

급속압축팽창기의 제작과 완전 예혼합기의 압축착화 연소실험

조상현¹⁾ · 김기수¹⁾ · 임명택²⁾

전남대학교 기계공학과 대학원¹⁾ · 전남대학교 기계시스템공학부²⁾

Development of a Rapid Compression Expansion Machine and Compression Ignition Combustion of Homogeneous Premixtures

Sanghyun Cho¹⁾ · Kisoo Kim¹⁾ · Myung Taeck Lim²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

²⁾Department of Mechanical Systems Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received 24 October 2003 / Accepted 8 December 2003)

Abstract : A flywheel-driven rapid compression and expansion machine is developed and utilized for experimental study of homogeneous charge compression ignition combustion. Compression ignition of homogeneous charge in IC engines offers possibilities of realizing ultra-lean engine operation with greatly reduced NOx and particulate formation. Fundamental investigations are carried out in order to better understand this ideal engine combustion mechanism. Perfectly premixed propane-air mixtures of various equivalence ratio are compression-ignited in the rapid compression and expansion machine, and the characteristics of the auto-ignition and the following combustion process are analyzed.

Key words : Rapid compression and expansion machine(급속 압축 팽창기), Homogeneous charge compression ignition(균일 예혼합 압축 착화), Rate of heat release(열발생률)

1. 서론

세계 각국의 자동차 배기 규제가 강화되면서 효율이 높고 배기가 깨끗한 엔진 개발을 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다. 엔진의 연소 방식 개선 연구 중에서는 희박연소의 일종인 균일 예혼합 압축 착화(HCCI; homogeneous charge compression ignition) 연소로 현재의 엔진 연소를 대체하려는 연구들이 진행되고 있다. 균일 예혼합 압축 착화 연소는 일본의 Onish¹⁾에 의하여 처음 보고된 이후 주로 일본에서 많은 연구가 수행되다가 현재는 미국과 유럽 등에서도 활발히 진행되고 있고 국내에서도 일부의 연구가 수행되고 있다.¹⁻⁶⁾

예혼합기 압축 착화 방식의 엔진은 압축착화가 가능한 대부분의 액체 및 가스 연료를 사용할 수 있고, 불꽃 점화식 엔진에 비하여 압축비가 높으며 또한 스토틀 밸브를 사용하지 않아서 효율이 높다. 디젤 기관과 비교하면 연소 온도가 낮아서 NOx 발생량이 현저하게 적고 국부적인 혼합기의 불균일로 인하여 발생하는 입자상 물질도 거의 배출되지 않는 장점이 있다.¹⁻⁶⁾

이 연구에서는 균일 예혼합 압축 착화 연소를 비롯한 엔진 연소 연구에 적합한 급속압축팽창기(RCEM; rapid compression and expansion machine)를 제작하고, 프로판-공기 예혼합기를 대상으로 압축비, 혼합기의 초기 온도 및 당량비 등을 변경하면서 압축착화 실험을 수행하여 기본적인 연소 특성을

*To whom correspondence should be addressed.
mtlim@chonnam.ac.kr

분석하였다.

2. 급속압축팽창기의 제작

2.1 급속압축팽창기(RCEM)란?

RCEM은 1사이클만 운전하는 단기통 엔진으로 사이클 변동이 적어 재현성이 좋으면서도 실제기관과 같이 피스톤 운동을 통한 고온 고압 분위기를 조성할 수 있어서, 실제 엔진을 이용하는 연구의 어려움과 정적연소실의 단점을 보완하는 엔진 연소 연구의 전용 장치이다.⁷⁾ 또한 실제 엔진보다 연소실의 가시화가 용이하여 혼합기 및 연소 진행 단계의 광학적 측정이 비교적 쉽게 이루어질 수 있고 주요 부품들의 조정 및 보관을 통한 압축비, 초기 충전 온도 등의 실험조건 변경도 자유롭게 때문에 엔진 연소의 기초 연구에 널리 이용된다.

2.2 설계 조건

이 연구에서 개발된 RCEM의 기본적인 설계조건은 다음과 같다.

- 1) 연소실은 연소실 벽면의 영향을 최소화하여 자유 분무 및 자유분무 화염을 실현할 수 있도록 충분히 커야 한다.
- 2) 연소실 대부분의 영역이 관측 가능하고 각종 광학측정 장비의 적용이 용이하여야 한다.
- 3) 압축 및 팽창 행정을 수행하고 엔진과 유사한 고온 고압의 연소 분위기가 조성되어야 한다.
- 4) 상사점 및 하사점의 위치 정밀도가 높고 재현성이 우수하여야 한다.
- 5) 연소실의 온도, 압축비, 혼합기 양 등의 운전조건을 독립적으로 자유롭게 변경할 수 있어야 한다.
- 6) 가능한 단순한 구조이고 조작성이 우수하여야 하며 제작 및 운전비용이 저렴해야 한다.
- 7) 안전성이 높아야 한다.

이와 같은 조건을 최대한 반영할 수 있는 RCEM을 제작하기 위하여 국내외의 다양한 RCEM의 설계 자료를 수집 분석한 후 일본 도시샤대학(同志社大學)의 장치를 기본형으로 채택하고 수정 설계하여 제작하였다.

2.3 RCEM의 제원

제작된 RCEM은 압축 및 연소 과정의 압력을 측정할 수 있고, 압축비와 당량비 및 초기 혼합기 온도를 비교적 자유롭게 변경할 수 있고 광학적 측정도 가능하며 상세 제원은 Table 1과 같다.

설계조건을 만족하고, 중형 DI 디젤 엔진과 유사하도록 내경과 행정은 각각 100 mm, 450 mm이고, 디스크(Flat disk) 형상인 연소실은 Fig. 1과 같이 대부분의 영역이 관측 가능하도록 실린더 헤드와 피스톤 크라운 및 연소실 측면에 석영창을 설치할 수 있도록 하였다. 연소실의 가시화가 필요하지 않은 실험의 경우에는 안전성을 위하여 석영창 대신에 동일한 형상의 황동판을 이용하여 시험할 수 있다.

Table 1 Specifications of RCEM

Description	Specifications
Bore (mm)	100
Stroke (mm)	450
Combustion chamber	disk
Displacement volume (cc)	3534
Compression ratio	8~23
Top clearance height (mm)	61.8~17.5
Max. speed (rpm)	200
Crank radius (mm)	225
Connecting rod (mm)	900

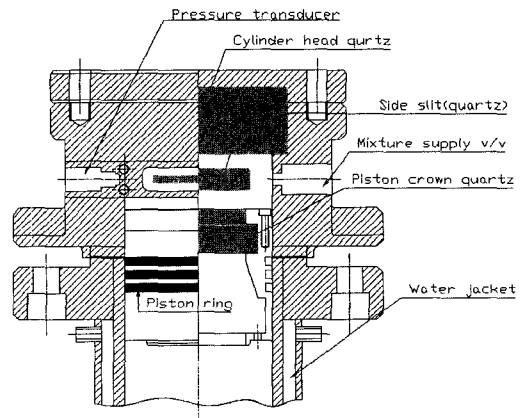


Fig. 1 Shape of combustion chamber in RCEM

2.4 피스톤 구동 방식

RCEM은 정지상태로부터 원하는 피스톤 속도에 순간적으로 도달하여야 하므로 초기 구동력이 매우 크

다. 따라서 적절한 구동방식의 선정이 매우 중요하다.

이 연구에서는 비교적 단순하고 소형이며 제작 비용이 저렴한 관성방식을 채택하였다. 관성방식은 엔진과 유사하게 크랭크 기구와 실린더 및 피스톤으로 구성된다. 전기모터로 플라이휠에 운동에너지를 저장한 후 크랭크축을 통하여 피스톤을 구동하는 방식으로 공압식이나 유압식에 비하여 장치가 비교적 단순하게 구성된다. 그러나 1 사이클 동안만 동력을 전달하기 위하여 동력단속 장치가 필요하고, 플라이휠의 크기와 속도 및 동력단속 제어에 제약이 있기 때문에 RCEM의 운전속도가 낮아지는 단점이 있으며, 크랭크 기구의 특성 때문에 사이클 중 토크 변동이 크므로 공압식과 유압식보다 진동이 심하다.

관성방식의 핵심 부품인 동력단속 장치는 Fig. 2의 구조를 갖는 기계식 클러치를 자체 제작 사용하였다. 또한 정지상태에서 일정 회전속도까지 급가속하는 RCEM의 특성상 전기모터만으로는 구동 토크를 공급하기가 어려워 먼저 15 마력의 전기모터로 플라이휠에 운동에너지를 저장한 후 5:1인 감속기를 통하여 클러치가 연결될 때 크랭크축에 전달되도록 하였다.

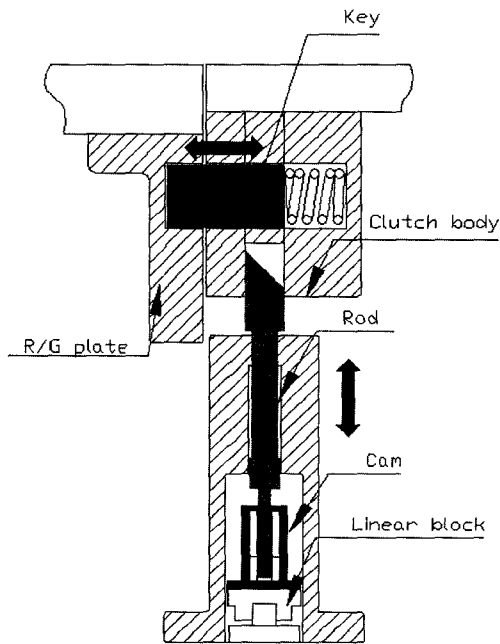


Fig. 2 Structure of the mechanical clutch

2.5 RCEM의 구성

제작된 RCEM은 대략 Fig. 3과 같이 구성되어 있는데 크게 보아서 엔진 모사 부분, 구동 부분, 클러치를 포함한 연결 부분으로 구성되어 있다.

엔진 모사 부분은 실린더, 피스톤, 커넥팅로드 및 크랭크축으로 구성되어 있다. 구동 부분은 15 마력의 AC 모터와 플라이휠 및 감속기로 구성되어 있으며, 연결 부분은 감속기와 크랭크축 사이의 동력 전달을 단속하는 클러치로 이루어져 있다. RCEM은 정지 상태로부터 거의 순간적으로 일정 수준의 회전 속도에 도달하기 때문에 매우 큰 구동토크가 필요하다. 이에 따른 진동이 심하므로 모든 구성요소는 I-형강으로 제작된 견고한 구조물(정반; 2700×2000×600mm, 2300kg) 위에 조립되어 있다.

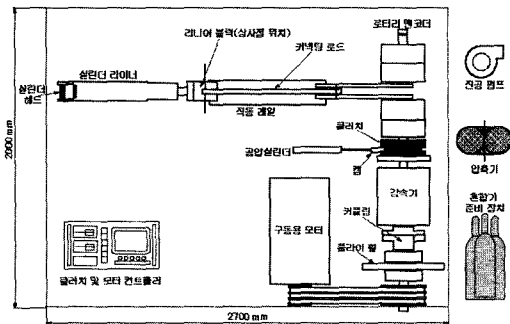


Fig. 3 Schematic view of the RCEM

2.6 RCEM의 작동 성능

2.6.1 모터링 압력

제작된 RCEM이 엔진 연소모사 연구에 적합한지 알아보기 위하여 모터링 압력을 측정하였다. 압축 과정을 비열비 1.3의 가역 단열압축 과정으로 보고 계산한 이상적 모터링 압력과 RCEM에서 측정된 압축행정 말기의 압력을 Fig. 4에 나타내었다.

비교적 낮은 압축비인 11까지는 RCEM의 압축압력이 이론적 압축압력과 매우 유사하지만 12 이상의 압축비에서는 압력의 차이가 점차 증가한다. 이는 압축비가 상승할수록 RCEM 연소실의 기밀성이 나빠지고 정반의 강성이 다소 부족하기 때문으로 판단된다. 향후에 정반을 보강하고 피스톤링을 추가하여 연소실의 기밀을 개선하면 이론압력에 더

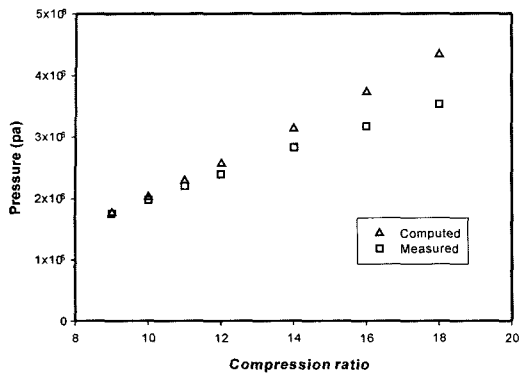


Fig. 4 Measured and computed motoring pressures in RCEM

근접한 압력을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

2.6.2 사이클 변동

엔진을 사용한 대부분의 연소 연구에서는 적어도 수십 사이클 내지 수백 사이클의 연소 압력을 평균한 다음에 분석하지만 엔진과 달리 1 사이클만 운전하는 RCEM은 1 회의 실험을 수행하기 위한 준비 시간이 너무 많이 소요되므로 수십 회의 시험 결과를 취득하는 것이 매우 어렵다. 따라서 한 조건에서의 시험 결과는 1~수회 실험 결과로 대표되므로 사이클 변동이 최소화 되어야 신뢰성 높은 실험결과를 얻을 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 동일한 모터링 및 연소 조건에서 10회 반복 측정된 압력을 나타낸 것이다. Fig. 5는 압축비 16, 초기 공기 온도 30°C 조건에서 측정된 모터링 압력인데 사이클간의 압력 변동이 매우 적음을 볼 수 있고 최고 압력의 변동계수(COV_{pp})는 0.9%이다.

Fig. 6은 압축비 18, 당량비 0.2 및 초기 혼합기 온도 80°C 조건에서 순수 프로판 예혼합기의 압축착화 연소 압력으로 모터링 결과와 비교하면 압력 변동이 약간 더 심하지만 최고 압력의 변동계수(COV_{pp})는 2.3%로 사이클간 압력 차이가 매우 적음을 알 수 있다.

위의 결과로부터 이 연구에 사용된 RCEM은 RCEM의 장점인 사이클 변동이 매우 적고 RCEM을 이용하여 연소시험을 1~2회 수행하더라도 충분히 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

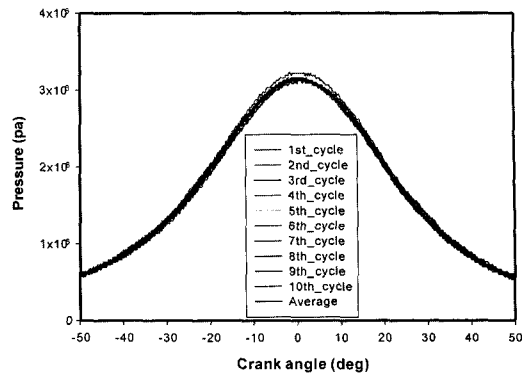


Fig. 5 Cyclic variation of motoring pressure in RCEM

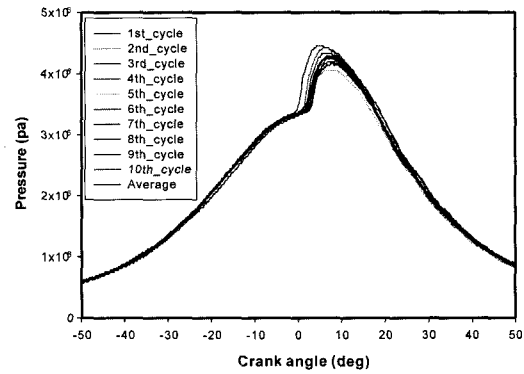


Fig. 6 Cyclic variation of firing pressure in RCEM

3. 연소 실험준비 및 방법

3.1 혼합기 제조

완전히 균일한 예혼합기의 압축 착화시험을 위하여 Fig. 7과 같은 연료-공기 혼합 장치를 구성하였다. 진공 펌프(Vacuum LTD, JOD-10)와 디지털 마노

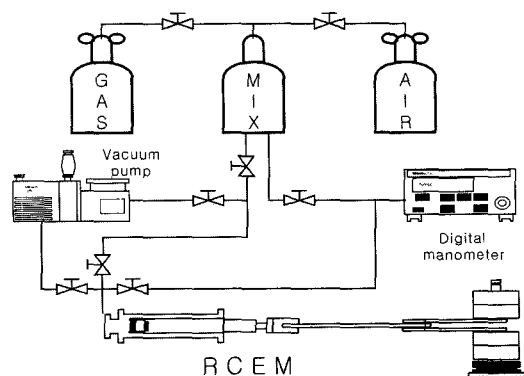


Fig. 7 Schematic diagram of mixture preparation system

미터(Yokogawa, MT110)를 사용하여 혼합기 탱크의 내부를 비운 후에 소정의 압력까지 연료와 공기를 차례로 채워서 원하는 당량비의 혼합기를 제조하였다. 혼합기는 연소 실험 전에 하루 이상 연소 실내에 방치하여 완전한 혼합을 꾀하였다.

연소 실험을 위하여 RCEM의 실린더에 혼합기를 채울 때에는 혼합기를 제조할 때와 유사하게 RCEM의 실린더 내부를 진공펌프로 비운 다음에 혼합기를 충전하였다.

3.2 실험연료와 조건의 선정

실험용 연료는 완전히 균일한 혼합기의 제조가 용이한 가스 연료 중에서 연소 관련 특성이 가솔린과 유사한 프로판(C_3H_8)을 선택하였는데 프로판의 주요 특성은 Table 2와 같다.

Table 2의 착화 온도로부터 프로판은 디젤보다 높은 압축비와 초기 혼합기 온도에서 압축 착화가 가능할 것임을 예상할 수 있다. RCEM 내부의 압축이 단열 압축 과정이고 비열비는 1.3으로 일정하다고 가정하여 계산된 압축 말기의 온도에 따르면 초기 혼합기 온도가 30°C, 55°C, 80°C일 때 압축비는 최소가 22, 16, 12 이상이어야 프로판의 압축착화가 가능하다. RCEM은 연소실 내부에 장착된 열전대 및 압력센서와 피스톤의 간섭을 피하기 위하여 최고 압축비를 19로 제한하였기 때문에 초기 혼합기 온도

가 30°C인 경우에는 프로판 예혼합기의 압축착화가 불가능하다. 따라서 18 이하의 압축비에서 압축 착화 가능한 초기 온도로 Table 3과 같이 프로판 예혼합기의 실험조건을 선정하였다.

3.3 실험 방법

진공 펌프로 비워진 RCEM의 연소실에 미리 제조되어 충분히 안정된 혼합기를 대기압으로 충전하고, 전열식 실린더 헤드 히터와 온수순환식 실린더 히터로 혼합기를 원하는 압축 시작 온도까지 가열하고, 약 10분 정도 후에 RCEM을 구동하여 압축 착화하였다.

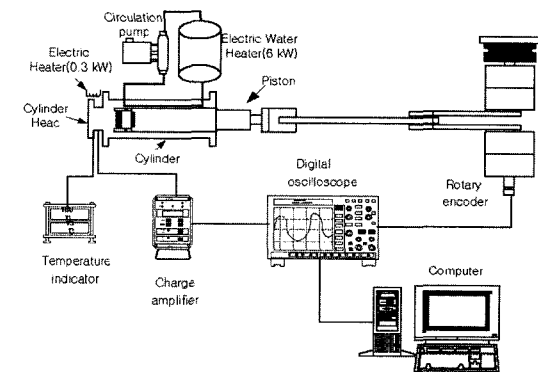


Fig. 8 Data acquisition in RCEM system

압축 및 연소 과정 중 실린더 내부의 압력은 압전형 압력 센서(Kistler, 6061B)와 전하 증폭기(Kistler, 5011A)를 사용하여 전기적 신호로 변환한 다음에, 크랭크축의 끝에 설치된 로터리 엔코더(Autronics, E40S-360-3-3)로부터 얻어진 크랭크 각 신호와 함께 오실로스코프(Lecroy, 9314A)에 동시 기록하고, PC로 전송 저장하였다. 저장된 압력 신호와 크랭크 각 신호는 크랭크 각 0.25° 간격으로 취하여 열발생률 계산에 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 HCCI 운전 영역

프로판과 공기의 완전 예혼합기를 이용하여 Table 3의 조건으로 압축한 결과 압축비가 14인 경우에는 모든 당량비 조건과 혼합기 온도 조건에서

Table 2 Selected properties of fuels

Property	Propane	Gasoline	Diesel
Molar weight (g/mol)	44.09	~110	~200
Cetane number	< 10	-	40~55
Octane number (RON)	112	92~98	-
Stoich. A/F ratio (kg/kg)	15.67	14.7	14.6
Boiling point (°C)	-42	30~190	180~370
Lower calorific value (MJ/kg)	46.35	43.2	42.7
Autoignition temperature(°C)	470	456	250

Table 3 Conditions of experiment

Fuel	Propane
Compression ratio	14, 16, 18
Intake temperature	55°C, 80°C
Equivalence ratio	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
Speed	100rpm

착화 불가능하였고, 압축비 16과 18인 경우에는 초기 혼합기 온도가 80°C인 경우에 혼합기가 비교적 농후한 영역에서 착화되었다. 압축비가 18인 경우에는 혼합기가 당량비 0.3 이상으로 농후해지면 압력상승이 급격하고, 최고압력 직후에 압력이 요동하며 파열음이 발생하여 노크로 간주하였다. 이러한 결과를 Fig. 9에 도시하였는데 이 연구에서 실험적으로 조사한 범위에서는 안정적 HCCI 연소가 가능한 영역이 매우 협소함을 알 수 있다. 상대적으로 낮은 압축비에서는 높은 혼합기 초기 온도와 농후한 혼합기 영역에서 압축착화가 가능하고, 높은 압축비에서는 낮은 혼합기 온도와 희박한 당량비에서도 압축착화가 가능할 것으로 추정된다.

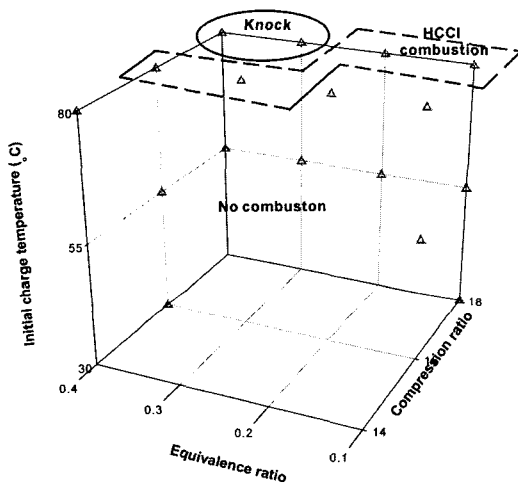


Fig. 9 HCCI region for propane-air mixtures

4.2 당량비의 영향

Fig. 10과 Fig. 11은 압축비와 압축 직전 혼합기의 온도를 18과 80°C로 일정하게 고정하고 프로판-공기 예혼합기의 당량비를 변경하며 압축착화한 실험 결과이다. 당량비가 증가할수록 연소 압력과 열발생률의 최고값이 증가함을 알 수 있고, 모든 당량비 조건에서 TDC 이후에 착화되고 연소가 완료됨을 확인 할 수 있다. 당량비가 0.1~0.3 구간에서는 당량비가 증가할수록 착화시기가 진각 되고, 연소기간이 짧아지는 현상이 뚜렷하게 나타나지만 당량비 0.3과 0.4 구간에서는 연소기간이 거의 동일하고, 착화시기도 TDC와 거의 일치한다. Fig. 9에 나타난 바

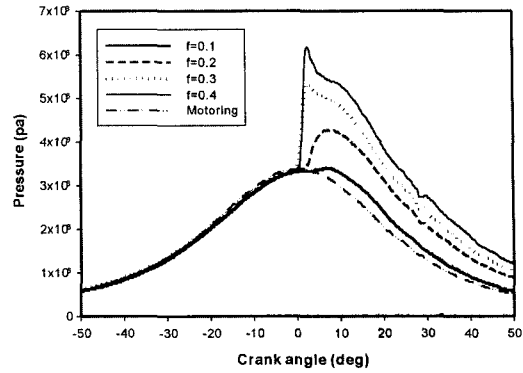


Fig. 10 Influence of equivalence ratio on cylinder pressure(CR=18, T=80°C)

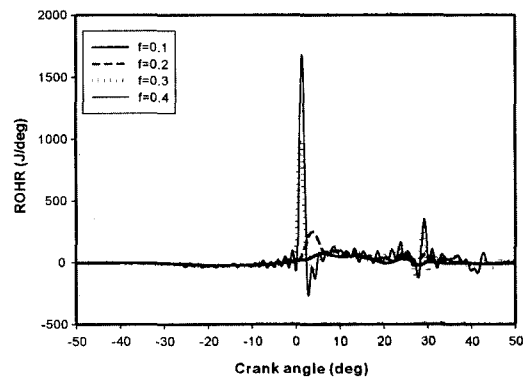


Fig. 11 Influence of equivalence ratio on rate of energy release(CR=18, T=80°C)

와 같이 압축비가 16인 경우에는 당량비가 0.3과 0.4 일 경우에만 압축착화가 가능하다. 이러한 결과로부터 압축비 18과 혼합기 온도 80°C의 조건은 세타가가 낮은 프로판 예혼합기의 압축착화 희박 한계에 가깝다고 추정할 수 있다. 또한, 당량비 0.3과 0.4 조건에서는 노크가 관찰되는데 두 경우의 압력 상승률과 열발생률은 각각 매우 유사함을 확인 할 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11에서 저온반응은 보이지 않고 고온반응만이 관찰되는데 이는 프로판의 착화성이 나쁘기 때문으로 판단된다.³⁻⁶⁾

이러한 결과에서 프로판을 연료로 사용하여 균일 예혼합 압축착화 연소를 수행할 경우에는 당량비가 증가할수록 착화시기의 진각이 뚜렷하게 존재함으로 농후한 혼합기 영역에서는 TDC 이전에 연소가 완료되는 문제점이 발생할 수 있고, 급격한 연소로 인한 노킹이 발생할 것으로 예측된다. 따라서 정확

한 연소제어가 이루어져야만 보다 넓은 운전범위에서 안정된 균일 예혼합 압축착화 연소가 가능할 것으로 판단된다.

4.3 압축비의 영향

Fig. 12와 Fig. 13은 압축비의 영향을 파악하기 위하여 당량비와 초기 혼합기 온도가 각각 0.4와 80℃인 경우에 압축비를 16과 18로 변경하며 착화 실험한 결과이다. 압축비 14에서는 압축착화가 일어나지 않았다.

Fig. 12와 Fig. 13에서 압축비가 증가할수록 착화 시기가 진각되고, 압축비가 18인 경우에는 노크가 발생한다. 이상의 결과로부터 프로판 예혼합기는 정상적 엔진 작동 온도인 80℃ 정도에서 압축비 16 이상이면 압축착화가 가능함을 알 수 있다. 그러나 이 연구에 사용된 RCEM의 압축비 16은 모터링 압

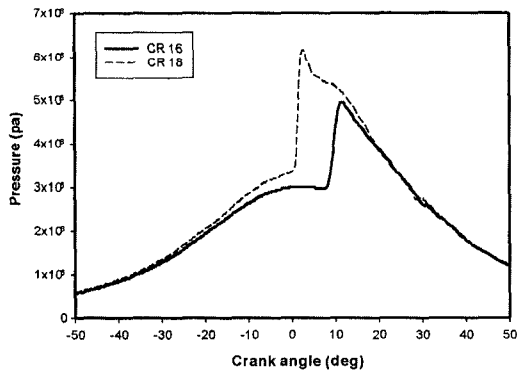


Fig. 12 Influence of compression ratio on cylinder pressure ($\phi=0.4, T=80^\circ\text{C}$)

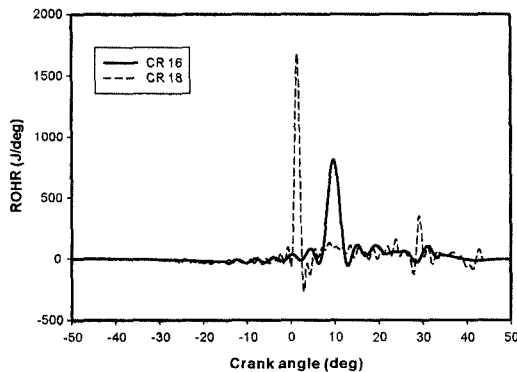


Fig. 13 Influence of compression ratio on rate of energy release($\phi=0.4, T=80^\circ\text{C}$)

력과 계산값과의 차이로 미루어 보면 실제로 14.5 전후가 될 것으로 추정된다. 따라서 압축비가 14.5 이상이면 초기 혼합기 온도가 더 낮은 조건에서도 압축착화가 가능할 것으로 기대되지만 TDC 전에 연소가 완료되거나 노크가 발생하는 등의 문제점이 발생할 것으로 예상된다.

5. 결론

압축착화 연소를 비롯한 기본적인 엔진 연소 연구가 가능하도록 다음과 같은 특징을 갖는 급속압축팽창기를 제작하였다.

- 1) 압축비, 당량비 및 초기혼합기 온도를 독립적으로 변경하고, 연소실 대부분에서 연소 현상의 관측이 가능하다.
- 2) 압축비는 8~23 까지 자유롭게 변경 가능하다. 압축비 12 이상에서는 비열비 1.3인 단열압축과정으로 가정하여 계산된 압력결과보다 다소 낮은 압력이 얻어지지만 가솔린 엔진의 압축비 상한인 12 이하에서는 압축 압력이 계산된 압력과 거의 동일하다.
- 3) 모터링과 연소과정의 압력을 측정된 결과 사이클 변동이 엔진보다 매우 적어 동일한 운전조건에서 수행된 1~수회의 시험결과는 신뢰 가능하다.

초기 온도 55℃~80℃인 프로판-공기 완전 예혼합기를 압축비 14~18, 당량비 0.1~0.4의 범위에서 압축착화 시험한 결과는 다음과 같다.

- 1) 당량비가 0.1이상인 프로판 완전 예혼합기는 압축비 18, 초기혼합기 온도 80℃ 이상에서 압축착화 가능하다.
- 2) 압축비가 18이고 초기 혼합기 온도가 80℃이면 당량비 0.3이상에서 노크가 발생한다. 압축비가 16이면 동일한 혼합기 온도 조건에서 노크가 발생하지 않는다.
- 3) 프로판 예혼합기를 노크 없이 안정적으로 압축착화 연소할 수 있는 엔진 운전 조건은 매우 좁다. 다만 당량비와 압축비에 따라 착화시기가 변화하므로 EGR이나 가변압축비등과 같은 연소 제어 기술을 함께 사용한다면 실제 엔진에 부분적 적용이 가능할 것으로 보인다.

후 기

이 연구는 2002년도 미래형 자동차 기술 개발 사업의 결과이며 관계자들에게 감사드립니다.

References

- 1) S. Onishi, S. H. Jo, K. Shoda, P. D. Jo, S. Kato, "Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC)-A New Combustion Process for Internal Combustion Engines," SAE 790501, 1979.
- 2) C. S. Lee, K. H. Lee, D. S. Kim, S. W. Chang, "Combustion Characteristics of Premixed Charge Compression Ignition Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.11, No.2, pp.9-14, 2002.
- 3) G. R. Pucher, D. P. Gardiner, M. F. Bardon, V. Battista, "Alternative Combustion Systems for Piston Engines Involving Homogeneous Charge Compression Ignition Concepts - A Review of Studies Using Methanol, Gasoline and Diesel Fuel," SAE 962063, 1996.
- 4) M. Christensen, A. Hultqvist, B. Johansson, "Demonstrating the Multi Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Variable Compression Ratio," SAE 1999-01-3679, 1999.
- 5) R. Takatsuto, T. Igarashi, N. Iida, "Auto Ignition and Combustion of DME and n-Butane/Air Mixtures in Homogeneous Charge Compression Ignition Engine," The Fourth International Symposium COMODIA 98, pp.185-190, 1998.
- 6) T. Aroonsrisopon, V. Sohm, P. Werner, D. E. Foster, T. Morikawa, M. Iida, "An Investigation Into the Effect of Fuel Composition on HCCI Combustion Characteristics," SAE 2002-01-2830, 2002.
- 7) T. Kamimoto, H. Kobayashi, S. Matsuoka, "A Big Size Rapid Compression Machine for Fundamental Studies of Diesel Combustion," SAE 811004, 1981.