의 변화를 나타낸 것이다. 1ms이후부터 분사각이 점점 감소하는데, 이는 주변 공기의

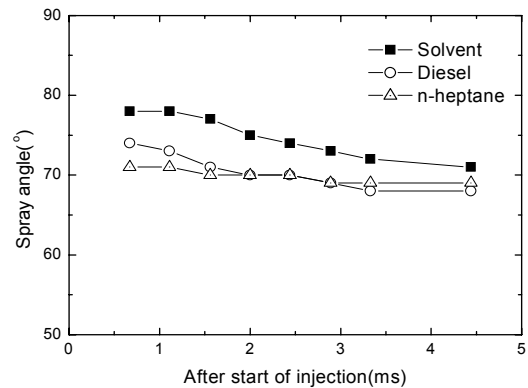


Fig. 8 Effect of fuel property on the spray angle

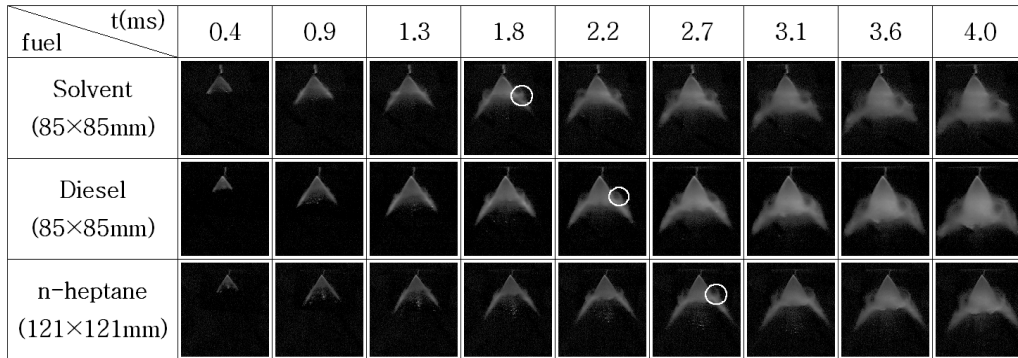


Fig. 9 Comparison of spray developing process between three fuels

유입으로 분무류 주변부의 재순환영역이 발생하면서 분사각을 감소시키기 때문이다.

Fig. 9는 각 연료에 따른 분무 성장 과정을 가시화한 화상이다. 분무가 성장하면서 특정 시점에서 분무 주변부에서 와류가 형성되는 것을 알 수 있다. 와류의 최초 발생 시점은 0.9~1ms로서 Fig. 7의 속도 감소 시점과 거의 일치함을 알 수 있었다.

위의 결과를 종합해 볼 때, 주변 공기가 유입되면서 미립화가 촉진되고 작은 액적들로 분해되면서 운동량이 소산되어 분무의 도달 속도가 둔화됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 HCCI 엔진에 사용하기 스웰 인젝터의 세가지 다른 연료를 사용하여 분무 특성을 측정하였으며 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 분무의 여러 측정점에서 평균입경을 측정한 결과, 노즐 팁 하류로 갈수록 평균 입경 들이 커지는 경향을 보이며, 이는 큰 지름의 액적들이 운동량이 크기 때문에 분무 선단부에 분포할 확률이 높기 때문이다. 또한 반경 방향으로 갈수록 입경들이 커지는데, 이러한 경향은 주변 공기 유입으로 인하여 작은 입경의 액적들을 분무 중앙으로 밀어내기 때문이라고 판단된다.

2) 연료에 따른 분무 도달 거리는 밀도가 가장 작은 헵탄이 도달 거리가 가장 길고 디젤과 솔벤트는 비슷한 경향을 나타내었다. LISA 모델을 적

용한 수치해석 결과에서도 동일한 경향을 나타내었으며, 노말 헵탄은 실험치 보다 작게, 솔벤트와 디젤은 실험치 보다 큰 분무 도달 거리를 나타내었다.

(3) 시간 경과에 따른 분사각의 변화를 비교해 본 결과, 모든 조건에서 1ms이후부터 분사각이 점점 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 주변 공기의 유입으로 분무류 주변부의 재순환영역이 발생하면서 분사각을 감소시키기 때문이다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단에서 지원하는 2002년도 협동연구지원 사업의 "균일 예혼합 압축 착화 엔진의 분무 및 혼합기 최적화 기술에 관한 연구 (KRF-2002-042-D00025)" 과제의 일원으로 수행되었다.

참고문헌

- 1) Arregle, J., Pastor, J. V., and Ruiz, S., "The Influence of Injection Parameters on Diesel Spray Characteristics," SAE Paper 1999-01-0200.
- 2) Hiroyasu, H. and Arai, M., 1980, "Fuel Spray Penetration and Spray angle in Diesel Engines," Trans. of SAE of Japan, Vol. 21, pp. 5-11
- 3) Yoshinori Tanaka, Takayoshi Takano, Etc. "Analysis on Behaviors of Swirl Nozzle Spray and Slit Nozzle Spray in Relation to DI Gasoline Combustion", SAE Paper 2003-01-0058