

고속 직분식 디젤 엔진에서의 점화지연시기 예측

임재만[†]·김용래^{*}·온형석^{*}·민경덕^{**}

Prediction of Ignition Delay for HSDI Diesel Engine

Jaeman Lim, Yongrae Kim, Hyungsuk Ohn and Kyoungdoug Min

Key Words: Diffusion Flame Combustion(확산화염연소), Homogeneous Combustion(예혼합연소), Ignition Delay Time(점화지연시간), Reduced Chemical Kinetic Mechanism(축소화학반응기구)

Abstract

New reduced chemical kinetic mechanism for prediction of autoignition process of HSDI diesel engine was investigated. For precise prediction of the ignition characteristics of diesel fuel, mechanism coefficients were fitted by the experimental results of ignition delay of diesel spray in a constant volume vessel. Ignition delay of diesel engine on various operation condition was calculated based on the new reduced chemical mechanism. The calculation results agreed well with experimental data.

기호설명

TDC : 엔진 상사점

BDC : 엔진 하사점

1. 서론

전세계적으로 급변하는 자동차산업의 구조와 수출시 초저공해 자동차 포함의 의무화와 더불어, 각종 환경보호법규들이 한층 강화되는 상황에서 초저공해 엔진설계에 관한 독자기술을 확립하는 것이 절실히 요구된다. 그리고 지구온난화 문제와 관련해 유해배출물인 자동차 CO₂ 규제에 대비하기 위해서는 위와 같은 HC, CO, NO_x, PM

등의 배출가스 저감과 동시에 저연비의 엔진개발이 요구되고 있다. 초저공해, 초저연비 엔진을 실현할 수 있는 대표적인 기술로 높은 열효율을 가지는 고속 직분식 (High Speed Direct Injection, HSDI) 디젤 엔진이 각광을 받고 있다. 그런데 현재 고속 직분식 디젤 엔진의 역사는 다른 연소방식의 엔진에 비해 짧기 때문에, 그 개발에는 막대한 비용과 시간이 소요될 것으로 예상된다. 따라서 개발 비용 및 기간 단축, 합리적인 데이터베이스 구축과 시행착오의 최소화를 위하여 3차원 시뮬레이션을 통한 연료 분사 시스템 해석 및 연소 제어, 진단 기술의 개발이 필요하다. 이에 본 연구에서는 연료에 따라 각기 다른 자발화 특성을 해석할 수 있는 축소화학반응기구를 개발하여, 고온 고압 조건에서의 디젤 분무의 점화지연시간을 측정된 결과를 이용해 그 계수를 조정하였다. 이러한 화학반응기구를 이용하여 실제 고속 직분식 디젤 엔진에 대해 다양한 운전조건에 대한 점화지연시간을 계산하였다.

† 서울대학교 기계항공공학부 대학원

E-mail : jaeman@engine.snu.ac.kr

TEL : (02)880-7124 FAX : (02)874-2001

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부

2. 연구 방법

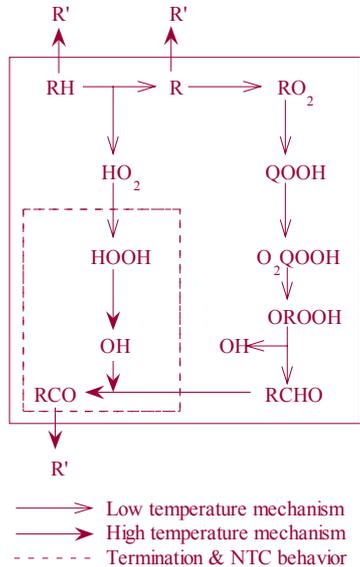


Fig. 1 Schematic diagram of main reaction path of the reduced chemical mechanism

2.1 디젤 연료에 대한 축소화학반응기구 구축

알칸(alkane)계열 연료들의 연쇄 반응은 저온 및 고온에서 Fig. 1 과 같이 각각 유사한 반응 경로로 진행되기 때문에, 이를 고려하면 일반화된 축소화학반응식의 선정이 가능하다. 본 연구실에서는 2,450 개의 반응식과 550 개의 화학종으로 구성된 노말헵탄의 상세화학반응기구를 고려한 19개의 반응식과 17개의 화학종으로 구성된 축소화학반응기구(1)를 개발한 바 있으며 본 연구에서는 이를 사용하였다. 반응기구의 화학식은 Table 1과 같다.

2.2 자발화실험을 통한 화학반응기구 계수조정

디젤 연료는 다양한 탄화수소계열 연료들의 혼합물로 되어 있기 때문에 특정한 탄화수소 연료의 화학반응기구로는 그 자발화 및 연소 특성을 파악하는데 어려움이 있다. 그래서 본 연구에서는 Table 1의 R3과 R6의 활성화 에너지를 조정함으로써 디젤 연료의 자발화 특성을 반영할 수 있도록 하였다. 이를 위해, 고온 고압의 정적 연소실에 디젤 연료를 분사하여 그 점화 지연 시간을 측정 한 후, 같은 조건에 대해 수행된 계산 결과와 비교하여 두 계수를 조정하였다.

Table 1 Present reduced chemical kinetic model

	Reaction
R1	$\text{RH} + \text{O}_2 = \text{R} + \text{HO}_2$
R2	$\text{R} + \text{O}_2 = \text{RO}_2$
* R3	$\text{RO}_2 = \text{QOOH}$
R4	$\text{QOOH} + \text{O}_2 = \text{OOQOOH}$
R5	$\text{OOQOOH} = \text{OROOH} + \text{OH}$
* R6	$\text{OROOH} = \text{RCHO} + \text{CH}_2\text{O} + \text{OH}$
R7	$\text{RH} + \text{OH} = \text{R} + \text{H}_2\text{O}$
R8	$\text{R} + \text{O}_2 = \text{HO}_2 + \text{Olefin}$
R9	$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 = \text{HOOH} + \text{O}_2$
R10	$\text{HOOH} + \text{M} = \text{OH} + \text{OH} + \text{M}$
R11	$\text{RO}_2 + \text{HO}_2 = \text{ROOH} + \text{O}_2$
R12	$\text{QOOH} = \text{RCHO} + \text{OH} + \text{Olefin}$
R13	$\text{RCHO} + \text{HO}_2 = \text{R} + \text{HOOH}$
R14	$\text{RCHO} + \text{OH} = \text{R} + \text{H}_2\text{O}$
R15	$\text{RH} + \text{RO}_2 = \text{R} + \text{ROOH}$
R16	$\text{RH} + \text{HO}_2 = \text{R} + \text{HOOH}$
R17	$\text{R} + \text{R} = \text{RH}$
R18	$\text{CH}_2\text{O} + \text{OH} = \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}$
R19	$\text{HCO} + \text{O}_2 = \text{HO}_2 + \text{CO}$

실험 장치는 Fig. 2와 같이 크게 고온 고압조건을 만들기 위한 정적 연소실 및 예연소 장치, 분무를 위한 인젝터와 연료 공급계인 연료 공급 장치, 연소실내 압력과 온도 및 자발광 신호 획득하기 위한 데이터 획득 장치로 구성된다(2).

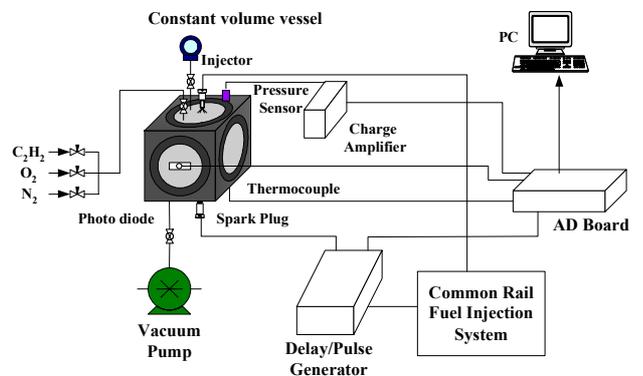


Fig. 2 Experimental setup

Table 2 Specifications of research engine

Stroke (mm)	100 mm
Connecting rod (mm)	167 mm
Compression ratio	17.8
I/O	-26°
I/V	230°
Engine speed	1,400 & 2,000 rpm

2.3 개발 대상 엔진의 제원 및 이동 격자 제작
 본 연구에서는 예혼합 압축착화(Homogeneous Charge Compression Ignition, HCCI) 엔진의 분무 및 연소 해석에 대한 3차원 연소 시뮬레이션을 수행하기 위해 실험용 단기통 엔진에 대한 계산격자를 생성하였다. 실험용 엔진의 형상은 스윙 포트와 평평한 피스톤 보울 모양으로 특징 지을 수 있다. 계산격자는 연소실과 흡기 포트를 포함하여 TDC 에서는 약 125,000 여개, BDC 에서는 약 245,000 여개이다. 피스톤 형상은 지름 52 mm, 길이 17.1 mm인 원통형의 보울 형태를 가졌다. 엔진 해석은 흡기과정과 압축, 연소과정을 모두 수행하였다. 자세한 엔진 제원은 Table 2와 같다.

3. 연구 결과

3.1 계산 결과와의 비교

본 연구에서는 커먼레일 인젝터의 분무 현상을 모사할 수 있는 분무 모델과 2.1에서 설명한 자발화용 축소 화학 반응 기구를 상용 CFD 코드인 STAR-CD에 접목하여 정적연소실 조건에서의 점화지연시간계산을 수행하였다. 분무모델(3, 4, 5)과 화학반응기구는 모두 STAR-CD의 user subroutine의 형태로 사용하였다.

Fig. 3의 왼쪽 그래프는 초기압이 21 bar인 경우, 다양한 초기 온도에 대해 계산된 점화지연시간을 실험결과와 비교한 것이다. 처음에 문헌에서 제시한 노말 헵탄에 대한 활성화 에너지 계수값을 사용하여 계산을 수행한 결과 점화지연시간이 실험치보다 길게 계산되었다. 그래서 계수값을 계속 수정하여 여러 온도 범위에 대해 계산치가 실험치에 거의 근접할 수 있도록 하였다.

Fig. 3의 오른쪽 그래프는 이러한 방법으로 결

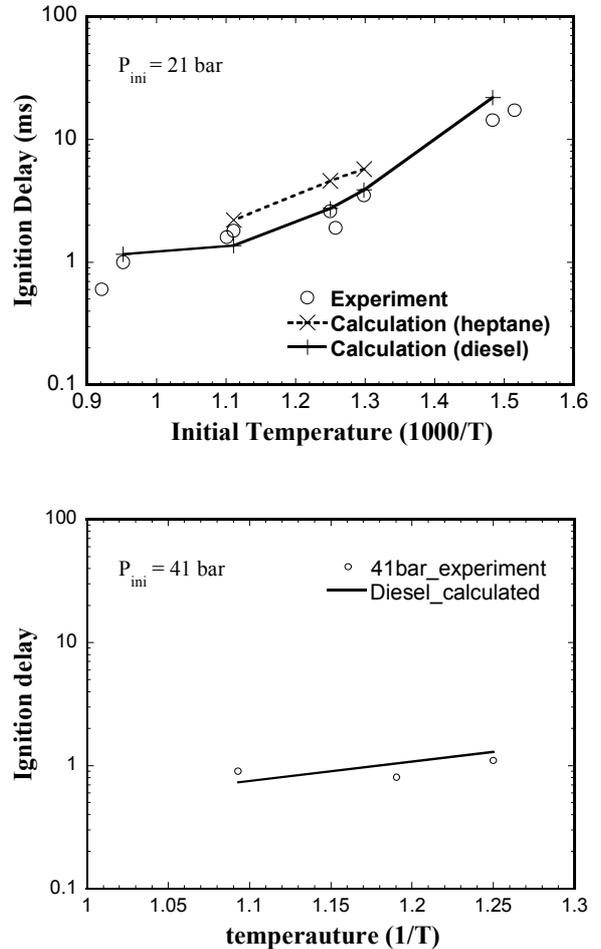


Fig. 3 Comparison of calculation results with experimental data

정된 계수 값을 사용하여 초기압이 41 bar인 경우 여러 가지 온도 범위에 대해 계산을 수행한 결과를 실험치와 비교한 것이다.

계수의 수정 없이 계산된 점화지연시간이 실험치와 거의 유사함을 알 수 있다. 이 외에 다양한 초기산소농도에 대해서도 계산치와 실험치가 거의 유사함을 확인하였다. 이를 통해 본 연구에서 구축한 자발화용 축소화학반응기구가 다양한 엔진운전조건에 대해 자발화 현상을 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 HCCI 엔진의 자발화 양상

본 연구에서는 제작된 이동격자를 사용하여 개발대상엔진의 자발화 특성을 해석하였다.

Fig. 4는 엔진 속도 1,400 rpm, 분사압 1,000 bar, 분사량 15 mm³ 조건에 대해 40° BTDC 시

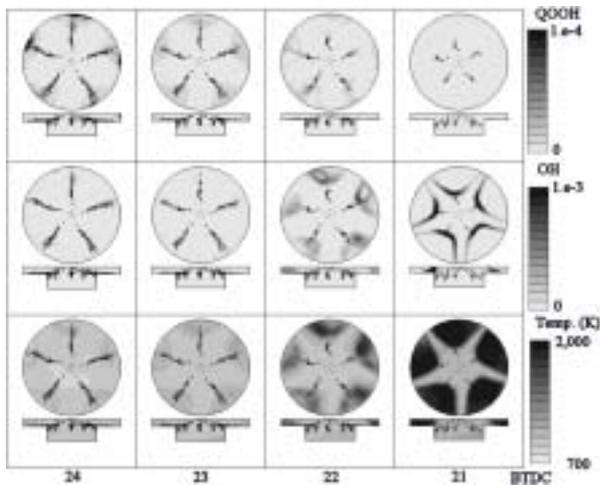


Fig. 4 Species and temperature distribution of homogeneous combustion condition

점에서 연료가 분사되었을 때 알데히드인 QOOH 라디칼, OH 라디칼과 온도 분포를 살펴본 그림이다. 이 때의 공연비는 35 이다. 연료의 분사는 29.5° BTDC 시점에서 이미 끝났지만 연소실 내에는 잔여 액적들이 조금 남아있는데, 이는 분사 말기에 느린 속도로 분사된 액적들이 충분한 미립화 현상을 거치지 않은 채 증발되지 않은 채로 남은 액적과, 전년도 연구결과에서 밝혔듯이 액적이 분사되면서 피스톤 벽면과 충돌되는 현상 때문에 남은 액적으로 구성된다. 24° BTDC 시점은 아직 2차 연소가 발생하기 전으로 실린더 벽면의 분무 끝 부분에 냉염과 함께 발생하는 QOOH 라디칼이 존재함을 알 수 있으며, 온도 역시 QOOH 라디칼이 존재하는 영역을 중심으로 약간 상승해 있다. 그러나 시간이 지남에 따라 QOOH 라디칼들은 분해되며, 22° BTDC 시점에 OH 라디칼이 갑자기 상승하면서 2차 점화가 발생한다. 그런데 액적이 피스톤 윗면에 충돌함에 따라 그 지점에 농후한 혼합기가 형성되어 결국 피스톤 윗면을 중심으로 고온 영역이 형성된다. 이로 인해 실린더 옆면 및 피스톤 윗면을 중심으로 HC 및 Soot 배출물이 형성될 것으로 예상되며, 이를 방지하기 위해 피스톤 형상과 분사각 변경이 필요하다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 조건에 대해 10° BTDC 시점에서 연료가 분사되었을 때 자발화 양상이다. 냉염의 생성과 함께 형성되는 QOOH 라디칼들은 3° BTDC 시점에서 조금 형성되다 2차 점화의 시작에 의해 바로 분해됨을 알 수 있

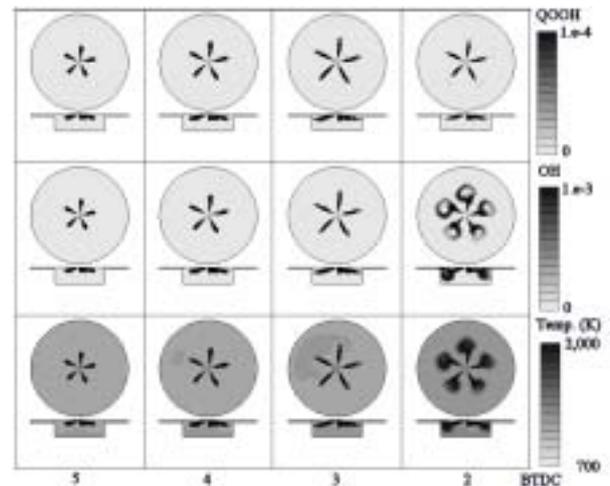


Fig. 5 Species and temperature distribution of diesel combustion condition

다. 이는 분사되는 시기의 연소실 내부 온도가 이미 $1,000$ K 에 이르는 고온으로 앞서 모사했던 냉염이 거의 생성되지 않기 때문이다. OH 라디칼의 경우 3° BTDC 시점에 조금 형성되다 2° BTDC 시점에 급격하게 증가한다. 이에 따라 OH 라디칼이 형성되는 지점을 중심으로 $2,000$ K 이상의 고온 영역이 형성된다. 이 때, 아직 연료의 분무가 끝나지 않았기 때문에, 분사된 액체 연료는 바로 연소과정에 참여하며, 이에 높은 발열량을 동반하는 급격한 화학반응이 발생된다. 이러한 화학 반응에 의해 많은 NOx 및 soot 가 형성될 것으로 예상된다. 이러한 해석을 통해 운전 조건에 따른 자발화 양상을 관찰할 수 있다.

3.3 실험 결과와 계산 결과의 비교

Fig. 6 은 1400 rpm, 분사압 $1,000$ bar, 분사량 15 mm^3 조건에서 각각 다른 분사시기에 대해 수행한 실험의 점화 지연 시간과 같은 조건에서 계산한 계산결과를 비교한 것이다. x 축이 분사시기, y축이 그에 따른 점화 지연시간을 크랭크 앵글 단위로 표현하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이 계산 결과와 실험 결과의 차이가 최대 크랭크 앵글 3° 차이로 거의 일치함을 알 수 있다. 여기서, 분사 기간은 약 10.5° 이므로 분사 이후 균일한 혼합기가 형성될 수 있는 시간이 충분한 분사시기가 40° BTDC 인 운전 조건이 HCCI 연소에 적합하다.

Fig. 7 은 $2,000$ rpm, 분사압 600 bar, 분사량 15 mm^3 조건에서 측정된 점화 지연 시간과 계산

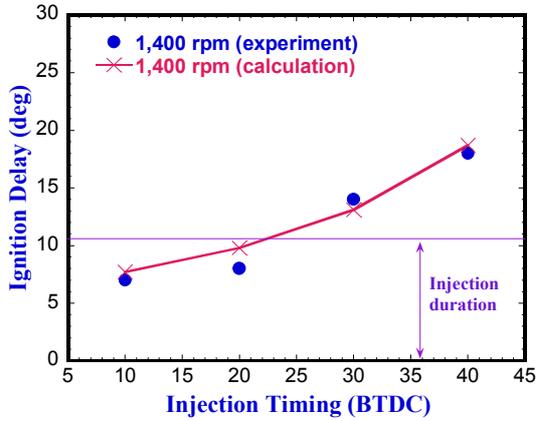


Fig. 6. Comparison between calculated ignition delay time and experimental data according to injection timing at 1,400 rpm

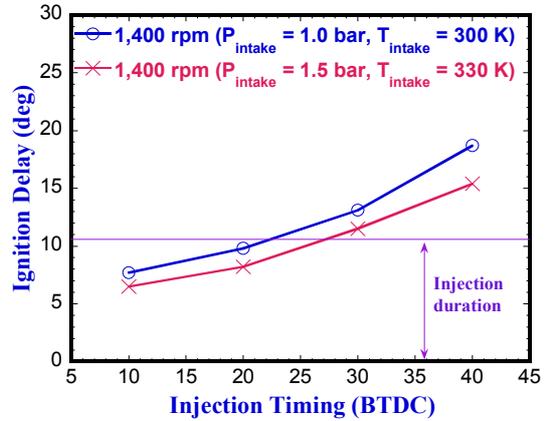


Fig. 9 Comparison of ignition delay time of NA condition and turbocharged condition according to injection timing

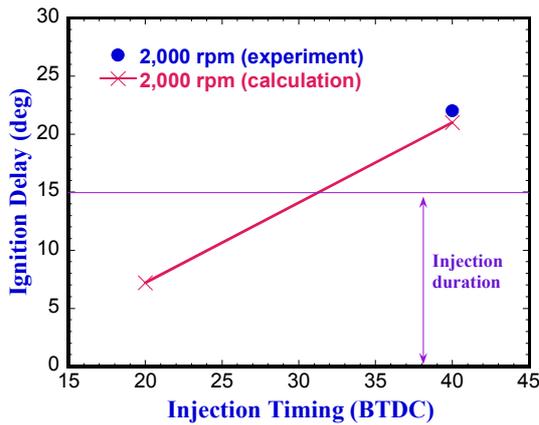


Fig. 7 Comparison between calculated ignition delay time and experimental data according to injection timing at 2,000 rpm

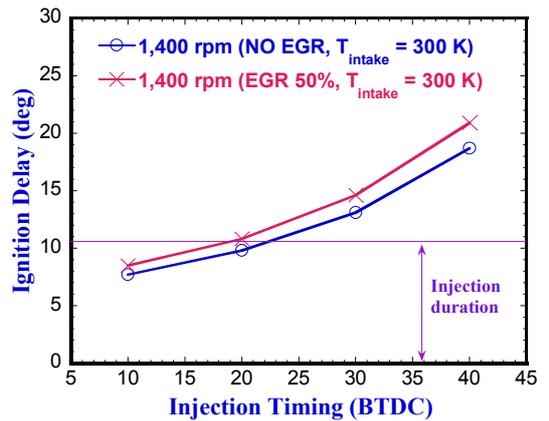


Fig. 10 Comparison of ignition delay time of normal condition and EGR condition according to injection timing

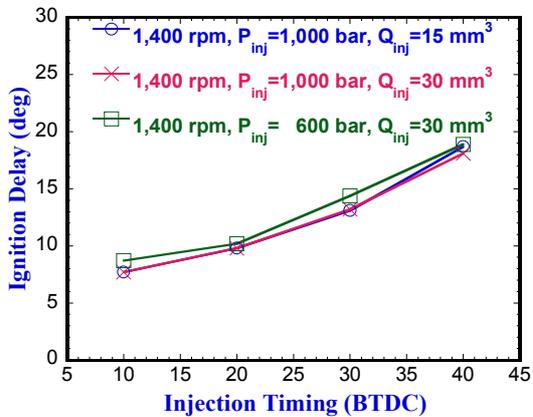


Fig. 8 Comparison of ignition delay time due to injection pressure and duration

결과를 비교한 것이다. 1,400 rpm 조건과 마찬가지로 실험 결과와 계산 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

3.4 다양한 운전조건에서의 점화지연시간 예측

Fig. 8은 1,400 rpm 운전조건에서 인젝터의 분사압과 분무량을 변화했을 때 점화지연시간의 차이를 비교한 것이다. 분사압이 같고 분무량이 다른 경우 대부분의 조건에서 점화지연시간이 별 차이가 없었으나 분사시기 40° BTDC 조건에서 약 2도 정도 분무량이 많은 경우가 짧다. 반면 분사압이 다르고 분무량이 같은 경우 대부분의 분사시기 조건에 대해 분사압이 높은 경우가 점화지연시간이 2-3도 정도 짧으나 40° BTDC 조건에 대해서는 거의 같다. 여기서 예혼합 연소

조건의 경우 연료의 거의 대부분이 증발된 상태이기 때문에 분사량이 점화지연시간에 영향을 줄 수 있고 확산 연소 조건에서는 분사압이 고압일수록 연료의 증발효율이 향상되기 때문에 분사압이 영향을 주는 것을 알 수 있다.

Fig. 9 는 터보 차저를 장착한 경우 점화지연 시간의 변화를 파악하기 위해 흡기포트의 압력을 1.5 bar로 가압한 후 1,400 rpm, 분사압 600 bar, 분사량 15 mm³ 조건에서 여러 가지 분사시기에 따른 점화 지연 시간을 일반 조건과 비교한 것이다. 주변 기체가 더욱 고압이기 때문에 분무 길이가 짧아져서 액적의 벽면 충돌 현상을 피할 수 있음을 전년도 연구 과제에서 해석한 바 있다. 그러나 그림에서 알 수 있듯이 40° BTDC 인 경우 점화 지연시간이 3° 정도 짧아지기 때문에 그만큼 HCCI 연소가 가능한 운전 영역이 줄어들게 된다.

Fig. 10 은 EGR 20% 조건에 대해 1,400 rpm, 분사압 600 bar, 분사량 15 mm³ 조건에서 여러 가지 분사시기에 따른 점화 지연 시간을 일반 조건과 비교한 것이다. EGR 사용으로 공기 농도가 희박해짐에 따라 점화 지연 시간이 늘어나는 것으로 나타났다.

4. 결 론

1. 개발된 자발화 축소화학반응기구로 계산한 개발 대상 HCCI 엔진의 점화지연시간은 실험치와 잘 일치하였다. 흡기압 증가와 EGR 적용에 따라 점화 지연 시간이 2-3° 정도 변화하였다.

2. 안정된 HCCI 연소를 위해서는 피스톤 보울 내부에서 균일한 혼합기의 형성이 필요하다. 이를 위해, 대상 엔진의 피스톤 형상과 분무각을 변경할 필요가 있다.

3. 본 과제에서 개발한 자발화 모델을 이용하여 기존의 실험적 연구방법 보다 짧은 시간과 적은 비용으로 가능 운전 영역을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 자동차부품연구원 주관의 “예혼합 압축착화 연소엔진의 기반 및 실용화기술개발” 과제의 연구비로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Hyunguk Kim, Sangsoo Pae, and Kyoungdoug Min, 2002, Reduced Chemical Kinetic Model for the Ignition Delay of Hydrocarbon Fuels and DME, Combustion Science and Technology, Vol.174, No.8, pp. 221-238
- (2) Hyungsuk Ohn, Yongrae Kim, Kyoungdoug Min, "Ignition Delay Measurement of Diesel Sprays in a Constant Volume Vessel", Spring Workshop of Korea Society of Automotive Engineering, pp 387-392, 2004.
- (3) R. D. Reitz, et al., 1986, "Effect of drop breakup on fuel sprays", SAE Paper 860469
- (4) P. J. O'Rourke, 1981. "Collective Drop Effects on Vaporising Liquid Sprays". Ph. D Thesis, University of Princeton.
- (5) Manshik Kim 2003. Ph'D Thesis, Seoul National University.