

가솔린 균일 예혼합 압축착화 엔진의 착화시점 검출

최 두 원¹⁾ · 이 민 광¹⁾ · 선 우 명 호^{*2)}

한양대학교 자동차공학과 대학원¹⁾ · 한양대학교 자동차공학과²⁾

Start of Combustion Detection Method for Gasoline Homogeneous Charge Compression Ignition Engine

Doowon Choe¹⁾ · Minkwang Lee¹⁾ · Myoung-ho Sunwoo^{*2)}

¹⁾Department of Automotive Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 14 December 2007 / Accepted 20 February 2007)

Abstract : Gasoline Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) combustion is a new combustion concept. Unlike the conventional internal combustion engine, the premixed fuel mixture with high residual gas rate is auto-ignited and burned without flame propagation.

There are several operating factors which affect HCCI combustion such as start of combustion (SOC), residual gas fraction, engine rpm, etc. Among these factors SOC is a critical factor in the combustion because it affects exhaust gas emissions, engine power, fuel economy and combustion characteristics. Therefore SOC of gasoline HCCI should be controlled precisely, and SOC detection should be preceded SOC control. This paper presents a control oriented SOC detection method using 50 percent normalized difference pressure. Normalized difference pressure is defined as the normalized value of difference pressure and difference pressure is difference between the in-cylinder firing pressure and the motoring pressure. These methods were verified through the HCCI combustion experiments. The SOC detection method using difference pressure provides a fast and precise SOC detection.

Key words : HCCI(homogeneous charge compression ignition, 균일 예혼합 압축착화), SOC(start of combustion, 착화시점), DP(Difference pressure, 압력차), NDP(Normalized difference pressure, 정규압력차), Detection delay(검출 지연각)

Nomenclature

ATDC : after top dead center, degree
DP : difference pressure, bar
IMEP : indicated mean effective pressure, bar
NDP : normalized difference pressure, bar
SOC : start of combustion, degree

1. 서론

가솔린 균일 예혼합 압축착화(gasoline HCCI: gasoline homogeneous charge compression ignition) 연소기술은 연소 특성으로 인하여 NO_x 저감과 연비의 향상을 동시에 이룰 수 있어 최근에 주목을 받고 있다. 가솔린 HCCI 연소는 불꽃점화 연소에 비해 압축비가 높고, 대량의 잔류가스와 함께 균일한 혼합기가 압축착화하여 화염 전파 없이 진행되므로 높은 열효율을 보이는 동시에 연소 가스의 온도가 낮

*Corresponding author, E-mail: msunwoo@hanyang.ac.kr

아 NO_x의 발생을 현저하게 저감시킬 수 있는 장점이 있다.¹⁾

가솔린 HCCI 연소에 영향을 미치는 인자로는 착화시점(SOC: start of combustion), 잔류가스비율, 엔진 회전 속도, 엔진 부하 등이 있다. 이 중에서 착화시점은 연소 배출물과 엔진 출력, 등에 영향을 끼치는 매우 중요한 연소 인자이다.²⁻⁶⁾ 따라서 가솔린 HCCI 연소가 적절한 시점에서 일어나도록 정밀한 제어가 필요하며, 착화시점을 제어하기 위해서는 착화시점 검출이 선행되어야 한다.

이 연구는 가솔린 HCCI 연소의 착화시점 검출 방법을 설명한다. 이 방법은 실린더 연소압과 모터링 압력의 차를 활용하는 방법으로, 엔진의 운전조건과 상관없이 모든 연소 연소과정을 표준화하여 나타내는 정규 압력차를 사용한다. 정규 압력차가 0.5에 도달할 때의 크랭크 각도인 CA_{NDP0.5}은 연료 분사 시점, 잔류가스비율, 실린더 온도와 엔진 부하의 운전 조건에 독립적이며 착화시점과 엔진 속도에 의하여 결정되므로, CA_{NDP0.5}으로부터 HCCI 연소의 착화시점을 검출할 수 있다. 이러한 착화시점 검출 방법은 기존의 열발생율(heat release) 분석을 이용하여 착화시점을 검출하는 방법이나 knock integral model과 같이 착화시점을 예측하는 방법과 비교하여 복잡한 계산을 요구하지 않으므로 빠르고 정확한 착화시점 검출이 가능할 뿐만 아니라, 실시간 제어기에 구현이 용이하다.

2. 가솔린 균일 예혼합 압축착화 연소 실험

2.1 가솔린 HCCI 엔진

착화시점 검출 방법을 검증하기 위하여 가솔린 HCCI 연소 실험을 하였다. 실험에 사용된 엔진은 500cc 단기통 직분사 엔진이며, HCCI 연소가 가능하도록 작동각이 60도인 유압식 CVVT(continuous variable valve timing) 기구와 BMW의 Valvetronic을 흡배기 밸브 시스템에 장착하였다. 시험엔진의 사양은 Table 1에 나타나 있다.

2.2 실험 조건

가솔린 착화시점 검출방법을 검증하기 위한 실험

Table 1 Specification of the test engine

Description	Specification
Engine type	DOHC with CVVT and CVVL
Number of cylinder	1
Bore × Stroke	86 mm × 86 mm
displacement	499.54cc
Compression ratio	11.5

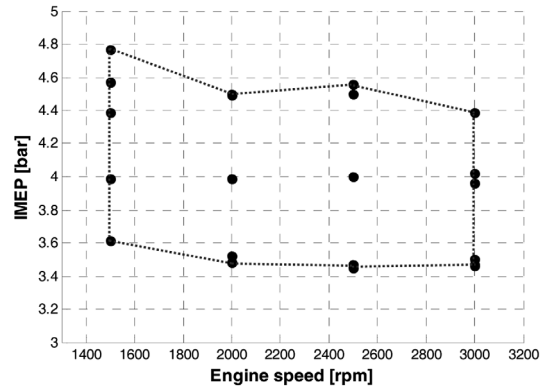


Fig. 1 Operation range of gasoline HCCI combustion

을 가솔린 HCCI 연소 구간 내의 정상 상태에서 시행하였다. Fig. 1은 엔진 부하와 엔진 속도의 실험조건을 나타낸다. 각 실험조건에서 가솔린 HCCI 연소를 안정적으로 유지하기 위하여 엔진 부하와 엔진 속도 외의 운전조건인 연료분사시기, 흡배기 밸브 타이밍, 공연비를 각각 조정하였다.

흡배기 밸브 타이밍은 밸브 열림각(opening duration)을 일정하게 유지하면서 TDC를 기준으로 대칭으로 조정하였으며, negative valve overlap은 144 ~ 170°CA(crank angle), 연료분사시점은 ATDC 310 ~ 450°CA, 공기과잉율(lambda)은 1.09 ~ 1.26 구간에서 변화시켰다. 이 때, 잔류가스비율은 46%에서 57%, 착화시점은 ATDC -10.1 ~ 0.14 °CA 사이에서 변화였다.

또한 가솔린 HCCI 연소의 착화시점을 결정하기 위하여 실린더에 압력 센서를 설치하였다. 실린더 압력은 크랭크 각 1도마다 측정하였으며, 각 실험조건에 대한 실험 데이터는 100 사이클 평균값을 기록하였다.

이 외에 추가로 실린더에 분사된 연료량, 공연비, 배기 온도를 측정하였다.

3. 가솔린 균일 예혼합 압축착화 엔진의 착화시점 검출

가솔린 균일 예혼합 압축착화(gasoline HCCI) 연소에서 착화시점은 매우 중요한 인자이지만, HCCI 연소의 자발화 특성으로 인하여 착화시점을 검출하기가 쉽지 않다. 그러나 가솔린 HCCI 연소가 압축착화라는 점에서 디젤 연소와 착화 방식이 동일하므로, 디젤 엔진의 착화시점 검출 방법을 가솔린 압축착화 연소에 적용하여 보았다.

이 장에서는 열발생을 분석을 통하여 착화시점을 결정하고, 실린더의 연소압과 모터링압력의 차이인 DP(difference pressure, 압력차)를 이용하여 착화시점 검출하는 방법을 제안한다. 착화시점은 실린더 내에 분사된 연료의 질량이 1% 연소되었을 때의 크랭크 각으로 정의한다.⁷⁾

3.1 압력차를 이용한 착화 시점 검출

3.1.1 선행 연구

HCCI 연소의 착화시점을 예측하는 방법으로는 temperature threshold 방법과 knock integral model이 있다. Temperature threshold 방법은 일반적으로 실린더의 온도가 1000 °K에 도달하였을 때 HCCI 연소가 일어난다는 사실을 이용하는 방법으로⁸⁾ 비교적 간단하나, 실린더 온도를 직접적으로 측정할 수 없다는 것과 운전조건에 따라 변하는 착화시점을 정확히 예측할 수 없는 단점이 있다. Knock integral model(KIM)은 균일한 혼합기에서 자발화 시점을 예측하기 위하여 Livengood과 Wu가 제안한 방법이다.⁹⁾ KIM은 비교적 정확하게 HCCI 연소의 착화시점을 예측할 수 있으나, 상당히 많은 계산량을 요구하므로 착화시점을 예측하는데 있어 실시간 제어기에 적용하기 어렵다.¹⁰⁻¹²⁾ 따라서 제어기에 계산 부하와 착화시점에 대한 연소 인자들의 불확실성을 최소화할 수 있는 착화시점 검출 방법이 필요하다.

이 외에 압축착화 엔진에서 착화시점을 검출하는 방법으로는 실린더의 연소압력을 이용하는 방법이 있다. Lee는 CRDI 디젤 엔진에서 착화시점을 실시간으로 검출하는 방법을 제안하였다.¹³⁾ 또한 Yoon은 Lee가 2000 rpm에서 검증한 착화시점 검출방법을 1500, 2000, 2500, 3000 rpm의 영역으로 확장하였

다.¹²⁾ 이 방법은 DP가 10 bar 주변에서 DP의 기울기가 커먼레일압력, 부스트 압력, 실린더에 분사된 연료량, SOE(start of energizing)에 대하여 거의 일정하며, 착화시점 검출 파라미터인 CA_{DP10}은 착화시점에 선형 관계에 있다는 사실을 이용한 것이다.¹⁴⁾ 여기에서 CA_{DP10}은 DP가 10 bar에 도달할 때의 크랭크 각도로 정의된다.

3.1.2 압력차를 이용한 가솔린 균일 예혼합 압축착화 연소의 착화시점 검출

앞에서 언급한 DP(difference pressure, 압력차)의 특성을 이용한 CRDI 디젤 엔진의 착화시점 검출방법을 가솔린 HCCI 연소에 적용하였다.

DP를 구하기 위한 모터링압력은 다음과 같이 계산하였다. 압축과정을 폴리트로픽 압축으로 가정하고 특정 크랭크 각도에서의 모터링압력은 다음과 같이 계산한다.

$$P_{mot}(\theta) = \left[\frac{V(\theta_{ref})}{V(\theta)} \right]^{\kappa} \times P(\theta_{ref}) \quad (1)$$

여기서 $P_{mot}(\theta)$ 은 크랭크 각이 θ [°CA]인 경우의 모터링 압력[bar], $P(\theta)$ 는 크랭크 각이 θ 일 때 연소 압력, $V(\theta)$ [L]는 크랭크 각도 θ 에 따른 실린더 내부 부피, κ 는 폴리트로픽 상수이며, 기준각도 θ_{ref} 는 실린더가 폴리트로픽 압축되고 있는 위치인 -50° ATDC이다.

착화시점 검출 파라미터인 CA_{DP10}을 각기 다른 운전조건(엔진 속도, 잔류가스비율, 엔진 부하, 공연비, 연료분사시기)에서 측정하였다.

Figs. 2~5은 1500, 2000, 2500, 3000 rpm에서 CA_{DP10}과 착화시점을 비교한 것이다. Figs. 2~5에서 볼 수 있듯이 착화시점과 CA_{DP10}의 관계는 선형이며, CA_{DP10}은 착화시점을 제외한 다른 운전 조건인 엔진 부하, 잔류가스비율, 연료분사시점 등에 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 각 엔진 회전속도에서 착화시점에 대한 검출지연각을 나타내는 것이다.

검출지연각(detection delay angle)이란 착화시점과 CA_{DP10}의 각도 차이로 정의된다. Fig. 6에서 보듯이 검출지연각은 엔진 부하, 잔류가스비율, 연료분사시점 등의 운전 조건에 상관없이 거의 일정하다.

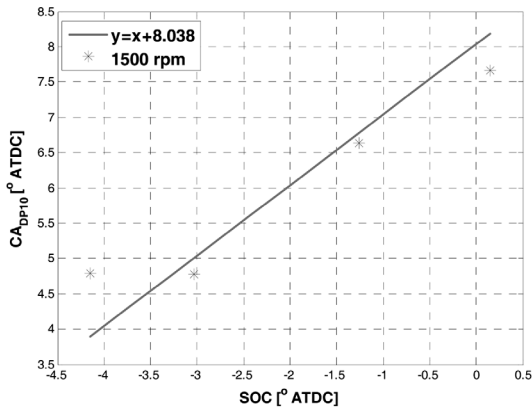


Fig. 2 Relationship between SOC and CA_{DP10} at 1500 rpm

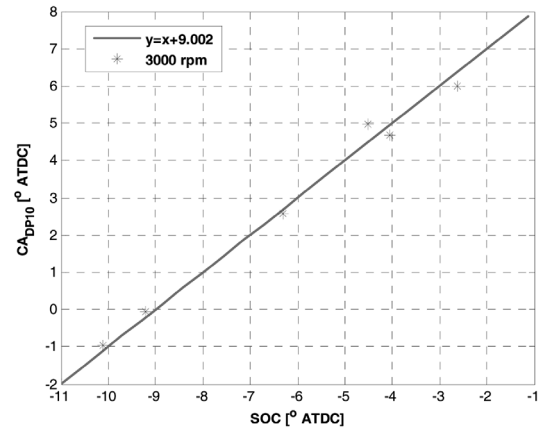


Fig. 5 Relationship between SOC and CA_{DP10} at 3000 rpm

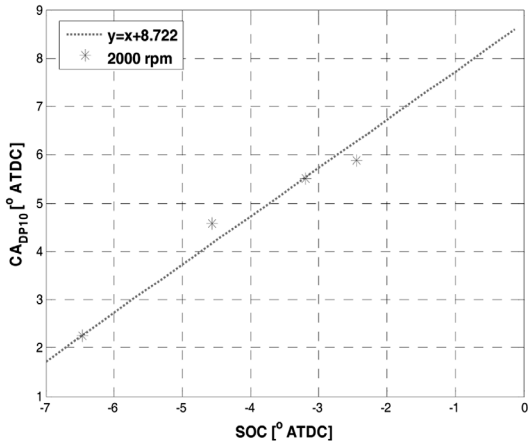


Fig. 3 Relationship between SOC and CA_{DP10} at 2000 rpm

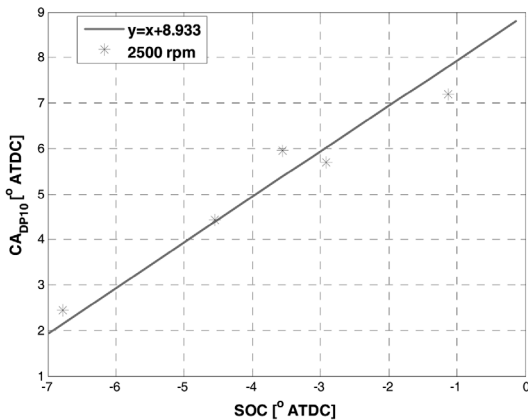


Fig. 4 Relationship between SOC and CA_{DP10} at 2500 rpm

이 경우 가솔린 HCCI 연소의 검출지연각은 약 8.67° CA이다. 즉 가솔린 HCCI 연소에서 압력차를 이용

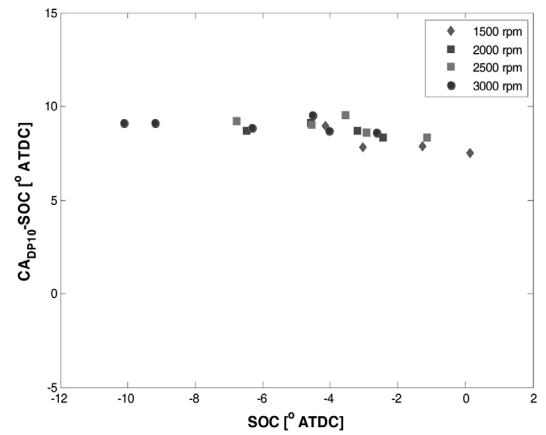


Fig. 6 SOC vs detection delay angle ($CA_{DP10}-SOC$)

한 간단한 방법으로 착화시점을 검출할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 CRDI 디젤 엔진의 결과와도 비슷하다.

따라서 HCCI 연소의 착화시점은 다음의 식으로 검출할 수 있다.

$$SOC = CA_{DP10} - \Delta CA_{DD} \quad [^\circ \text{ ATDC}] \quad (2)$$

$$\Delta CA_{DD} = -4.7178N^{-3.702} + 9.086 \quad [^\circ \text{ CA}] \quad (3)$$

where, $N = \frac{rpm}{1000}$

3.2 정규 압력차를 이용한 가솔린 균일 예혼합 압축착화 연소의 착화시점 검출

DP를 이용한 착화시점 검출 방법으로 가솔린

HCCI 연소의 착화시점을 검출이 가능하나, 개선되어야 할 사항이 있다. 그것은 가솔린 HCCI 연소에서 검출지연각의 편차가 CRDI 디젤 연소보다 크다는 것이다. DP를 이용한 방법은 DP의 상승 기울기가 10 bar 주변에서 모든 운전 조건에 상관없이 거의 일정하다는 사실로부터 유도한 것이다. 그러나 가솔린 HCCI 연소에서 각 엔진 사이클의 DP의 형태는 엔진의 운전 조건에 따라 CRDI 디젤엔진보다 변동이 크므로, 검출지연각의 편차가 커지게 된다. 검출지연각의 편차가 적을수록 정확한 착화시점 검출이 가능하므로 편차를 줄일 필요가 있다. 그러므로 검출지연각의 편차가 작으면서 압력 변수의 상승 기울기가 일정한 착화시점 검출 방법이 필요하다.

이것의 해결 방법으로 NDP(normalized difference pressure, 정규압력차)라는 새로운 압력변수를 제안한다. NDP는 한 사이클에서의 DP를 DP의 최대값으로 나눈 것으로 모든 사이클의 연소과정을 운전조건에 상관없이 정규화시킬 수 있으며, 모든 압력차를 0~1의 크기로 나타낼 수 있다.

$$NDP = \frac{DP}{\max(DP)} \quad (4)$$

가솔린 HCCI 연소의 착화시점을 검출하기 위하여, 정규 압력차의 threshold level을 설정하여야 한다. 압력 신호는 노이즈에 민감하므로 threshold level은 실린더의 압력 신호가 충분히 변한 위치나, 압력 신호의 반송파 대 잡음비(carrier to noise ratio)가 특정 수준을 초과한 위치로 선택하여야 한다. 이 연구에서는 정규 압력차의 중간 위치, 즉 0.5를 threshold level로 정하였다. 0.5의 threshold level은 착화시점과 연소 종료 시점의 중간 지점이며 연소가 충분히 진행되는 시점이기도 하다. 정규 압력차가 0.5에 도달할 때의 크랭크 각을 $CA_{NDP0.5}$ 로 정의한다.

CA_{DP10} 에 사용한 실험 데이터를 정규 압력차를 이용한 착화시점 검출 방법에 적용하였다. 각기 다른 19개의 운전조건(엔진 속도, 엔진 부하, 공연비, 잔류가스비율, 연료분사시기)에서 그에 상응하는 $CA_{NDP0.5}$ 과 착화시점을 측정하였다. Figs. 7~10은 각 엔진 속도 1500, 2000, 2500, 3000 rpm에서 착화시점과 $CA_{NDP0.5}$ 를 비교한 것이다. Figs. 7~10에서 볼 수 있듯이, 착화시점과 $CA_{NDP0.5}$ 의 관계는 선형이며 다

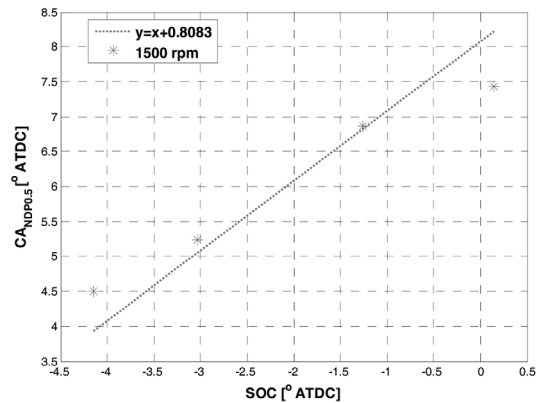


Fig. 7 Relationship between SOC and $CA_{NDP0.5}$ at 1500 rpm

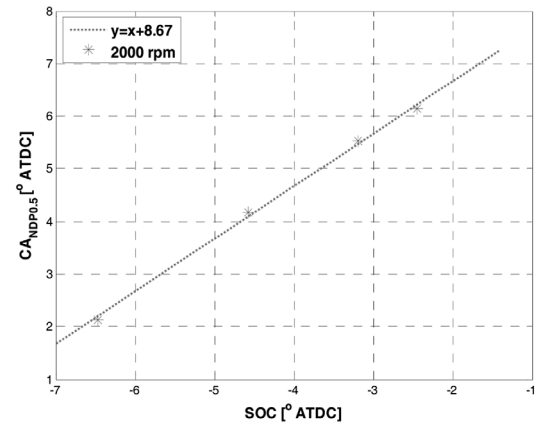


Fig. 8 Relationship between SOC and $CA_{NDP0.5}$ at 2000 rpm

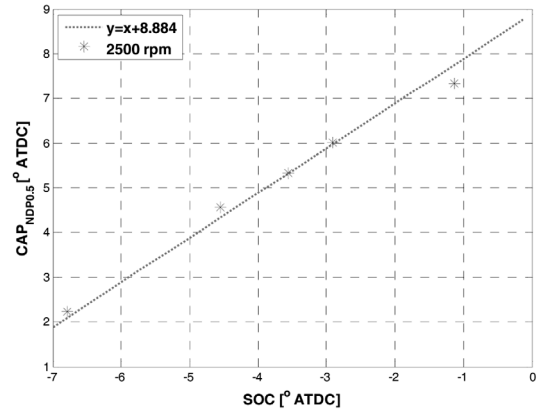


Fig. 9 Relationship between SOC and $CA_{NDP0.5}$ at 2500 rpm

른 운전 조건인 엔진 부하, 연료 분사 시기, 잔류가스비율에 대하여 독립적이다.

Fig. 11은 각 엔진속도에서 착화시점에 대한 검출

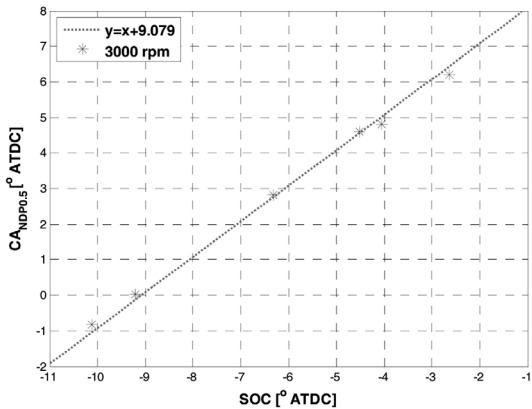


Fig. 10 Relationship between SOC and $CA_{NDP0.5}$ at 3000 rpm

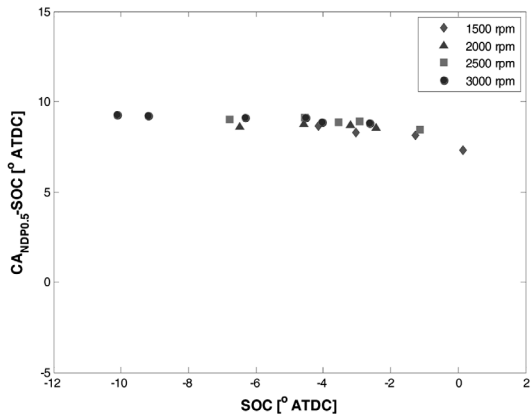


Fig. 11 SOC vs detection delay angle ($CA_{NDP0.5}$ -SOC)

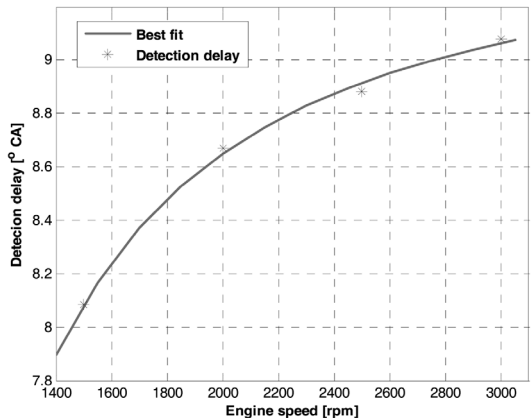


Fig. 12 Engine speed to detection delay angle

지연각을 나타내는 것이다. 여기에서 검출지연각은 착화시점과 $CA_{NDP0.5}$ 의 차이로 정의된다. Fig. 11에서 보듯이 $CA_{NDP0.5}$ 의 검출지연각은 엔진 부하, 잔류

가스비율, 연료분사시점, 공연비 등의 운전 조건에 상관없이 일정하다. 이때의 정규 압력차의 검출지연각은 약 $8.68^\circ CA$ 이다. 그리고 착화시점과 $CA_{NDP0.5}$ 의 각도차이인 검출지연각은 엔진 속도에 따라 변하며 엔진 속도의 함수이다(Fig. 12). 이것은 $CA_{NDP0.5}$ 로 가솔린 HCCI 연소의 착화시점을 검출할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 가솔린 HCCI 연소에서, 착화시점은 다음의 식으로 검출할 수 있다.

$$SOC = CA_{NDP0.5} - \Delta CA_{DD}(N) \quad [^\circ ATDC] \quad (5)$$

또한 엔진 속도와 검출지연각의 상관식은 다음과 같다.

$$\Delta CA_{DD}(N) = -2.889N^{-1.984} + 9.409 \quad [^\circ CA] \quad (6)$$

이 방법은 knock integral method와 같이 균일 예혼합 연소에서 착화시점을 예측하는 방법과는 달리 많은 계산량을 요구하지 않으므로 실시간 제어기에 구현하기 용의하다.

3.3 정규 압력차와 압력차를 이용한 가솔린 균일 예혼합 압축착화 연소의 착화시점 검출 방법의 비교

이 논문에서는 가솔린 HCCI 연소의 착화시점 검출 방법으로 DP(difference pressure, 압력차)와 NDP(normalized difference pressure, 정규압력차)를 이용하는 방법을 제시하였다. 이들 착화시점 검출 방법에서 검출지연각의 편차가 작을수록 정확한 착화시점 검출이 가능하다.

Fig. 6과 Fig. 11를 비교하면 $CA_{NDP0.5}$ 의 착화시점 편차가 CA_{DP10} 의 것보다 향상된 것을 알 수 있다. 이것은 정규 압력차를 이용한 HCCI 연소의 착화시점 검출 방법이 압력차를 이용한 방법보다 정확하다는 것을 뜻한다. $CA_{NDP0.5}$ 의 정규압력차 방법의 검출지연각의 표준 편차는 $0.47^\circ CA$ 로 압력차 방법과 비교하여 14.6% 향상되었다. Fig. 12와 Fig. 13은 정규압력차 방법과 압력차 방법의 회귀분석을 나타낸 것이다. SSE(sum of square error)는 오차 제곱의 합으로, SSE의 값이 0에 가까울수록 착화시점 검출의 오차가 작다는 것을 의미한다. R-square는 결정계수로 R-square의 값이 1에 가까울수록 착화시점 검출 방법이 정확하다는 것을 의미한다. Fig 13과 Fig. 14

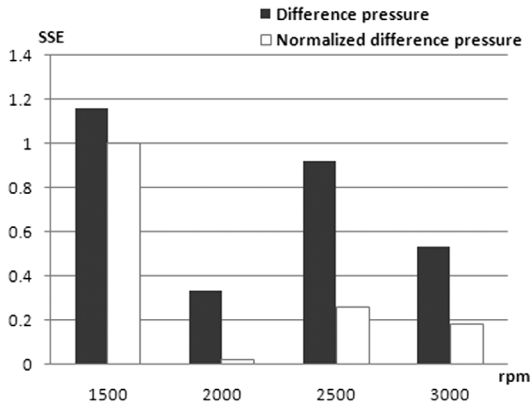


Fig. 13 SSE of CA_{NDP0.5} and CA_{DP10}

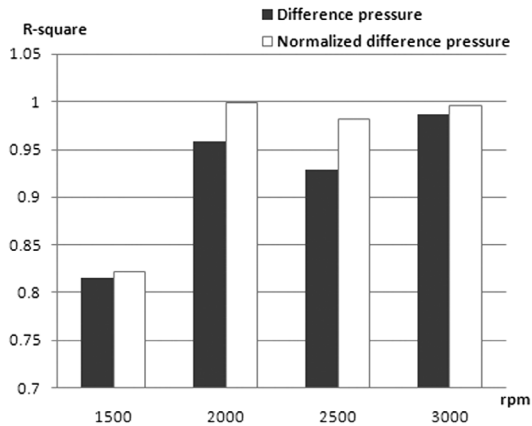


Fig. 14 R-square of CA_{NDP0.5} and CA_{DP10}

에서 볼 수 있듯이 정규압력차 방법의 SSE와 R-square의 값이 압력차 방법보다 모든 엔진 속도에서 향상된 것을 알 수 있다. 따라서 가솔린 HCCI 연소에서 정규압력차를 이용한 착화시점 검출 방법이 압력차를 이용하는 방법보다 착화시점을 정확하게 검출할 수 있다.

4. 결론

이 연구의 목적은 가솔린 균일 예혼합 압축착화 (gasoline HCCI) 엔진의 착화 시점을 개발하는 것이다. 가솔린 HCCI 연소는 압축착화라는 점에서 CRDI 디젤 연소와 착화방식이 동일하므로, CRDI 디젤 엔진에서 연소압과 모터링 압력의 압력차를 이용하여 착화시점을 검출하는 기술을 가솔린 HCCI 연소에 적용하여 보았다. 그러나 가솔린

HCCI 연소에서 검출지연각의 표준편차가 CRDI 디젤 엔진보다 크므로 정확하게 가솔린 HCCI 연소의 착화시점을 검출할 수 없다. 따라서 착화시점을 보다 정확하게 검출하기 위하여 정규압력차를 새로운 압력 변수로 제안하였다. 정규압력차를 이용한 착화시점 검출방법을 HCCI 연소 실험에 적용하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 착화시점 검출 파라미터인 CA_{NDP0.5}는 착화시점과 선형 관계에 있으며 다른 운전 조건인 엔진 부하, 연료 분사 시기, 잔류가스비율, 공연비에 독립적이다. 따라서 CA_{NDP0.5}는 가솔린 HCCI 연소의 착화시점 검출을 위한 변수로 적합하다.
- 2) CA_{NDP0.5}의 검출지연각의 표준 편차는 기존의 CA_{DP10}의 것보다 14.6% 감소하였으며, 각 엔진 속도에서 SSE와 R-square도 향상되었다.
- 3) CA_{NDP0.5}를 이용한 착화시점 검출 방법은 복잡한 계산을 요구하지 않으므로 간단한 압력차 조작으로 가솔린 HCCI 연소에서 빠르고 정확한 착화시점 검출이 가능할 뿐만 아니라, 실시간 제어기에 구현이 용이하다.

후 기

이 연구는 산업자원부 주관의 “자동차기반기술 개발사업” 과제의 일부로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- 1) F. Zhao, T. W. Asmus, D. N. Assanis, J. E. Dec, J. A. Eng and P. M. Najt, “Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines,” SAE, PT-94, p.3, 2003.
- 2) H. Zhao, K. Li, T. Ma and N. Ladommatos, “Performance and Analysis of a 4-Stroke Multi-Cylinder Gasoline Engine with HCCI Combustion,” SAE 2002-01-0420, 2002.
- 3) K. Swan, M. Shahbajhti and C. R. Koch, “Predicting Start of Combustion Using a Modified Knock Integral Method for an HCCI Engine,” SAE 2006-01-1086, 2006.
- 4) R. Standing, N. Kavian, T. Ma and H. Zhao, “Effect of Injection Timing and Valve Timings

- on CAI Operation in a Multi-Cylinder DI Gasoline Engine,” SAE 2005-01-0132, 2005.
- 5) K. Shin, K. Kwon, W. Lee and H. Kim, “Study on the Improvement in Fuel Economy of the Controlled Auto Ignition Engine with Mechanical Variable Valvetrain,” Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.36-41, 2006.
 - 6) A. Iijima, K. Yoshida, H. Shoji and J. T. Lee, “Analysis of HCCI Combustion Characteristics based on Experimentation and Simulation-influence of Fuel Octane Number and Internal EGR on Combustion,” Int. J. Automotive Technology, Vol.8, No.2, pp.137-147, 2007.
 - 7) M. B. Young, “Cyclic Dispersion - Some Quantitative Cause - and - Effect Relationships Sensors,” SAE 800459, 1980.
 - 8) J. Qin, H. Xie, Y. Zhang and H. Zhao, “A Combustion Heat Release Correlation for CAI Combustion Simulation in 4-Stroke Gasoline Engines,” SAE 2005-01-0183, 2005.
 - 9) J. C. Livengood and P. C. Wu, “Correlation of Autoignition Phenomena in Internal Combustion Engines and Rapid Compression Machines,” Fifth Symposium (International) on Combustion, 1955.
 - 10) G. M. Shaver, J. C. Gerdes, M. J. Roelle, P. A. Caton and C. F. Edwards, “Dynamic Modeling of Residual-Affected Homogeneous charge Compression Ignition Engines with Variable Valve Actuation,” Transactions of the ASME, 2005.
 - 11) G. M. Shaver, J. C. Gerdes, P. Jain, P. A. Caton and C. F. Edwards, “Modeling for Control of HCCI Engines,” IEEE Proceedings of the American Control Conference, 2003.
 - 12) G. M. Shaver, M. J. Roelle and J. Christian Gerdes, “Modeling Cycle-to-cycle Dynamics and Mode Transition in HCCI Engines with Variable Valve Actuation,” Science Direct, 2005.
 - 13) K. Y. Lee, “Closed-loop Control of SOC for Common-Rail Direct injection Diesel Engines,” Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Ph. D. Dissertation, 2005.
 - 14) M. Yoon, “Real-time Simulation and Control of Common-Rail Direct Injection Diesel Engines,” Hanyang University, Ph. D. Dissertation, 2006.