

3개 구동방식(SI, PI, DPI)별 디젤HEV용 인젝터의 분무 특성 비교

정명철* · 성기수* · 김상명* · 이진욱***

Comparison on Spray Characteristics of Diesel HEV Injectors for 3-different Driving Type (SI, PI, DPI)

M. C. Chung, G. S. Sung, S. M. Kim and J. W. Lee

Key Words: Solenoid-driven injector(솔레노이드 인젝터), Piezo-driven injector(피에조 인젝터), Direct needle-driven piezo injector(직접 니들구동 피에조 인젝터), Hydraulic-servo injector(유압서보 인젝터), Spray visualization(분무 가시화)

Abstract

Performance of DI diesel engine with high-pressure fuel injection equipment is directly related to its emission characteristics and fuel consumption. So, the electro-hydraulic injector for the common-rail injection system should be designed to meet the precise high fuel delivery control capability. Currently, most high pressure injector in use has a needle driven by the solenoid coil energy or the piezo actuator controlled by charge-discharge of output pulse current. In this study, macroscopic spray approaching method was applied under constant volume chamber to research the performance of three different injectors : solenoid, indirect-acting piezo and direct-acting piezo type for CR direct-injection. LED back illumination for Mie scattering was applied on the liquid spray visible of direct-acting piezo injector, including hydraulic-servo type solenoid and piezo-driven injectors. As main results, we found that a direct-acting piezo injector had better a spray tip penetration than hydraulic-servo injectors in spray visualization.

1. 서 론

최근 고유가 문제와 환경문제 그리고 이산화탄소 배출량 규제 등으로 자동차 산업의 패러다임이 고효율친환경 자동차로 급속하게 전환되고 있다. 연소방식 개선, 후처리 장치 장착 등으로 인해 기존의 압축착화 방식의 디젤엔진이 클린디젤로 인식되면서 전 세계적으로 디젤 차량의 시장점유율이 늘고 있다. 하지만, 2014년 9월부

터 시행되는 강화된 EURO 6 규제와 기존 가솔린 엔진의 효율개선, 하이브리드 자동차 그리고 웨일가스 등장으로 인해 디젤엔진이 주도권을 잡기 위해서는 후처리 장치와 연료분사장치 개선이 필요하다. 클린디젤의 핵심이라고 할 수 있는 커먼레일 연료분사시스템(fuel injection equipment, FIE)은 전자적으로 제어하면서 다단분사와 함께 분사율 모양(Injection rate shape) 제어를 통해 배출가스, 연소 소음 그리고 연료 소비율 개선을 목표로 하고 있다.⁽¹⁾ 즉, 강화되는 배출가스 규제와 연소효율을 높이기 위해서는 응답성과 정확성이 높은 고성능 인젝터의 필요성이 높아지고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 전자식 고압 인젝터는 솔레노이드, 피에조 액추에이터를 사용하는 유압서보 방식의 인젝터이며, 액추에이터가 컨트롤 밸브를 작동시켜 인젝터 내부 압력차로 인해 니들이 열리면서 분사하는 방식이다. 따라서, 인젝터의

(Received: 01 January 2014, Received in revised form: 03 March 2014, Accepted: 04 March 2014)

*승실대학교 일반대학원 기계공학과

**승실대학교 기계공학과

†책임저자, 종신회원, 한국액체미립화학회

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : (02)820-0929 FAX : (02)820-0668

연료 리턴라인이 필요하며 커먼레일 내 압력백동으로 인해 분사율 모양이 왜곡되는 현상이 발생한다.⁽²⁾ 또한, 분사시 내부 유압회로를 거쳐 분사되기 때문에 구동 응답성 제한으로 인해 7단 이상의 다단분사와 정확한 분사율 모양의 분사전략 확립에 자유도가 떨어진다.

최근 개발되고 있는 고압 연료 분사용 인젝터는 액추에이터가 니들을 직접 구동시키는 방식이다. 기존과 다르게 복잡한 유압회로를 거치지 않고 피에조 액추에이터가 변위증폭기를 거쳐 니들을 직접 구동시키는 작동 방식으로 기존 유압서보 인젝터 대비 응답성 향상을 통해 더 짧은 분사 기간과 보다 유연한 다단분사와 같은 분사전략을 구사할 것으로 예상된다^(2,3).

따라서 본 연구에서는 직접구동 피에조 인젝터를 대상으로 기존 유압서보 방식 솔레노이드, 피에조 인젝터와 함께 분무 가시화 실험을 통해 분무 성능을 비교분석하고자 함에 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 본 연구에 사용된 인젝터 특징

본 연구에서 사용된 CRDi용 인젝터 사양을 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 본 연구에 사용한 구동방식이 다른 피에조 인젝터를 분해한 사진이다. 직접구동방식 인젝터(사진 아래)는 기존 유압서보 인젝터와 다르게 유압증폭기가 없이 충방전에 따라 피에조 스택이 변위가 생기고 니들 변위 증폭기 역할을 하는 탄성체를 거쳐 니들을 직접 구동하는 특징이 있다. 기존 유압서보 방식의 인젝터는 액추에이터가 컨트롤 밸브를 작동시키면

Table 1 Specification of injectors in study

Item	SI	PI	DPI
Actuator type	Solenoid	Piezo	
Driving type	Hydraulic-servo		Direct-acting
Maximum injection pressure (MPa)	160	180	200
Number of nozzle hole	7		
Needle speed (m/s)	0.5	0.8~1	3
Load type	Induction load		Capacitive load
Needle weight(g)	15.5	3.2	5.67
Injector weight(g)	490	270	352

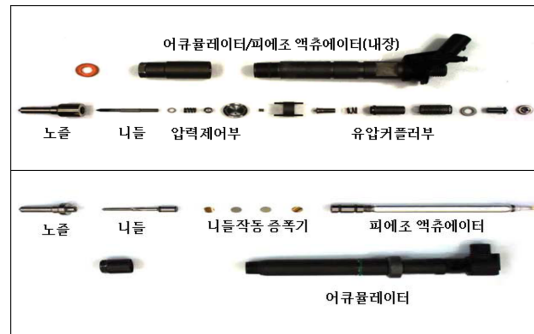


Fig. 1 Components of piezo injectors used in the current study (top: hydraulic-servo type, bottom: direct-acting type)

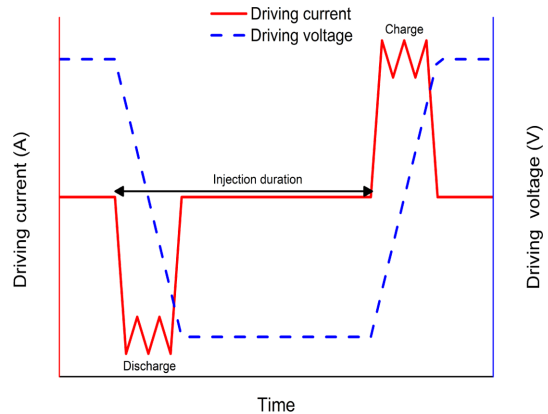


Fig. 2 Driving current wave of direct-acting piezo injector

인젝터 내부의 압력차이로 니들이 열려 연료가 분사되기 때문에 연료 리턴라인이 필요하지만, 직접구동 방식 인젝터는 별도의 유압회로가 없기 때문에 피에조 스택이 상대적으로 크다는 특징이 있으며, 내부부품이 상대적으로 적고 별도의 연료 리턴라인이 없어 연료가 인젝터 내부에 항상 저장되어 있기 때문에 커먼레일 압력백동에 의한 분사율 모양 왜곡 상대적으로 적다는 장점이 있다. 구동전류파형은 기존 유압서보방식 피에조 인젝터는 ‘충전 시 분사’ 특성을 가지지만 본 연구에서 사용한 직접구동 피에조 인젝터는 Fig. 2와 같이 ‘방전 시 분사’ 특성을 갖는다. 직접구동 피에조 인젝터는 기존 인젝터와 마찬가지로 충전/방전 순간에 전류가 흐르지만 초기상태/분사종료 상태에서는 항상 피에조 스택에 전압이 인가되어 피에조 스택이 팽창되면서 노즐을 막는다^(4,5).

2.2 분무가시화 장치 및 연료분사

본 연구에서 수행한 분무 가시화 실험 구성은 Fig. 3 과 같이 체적 855 cc의 정적 분무실에 인젝터 별 장착을 용이하기 위해 아답터를 제작하였다. 또한 인젝터 노즐을 기준으로 5 mm 단위로 동심원이 그려진 원판을 부착하여 분무 관통길이를 측정할 수 있도록 하였으며, Table 2에서 소개된 사양의 고속카메라를 사용하여 후방 광원(80W LED)에 의한 Mie-Scattering으로 촬영하는 직접사진법을 적용하여 거시적 이미지를 획득하였다.

연료 분사는 연료 분사시스템 구성은 EDC-17커먼레일 시스템(Bosch)을 적용하였다. 최대 200 MPa까지 가압할 수 있는 고압 펌프(Bosch, CP4S1)는 DC모터와 벨트를 사용해서 구동 시켰다. 피에조 인젝터 구동장치(ZB-6200), 솔레노이드 인젝터 구동장치(ZB-5100) 그리고 커먼레일 제어장치(ZB-9013)를 각각 사용하였다. 연료 분사량 측정은 고정밀 전자저울(AND사, GF-4000)를 사용하여 1000회 분사하고 이를 3회 반복하여 평균을 내었다. 연료온도에 따라 측정되는 연료 무게가 틀려지기 때문에 연료온도는 연료탱크 내 k-type 열전대를 설

Table 2 Specification of high-speed camera

Item	Specification
Model	Phantom V7.3 Mono
Full resolution	800 × 600
Sensor type	14 bit sensor SR-CMOS
Pictures per second	500,000 pps
Trigger	TTL Signal or contact closure
Memory	8 G DDR RAM

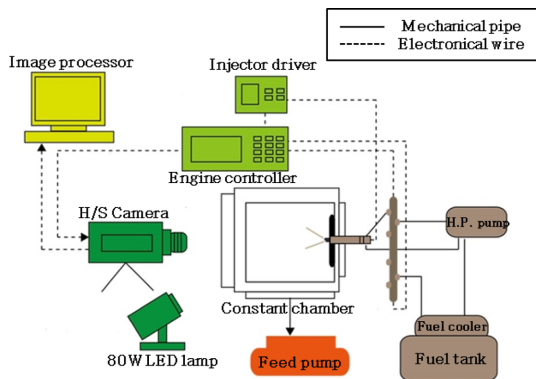


Fig. 3 Schematic diagram of macroscopic spray visualization

Table 3 Experimental conditions for macroscopic spray

Item	Specification
Injection pressure (MPa)	30, 60
Injection quantity (mg/stroke)	10.1
Fuel temperature (°C)	30 ± 2
Constant volume chamber ambient	Pressure and temperature of atmosphere

치하고 라디에이터-팬을 이용하여 일정한 온도를 유지 시켰다. 또한, 진공펌프를 설치하여 분무실내 잔류하고 있는 미립화된 연료를 배출시키도록 하였다.

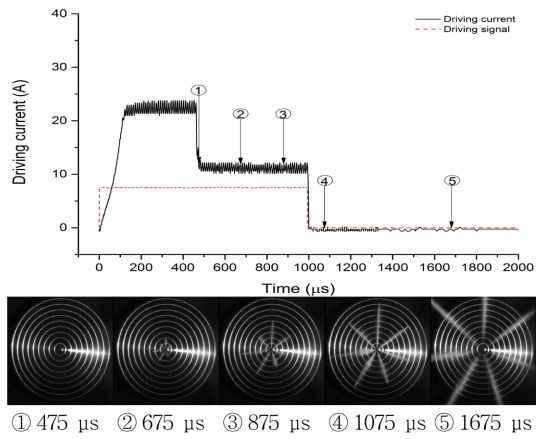
2.3 실험 조건 및 방법

분무가시화 실험 조건은 Table 3과 같다. 정적 분무실 분위기는 대기압력, 대기온도로 설정하였으며, 고속카메라는 설정조건 노출시간 38 μs, 허용영상 취득 시간 간격 40 μs로 고속카메라의 트리거는 인젝터 구동신호를 TTL 신호로 받아 분무영상(320 × 320 pixel, 25,000 pps)을 획득하였다. 분사량은 각 실험별 10.1 mg/stroke로 모두 동일하다. 분사량 측정은 고정밀 전자저울(GF-4000, AND)을 사용하여 각 인젝터별 1000회 분사 후 이를 3회 반복하여 평균을 내어 조정하였다. 또한, 인젝터의 구동파형은 오실로스코프(Tektronix, TDS2014C)를 사용하여 인젝터 드라이버로부터 취득하였다.

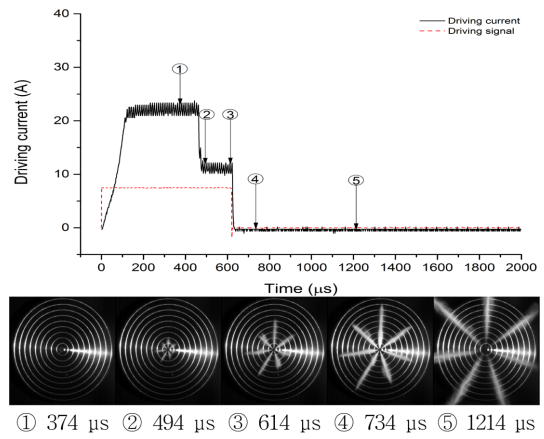
3. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서 고속분무가시화 실험은 대기압, 상온 조건 하에서 디젤 엔진 연소실험과 동일한 실험조건으로 수행하였으며, 분무가시화를 통해 취득한 거시적 분무 이미지를 정성적·정량적으로 비교, 분석하였다.

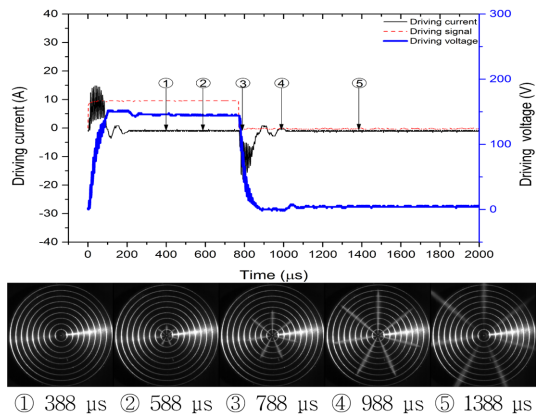
구동방식별 인젝터의 거시적 분무 이미지를 비교하기 위해서 취득한 거시적 이미지를 기준으로 분사 시작(①번 지점 : Start of Injection, SOI), 분사 종료(⑤번 지점 : End Of Injection, EOI)를 구분하였으며, 분사압력 30, 60 MPa인 경우 분사 시작 후(After Start Of Injection, ASOI) 시간 간격인 ②, ③, ④ 지점의 간격을 각각 100 μs, 120 μs로 이미지를 구분하여 정성적 분석으로 분무거동발달과정을 분석하였다.



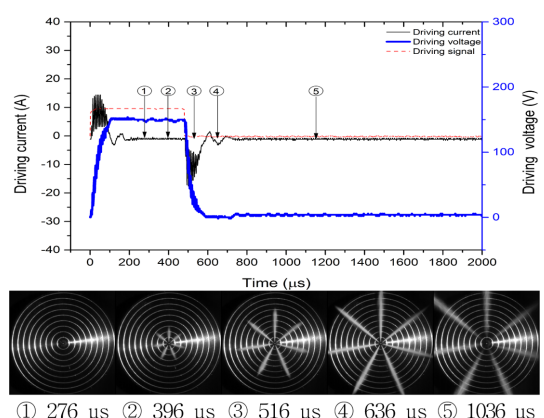
(a) Hydraulic-servo solenoid injector(SI)



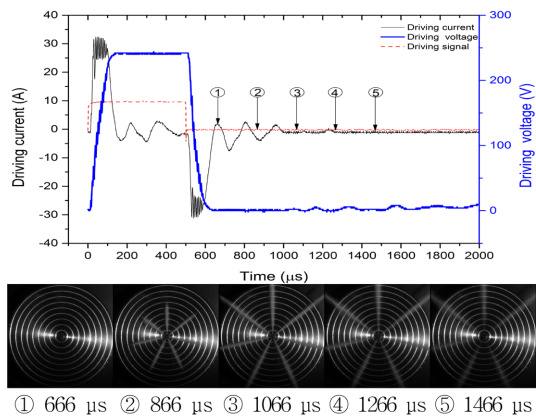
(a) Hydraulic-servo solenoid injector(SI)



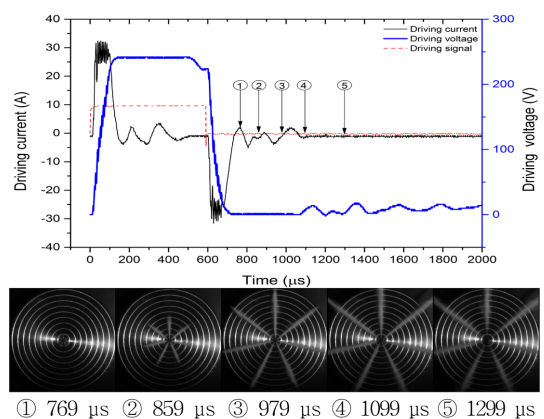
(b) Hydraulic-servo piezo injector(PI)



(b) Hydraulic-servo piezo injector(PI)



(c) Direct-acting piezo injector(DPI)



(c) Direct-acting piezo injector(DPI)

Fig. 4 Mie spray images and input current for different driving mechanism injectors at injection pressure of 30 MPa

Fig. 5 Mie spray images and input current for different driving mechanism injectors at injection pressure of 60 MPa

Fig. 4와 5는 동일한 연료 분사량 조건에서 분사압력 30, 60 MPa 조건일때의 인젝터 구동파형과 취득한 거시적 분무 이미지를 나타낸 것이다. 직접구동 피에조 인젝터의 경우 ‘방전 시 분사’하는 것을 알 수 있었으며, 유압서보 인젝터 대비 트리거 신호 후 시간을 기준으로 할 경우, 늦게 분사됨을 확인할 수 있었다.

이는 피에조 구동드라이버가 일반적인 ‘충전 시 분사’로직만을 갖고 있기 때문인 것으로 판단된다. 하지만, 분사 시작 후(ASOI) 기준으로 봤을 때 분사 시작(①번 지점, SOI)과 분사 종료(⑤번 지점, EOI) 사이의 시간인 분사 기간(injection duration)은 더 짧은 것을 알 수 있었다. 또한, 직접구동 피에조 인젝터의 분무거동이 더 빨리 발달되는 것을 알 수 있었다. 이는 직접구동 피에조 인젝터의 액추에이터가 직접 니들을 작동 시키기 때문에 상대적으로 더 빠른 응답속도를 갖기 때문인 것으로 판단된다. 하지만, 전류파형을 보면 직접구동 피에조 인젝터의 구동전류가 더 큰 것을 확인할 수 있었는데, 이는 직접구동 피에조 인젝터는 유압서보가 없기 때문에 일반적인 피에조 인젝터 보다 상대적으로 피에조 스택이 더 크고 피에조 스택 최대 인가전압이 250 V로 더 많은 에너지가 필요한 것으로 판단된다⁽⁶⁾.

Fig. 5와 6은 취득한 거시적 이미지를 통해 정량적으로 분석한 결과이다. 분무관통길이는 분사 시작 후(ASOI) 40 μs부터 직접구동 피에조 인젝터가 더 길어짐을 알 수 있었다. 또한, 동일 분사량 조건에서 분사압력

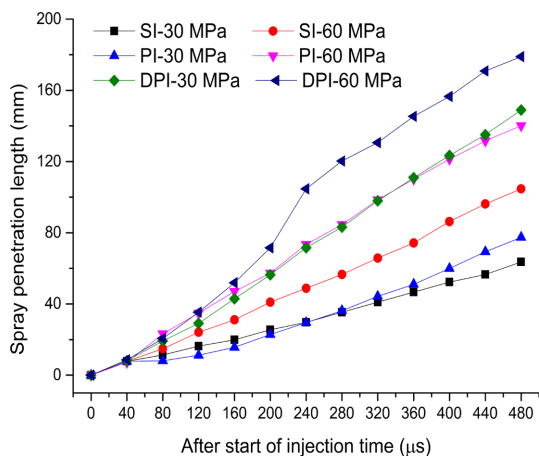


Fig. 5 Distribution of spray penetration length at injection pressure of 30 and 60 MPa with respect to different driving mechanism injectors

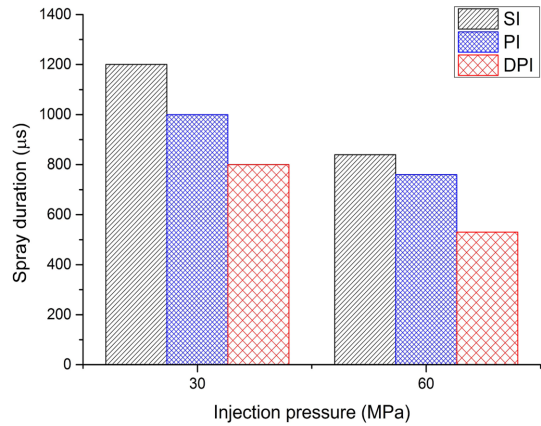


Fig. 6 Distribution of spray duration at injection pressure of 30 and 60 MPa with respect to different driving mechanism injectors

이 높을수록 분무관통길이가 길어지는 것을 확인할 수 있었다. 분사압력 30, 60 MPa 조건에서 분사 시작 후(ASOI) 480 μs 지점에서 평균 55 mm 더 관통길이가 긴 것을 알 수 있었다. 직접구동 피에조 인젝터는 유압서보 피에조 인젝터 대비 분무기간도 마찬가지로 분사압력 30, 60 MPa 조건에서 직접구동 피에조 인젝터는 유압서보 피에조 인젝터 대비 평균 275 μs 분사시간이 짧은 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 클린디젤 및 디젤HEV용 엔진에 적용되는 직접구동 피에조 인젝터(DPI)와 유압서보 인젝터(SI 및 PI)를 대상으로, 커먼레일 연료분사시스템을 통한 분사특성을 비교하고자, 고속 카메라를 사용하여 고압 분무를 가시화 실험을 수행하였다. 이를 통해 주요 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 직접구동 피에조 인젝터는 유압서보 피에조 인젝터와 비교했을 때, 분사량 10.1 mg/stroke와 분사압력 30, 60 MPa 조건에서 분무 관통길이는 분사 시작 후 480 μs에서 각각 약 71 mm(92%), 38 mm(27%) 증가함을 알 수 있었다.

2) 직접구동 피에조 인젝터는 유압서보 피에조 인젝터와 비교했을 때, 분사량 10.1 mg/stroke와 분사압력 30, 60 MPa 조건에서, 분무 기간은 각각 약 100 μs(11.1%), 300 μs(37.5%) 감소함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2013년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 지식경제 기술혁신사업 지원을 받아 수행된 것이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) G. Dober, N. Guerrassi and K. Karimi, "Mixture Preparation and Combustion Analysis, a Key Activity for Future Trends in Diesel Fuel Injection Equipment", SIA Diesel Powertrain International Conference, Luxembourg, 2012.
- (2) P. Beierer, K. Huhtala, E. Lehto, M. Vilenius, "Study of the Impact of System Characteristics on Pressure Oscillations in a Common Rail Diesel Fuel Injection System", SAE Paper No. 2005-01-0910, 2005.
- (3) G. Bression, D. Soleri, S. Savy, S. Dehoux, D. Azoulay, H. B. Hamouda, L. Doradoux, N. Guerrassi and N. Lawrence, "A Study of Methods to Lower HC and CO Emissions in Diesel HCCT", SAE Paper No. 2008-01-0034, 2008.
- (4) G. Bression, P. Pacaud, D. Soleri, J. Cessou, D. Azoulay, N. Lawrence, L. Doradoux and N. Guerrassi, "Comparative study in LTC combustion between a short HP EGR loop without cooler and a Variable Lift and Duration system", 17th Aachen Colloquium, Automobile and Engine Technology, Germany, 2008.
- (5) G. Dober, S. Tullis, G. Greeves, N. Milovanovic, M. Hardy and S. Zuelch, "The Impact of Injection Strategies on Emissions Reduction and Power Output of Future Diesel Engines", SAE Paper No. 2008-01-0941, 2008.
- (6) Tschöke, H. C. Hemut, "Diesel and gasoline direct injection-Spray formation, Simulation, Application, Measurement," Broschiert, 1ed, pp. 233-237, 2008.