

분사 조건이 다공형 GDI 인젝터의 분무 거동에 미치는 영향

박정환¹⁾ · 박수한¹⁾ · 이창식²⁾ · 박성욱^{*2)}

한양대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학부²⁾

Effect of Injection Conditions on the Spray Behaviors of the Multi-hole GDI Injector

Jeong Hwan Park¹⁾ · Su Han Park¹⁾ · Chang Sik Lee²⁾ · Sungwook Park^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 4 July 2011 / Revised 29 July 2011 / Accepted 2 August 2011)

Abstract : The purpose of this study is to investigate the overall spray behavior characteristics for various injection conditions in a gasoline direct injection(GDI) injector with multi-hole. The spray characteristics, such as the spray penetration, the spray angle, and the injection quantity, were studied through the change of the injection pressure, the ambient pressure, and the energizing duration in a high-pressure chamber with a constant volume. The n-heptane with 99.5% purity was used as the test fuel. In a constant volume chamber, the injected spray was visualized by the spray visualization system, which consisted of the high-speed camera, the metal-halide lamp, the injector control device, and the image analysis system with the image processing program.

It was revealed that the injection quantity was mainly affected by the difference between the injection pressure and the ambient pressure. For low injection pressure conditions, the injection quantity was decreased by the increase of the ambient pressure, while it nearly maintained regardless of the ambient pressure at high injection pressure. According to the increase of the ambient pressure in the constant volume chamber, the spray development became slow, consequently, the spray tip penetration decreased, and the spray area increased. In additions, the circular cone area decreased, and the vortex area increased.

Key words : GDI(Gasoline Direct Injection, 가솔린 직접분사), Multi-hole injector(다공형 인젝터), Spray penetration(분무 도달거리), Spray area(분무 면적), Spray angle(분사각), Ambient pressure(분위기 압력)

1. 서론

가솔린 직접 분사식(GDI, Gasoline Direct Injection) 엔진은 기존의 포트 분사식(PFI, Port Fuel Injection) 엔진과 달리 연료를 연소실 내에 직접 분사함으로써 흡기 포트에서 생기는 벽류 현상을 없애고 저 부하 운전 영역에서의 성층화 연소를 통해 연비를 저감시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 직접 분사된 연료의 증발 잠열로 인하여 연소실 온도가 기존의 포트

분사식 엔진 보다 낮아져 보다 높은 압축비로 운전할 수 있어 열효율과 충전 효율을 높일 수 있으며, 펌핑 손실 및 열 손실을 줄임으로써 출력을 높일 수 있다. 이와 같이 높은 열효율과 출력을 갖는 GDI 엔진은 강화되고 있는 배기가스 규제와 연비 규제를 만족시킬 수 있는 차세대 가솔린 엔진으로 대두되고 있다.¹⁻³⁾

그러나 성층화 연소를 구현하기 위해서는 부하에 따른 공연비 제어가 필수적이며, 이를 위해서는 정확한 분사 타이밍 조절이 가능해야 한다. 최적의 혼

*Corresponding author, E-mail: parks@hanyang.ac.kr

합기 형성과 분사 시기 제어를 위해 GDI 인젝터는 스웰 인젝터에서 멀티홀 인젝터로 발전하였고, 10MPa 이상으로 분사가 가능해졌다. 분사 압력의 증가는 연료 액적의 미립화 성능 향상과 균일한 혼합기 형성이 가능하고, 배기가스 저감과 출력 향상을 가능하게 한다. 또한 분무특성에서 분무 도달거리, 분사각, 분무 형상 등 분무 거동은 인젝터 니들의 각도, 노즐 분사공의 배치와 크기 등과 같은 인젝터 노즐 구조와 연료 온도, 분사압력, 통전 기간 등과 같은 분사 조건에 의해 결정된다.⁴⁾ 그러나 GDI 분사 시스템은 점화 플러그와 인젝터가 가깝게 위치하고 있어 혼합기 형성 시간이 매우 짧아 정확한 분사 제어가 어려운 단점이 있다. 운전 영역에 따라 빠르고 정확한 공연비 제어를 요구하는 GDI 엔진은 분무의 도달거리와 분사각 등 혼합기 형성에 영향을 미치는 요소들의 특성이 매우 중요하다.⁵⁾ GDI 인젝터의 분무 특성에 관하여 많은 연구자들에 의하여 연구가 진행되어 왔다. Lee 등^{6,7)}은 고압의 분사 압력이 GDI 인젝터의 분무 특성에 미치는 영향과 분무 외곽에서의 와류 형성을 PIV(Particle Image Velocimetry, 입자 영상 분석법), PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer, 위상도플러 입자분석기) 기법을 이용하여 규명하였으며 이에 따른 GDI 스웰 인젝터의 분무 거동과 미시적 특성을 분석하였다. Pielecha 등⁸⁾은 피에조 구동 방식의 GDI 인젝터에서 에탄올 85%를 혼합한 E85 연료와 100% 가솔린 연료의 분무 특성 차이를 거시적 관점에서 비교하였다.

GDI 인젝터에 관한 연구가 몇몇 연구자 및 연구 그룹에서 진행되고 있으나, 보다 뛰어난 GDI 엔진 성능과 배기 성능을 구현하기 위해서는 다공형 GDI 인젝터에 관한 체계적인 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 연료 분사 조건이 GDI 인젝터로부터 분사되는 연료의 분무 도달 거리, 분무각, 분무 면적과 같은 분무 거동에 미치는 영향을 실험적으로 관찰하고, 분석하는 것에 연구의 목적이 있다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

다공형 GDI 인젝터의 분무 특성에 관한 연구를 위해 Fig. 1과 같이 분무 가시화 및 분사 유량 측정

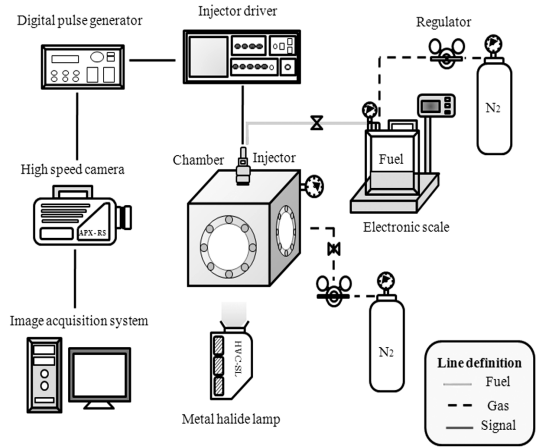


Fig. 1 Schematic diagram of spray visualization and injection quantity measuring systems

장치를 구성하였다. 본 연구를 위한 실험 장치는 연료 공급 장치, 분사 신호 제어 장치, 분무 영상 취득 장치, 데이터 처리 장치 그리고 분사 유량 측정을 위한 정밀 저울로 구성하였다.

연료 공급 장치는 고압 분사를 위하여 레귤레이터를 이용하여 질소 가스를 연료 탱크에 직접 가압하여 실험을 위한 분사 압력으로 가압하였으며, 고압 연료 라인을 통해 인젝터로 연료를 공급하였다. 인젝터 구동을 위한 분사 신호는 인젝터 드라이버(TEMS, TDA-3200H)를 이용하여 제어하였다. 분무 영상 취득을 위하여 고속 촬영 시스템을 구성하였으며, 고속카메라(Photron, Fastcam-APX RS)와 2개의 메탈 할라이드 램프(Photron, HVC-SL, 150W)를 사용하였다. 또한 고압 분위기 압력 조건을 형성하기 위하여 정적 체임버에 질소를 공급하고, 잔류가스의 영향을 줄이기 위하여 배기장치를 설치하였다. 분무 영상 촬영은 분사 방향의 90° 방향으로 카메라를 배치하여 촬영하였으며, 디지털 신호 발생기(Berkeley Nucleonics Corp, Model 555)를 사용하여 카메라 신호와 인젝터 드라이버 신호를 동기화시켜 가시화 실험을 수행하였다. 고속카메라를 이용하여 취득한 분무 영상의 데이터 처리 장치는 영상 처리 프로그램이 설치된 컴퓨터로서 영상의 취득, 저장, 분석에 사용되었다. 분사유량의 측정을 위하여 0.1g 단위로 측정 가능한 정밀 저울(AND GP-30K)을 이용하였다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 GDI 인젝터의 분무 거동 특성에 관한 연구를 위하여 분공수가 여섯 개이고 분사각이 42°인 다공형 인젝터를 사용하였으며, Table 1과 같은 실험 조건하에서 실험을 수행하였다. 분무 가시화 실험은 명확한 분무 영상 취득을 위하여 매 분사 후 배기 장치를 이용하여 체임버 내 잔류 가스를 외부로 배출시켜 잔류 가스의 영향을 최소화 한 후 실험을 수행하였다. 또한 고압의 분위기 조건에서 분사 유량 측정을 위하여 정적 체임버 내에 연료를 분사하고 분사 전·후 연료 탱크 무게의 차이를 이용하여 유량을 측정하였다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 GDI 인젝터의 분무 도달거리는 노즐 팁으로부터 분무 선단이 도달하는 최대 길이로 정의하였고, 분사각은 노즐 팁으로부터 분무 축 방향으로 10mm, 30mm, 50mm, 80mm 떨어진 위치에서 수직방향으로 분무의 최외곽 두 지점을 잇는 각으로 정의하였다.

Table 1 Experiment conditions

Test fuel	n-Heptane (C ₇ H ₁₆)
Injector	multi-hole injector (6hole)
Injection pressure (MPa)	4, 8, 12
Ambient pressure (MPa)	0.1, 1.0, 2.0
Energizing duration (ms)	1.0, 1.5, 2.0, 3.0

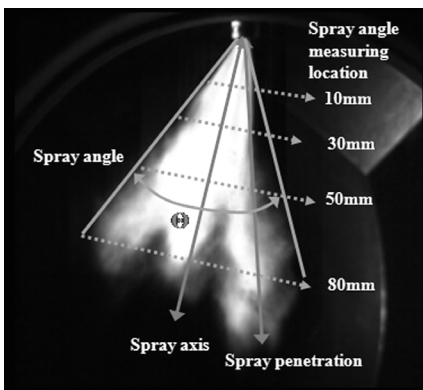


Fig. 2 Definition of macroscopic spray characteristics (spray penetration, spray angle)

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분무 영상 처리 및 분무 발달 과정

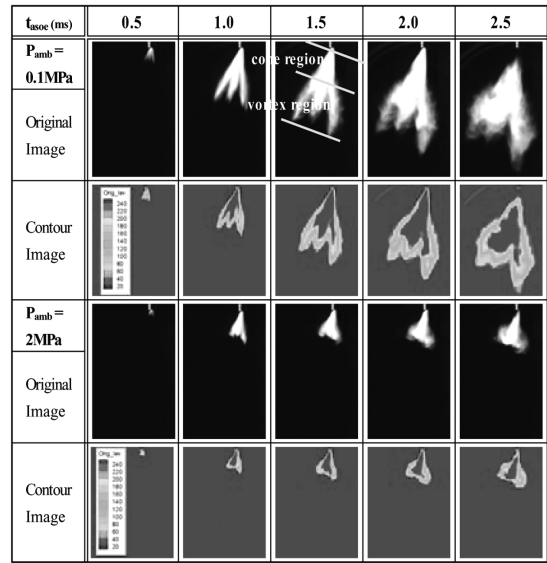


Fig. 3 Comparison of original and contoured spray images (P_{inj} = 12MPa, t_{eng} = 2.0ms, P_{amb} = 0.1MPa, 2MPa)

본 연구를 위한 분무 가시화 영상은 분석의 정확성과 객관성을 위하여 영상 처리 프로그램을 이용하여 영상을 처리하였으며, 실제 분무 영상과 후처리된 영상을 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

분무 영상을 분석하기 위하여 고속카메라에서 취득된 컬러 영상을 회색조(8bit) 영상으로 전환 하고, 실제 분무 영상과 가장 근접한 결과 값을 갖는 스톱스홀드(threshold) 값을 선정하여 영상을 분석하였으며, 변환된 영상의 범례는 연료의 농도에 비례하게 나타나도록 하였다.

Fig. 3에 나타난 것과 같이 분무 형상은 분위기 압력과 관계없이 분무가 원추형으로 유지되는 원추영역(cone region)과 와류의 형성이 활발한 분무 외곽의 와류 형성 영역(vortex region)으로 구분된다.⁹⁾ 또한, 연료의 분포는 분무 중앙 부분이 농후하며, 분무 외곽으로 갈수록 증발의 영향으로 연료의 농도가 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 분위기 압력이 2MPa일 때 분무 발달은 대기압 조건에 비해 매우 느렸으며, 증가된 분위기 밀도의 영향으로 분무가 작게 형성됨을 확인하였다. 그리고 높은 분사 압력으로 인하여 상대속도 차이가 커짐에 따라 분무 외곽에서 와류가 형성되고, 레이놀즈 수의 증가로 인해 주변 기체의 난류 유동이 커져 와류가 크게 형성 되

었다. 또한 분위기 압력의 증가로 인하여 분무 발달이 느려지고 와류의 형성 위치가 노즐 팁 근처로 이동되는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 분사 유량

분사 압력, 분위기 압력, 통전기간이 다공형 GDI 인젝터의 분사 유량에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 통전기간은 니들이 열리는 시간으로, 통전기간이 2배 증가함에 따라 분사 유량도 선형적으로 증가하였다. 분위기 압력이 증가함에 따라 분사 유량은 감소하였으며, 특히 낮은 분사압력에서 분위기 압력의 영향이 분명하게 나타났다. 그러나 분사 압력 12MPa에서는 분위기 압력의 영향을 거의 받지 않고 일정한 분사 유량을 나타냈다. 이것은 분사 유량이 분사 압력과 분위기 압력의 차이에 비례 ($m_{fuel} \propto \sqrt{\Delta P}$) 하기 때문에 높은 분사 압력의 경우 분위기 압력이 0.1MPa, 1MPa, 2MPa로 변하더라도 크게 영향을 받지 않았지만, 분사 압력이 낮고, 통전기간이 짧은 경우에는 분위기 압력의 변화가 분사 유량에 영향을 주는 것으로 판단되며, 결과적으로 분사 유량은 분위기 압력보다 분사압력의 영향이 더 지배적인 것으로 판단된다.¹⁰⁾

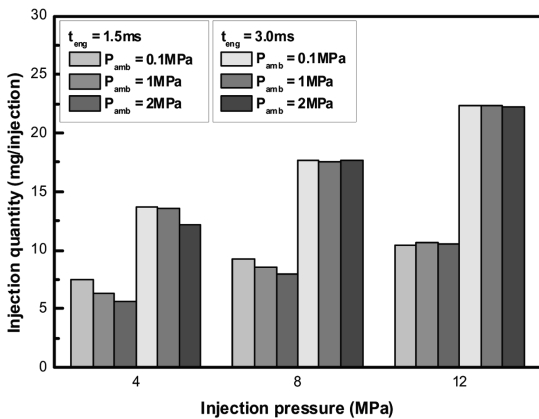


Fig. 4 Comparison of the injection quantity characteristics for the variation of the injection pressure, ambient pressure and the energizing duration (P_{inj} = 4, 8, 12MPa, P_{amb} = 0.1, 1, 2MPa, t_{eng} = 1.5, 3.0ms)

3.3 분무 도달거리

Fig. 5는 분사 유량이 일정한 조건에서 분위기 압

력과 통전기간에 따른 분무 도달거리를 비교한 것이다. 통전기간 1.5ms와, 3.0ms는 모두 인젝터 노즐의 니들이 충분히 열리는 시간으로 분무 거동에 미치는 영향이 적어 분무 도달거리의 차이는 적었으며, 분무 후반에서의 차이는 분무의 증발로 인한 것으로 그 차이는 미미하였다. 이를 통해 분무 형성을 위한 충분한 분사 유량 조건에서 통전기간은 분무 도달거리에 미치는 영향이 적음을 확인하였다. 또한, 분위기 압력의 증가는 주변 기체의 항력을 증가시켜 분무 발달을 느리게 하고, 분위기 밀도를 증가시켜 분무와 기체 사이의 마찰로 인하여 운동량이 감소되어 분무 도달거리가 짧게 나타났다.

Fig. 6은 동일한 통전기간 조건에서 분사 압력과

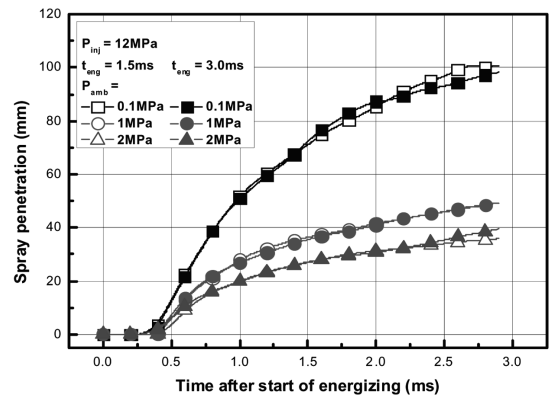


Fig. 5 Effect of ambient pressure and energizing duration on the spray penetration (P_{inj} = 12MPa, P_{amb} = 0.1, 1, 2MPa, t_{eng} = 1.5, 3.0ms)

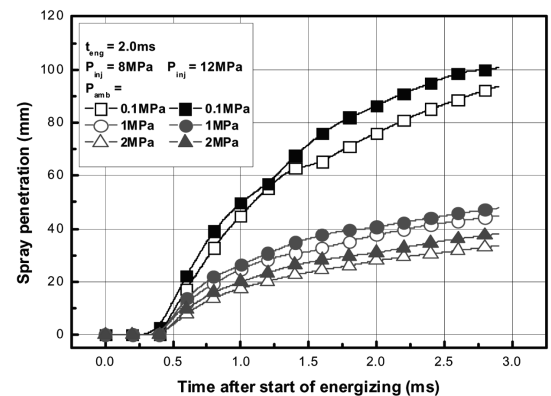


Fig. 6 Effect of injection pressure and ambient pressure on the spray penetration (P_{inj} = 8, 12MPa, P_{amb} = 0.1, 1, 2MPa, t_{eng} = 2.0ms)

분위기 압력에 따른 분무 도달거리를 비교한 것이다. 동일한 분위기 압력 조건에서 분사 압력의 증가는 분무 도달거리를 길게 하였으며, 분위기 압력의 증가는 분무 도달거리를 짧게 하였다. 특히, 분위기 압력이 0.1MPa에서 1MPa로 증가하였을 때, 분무 도달거리는 급격히 줄어들었으며, 분사압력의 증가에 따른 분무 도달거리의 증가보다 분위기 압력 증가에 따른 분무 도달거리의 감소 비율이 더 크게 나타났다.

3.4 분무 면적

Fig. 7과 8은 분사 압력과 분위기 압력에 따른 분무 면적을 나타낸 것으로, 분무 면적은 시간이 경과함에 따라 분무의 확산으로 인하여 급격히 증가하였으며, 분사 압력이 증가함에 따라 분사 유량 또한 증가하므로 분무 면적이 넓게 나타났다. 특히, 분사 압력 8MPa에서 12MPa로 증가하는 경우에는 분사 압력이 4MPa에서 8MPa로 증가하는 경우보다 3배 이상의 분무 면적 증가를 보였다. 그러나 분사 압력의 증가에 따른 분사 유량의 증가는 약 25~30%이지만, 분무 면적의 증가는 약 20~67%로 나타났다. 이 결과는 고압의 분사 압력일수록 분사 유량의 증가로 인한 분무 면적의 증가뿐만 아니라 분무의 미립화 향상으로 인하여 증발과 분무 확산의 영향으로 인한 분무 면적 증가로 판단된다. Fig. 8에 나타난 것과 같이 분위기 압력이 증가할수록 분무 면적이 급격히 감소하였다. 이것은 주변 기체의 밀도 증가에 따라

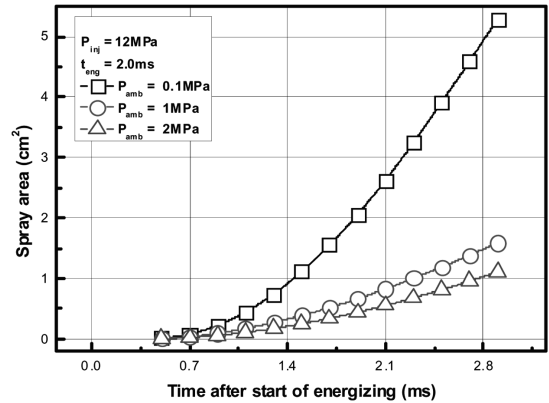


Fig. 8 Effect of ambient pressure on the spray area ($P_{inj} = 12\text{MPa}$, $P_{amb} = 0.1, 1, 2\text{MPa}$, $t_{eng} = 2.0\text{ms}$)

액적의 운동에 대한 저항과 마찰이 커짐에 따라 분무의 발달이 느려지기 때문이며, Fig. 8의 분무 사진과 같이 분위기 압력이 증가할수록 분무의 크기가 작아짐에 따라 면적이 작아지는 것으로 판단된다.

3.5 분사각

Fig. 9는 분사 압력 12MPa, 분위기 압력 0.1MPa, 통전기간 2.0ms에서의 분사각을 나타낸 것이다. 노즐 팁에서 10mm 떨어진 지점에서의 분사각은 측정 지점이 노즐 팁에서 너무 가까워 다른 측정점에서의 분사각보다 상대적으로 큰 값을 가졌다. 측정점이 멀어질수록 분무의 도달이 늦어짐에 따라 분사각이 측정되는 시간 또한 늦어졌다. 측정점 50mm는 와류 형성 영역으로 최대 분사각 크기가 가장 크게

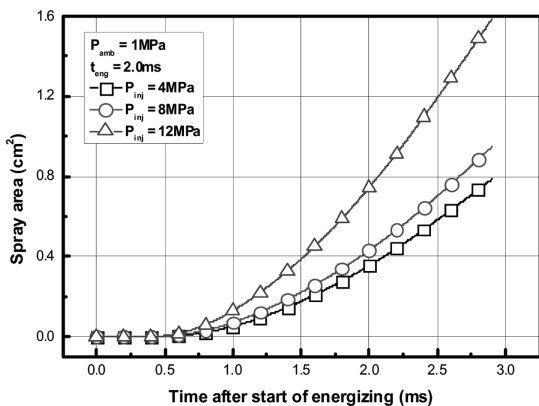


Fig. 7 Effect of injection pressure on the spray area ($P_{inj} = 4, 8, 12\text{MPa}$, $P_{amb} = 1\text{MPa}$, $t_{eng} = 2.0\text{ms}$)

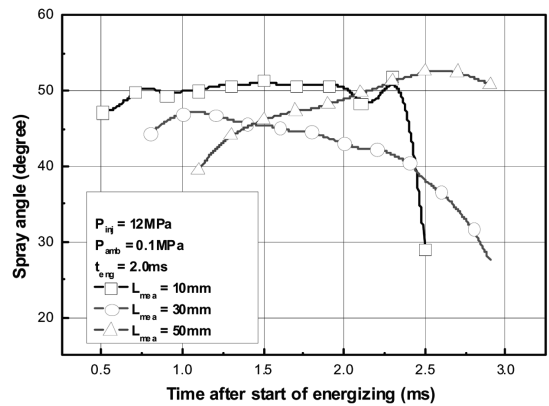


Fig. 9 Spray angle characteristics for the measuring locations ($P_{inj} = 12\text{MPa}$, $P_{amb} = 0.1\text{MPa}$, $t_{eng} = 2.0\text{ms}$)

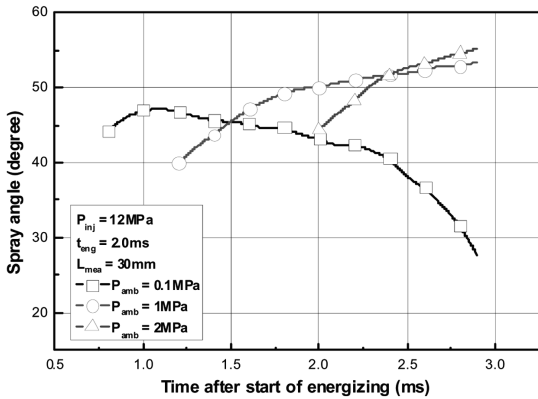


Fig. 10 Effect of ambient pressure on the spray angle ($P_{inj} = 12\text{MPa}$, $P_{amb} = 0.1\text{MPa}$, 1MPa , 2MPa , $t_{eng} = 2.0\text{ms}$, $L_{mea} = 30\text{mm}$)

나타났으며, 시간이 지남에 따라 증발로 인하여 분무 각의 크기가 점차 커졌다. 그리고 측정점에 상관없이 최대 분무 각을 형성한 후에 분무가 측정점을 벗어나거나 증발하여 없어짐에 따라 분사각이 점차 감소하는 것을 확인하였다.

분위기 압력이 분사각에 미치는 영향을 확인하기 위하여 측정점 30mm에서의 분사각을 측정하여 Fig. 10에 나타내었다. 분위기 압력의 증가는 분무의 발달을 지연시켜 분사각의 측정 시작 시간을 늦추고, 분위기 밀도의 증가로 인하여 측 방향보다는 반경 방향으로의 분무 발달 촉진시켜 분위기 압력이 높을수록 최대 분사각을 크게 하였다. 또한 분위기가 0.1MPa 조건에서는 분무가 다른 조건에서보다 빠른 속도로 발달되어 측정 지점을 빠르게 벗어나기에 따라 상대적으로 분사각의 감소가 빠르게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 분사 조건(분사 압력, 분위기 압력, 통전기간)이 다공형 GDI 인젝터의 분무 거동에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험을 수행 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 분사 유량은 통전 기간과 분사 압력의 영향이 지배적이며, 통전 기간과 분사 압력이 증가함에 따라 분사 유량이 증가하였다. 특히, 고압의 분사 압력에서는 분위기 압력의 영향이 거의 없었지

만, 저압의 분사 압력에서는 분위기 압력의 영향이 크게 나타나고 분위기 압력이 높을수록 분사 유량은 작게 나타났다.

- 2) 분위기 압력의 증가에 따라 주변 기체의 항력이 증가하여 분무 발달이 느려지며 이에 따라 분무 도달거리와 분무 면적이 작게 나타났다. 분사 압력의 증가는 분무 면적과 유량을 증가시키고, 분무의 미립화를 향상시킨다.
- 3) 분위기 압력의 증가에 따라 반경방향으로의 분무 발달이 증가하고, 분무의 원추 영역의 감소와 와류 영역이 증가하여 분사각이 증가하였다.

후 기

본 연구는 현대기아 연구개발총괄본부 및 케피코의 연구지원과 2단계 BK21 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1) T. Pauly, S. Franschek, R. Hoyer and S. Eckhoff, "Cost and Fuel Economy Driven Aftertreatment Solutions - for Lean GDI," SAE 2010-01-0363, 2010.
- 2) S. H. Park, H. J. Kim, H. K. Suh and C. S. Lee, "Atomization and Spray Characteristics of Bioethanol and Bioethanol Blended Gasoline Fuel Injected through a Direct Injection Gasoline Injector," Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol.30, pp.1183-1192, 2009.
- 3) F. Zhao, M. C. Lai and D. L. Harrington, "Automotive Spark-ignited Direct-injection Gasoline Engines," Progress in Energy and Combustion Science, Vol.25, pp.437-562, 1999.
- 4) N. Mitroglou, J. M. Nouri, Y. Yan, M. Gavaises and C. Arcomanis, "Spray Structure Generated by Multi-hole Injectors for Gasoline Direct-injection Engines," SAE 2007-01-1417, 2007.
- 5) C. Preussner, C. Doring, S. Fehler and S. Kampmann, "GDI: Interaction between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance," SAE 980498, 1998.
- 6) C. S. Lee, K. H. Lee, M. S. Chon and D. S.

- Kim, "Spray Structure and Characteristics of High-pressure Gasoline Injectors for Direct-injection Engine Applications," *Atomization and Sprays*, Vol.11, pp.35-48, 2001.
- 7) C. S. Lee, M. S. Chon and Y. C. Park, "Spray Structure of High-pressure Gasoline Injector in a Gasoline Direct Injection Engine," *Int. J. Automotive Technology*, Vol.2, No.4, pp.165-170, 2001.
- 8) I. Pielecha, D. Maslennikov and K. Wislochi, "Optical Research of Spray Development of E85 Fuel in High Pressure Gasoline Direct Injection System," SAE 2010-01-2285, 2010.
- 9) L. W. Evers, "Characterization of the Transient Spray from a High Pressure Swirl Injector," SAE 940188, 1994.
- 10) Y. J. Kim, K. B. Kim and K. H. Lee, "The Spray Characteristics of a Liquid Phase LPG Port Injection Type Injector for a Remodeled Diesel Engine," SAE 2009-01-1879, 2009.