

## 가솔린 직접분사용 다공형 인젝터의 분무특성에 관한 실험적 연구

이상인<sup>1</sup>, 박성영<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공주대학교 일반대학원 기계공학과

<sup>2</sup>공주대학교 공과대학 생산기술연구소

## Experimental Study on Spray Characteristics of Gasoline Direct Injection Multi-hole Injector

Sang-In Lee<sup>1</sup> and Sung-Young Park<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Dept., Graduate School, Kongju National University

<sup>2</sup>Industrial Technology Research Institute, College of Engineering, Kongju National University

**요약** 본 연구의 목적은 경제적이고, 친환경적인 가솔린 직접 분사 인젝터의 분무특성을 연구하는 것에 있다. 분무 도달거리, 분무각 그리고 혼합기 형성과 같은 인젝터의 특성을 가시화 실험을 통하여 측정하였다. 특히 분무압력과 분위기압력이 분무 침투거리와 분무각에 미치는 영향을 분석하였다. 가시화 실험을 위하여 정적 연소실과 연료 공급 장치를 제작하였다. 초고속 카메라와 LED광원을 이용하여 분무형상을 촬영하였고, 촬영된 영상으로 분무 특성을 분석하였다. 연소실내의 분위기압력이 감소하고, 연료의 분무압력이 증가할수록 도달거리는 증가하였다. 분위기압력과 분무압력에 대해 분무각의 변화는 미소하지만, 분위기압력이 분무각에 더 큰 영향을 미치고 있다.

**Abstract** The purpose of this paper is to investigate spray characteristics of GDI injector that is economic and environment-friendly. Injector characteristics such as penetration length, spray angle and mixture formation were measured using experimental visualization technique. Especially, it has been analyzed that the influences of ambient pressure and injection pressure on penetration length and spray angle. To visualize the spray, a constant volume combustion chamber and fuel supply system have been manufactured. A high-speed camera and LED light source have been applied to obtain spray images. The experimental and visualization result shows that the penetration length is increased as decreasing ambient pressure and/or increasing injection pressure. Also, ambient pressure and injection pressure have minor effect on the spray angle variation.

**Key Words :** Gasoline direct injection, Spray characteristics, Spray angle, Penetration length

### 1. 서론

전 세계적으로 경제성이 좋고, 친환경적인 엔진에 대한 많은 요구가 증대되어 왔다. 이에 따라 자동차 엔지니어들은 연료소모율 개선과 점점 강화되고 있는 배기ガ스 환경규제를 만족시키기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다[1,2]. 가솔린 직접분사 엔진은 가솔린 연료를 연소실 내에 직접 분사하여 연소시키는 엔진이다. 연소실내에 연료를 직접 분사하기 때문에 엔진의 응답성이 빠르고, 포트 분사방식의 엔진 대비 정밀한 연료 공급 제어가 가능

하다. 또한 연소실내로 분사된 연료의 기화 잡열에 의한 흡기 냉각효과가 높아 압축비 증대가 가능하기 때문에 열효율과 체적효율이 향상된다[3]. Mitsubishi는 DISC 연소방식을 채용한 상용 가솔린 직접분사 엔진인 Galant 1.8L가 기존의 동급 엔진 대비 10%의 출력 향상, 희박 연소시 25%의 연비 향상 및 EGR 제어를 통해 최대 90%까지의 NOx 저감 성능이 있는 것으로 주장하고 있다. Ford의 PROCO 엔진은 이론공연비 운전을 하는 가솔린 직접 분사 방식으로 5~10%의 연비향상을 보인다고 발표한 바가 있다[2]. 그러나 이러한 이점에도 불구하고 가솔린 직

\*교신저자 박성영(sungyoung@kongju.ac.kr)

접수일 11년 02월 10일

수정일 (1차 11년 03월 19일, 2차 11년 03월 23일)

제재확정일 11년 05월 12일

접분사 기술이 사장되었던 이유는 짧은 혼합시간 때문에 연소실내의 연료와 흡기의 혼합비 제어 등에 어려움이 있었기 때문이다. 양호한 혼합기를 얻기 위해서는 인젝터의 분무성능 그리고 점화 제어 기술의 향상과 이에 대한 연구가 필요하다. 특히 가솔린 직접분사 엔진은 포트 분사 엔진 대비 분무 미립화 특성과 연소실내 혼합기의 유동이 중요하기 때문에 인젝터의 분무특성 연구에 대한 요구가 증대되고 있다[3,4]. 본 연구에서는 2400cc급 가솔린 직접분사 엔진에 적용되는 인젝터의 가시화실험을 통하여 분무압력 및 분위기압력의 변화가 분무된 연료입자의 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 실험 방법 및 장치

### 2.1 인젝터

본 연구에 사용된 인젝터는 국내에서 양산 자동차에 장착되는 솔레노이드 타입의 가솔린 직접분사 인젝터이다. Continental사에서 제작된 이 인젝터는 2400cc급 가솔린 직접분사 엔진에 적용되는 6홀의 다공형 인젝터로 장착각은 피스톤 상면과 21°를 이루고 있다. 분무압력이 120bar 일 때 분무각과 벤트각은 33° 및 13°로 설계되었고, 분무유량은 14.7g/s이다.



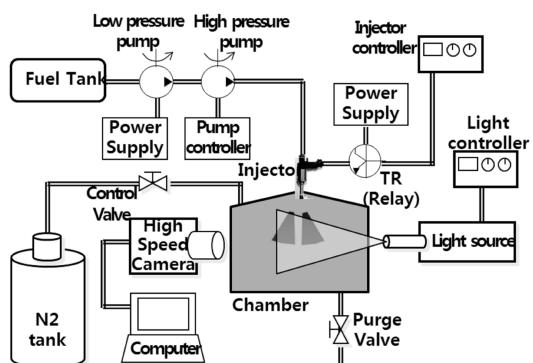
[그림 1] 가솔린 직접분사 인젝터

### 2.2 가시화 실험장치

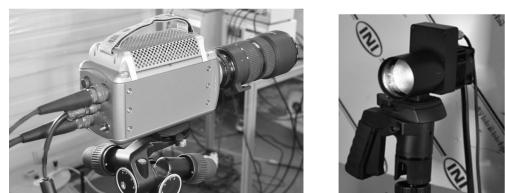
가솔린 직접분사 인젝터 가시화실험을 위하여 그림 2와 같은 실험 장치를 구성하였다. 연소실(Chamber)은 인젝터가 장착되는 좌측면을 제외하고 전면, 후면 및 우측면에 퀴즈를 장착하여 연소실내의 시야를 확보하였고, 광원에 의한 연소실내 빛의 산란을 최소화하기 위하여 연소실내부를 흑색 무광페인트로 채색하였다. 그림 2의 개략도와 같이 연소실을 기준으로 정면에는 카메라가 설치되고, 후면에는 광원을 배치하였다. 카메라와 광원은 서로 바라보는 대칭의 형태이고, 이 때 분무는 광원에 피사되어 그림자의 형태 즉 역광의 화상으로 카메라에 취득된다. 그림 3은 가시화를 위한 초고속 카메라를 보여주고

있으며 상세한 제원은 표 1과 같다.

엔진 내부와 유사한 분위기를 조성하기 위하여 고압의 질소로 연소실내의 압력을 형성하였다. 가솔린 직접분사 인젝터의 높은 연료 압력을 제어하기 위하여 저압펌프로 고압펌프에 연료를 공급하였고, 실험이 진행되는 동안의 일정한 연료 공급압력을 유지하기 위하여 고압펌프 제어기를 사용하였다. 연소실은 고압의 연료가 분사되고 분위기압 변화를 위한 질소가압을 견뎌야 하기 때문에 SUS 304를 이용하여 그림 4와 같이 설계 및 제작하였다.



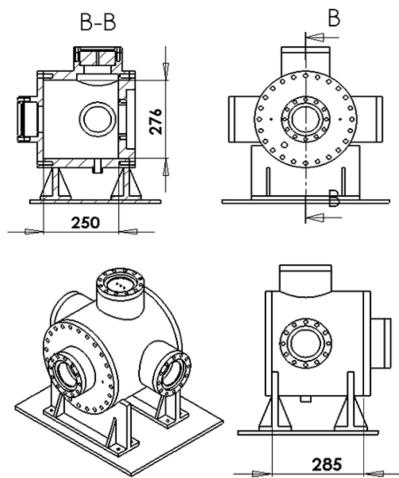
[그림 2] 가시화 실험 장치 개략도



[그림 3] 초고속 카메라와 LED 광원

[표 1] 초고속 카메라 제원

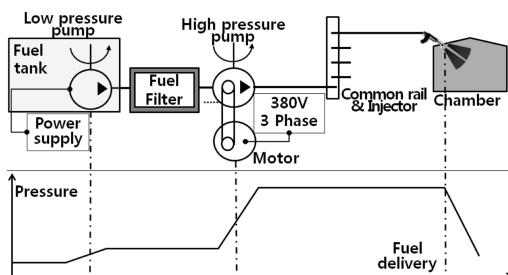
Feature	Value
Sensor mono/color	14bit
Sensitivity	2,400/600
Pixel/PPS	1634 × 1200 at 1,019pps
Resolution	1632 × 240 at 4,975pps
Max. PPS	96 × 8 at 153,846pps
Exposure Time	2μs
Memory	24 Giga byte
Weight	3.2kg



[그림 4] 가시화용 정적 연소실

### 2.2.1 연료 공급 장치

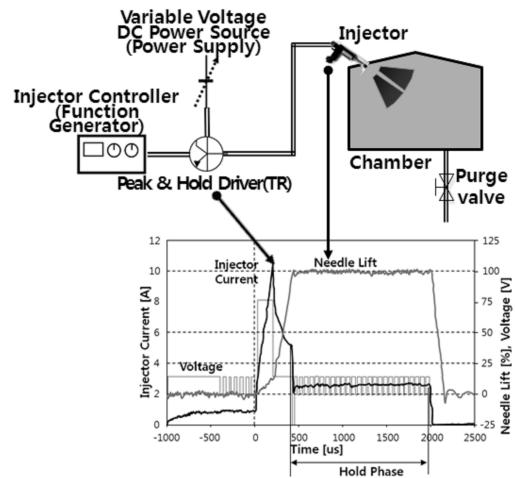
가솔린 직접분사 엔진은 양호한 혼합기의 확보를 위해 고압의 연료를 필요로 한다[5]. 본 연구에서는 그림 5와 같이 저압펌프와 고압펌프로 연료를 기압하였다. 이때 저압펌프는 상용 가솔린 연료 펌프를 사용하였고, 고압펌프는 3상 380V 2.2kW 모터와 인버터를 연동하여 구동하였다. 고압 연료라인에 bypass를 설치하였으며, 고압펌프 제어기를 적용하여 정밀한 연료압력을 제어하였다.



[그림 5] 연료 공급 장치의 개략도

### 2.2.2 인젝터 제어 장치

인젝터 제어기에서 5V의 TTL신호를 발생시키면, Peak & Hold Driver는 DC Power supply를 통하여 80V 10A의 전력을 인젝터에 인가한다. 그림 6은 최종 출력 신호를 오실로스코프에 나타낸 그림이다. 이 출력 신호는 인젝터를 구동할 때, 구동 초기에 인젝터 내부의 니들이 상승되는 Boosting 및 Pick-up 구간으로 구성되어 있고, 나머지 시간은 Hold 구간으로 이루어진다.



[그림 6] 인젝터 제어 신호

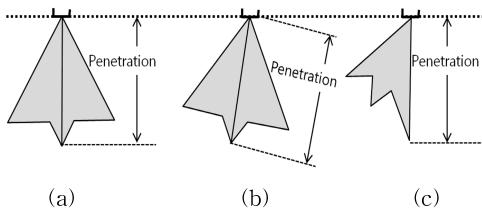
### 2.3 성능실험 방법

#### 2.3.1 분무 재현성 실험

인젝터의 기본 성능을 확인하기 위한 가장 기초적인 실험으로 동일한 조건에서 반복적으로 분무데이터를 취득하여 분무의 형태를 비교하는 실험이다. 이 실험은 인젝터의 기본 성능과 신뢰성을 확인하는 실험으로 여러 분석 방법이 있지만 본 논문에서는 명암차이를 이용한 높도분석법을 사용하였다. 분무 영역의 임의의 영역을 지정하고 분사 시작 후 시간의 변화에 따른 명암의 변화를 수치로 변환하여 분석하였다. 실험 조건으로 분무압력은 100bar, 분위기압력은 대기압으로 설정하였으며 1ms동안 분무하였다.

#### 2.3.2 분무 도달거리 측정 실험

연료 입자의 분열은 동일 조건에서 공기와 연료 입자의 상태속도가 클수록 더욱 활발히 진행된다[6]. 공기와 연료 입자의 상태속도는 측정하기 어렵기 때문에 일정시간동안 연료 입자의 이동거리 즉 분무 도달거리의 크기로 대변될 수 있다. 인젝터에서 관통력의 척도이기도 한 분무 도달거리는 분무압력과 연소실내 분위기압력의 변화에 민감한 영향을 받는다. 분무 도달거리는 분무 형상에 따라 그림 7과 같이 여러 가지 측정방법이 있으며, 본 연구에서는 그림 7(c)를 기준으로 최대 도달거리를 측정하였다.



[그림 7] 분무 도달거리 측정 방법

분무 도달거리는 인젝터의 분무특성을 대표하는 매우 중요한 성능인자 중 하나이다. 본 연구에서는 분무압력 및 분위기압력의 변화에 따른 도달거리를 측정하기 위해 표 2와 같이 엔진에서 빈번하게 사용되는 조건을 설정하고, 가시화 실험을 진행하였다.

[표 2] 도달거리를 측정을 위한 압력 조건

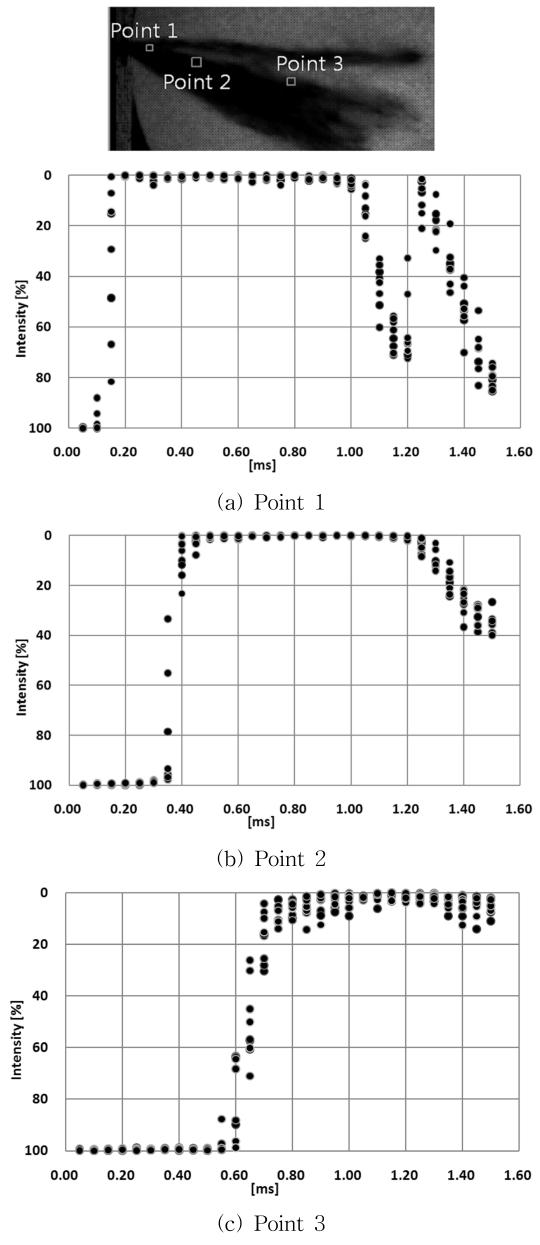
분위기압력	분무압력	분무시간
0 bar	75, 100, 125, 150 bar	1ms
6 bar		
8 bar		
10 bar		

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 인젝터 기본 성능 실험 결과

##### 3.1.1 분무 재현성 실험 결과

10회의 반복실험 결과를 바탕으로 인젝터의 재현성을 확인하였다. 측정 결과값에 대해서 백분율로 변환하여 분석을 수행하였다. 명도의 측정은 분무가 진행하는 방향으로 세 위치를 설정하였으며 그림 9에 그 위치와 결과를 나타내었다. Intensity 100%는 분무가 없는 상태를 나타내며, 0%는 분무된 연료로 인하여 가시화용 광원의 빛이 투과되지 못함을 나타낸다. 최소, 최대의 값을 제외한 표준편차는 point 1에서 4.9, point 2에서 2.4 그리고 point 3에서 4.2로 나타났다. 이 값은 각 실험의 평균 표준편차의 값으로 표준편차의 값이 작을수록 오차의 범위가 작다. 결과적으로 본 연구의 대상이 되는 인젝터의 재현성은 상당히 양호한 것으로 판단된다.

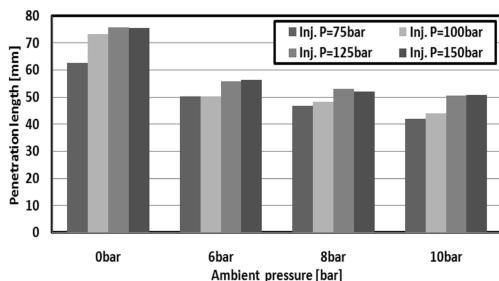


[그림 9] 위치에 따른 명도변화

#### 3.2 분무 도달거리 실험 결과

연소실내의 분위기압력이 상승할수록 도달거리는 감소하였고, 인젝터의 분무압력이 상승할수록 도달거리는 증가하였다. 그림 10은 동일한 분위기압력 조건에서 연료 분무압력에 따른 도달거리를 나타내고 있다. 도달거리는 연료 분무압력이 25 bar 증가할 때 평균 4.8%의 증가율을 보였고, 분위기압력이 2 bar 감소할 때 6.8%의 감소

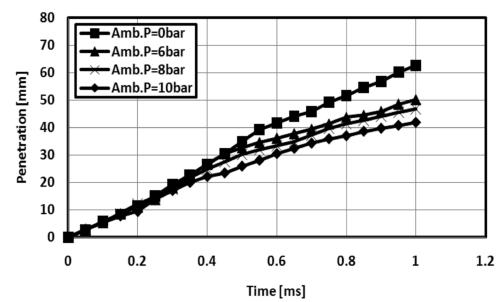
율을 보였다. 인젝터의 분무압력이 증가할수록 도달거리가 증가한 것은 분무유량의 증가와 더불어 분무입자의 운동량이 증가하였기 때문이다[7]. 그림 11은 동일 연료 분무압력 조건으로 도시한 그림이다. 네 개의 그래프 모두 분무초기에는 도달거리가 선형적으로 증가하다가 분위기압력 0 bar의 분무를 제외한 모든 경우에서 0.3ms이후부터 단위시간당 이동거리가 현저히 저하된다. 이는 분위기압력이 높을수록 기체의 밀도 상승에 의한 항력과 저항이 증가하여 속도가 감소하기 때문이다. 연소실 내 흡기의 밀도증가는 연료입자에 대한 항력을 증가시키고 미립화를 활성화시킨다. 미립화로 인한 각 연료입자의 질량 감소는 모멘텀을 감소시키고 속도를 감소시킨다.



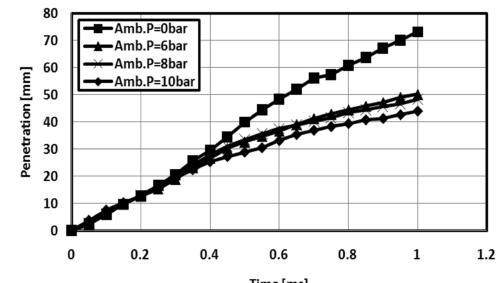
[그림 10] 분무압력과 분위기압력 변화에 따른 도달거리 (Injection duration=1ms)

### 3.3 분무각 측정 실험 결과 분석

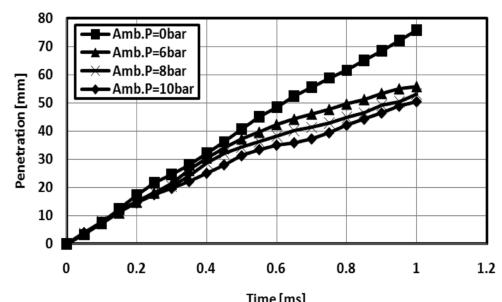
분무각 측정 실험은 분무가 끝나는 시점을 기준으로 측정하여 분석하였다. 분무각은 분위기압력의 변화와 분무압력의 변화에 대해 그림 12와 같은 변화를 보이고 있다. 그림 12의 결과는 분무 시작 1ms 후 분무각의 변화를 나타내고 있다. 분무각 변화를 수치적으로 정리하여 그림 13에 나타내었다. 분위기압력이 1bar증가할 때 분무각은 평균 0.17%의 증가율을 보였고, 분무압력이 1bar증가할 때 분무각은 평균 0.05%의 증가율을 보였다. 결과적으로 분위기압력의 증가가 분무압력의 증가보다 분무각에 큰 영향을 미치고 있으나, 분무압력과 분위기압력 변화에 대해 분무각의 영향은 미소하였다.



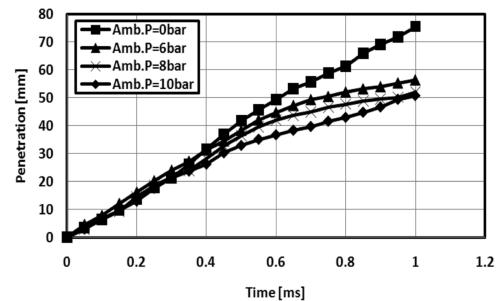
(a) Inj. P = 75 bar



(b) Inj. P = 100 bar

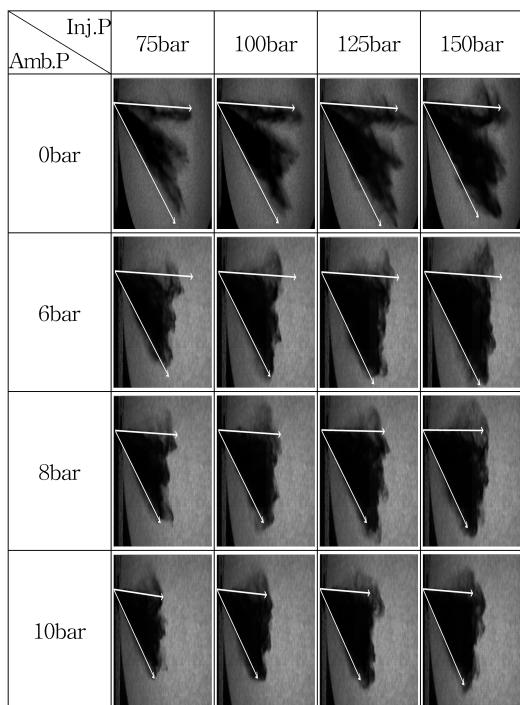


(c) Inj. P = 125 bar

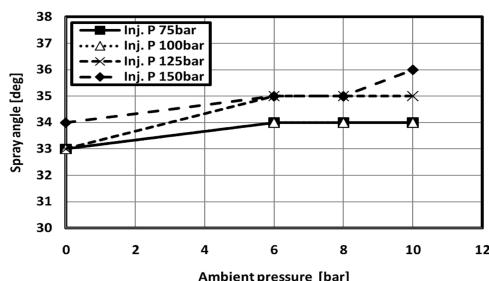


(d) Inj. P = 150 bar

[그림 11] 분무압력 변화에 따른 분무 도달거리



[그림 12] 분무압력과 분위기압력에 따른 분무각 가시화 사진



[그림 13] 분무압력과 분위기압력에 따른 분무각의 변화량

#### 4. 결론

본 연구에서는 가솔린 직접분사 엔진에 적용되는 다공형 인젝터를 대상으로 분무압력 및 분위기압력의 변화에 대한 분무 거동의 영향성을 가시화 실현하였으며, 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연소실내의 분위기압력이 감소하고, 연료의 분무압력이 증가할수록 도달거리는 증가하였다. 연료 분무압력이 25 bar 증가할 때 도달거리는 평균 4.8%

증가하였고, 분위기압력이 2 bar 감소할 때 6.8% 감소하였다. 분무압력이 증가할 때 도달거리가 증가하는 것은 분무 모멘트와 연료입자 속도가 증가하였기 때문이다. 분위기압력이 증가할 때 도달거리가 감소하는 것은 분무압력과 분위기압력의 압력차이가 감소하고, 연소실내 공기 밀도 상승에 의해 항력이 증가하여 연료입자의 모멘트가 감소하였기 때문이다.

- 2) 분위기압력과 분무압력에 대해 분무각의 변화는 미소하지만, 분위기압력이 분무각에 더 큰 영향을 미치고 있다. 분위기압력이 1bar 증가 할 때 분무각은 평균 0.17%의 증가율을 보였고, 분무압력이 1bar 증가 할 때 분무각은 평균 0.05%의 증가율을 보였다.

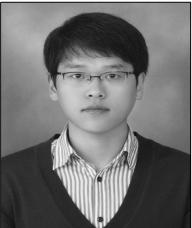
#### 참고문헌

- [1] F. Zhao, M.-C. Lai and D.L. Harrington, "Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines", Progress in Energy and Combustion Science, pp. 437-562, 1999.
- [2] Y.P. Lee, C.S. Bea and S.M. Choi, "Observation of GDI Spray in an Optical Engine", pp. 315-319, KSAE Spring Conference Proceeding, Paper No. 98380051, 1998.
- [3] 송범근, 김원태, 강신재, "가솔린 직접분사식 고압선회 분사기의 분무 영역별 분무 특성 고찰", 대한기계학회논문집 B권, 제 27권, 제 1호, pp.9-16, 2003.
- [4] 이상만, 정영식, 채재우, "연소실 직접분사식 성충급기 가솔린기관 개발에 관한 연구", 대한기계학회논문집 제 2권, 제 9호, pp. 1317-1324, 1998.
- [5] C.S. Lee, S.C. Choi, M.K. Kim, "Spray Characteristics of High-Pressure Injector in Direct-Injection Gasoline Engine", SAE NO. 99370245, Vol. 7, No. 8, pp 1-6, 1999.
- [6] R. Rotondi, C. Leger, M. Mojtabi and G. Wigley, "Multi-hole Gasoline Direct Injection Spray Plumes", ILASS-Europe, 2010.
- [7] 김봉규, 이기형, 이창식, 홍진성, "가솔린 직접 분사식 인젝터의 미립화 특성에 관한 연구", SAE NO. 99370192 Vol. 7, No. 6, pp. 65-71, 1999.

---

이 상 인(Sang-In Lee)

[정회원]



- 2009년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부(학사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 일반대학원 기계공학과 재학

<관심분야>

열 및 유체 유동해석, 기관 성능개발

---

박 성 영(Sung-young Park)

[정회원]



- 2002년 5월 : Texas A&M Univ., 기계공학과 (공학 박사)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 공주대학교, 기계자동차공학부, 조교수

<관심분야>

열 및 유체 유동해석, 기관 성능개발