

2중연료(디젤+가솔린)의 RCCI 연소 및 배기 특성에 관한 실험적 연구

성 기 안[†]

An Experimental Study on Combustion and Exhaust Emissions Characteristics in RCCI (Reactivity Controlled Compression Ignition) of Dual-Fuel (Diesel+Gasoline)

K. A. Sung

Key Words: Reactivity controlled compression ignition(RCCI), Dual-Fuel(2중연료), Start of injection(SOI), Gasoline percent(가솔린 혼합비율), Premixed(예혼합)

Abstract

An experimental study was performed to explore characteristics of combustion and exhaust emissions in the compression ignition engine of RCCI (reactivity controlled compression ignition) using diesel-gasoline dual fuel. A dual-fuel reactivity controlled compression ignition concepts is demonstrated as a promising method to achieve high thermal efficiency and low emissions. For investigating combustion characteristics, engine experiments were performed in a light-duty diesel engine over a range of SOIs (start of injection) and gasoline percents. The experimental results showed that cases of diesel-gasoline dual fuel combustion is capable of operating over a middle range of engine loads with lower levels of NOx and soot, acceptable pressure rise rate, low ISFC (indicated specific fuel consumption), and high indicated thermal efficiency.

1. 서 론

최근 국제정세의 불안함으로 연료 가격이 상승하고 있고 각국의 온실가스 정책에 의하여 고효율 및 저공해를 얻을 수 있는 새로운 내연기관 연소기술의 개발 요구가 증가되고 있다.

내연기관(ICE)은 차량 및 산업분야에 많이 사용되고 있으며, 연소방식에 따라 점화착화(SI) 기관 및 압축착화(CI) 기관으로 분류된다.

점화착화기관은 공기-연료 예혼합 상태에서 화염점과

에 의한 연소과정이 진행되어 연소 배기가스 중 유해성분인 질소산화물(NOx)과 입자상물질(Soot)이 상대적으로 적게 배출되지만, 이론 당량비 영역에서 운전되기 때문에 열효율이 낮다^{(1,2)}}.

압축착화기관은 디젤 연료의 자착화 특성을 이용한 디젤기관이 폭넓게 사용되고 있으며, 희박연소에 의한 높은 열효율, 낮은 연료소비율 그리고 낮은 미연탄화수소(UHC) 및 이산화탄소(CO₂) 등 장점이 있지만, 연소실 내 농후 및 희박 영역의 존재에 의해 질소산화물과 입자상물질이 상대적으로 많이 발생하는 단점이 있다^{(1,2)}}.

디젤기관에서 유해 배출가스로 규제 대상인 입자상물질은 DPF(Diesel particulate filter)를 이용한 후처리 방식으로 효과적으로 줄일 수 있지만, 정기적인 재생과정 때문에 연료소비를 증가시킨다. 또 다른 규제 대상인 질소산화물을 감소하려는 여러 가지 연구 중에서 삼원촉매

(2011년 2월 21일 접수 ~ 2011년 3월 14일 심사완료, 2011년 3월 21일 게재확정)

[†] 책임저자, 회원, 강원도립대학 자동차과

E-mail : kiansung@empal.com

TEL : (033)660-8262 FAX : (033)660-8265

장치(Three-way catalyst)를 이용한 이른 당량비 영역(Near stoichiometric) 연소기술은 NOx를 98%까지 절감할 수 있으나, 연료소비를 증가시킨다⁽³⁾.

앞서 언급한 것처럼 유해 배출물이 많이 발생하는 디젤 기관의 단점을 극복하고, 전체적인 기관의 효율을 향상하기 위하여 배기 후처리장치에 의한 배출가스 절감 방식은 최소화 되어야 한다. 따라서 많은 연구자들은 실린더 내부 연소과정에서부터 NOx와 Soot의 생성 자체를 저감하는 연소기술들을 연구하고 있으며, 예혼합(Premixed) 저온연소기술(LTC)이 그 중 하나이다⁽⁴⁾.

HCCI(Homogeneous charge compression ignition)와 PCCI(Premixed charge compression ignition) 연소기술도 NOx와 Soot를 동시 절감할 수 있지만, 혼합기가 연소실 내부의 압력과 온도에 의하여 착화되기 때문에 연소제어의 어려움과 출력이 낮은 문제점이 있다.

이러한 단점들을 개선하기 위하여 가솔린-디젤 2중연료를 이용한 예혼합 저온연소기술에 관한 연구가 몇몇 연구팀에서 활발히 진행되고 있다. 예혼합 저온연소기술의 2중연료에 사용되는 휘발성 높은 가솔린은 흡기과정에 포트 분사하여 빠른 증발을 통한 연소실 내에 균일한 혼합기를 생성시키고, 자기착화 성질이 우수한 디젤을 고압 직분사하여 미리 형성된 균질의 혼합기와 함께 연소시키는 방법이지만, 기관 부하의 증가에 따른 연소이동(Combustion phasing) 제어가 매우 어려운 문제점이 있다. 따라서 기관 부하에 따라 가솔린 혼합비율의 변화가 필요하고 이와 관련된 연구가 절실하게 요구되고 있다⁽⁵⁾.

따라서 본 연구는 예혼합 저온연소기술 및 가솔린-디젤 2중연료 혼합비율에 따른 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 단기통 Light-duty 디젤기관과 커먼레일 디젤직분사 및 가솔린 포트분사로 다수의 실험을 실시하여 고효율 저공해를 얻을 수 있도록 운전영역을 분석하였다.

2. 실험 구성

2.1 실험장치의 구성

University of Wisconsin-Madison, 엔진연구센터(ERC)의 DERC Lab.에 설치되어 있는 상용 4실린더 Light-duty 디젤기관(GM 1.9L)을 재가공한 단기통 테스트 엔진과 그 주변 장치들이 본 연구에 사용되었다. 엔진의 주요 제원은 Table 1에 나열되었고, 실험 장치의 개략도

Table 1. Engine Specifications

Parameters	Nominal Values
Engine Type	DOHC Direct Injection
Bore [mm]	82
Stroke [mm]	90.4
Connecting Rod [mm]	161
Compression Ratio	15.24
Displacement [mm]	478
Piston Bowl Type	Mexican-Hat
Swirl Ratio	1.8~5.5
IVO [ATDC]	344
IVC [ATDC]	-132
EVO [ATDC]	112
EVC [ATDC]	-388

는 Fig. 1에 도시되었다.

이 기관은 전형적인 Light-duty 형식의 디젤 기관으로 기하학적 압축비는 15.24:1이며, DOHC로 흡기 및 배기 밸브가 각각 2개씩 구성되어 있다. 흡기 포트에는 Helical 포트와 Tangential 포트 및 가변 베인밸브가 각각 부착되어있어 개폐정도에 따라 1.8에서 5.5까지 스월비(Swirl ratio)를 변경할 수 있다.

피스톤 볼은 Mexican-Hat 형상으로 유전자 알고리즘(GA) 및 협각직분사(NADI) 개념을 도입한 CFD 계산결과에 따라 자체적으로 제작하였다^(6,7).

디젤 직분사 및 가솔린 포트분사는 National Instruments의 cRIO-FPGA 채서와 C-모듈(9411, 9215) 및 Driven의 C-모듈(D00020, D000006)로 구성된 하드웨어 세트와 LabVIEW 응용 프로그램으로 시스템 되었으며, 최대 5단 분사 및 분해능 0.01° 크랭크각의 정밀도로 연료분사시기(SOI), 분사기간(Duration) 및 인젝터 구동전류 등을 제어한다.

커먼레일의 유효 운전 최대 압력은 1800[bar]이고, 고압 연료펌프(Denso HP2)는 5마력 유도 전동기에 의해 구동된다.

정밀한 분사압력을 유지하기 위해 2개의 커먼레일이 직렬로 연결되었고, 고압 펌프쪽 압력조절밸브(PCV)와 레일쪽 압력조절밸브를 각각 250[Hz]와 1000[Hz]로 되먹임 듀티 제어하였다.

디젤과 가솔린의 연료유량 측정은 온도 및 밀도가 자

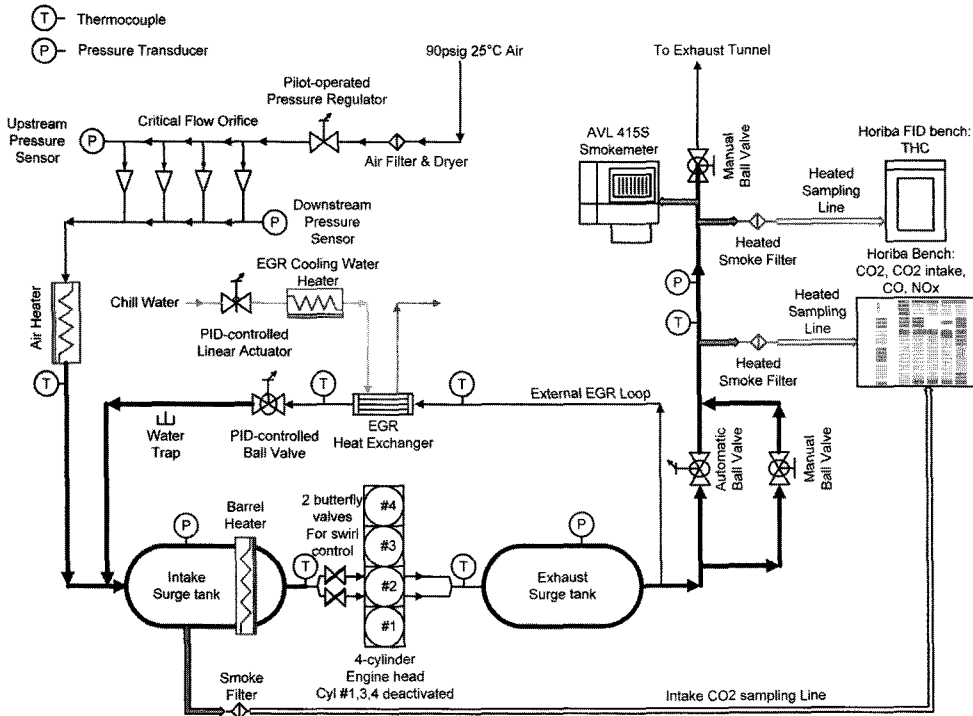


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 2. Horiba 20-series tailpipe emission bench system

Analyzers	Type	Species
FIA-23A	Flame ionization	Hydrocarbon
MPA-21A	Magneto-pneumatic	O ₂
CLA-22A	Chemiluminescent	NO _x
AIA-23	Infrared	CO
AIA-23	Infrared	Intake CO ₂
AIA-23	Infrared	Exhaust CO ₂

동으로 보정되는 유량계(Endress & Hauser PROMASS-80)를 사용하였으며, ±0.001[mg/sec]의 정밀도 출력과 DAQ 인터페이스로 실시간 계측되었다.

리얼타임 초정밀 배기가스 성분을 분석하기 위하여 성분별 각각의 분석기로 구성된 Horiba 20-시리즈 테일 파이프 벤치를 사용하였으며 Table 2에 분석기의 형식을 기술하였다. 또한 배연측정기(AVL 415S)를 이용하여 매회 4번의 샘플링 방식으로 Soot를 계측하였다.

모든 실험에 사용된 가솔린은 시중에서 판매되는 옥탄가((R+M)/2) 91.6 이며, 디젤은 Chevron에서 제공된 세탄가 46의 초저유황경유(ULSD)가 사용되었다. Table

Table 3. Fuel analysis report

	Parameters	Property
Diesel	Lower heating value	42.5 MJ/kg
	Viscosity (@40°C)	2.71 cSt
	H/C ratio	1.74
	Density	856 kg/m ³
	Cetane number	46.1
Gasoline	Lower heating value	43.2 MJ/kg
	H/C ratio	1.88
	Density	756 kg/m ³
	(R+M)/2	91.6
	Final boiling point	215.6°C

3은 이들 연료에 대한 분석 결과표이다.

윤활 및 냉각 계통, 흡기 및 배기 계통에 설치된 써모커플과 압력 트랜스듀서들은 National Instruments의 SCXI로 구성된 DAQ 시스템에 연결되어 실시간 계측되었고, 향상된 PID 로직을 통하여 히터, 밸브, 레귤레이터 등 모든 액추에이터들이 피드백 제어되었다.

클로우 플러그 위치에 설치된 피에조 압전소자형 압력 트랜스듀서(Kistler 6125B)의 출력전압은 3600[PPR] 엔코더 펄스와 동기 되어, 매 사이클마다 실시간 실린더 압력 및 열발생율(HRR) 계산에 사용되었다. 실린더 압력선도(P-V)는 버퍼 메모리에 300개 사이클의 원형 데이터를 FIFO 방식으로 일시 저장하고, 그 평균값으로부터 2가지 필터(Savitzky-Golay 및 Lowpass)를 적용하여 노이즈를 없앤 후 여러 가지 산술 계산에 이용되었다.

2.2 실험 조건 및 방법

디젤-가솔린 2중 연료의 연소 및 배기 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 양산 차량용 가솔린 포트분사(PFI) 방식과 디젤 커먼레일 직분사(DI) 방식을 도입하였고, 이를 통하여 예혼합 RCCI 연소를 이루었다.

포트분사와 직분사에 사용된 각각의 인젝터의 특성은 Table 4에 기술되었다.

스월비는 인테이크의 헬리컬 및 탄젠셜 포트 전에 설치된 스로틀 플레이트의 각도로 조절된다. 오른쪽에 위치한 탄젠셜 조절밸브는 편번호 1(0°)에서 닫히고 반시계방향으로 갈수록 열리며 최대 개방위치는 편번호 19(90°)이다. 같은 방식으로 왼쪽에 위치한 헬리컬 조절밸브는 시계방향으로 갈수록 최대 개방된다.

최대 스월비는 헬리컬 포트가 닫히고 탄젠셜 포트가 개방되었을 때 발생하며, 본 연구에 사용된 스월비는 1.5로 설정되었는데 이는 탄젠셜 및 헬리컬 조절밸브가 각각 편번호 7 및 15 위치에서 얻어진다⁶⁾.

기관 배기량의 약 100배 크기의 서지 탱크가 흡기와 배기 계통에 설치되어 단기통 기관의 맥동현상을 최소화하였다. 또한 흡기계통에 3[kW] 히터를 삽입하여 기관속도 2000[rev/min]에서 140[°C]까지 흡입공기를 제어

Table 4. DI and PFI injector specifications

Parameters		Property
DI	Injector manufacturer	BOSCH
	Nozzle	6×164 μm
	Spray angle	144°
	Steady flow rate @100bar	880[cc/min]
PFI	Injector manufacturer	BOSCH
	Nozzle holes	3
	Spray angle	15°
	Steady flow rate @5bar	750[cc/min]

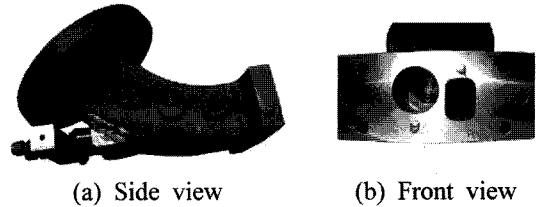


Fig. 2 Photograph of modified intake runner

Table 5. Operation conditions for dual-fuel RCCI

Items	Conditions				
Engine speed [rev/min]	1900				
Net IMEP [bar]	5.6~6.0				
DI injection pressure [bar]	800				
PFI injection pressure [bar]	5				
Intake Temperature [°C]	65				
Boost pressure [bar]	1.3				
Exhaust pressure [bar]	1.5				
EGR[%]/Equivalence Ratio	0/0.33				
Swirl ratio	1.5				
Total fuel injection [mg/cyc]	14.6				
Premixed gasoline [% mass]	81		85		
DI injection SOI [°BTDC]	52	42	38	34	32

하여, 일반적인 터보과급기 기관의 흡입공기 조건을 모사하였다. 흡입 공기압과 공기량은 압축된 공기를 전자 제어식 압력조절기를 통해 0~6.2[bar]와 0~2[kg/min] 영역에서 균일하게 공급되도록 하였다. Fig. 2는 수정된 흡기관 정면 및 측면 영상을 보여준다.

RCCI 연소 특성을 분석하기 위하여 예혼합 가솔린 혼합비율과 연료분사시기(SOI)를 변화하였고, 이러한 실험조건은 Table 5에 기술하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

2중 연료(디젤-가솔린)의 가솔린 혼합비율과 연료분사시기 변화에 따른 RCCI 연소 및 배기 특성을 관찰하기 위하여 실험 그룹을 크게 가솔린 질량 기준으로 81%와 85% 구별하고, 각각의 경우에서 연료분사시기를 52에서 32[°BTDC]로 지각 시키면서 압력선도와 배기가스

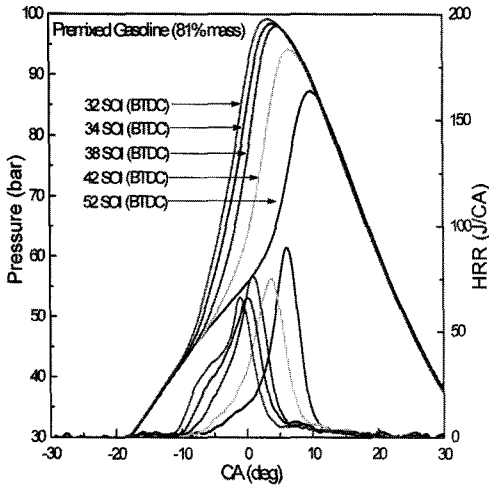


Fig. 3 Cylinder pressure and heat release rate over SOI sweep for 81% gasoline percent

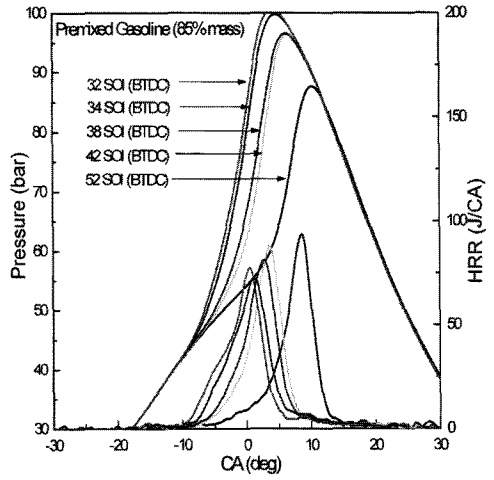


Fig. 4 Cylinder pressure and heat release rate over SOI sweep for 85% gasoline percent

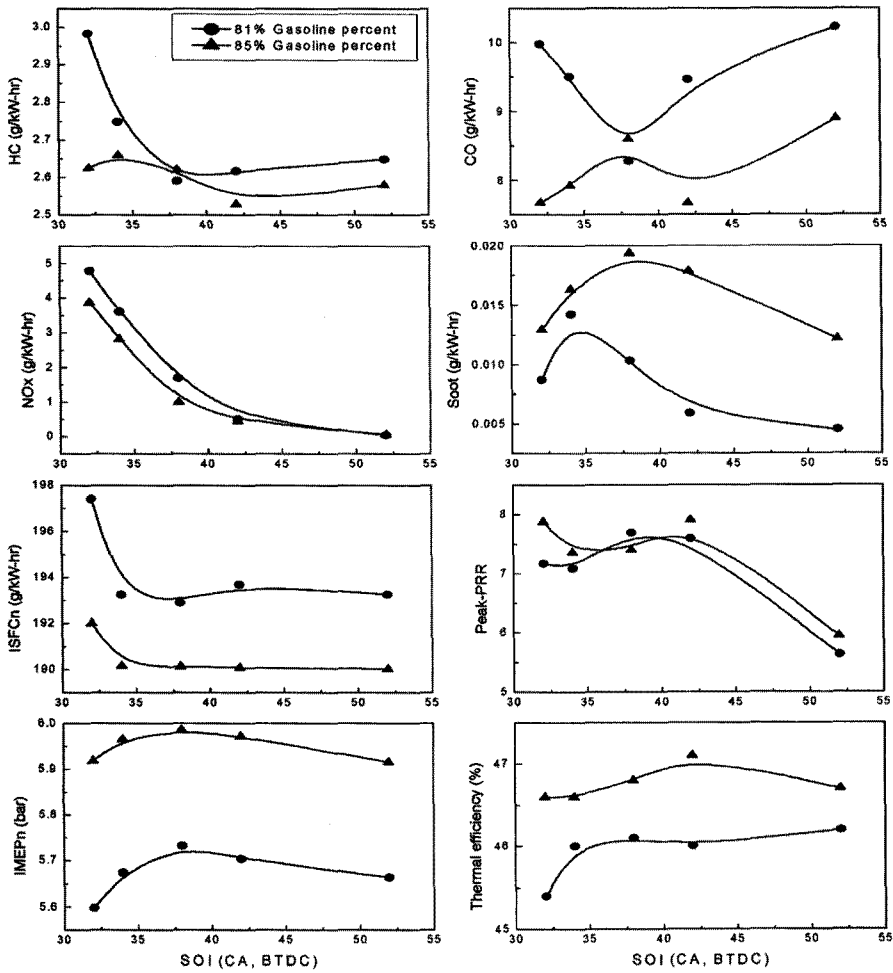


Fig. 5 Emissions and performance of dual-fuel RCCI over a range of SOI from 52 to 32[°BTDC]

성분을 분석하였다.

Fig. 3 및 Fig. 4는 각각 가솔린 혼합비율 81%와 85%에서 SOI 변화 실험에 따른 압력선도와 열발생율을 도시하였다. 81% 경우 최대 압력은 3.3[°BTDC]에서 99.2[bar]까지 도달했고 진각 될수록 최대 압력값과 발생 시기는 감소 및 지각되는 현상을 보였으며, 이는 디젤 분사시기를 진각시키면 연소이동이 지연되는 전형적인 RCCI 연소 결과와 동일한 경향을 보였다.

RCCI 연소의 특징은 분사시기를 진각 시키면 두 연료의 혼합이 더욱 균질하게 되고, 이는 국소 당량비(Local equivalence ratio)가 낮아지고 연소구간이 지연되는 경향을 보이는 것이다.

가솔린 예혼합 비율이 높은 85%의 경우, 81% 결과에 비하여 최대 압력은 약 1.5[bar] 정도 상승하였고 발생 지점은 약 0.5[°CA] 지각되었다. Fig. 5는 SOI 변화에 따른 배기가스 성분 및 연소 성능을 분석한 선도이다.

분사시기가 진각되고 연소구간이 지연되었을 때 정미 연료소비율(Net ISFC)은 낮아지고 도시열효율은 향상되며 최대 압력상승률(Peak-PRR)은 감소하는 경향이 보였다. 85%의 42[°BTDC] SOI에서 정미 연료소비율은 가장 낮은 190.1[g/kW-hr]이 관찰되었고 이때 도시열효율은 47.1%가 산출되었다. 또한 분사시기를 진각시키면 최대 압력상승율은 7.9에서 5.9[bar/CA]으로 감소됨을 보였다.

배기가스 중 HC, CO 및 NO_x는 가솔린 혼합비율이 높을수록 저감되는 경향을 보였고 Soot는 약간 증가하였으나 그 양이 매우 적어 큰 차이가 없다고 볼 수 있다.

81%의 모든 경우에서 Soot는 US2010 Heavy duty 제한값(0.013 g/kW-hr)을 모두 만족하였으나, 85%의 경우에는 모두 약간 상회함을 보여줬다. NO_x는 가장 진각된 두개의 실험 조건에서만 모두 US2010 제한값(0.27 g/kW-hr)을 만족하여, 배기후처리장치 없이 RCCI 연소 조건만으로 정미 평균유효압력(Net IMEP) 5.9[bar] 영역에서 초저공해가 실현됨을 보였다.

4. 결 론

2중 연료(디젤-가솔린)의 가솔린 혼합비율과 연료분사시기 변화에 따른 RCCI 연소 및 배기 특성을 관찰하기 위하여 EGR없는 중부하에서 다수의 실험이 수행되었고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 디젤-가솔린 연료 혼합을 이용한 RCCI 연소 특성

이 재현되었고, 연료분사시기를 진각시키는 특정 운전 조건에서 낮은 연료소비율 및 향상된 열효율을 얻을 수 있었다.

2) 85% 가솔린 혼합비율 및 42[°BTDC] 분사시기에서 가장 우수한 열효율(47.1%), 낮은 정미 연료소비율(190.1 [g/kW-hr]) 및 낮은 유해 배기가스(HC, CO, NO_x) 등의 결과를 획득함으로써, 압축착화 내연기관의 초저공해를 실현할 수 있는 가능성이 보였다.

후 기

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2010-0020907)입니다.

참고문헌

- (1) D. A. Splitter, R. Hanson and R. D. Reitz, "High efficiency, low emissions reactivity controlled combustion through use of a fuel additive", SAE paper 2010-01-2167, 2010.
- (2) P. B. Dunbeck, and R. D. Reitz, "An experimental study of dual fueling with gasoline port Injection in a single-cylinder, air-cooled HSDI diesel generator", SAE paper 2010-01-0869, 2010.
- (3) K. A. Sung, J. H. Kim and R. D. Reitz, "Experimental study of emission reduction for near-stoichiometric diesel combustion using a 3-Way catalyst", International Journal of Engine Research, Vol 10, No 5, pp. 349~357, 2009.
- (4) D. A. Splitter, R. Hanson, S. Kokjohn and R. D. Reitz, "Reactivity controlled compression ignition(RCCI) heavy-duty engine operation at mid-and high-loads with conventional and alternative fuels", SAE paper 2011-01-0363, 2011.
- (5) R. Hanson, D. A. Splitter and R. D. Reitz, "Operating a heavy-duty direct-injection compression-ignition engine with gasoline for low emissions", SAE paper 2009-01-1442, 2009.
- (6) S. Lee, "Investigation of two low emissions strategies for diesel engines; Premixed charge compression ignition (PCCI) and stoichiometric combustion", Phd. Thesis, University of Wisconsin-Madison, pp. 34~54, 2006.

- (7) P. K. Senecal, D. T. Montgomery and R. D. Reitz, "A Methodology for engine design using multi-dimensional modeling and genetic algorithms with validation through experiments", Int. Journal of Engine Research, Vol. 1, pp. 229~248, 2000.
- (8) M. Bergin and R. D. Reitz, "Effect of flowfield non-uniformities on emissions predictions in HSDI engines", SAE paper 2011-01-0821, 2011.