

경사노즐 선회분사기의 가솔린 분무 특성

문석수* · 최재준** · 배충식†

The Gasoline Spray Characteristics of Tapered Nozzle for a Swirl Injector

Seoksu Moon, Jaejoon Choi and Choongsik Bae

Key Words: DISI(직접분사식 가솔린), tapered nozzle(경사 노즐), flow angle(유동각), differential flow angle(유동차각), asymmetrical spray(비대칭분무)

Abstract

The swirl spray for direct-injection spark-ignition (DISI) engines was investigated using a nozzle whose exit surface shape was cut with a certain tapered angle. The reason for the change in spray's characteristics at various tapered angles was explained by the data correlating the taper and flow angles. The spray tended to shift its characteristics from the symmetric to asymmetric when the tapered angle was increased; furthermore, the spray penetration and spray cone angle were also increased. When the tapered angle was greater than the 90° minus flow angle, an opened hollow cone spray was formed because of the fuel impingement against the tapered surface area of the nozzle exit. This behavior indicates that the reduction in the air pressure difference between the inner and outer spray of the spray can be achieved. This behavior also promises the potential use of the tapered nozzle for the case where the independence of the spray performance from atmospheric pressure and fuel temperature is desired.

기호설명

α : taper angle, deg

θ : flow angle, deg

δ : differential flow angle, deg

1. 서 론

선회(swirl) 분무는 기존의 분무유도방식에 적용되는 비선회분사기에 비해 상대적으로 낮은 분사압에도 불구

하고 강한 회전운동을 통해 분무의 미립화도를 향상시켜 줌으로써, 기존의 벽면유도방식을 이용하는 직접분사식 가솔린 엔진에 폭넓게 이용되어 왔다⁽¹⁾. 그러나 선회분무는 주변 압력과 온도조건에 의해 분무의 형상이 크게 변화하는 특성을 가지고 있으며⁽¹⁻³⁾, 이는 강성한(robust)분무형태를 요구하는 분무유도방식 연소시스템에의 적용을 어렵게 하고 있다. 따라서 다양한 직접분사식 가솔린엔진에 선회분무를 적용하기 위해서는 능동적으로 선회분무를 제어할 수 있어야 하며⁽⁴⁻⁶⁾, 이는 기존 선회분무의 운동량 및 내부압력 구조의 제어를 통해서 가능해질 것이다⁽⁷⁾.

이전의 연구들에서는 경사노즐 및 L-step 노즐을 통해서 선회분무의 강성을 향상시키는 동시에 엔진의 요구에 따라 분무를 제어하고자 하는 노력을 기울여 왔다. 이는 미립화 특성이 좋은 선회분무를 분무유도방식 등과 같은 여러 연소시스템에 적용하고자 하는 의도에서 비롯되었다. 그러나 기존의 연구자들이 수행한 경사 노

(2006년 11월 15일 접수 ~ 2006년 12월 11일 심사완료)

*한국과학기술원

**한국에너지기술연구원

†책임저자, 회원, 한국과학기술원

E-mail : csbae@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3044 FAX : (042)869-5044

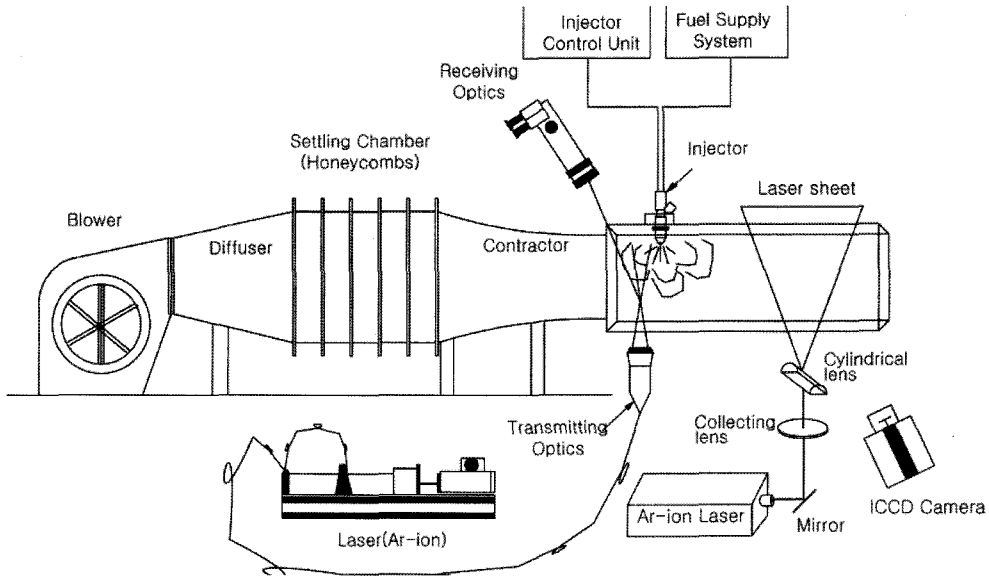


Fig. 1 Experimental setup for spray imaging

줄에 대한 결과는 경사각이 45° 이하인 경우에만 국한되어 있었다. 이는 한쪽 방향으로의 연료운동량 강도가 충분하지 않아 높은 주변압력에 의하여 분무의 형태가 변화하는 결과를 나타냈다⁽⁸⁾. 또한 L-step 노즐의 경우에는 분무의 형태가 높은 주변압력에 의하여 변하지 않았으나, 분무가 한쪽 방향으로 지나치게 편중됨으로써 V형태의 분무를 형성하고 국부적으로 매우 농후한 영역을 형성시켰다^(8, 9). 이러한 극단적인 분무 특성의 변화를 해결하기 위해서는 경사각에 따른 선회분무의 형태 변화를 좌우하는 중요 인자에 대한 이해가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 분무유도방식과 같은 엔진 연소시스템에 선회분무를 적용하기 위해서 경사각의 변화에 따른 분무 특성의 변화를 살펴보고자 하였다. 특히 기존의 연구에서 고려되지 않았던 유동각과 경사각과의 상관관계에 초점을 맞추었으며, 이러한 두 가지 인자의 상호관계에 따라서 분무의 형태 및 강성이 어떻게 변화하는지 살펴보고자 하였다.

2. 실험 장치 및 조건

Figure 1은 경사각에 따른 분무의 영상을 촬영하기 위한 장치구성을 나타내고 있다. 경사각에 따른 분무 영상의 취득은 미산란(Mie-scattering) 기법을 이용하여 취득

되었다. 레이저는 6W급의 Ar-ion 레이저를 이용하였으며, 시트(sheet)를 형성하기 위하여 원통렌즈와 볼록렌즈를 이용하였다. 모든 영상은 1280×1024의 해상도를 가진 CCD (charge coupled device) 카메라를 통하여 취득되었으며, 노출시간을 10 μs로 설정하였다.

연료 가압을 위하여 질소탱크를 이용하였으며 압력 조절기(regulator)를 통해서 분사압력을 변화시켜 주었다. 또한 지연발생기(delay generator)를 통해서 분사기간을 조절하고 분무 영상의 촬영시점을 결정하여 주었다. 실제 엔진의 연소 및 냉각수 온도에 의해 변화되는 연료 온도를 설정하기 위하여 분사기를 감싸는 히터(heater)를 장착하였으며 온도조절기를 통해 분사기의 온도를 제어하였다. 실제 연소실 내부의 압력을 모사한 상태에서 분무 영상을 취득하기 위해 가시화가 가능한 정적챔버(chamber)를 이용하였으며, 정적챔버 내의 압력은 질소탱크(tank) 및 압력조절기(regulator)

Table 1 Experimental conditions

Taper angle	0°, 50°, 70°, 90°
Back pressure	0MPa, 0.5MPa, 1MPa
Fuel temperature	298K, 358K, 393K
Injection pressure	5MPa, 7MPa
Injection duration	1.5ms
Fuel	Commercial gasoline

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 경사각 및 유동각의 정의 및 이해

Figure 2는 경사각(θ : taper angle), 유동각(α : flow angle), 유동차각(δ : 90°-flow angle)의 정의 및 적용된 경사노즐의 형태를 그림으로 나타내고 있다. 기존의 노즐은 경사각이 0°인 경우이며, 이전 연구에서 수행된 L-step 노즐의 경우는 경사각이 90°인 경우로 생각할 수 있다. L-step 노즐의 경우, 잘려진 단면의 높이(χ)는 70° 경사노즐과 같게 설정하였다. 유동각은 선회운동을 형성시켜 주는 노즐 내부의 선회포트(swirl port)에 의해 주로 결정되는 것으로 알려져 있다. 실제적인 유동각의 값을 측정하기 위해서 노즐 출구의 매우 미세한 영역을 촬영하였다. 액막이 가진 파동(wave)에 의해 영상의 일정부분은 밝게 나오고 일정부분은 어둡게 나오게 되며, 이러한 명암의 차이에 의해 유동이 진행되는 방향의 궤적이 나타나게 된다^(10, 11). 본 연구에서는 이러한 궤적이 분무의 유동각과 일치한다고 판단하였으며, 실제적으로 영상을 통해서 선회포트의 연료 유입각인 30°와 유사한 31°의 유동각을 가짐을 확인할 수 있었다. 또 한 가지 정의된 각은 유동차각이다. 유동차각은 90°에서 측정된 유동각을 뺀 값으로써, 유동각과 경사각과의 상호관계에 의한 분무 형태의 변화를 해석하는데 이용하기 위하여 정의되었다. 경사각이 커지게 될수록 노즐 내부의 연료가 노즐에서 보다 가까운 거리에서 공기 중에 노출되게 되며, 이로 인해 노즐면에 의한 저항이 줄어 분무 한쪽 방향으로의 분사각 및 분사속도가 증가하리라 기대된다. 또한 경사각이 유동차각보다 커지게 되면 분무의 일부가 노즐에 충돌을 하게 되어 일정영역으로의 연료 공급이 차단되게 된다. 이로 인해 분무가 닫힌 형태의 원추중공형태에서 열린 형태의 분무로 변화함으로써 분무 내부의 공기가 외부의 공기와 접촉을 하게 된다.

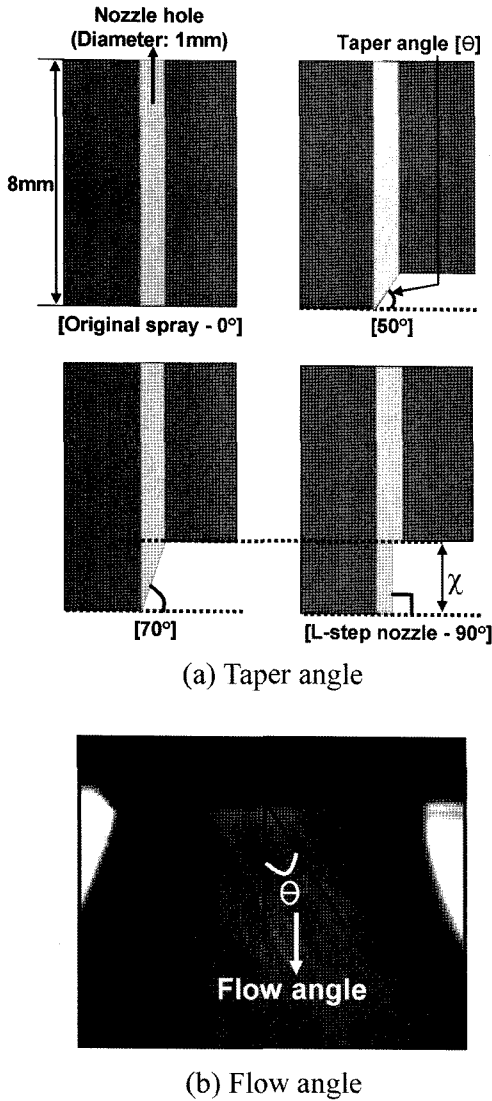


Fig. 2 Definition of taper angle and flow angle

를 통해서 제어하였다.

Table 1은 실험조건을 나타내고 있다. 경사각은 기존 노즐인 0°부터 L-step 노즐인 90° 범위로 설정하였으며, 주변압력은 0 MPa에서 1 MPa까지로 설정하였다. 연료 온도는 상온과 냉각수온도인 298K과 358K, 그리고 엔진 연소에 의해 증가된 연료온도의 영향을 살펴보기 위한 조건인 393K로 설정하였다. 분사압은 적용 분사기의 일반적인 작동 조건인 5 MPa과 7 MPa를 적용하였으며, 분사기간은 1.5 ms로 고정하여 적용하였다. 연료는 상용 가솔린을 이용하였다.

3.2 경사각에 따른 거시적 분무 형태의 변화

Figure 3은 경사각에 따른 분무의 전방 및 하방 영상(image)을 거시적으로 보여주고 있다. 전방 영상을 통해서 살펴볼 때, 경사각이 증가함에 따라 기존의 대칭적인 선회분무의 형태에서 점차 비대칭적인 분무의 형태로 변하는 것을 볼 수 있으며, 경사각이 유동차각인 60°보다 커진 경우에는 분무의 왼쪽 부분이 거의 나타나지 않음을 살펴볼 수 있다. 하방영상을 통해서 살펴보았을 때는, 경사각이 유동차각보다 작을 경우 중공형태의 분무형태가 유지되었으나, 유동차각보다 큰 경우는 왼쪽

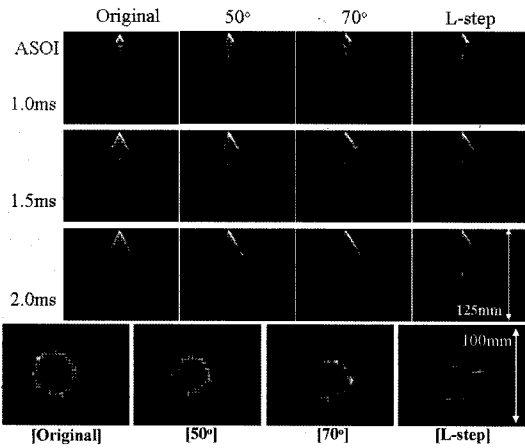


Fig. 3 Macroscopic spray images at different taper angles

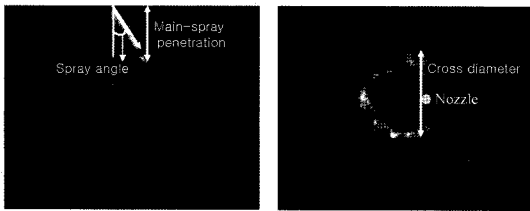


Fig. 4 Geometric parameters for spray analysis

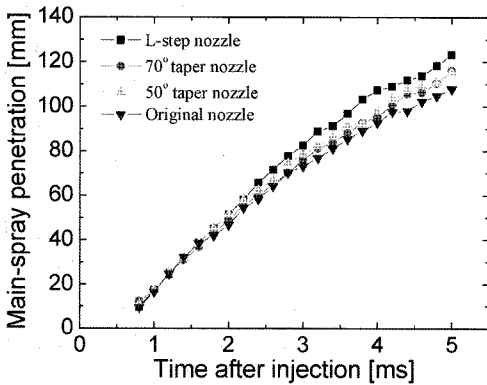


Fig. 5 Main-spray penetration at different taper angles

부분이 열린 형태의 중공형 분무가 형성됨을 알 수 있다. 경사각이 증가하게 되면, 노즐의 상부지역에서 연료가 외부공기에 노출되게 되므로 빠른 속도 및 많은 양의 연료를 가진 분무 영역을 형성하게 되며, 하부지역에서 노출된 연료는 느린 속도 및 적은 양의 연료를 가진 분무 영역을 형성하게 된다. 이로 인해 경사각의 증가에 따라 분무의 비대칭성은 증가하게 된다. 경사각이 유동차각보다 큰 경우에는 초기 분사된 분무의 일부가 노즐의 잘려진 단면에 충돌하게 되어 일정영역으로의 연료

공급이 차단되게 되므로, 중공형태에서 일정부분이 사라진 형태의 분무를 형성하게 된다. Fig. 4는 Fig. 3의 분무형태를 분석하기 위한 형상인자들을 나타내고 있다. 분무의 축방향 및 반경방향 진행 정도를 살펴보기 위하여 주분무도달거리(main-spray penetration)와 분무각(spray angle)을 정의하였으며, 분무의 수축정도를 살펴보기 위하여 교차직경(cross diameter)을 정의하였다.

Figure 5는 전방영상을 통해 분석된 주분무 도달거리를 나타내고 있다. 분사 초기에는 경사각이 증가함에 따라 주분무도달거리에는 변화가 없으나, 분무가 진행됨에 따라 경사각이 증가할수록 주분무의 도달거리는 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 경사각의 증가에 따라 한쪽 방향으로의 분무운동량이 증가했기 때문이라 할 수 있다. Fig. 6은 분무영상의 오른쪽 부분에서 측정된 분무각의 결과를 나타내고 있다. 경사각의 증가에 따라 분무각이 증가하는 결과를 볼 수 있으며, 경사각이 유동차각보다 커지게 되면 점차 균일한 값을 보임을 알 수 있다. 경사각의 증가에 따른 분무각의 증가와 분무도달거리의 증가는 단위 시간당 분무 진행거리의 증가를 의미

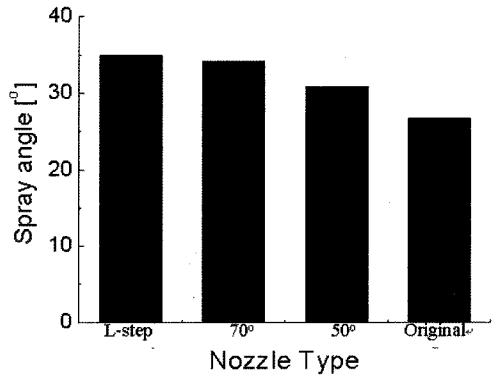


Fig. 6 Right side spray angle at different taper angles

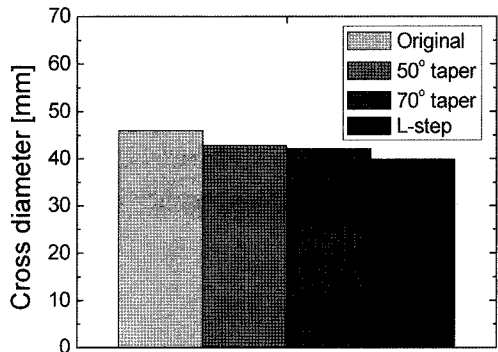


Fig. 7 Cross diameter of tapered nozzle with various taper angles

하며, 이는 한쪽 방향으로의 분무 진행속도가 증가하였음을 의미한다. 이러한 결과를 통해, 경사각이 증가함에 따라 분무의 운동량이 한 쪽 방향으로 강화되는 것을 확인할 수 있다^(8, 9). Fig. 7은 경사각에 따른 분무의 수축정도를 나타내는 교차직경을 나타내고 있다. 경사각이 증가할수록 교차직경이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이는 경사각의 증가에 따라 분무 한쪽 방향으로의 운동량이 증가하여 일정영역으로의 속도가 증가하기는 하나, 선회운동이 방해를 받음으로써 반경방향 속도 성분이 감소하게 되어 분무가 교차방향으로 수축이 되기 때문이다. 이는 경사각의 증가에 따라 강화된 운동량이 위치하는 영역이 감소하는 것을 의미하며, 이로 인해 L-step 노즐의 경우는 분무의 한쪽 영역에 농후한 영역을 형성한다.

3.3 연료온도 변화에 따른 경사노즐의 분무특성

Figure 8은 각각의 경사각 조건에서 연료 온도에 따른 선회분무의 형상변화를 전방영상을 통해서 나타내고 있다. 기존 선회분무의 경우는 연료온도의 증가에 따라 분

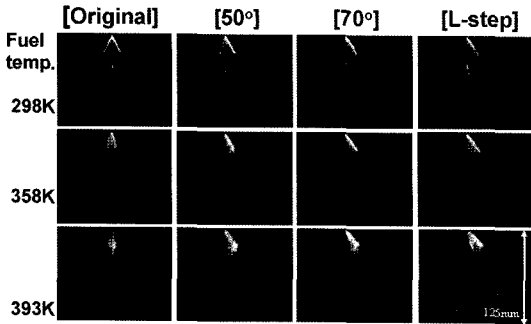


Fig. 8 Macroscopic spray images of tapered nozzle at different fuel temperatures

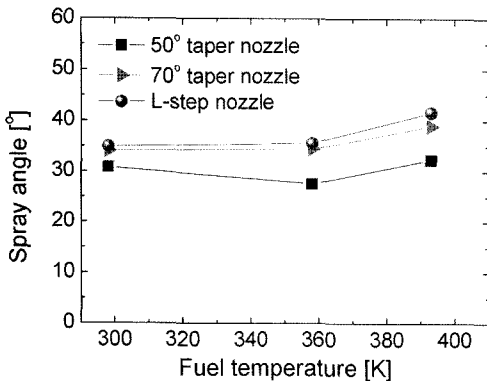
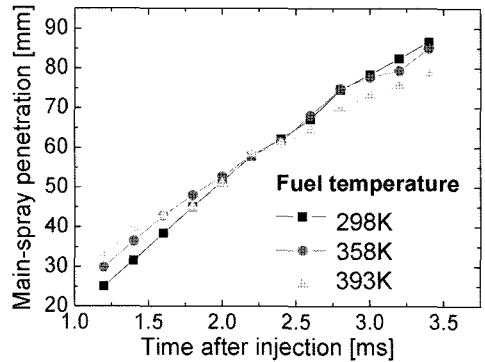
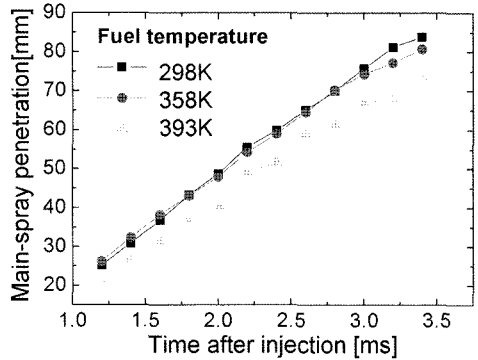


Fig. 9 Spray angles of tapered nozzle at different fuel temperatures

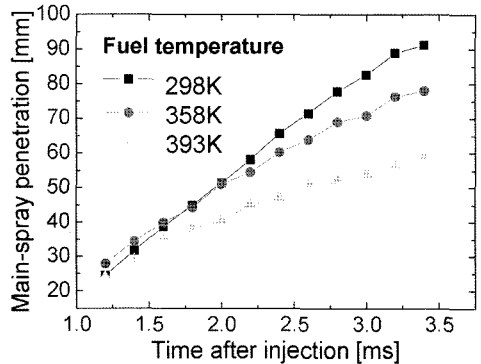
무가 축방향으로 급격히 수축하는 것을 볼 수 있다. 그러나 경사각의 증가에 따라 이러한 경향성은 크게 변화된다. 가장 큰 차이점은 기존의 결과와는 상반되게 분무각이 증가하고 주분무도달거리가 감소한다는데 있다. Fig. 9는 각각의 경사각 조건에서 연료온도의 증가에 따른 분무각의 변화를 나타내고 있다. 경사각이 증가하였을 때, 연료온도의 증가에 따라 분무각이 증가하는 것을



(a) 50° taper nozzle



(b) 70° taper nozzle



(c) L-step nozzle

Fig. 10 Main spray penetration of tapered nozzle at different fuel temperatures

볼 수 있으며, 경사각이 유동차각보다 클 때에는 그 경향성이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 연료 온도의 증가에 따라 액막과 공기기둥(air core) 사이의 마찰력 감소에 의해 출구에서의 선회운동이 증가하였기 때문이라고 판단된다⁽¹⁰⁻¹²⁾. 또한 기존 선회분무의 경우에 순간적인 액막의 팽창 이후 입자크기의 감소 및 급격한 내부압력의 감소에 의해 분무가 수축하여야 하나, 경사노즐의 경우에는 초기 운동량이 한 쪽 방향으로 강화되고 내부압력의 강하 현상이 완화됨으로써 이러한 수축이 일어나지 않았다고 판단된다⁽⁷⁾. Fig. 10은 각각의 경사각 조건에서 연료온도에 따른 주분무 도달거리를 나타내고 있다. 경사각의 증가에 따라 연료온도의 증가에 의한 주분무도달거리의 감소 현상이 더 극심해짐을 알 수 있다. 주분무 도달거리가 아닌 실제 분무도달거리로 살펴보더라도 경사각이 증가하였을 때, 연료온도의 증가에 따라 분무도달거리가 감소하는 경향성을 나타냈다. Fig. 11은 각각의 경사각 조건에서 연료 온도에 따른 선회분무의 형상 변화를 하방영상을 통해서 보여주고 있다. 또한 Fig. 12는 이를 정량화한 결

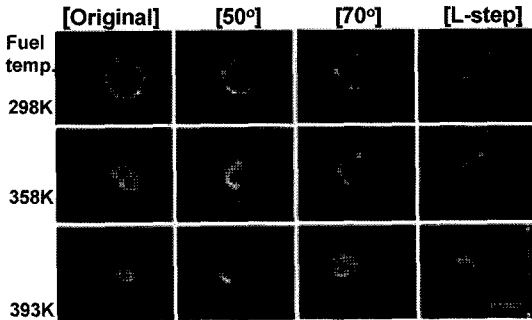


Fig. 11 Bottom view spray images of tapered nozzle at different fuel temperatures

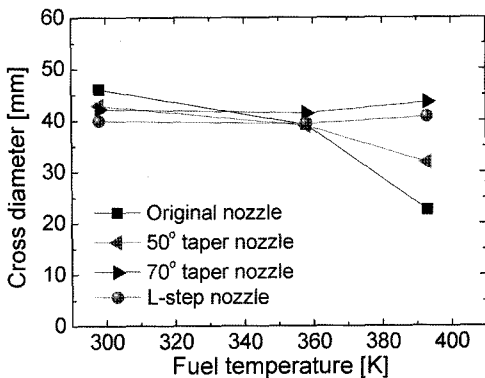


Fig. 12 Cross diameter of tapered nozzle at different fuel temperatures

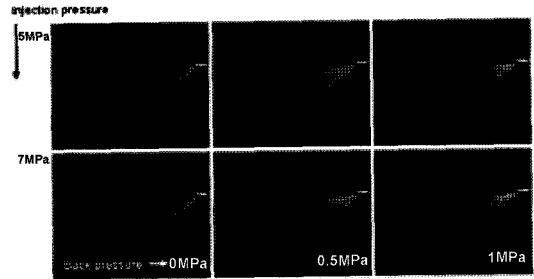


Fig. 13 Spray development of 70° tapered nozzle at different back pressure conditions

과를 나타내고 있다. 기존 노즐의 경우, 연료온도의 증가에 따라 분무가 대폭 수축하는 것을 볼 수 있으나, 경사각의 증가에 따라 수축 정도는 점차 감소함을 볼 수 있으며, 경사각이 유동차각보다 클 때에는 거의 동일한 값을 보임을 알 수 있다. 이는 경사각의 증가에 따라 노즐 내부의 압력강하 현상이 약화되고, 분무의 운동량이 강화되었기 때문이라 판단된다.

연료온도의 변화에 따른 경사노즐 분무의 이러한 특성은, 엔진 연소열에 의해 가변적으로 변화되는 연료온도에 의해서도 경사노즐 선회분무가 강성한 특성을 유지할 수 있음을 나타낸다.

3.4 주변압력조건에 따른 70° 경사노즐의 분무 특성

Figure 13은 주변압력의 증가에 따른 70° 경사 노즐 분무의 형태 변화를 나타내고 있다. 기존의 선회분무는 주변압력의 증가에 의해 극심하게 수축하였으나, 70° 경사 노즐 분무의 경우는 주변압력의 증가에 따라, 분무의 도달거리가 감소하기는 하나 분무각은 변화하지 않았다. 이러한 특성은 앞서 설명한 내부압력 강하의 완화와 분무 운동량의 증가로 설명할 수 있다. 따라서, 70° 경사 노즐 분무의 경우는 직선방향의 운동량을 가지는 비선회 분무에 근접한 형태임을 알 수 있다. 이는 엔진의 요구에 따라 선회분무를 변형해 사용할 수 있는 가능성을 제시해 준다.

4. 결 론

본 논문에서는 경사 노즐 경사각과 선회분무 유동각의 상호관계에 의한 분무 특성을 규명하고자 하였다. 이를 위해 다양한 경사각을 가진 경사 노즐의 분무 형태를 살펴보고, 주변 조건이 분무에 미치는 영향에 대한

연구를 수행하였다. 수행된 연구를 통해 얻어진 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

1) 경사각의 증가에 따라 분무는 점차 비대칭적인 형태로 바뀌었으며, 경사각이 유동차각 보다 클 때에는 열린 형태의 중공분무가 형성되었다. 또한 경사각이 증가할수록 분무각 및 분무도달거리는 증가하는 경향성을 보였다. 이는 분무의 운동량이 한쪽 방향으로 강화됨을 의미한다.

2) 경사각의 증가에 따라 연료온도의 증가에 의한 분무의 수축 정도는 감소하고 분무도달거리는 감소하였으며, 경사각이 유동차각보다 클 때에는 연료온도가 증가하였음에도 불구하고 분무각은 증가하는 경향성을 보였다.

3) 경사각이 유동차각 보다 큰 노즐의 경우, 분무운동량의 강화 및 분무내부 압력강하 현상의 약화에 의해 주변압력의 증가에도 불구하고 분무각에 변화가 발생하지 않았다.

후 기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC) 및 미래형 자동차사업단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) F. Zhao, M. C. Lai and D. L. Harrington, "Automotive Spark-ignited Direct-Injection Gasoline Engines", Prog. Energy Combustion Sci., Vol. 25, 1999, pp. 4-8.
- (2) S. Moon, J. Choi, E. Abo-Serie and C. Bae, "The Effect of Temperature on Spray and Combustion Characteristics in a Single Cylinder DISI Engine", SAE Paper 2005-01-0101, 2005.
- (3) J. Choi, Y. Lee, W. Choi and C. Bae, "Spray Character-

- istics of High Pressure Gasoline Swirl Injector with Various Cross-flow Speeds", Transaction of Korea Society of Automotive Engineers, Vol.13, No.1, 2005.
- (4) T. Honda, M. Kawamoto, H. Katashiba, M. Sumida, Norihisa Fukutomi and Kazuhiko Kawajiri, "A Study of Mixture Foramtion and Combustion for Spray Guided DISI", SAE paper 2004-01-0046, 2004.
- (5) B. Berifui, R. Kneer, S. Breuer, W. Reckers, D. Robart, H. Wanlin and C. Weiten, "Investigation of a DISI Fuel Injector for a Close-Arranged Spray-Guided Combustion System", SAE paper 2002-01-1133, 2002.
- (6) M. C. Drake, T. D. Fansler and A. M. Lippert, "Stratified-charge combustion: modeling and imaging of a spray-guided direct-injection spark-ignition engine, Proceedings of the Combustion Institute", Vol. 30, 2005, pp. 2683~2691.
- (7) S. Moon, E. Abo-Serie, H. Shin and C. Bae, "Static pressure Distribution inside the Swirl spray", ICLASS 2006, August 2006, Kyoto, Japan.
- (8) A. Miyajima, Y. Okamoto, Y. Kadomukai, S. Togashi and M. Kashiwaya, "A Study on Fuel Spray Pattern Control of Fuel Injector of Gasoline Direct Injection Engines", SAE Paper 2000-01-1045, 2000.
- (9) M. Abe, Y. Okamoto and Y. Kadomukai, "Fuel Spray Pattern Control Using L-Step Nozzle for Swirl-Type Injector", SAE Paper 2004-01-0540, 2004.
- (10) M. Gavaises, E. Abo-serie and C. Arcoumanis, "Nozzle Hole Film Formation and its Link to Spray Characteristics in Swirl-Pressure Atomizers for Direct Injection Gasoline Engines", SAE Paper 2002-01-1136, 2002.
- (11) E. Abo-Serie, "Internal Flow and Spray Characteristics of a Swirl Pressure Atomiser for Gasoline Engines, Ph. D thesis", Imperial College, 2003.
- (12) S. Moon, E. Abo-Serie, J. Choi and C. Bae, "The Initial Film Flow Development of the High-Pressure Swirl Spray", Journal of ILASS-Korea, Vol. 11, No. 3, 2006, pp. 168~175. (in Korean)