

## 낮은 엔진 부하의 운전조건에서 흡기포트 내 물 분사에 따른 가솔린 직접분사 엔진의 연소 특성

전해강\* · 이경환\*\* · 최명식\*\*\* · 박수한\*\*\*\*,†

### Combustion Characteristics of Gasoline Direct Injection Engine with Water Injection into Intake Port under Low Engine-Load Operating Condition

Haegwang Jeun, Kyung-Hwan Lee, Myungsik Choi and Suhan Park

**Key Words:** Water injection(물 분사), Gasoline direct injection engine(가솔린 직접 분사 엔진), BSFC(brake specific fuel consumption, 제동연료소비량), Engine torque(엔진부하)

#### Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of water injection on combustion characteristics of gasoline direct injection (GDI) engine with turbo-charger under low-load operating condition. The test engine used in this study has four-cylinder and 10.2 of compression ratio. In order to study the effect of water injection ratio on combustion characteristics, the water was injected into the intake port from 10% to 50%, based on fuel injection quantity. From the experiment, it revealed that the water injection induced the improvement of fuel economy because of the advance of spark-timing by the reduction of in-cylinder temperature. In addition, the water injection caused the prolong of extension of the ignition delay and slight increase of burn duration.

#### 1. 서 론

산업의 발전과 자동차 이용량의 증가로 많은 대기 오염물이 배출되어 대기 오염의 정도는 점차 심각해지고 있다. 대기오염물질 배출량 중 자동차를 포함한 수송 분야에서의 배출가스가 대기오염의 상당 부분을 차지하고 있기 때문에<sup>(1)</sup> 강력한 배기가스 규제가 시행되고 있으며, 점차 강화되고 있다. 이에 따라 강력해지는 배기가스 규제를 만족시키고 높은 출력과 우수한 연비 성능을

갖는 차량 및 엔진 기술들이 활발하게 연구되고 있다<sup>(2)</sup>.

연료를 흡기 포트에 분사하는 기존의 불꽃점화 방식 가솔린 엔진은 균일혼합기 조건의 연소 및 삼원촉매의 적용으로 압축 착화 방식의 디젤 엔진에 비해 매우 낮은 양의 유해물질을 배출하였다. 그러나 예혼합 연소의 단점인 이상연소현상(노킹)에 의해 디젤엔진 보다 낮은 압축비를 가지고 있어 열효율은 더 낮다. 또한 연료를 흡기 포트에 분사하는 방식은 흡기포트 내 연료 침착이 일어날 수 있으며 연료와 공기량의 정밀한 제어에 어려움이 있어 최고 출력의 약 80%정도 사용 할 수 있다. 이러한 단점인 가솔린엔진의 낮은 열효율을 향상시키기 위해 직접분사에 의한 엔진 연소 방식(gasoline direct injection, GDI) 및 고압 분사 적용, 과급기의 차용, 다운 사이징 등의 기술이 활발히 연구되고 있다. 특히 직접분사에 의한 엔진 연소 방식은 원천적으로 디젤엔진에 적용되고 있는 기술을 차용한 것이기에 가솔린엔진에 최

(Received: 13 June 2018, Received in revised form: 23 June 2018, Accepted: 24 June 2018)

\*전남대학교 대학원 기계공학과

\*\*순천대학교 기계우주항공공학부

\*\*\*현대자동차 선행가솔린엔진개발팀

\*\*\*\*교신저자, 전남대학교 기계공학부

E-mail : suhanpark@jnu.ac.kr

TEL : (062)530-1674

적화하는 연구에 관심이 가져지고 있다<sup>(3,4)</sup>.

한편, 오토사이클 (Otto cycle)을 기본으로 하고 있는 가솔린엔진의 열효율은 압축비에 비례하기 때문에 열효율 향상을 위해서는 압축비 증가가 필요하다. 그러나 엔진 연소 시스템의 변경 없이 압축비를 상승시킬 경우 연소실 내 온도 상승 등에 의해 노킹이 발생하게 된다. 일반적으로 노킹이 발생되면 점화시기를 강제 지각하게 되는데, 이는 엔진의 폭발 행정 시 효율을 떨어뜨리는 원인이 된다. 따라서 노킹이 발생하는 주요 원인인 실린더 내 온도상승을 억제시킬 수 있는 조치가 필요하며, 이를 위해 최근 흡기포트 또는 연소실 내에 증발 잠열이 높은 물을 분사하는 기술이 활발히 연구되고 있다. 흡기포트 또는 연소실 내에 물을 분사할 경우 실린더 내 온도 감소 및 노킹의 억제효과를 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다<sup>(5)</sup>. Wei Mingrui<sup>(6)</sup>는 전산해석을 통해 실린더에 물을 분사할 경우 NO<sub>x</sub>의 배출량을 34.6%까지 감소시키며 압축행정의 후반에서 실린더 내 온도를 크게 감소시켜 높은 압축비의 형태로 성능을 향상시킬

수 있다는 결과를 보고했으며, Cinzia Tornatore<sup>(7)</sup>는 흡기포트분사방식(port fuel injection, PFI) 엔진에 물을 분사하여 노킹이 발생하기 전까지 점화시기를 진각 시키면 연비를 6%~12%까지 향상시킬 수 있고, 배기가스 온도 및 배기 소음을 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

흡기 포트 내에 물을 분사 할 경우 물의 높은 기화잠열과 열용량에 의해 흡입 공기와 연소 가스의 온도 감소를 유도하여 연소실 내의 노킹 현상을 저감시킬 수 있으며, 점화시기의 진각을 유도할 수 있다. 이로 인해 압축비 증가를 통한 열효율 향상과 연비 및 출력 개선을 기대할 수 있다. 또한 연소실 내 온도가 낮아지기 때문에 NO<sub>x</sub>의 발생을 저감시킬 수 있다. Michele Battistoni<sup>(8)</sup>는 물 분사 적용에 대한 해석적 연구를 통해 물의 분사위치와 분시시기, 분무형상의 최적화를 통해 연소성능 개선이 필요하다고 보고하였다. 가솔린 엔진의 열효율 향상을 위한 물분사 적용에 관한 최근 연구를 Table 1에 정리하였다.

선행 연구에 따르면 고부하, 고속 조건에서 물 분사에 의한 연비증대 효과가 큰 것으로 보고되고 있으며, 이에 따라 많은 연구가 전부하(wide open throttle, WOT) 조건에서 이루어지고 있다. 또한 실제 엔진의 운전영역에서 분사시기와 분사량 등의 최적화를 위한 연구보다 물 분사의 효과만을 검증하는 연구가 주를 이루고 있다. 이러한 물 분사는 분사압력, 분사시기, 분사비율 등이 엔진의 운전 조건에서 최적화 되어야 하며 각각의 물 분사 특징이 엔진의 연소와 배기에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 실제 도심 등에서 운전 비율이 높은 저부하, 중·고속조건에서 물 분사 비율에 의한 직접분사식 가솔린 엔진의 연소 특성에 대한 연구를 수행하였다.

Table 1 Reviews on water-injection engine studies

참고 문헌	출판 연도	주요 실험 조건	주요 내용
10	2017	· 물·연료의 분사 비율	▶ 물 분사 비율 변화에 따른 연소 및 배기특성에 대한 전반적인 문헌조사.
11	2017	· 연료의 물성 · 물분사 여부	▶ 엔진 운전 속도별 WOT 조건에서 각 연료 및 물 분사에 따른 연소 성능. ▶ 고부하 조건에서 물 분사 효과 증가 보고.
12	2017	· 노킹 영역에서의 물 분사 비율 · 점화 진각	▶ 물 분사시 노킹 억제가 가능하고 열효율 향상으로 인한 터보부스트량 감소. ▶ 고부하에서 물 분사 비율을 증가시킬 경우 MBT 영역에서 엔진 운전을 가능케 함.
13	2017	· 엔진 속도 · 점화 진각 · 물분사비율	▶ 중고속에서 IMEP의 증가, 고속에서는 불안정한 연소위상으로 IMEP 감소. ▶ 점화 진각으로 얻은 효율 증가의 이점이 연소기간의 증가로 약간 상쇄.
14	2017	· 물분사시기 · 분사압력 · 압축비	▶ 물 분사는 압축비를 높일 수 있으며 밀러 사이클 적용을 통해 연비 향상을 시킬 수 있음. ▶ 물의 보충 없이 더 넓은 엔진 운전 영역에서 사용하려면 압축비를 높이지 않는 것이 유리.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 엔진은 터보과급기를 장착한 2.0 리터 배기량의 가솔린 엔진을 기본으로 하였으며, 물 분사 인젝터는 흡기포트에 설치하였다. 실험 엔진의 주요 제원은 Table 1에 나타내었다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 엔진과 연소 및 배기 측정 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 엔진의 속도와 토크는 330 kW급 AC동력계(Schneider INDY, AVL)로 제어하였으며, 연소 특성 파악과 피스톤의 상사점을 검출하기 위해 AVL社의

IndiMicro와 Vehicle Interface를 사용하였으며, 연소 압력은 점화플러그 일체형 압력센서(6115BFD35, Kistler)로 측정하였다. 또한 연료 유량 측정은 연료유량계(753S, AVL)를 이용하였으며, 연료의 온도는 연료온도 제어기(753C, AVL)를 이용하여 26°C로 일정하게 유지하였다. 냉각수 온도는 냉각수 온도 제어기(ConsysCool, AVL)로 실험조건에 맞추어 제어 하였다.

흡기 포트 내 물을 공급하기 위해 흡기 매니폴드를 가공하여 12홀 저압 인젝터를 설치하였으며, 인젝터의 제어는 MOTEC 社의 M800 ECU(electric control unit)를 사용하였다. 물 분사용 저압 인젝터는 엔진 ECU의 캠각도 신호와 크랭크 각도 신호를 이용하여 동기화 후 분사량과 분사시기를 제어 할 수 있게 하였다. 물은 질소로 가압된 사이폰 탱크로부터 공급되었으며, 물 분사 압력은 질소로 조절하였다. NO<sub>x</sub> 등의 배기가스는 배기가스 분석계(MEXA-9100, HORIBA)를 이용하여 측정하였으며 샘플가스의 취득은 삼원촉매에 의한 정확도를 피하기 위해 삼원촉매의 전단을 가공하여 취득하였다.

2.2 실험 조건 및 방법

물 분사에 따른 엔진의 연소 및 배기 특성을 파악하기 위한 실험조건은 Table 2에 나타내었다. 실험은 물 분사비율의 변화에 따라 각 조건에서 엔진 부하를 고정한 후 실험을 진행하였다. 일반적으로 가솔린 엔진은 부하가 증가 할수록 노킹의 방지를 위해 점화시기를 지각시키게 된다. 본 연구에서는 물을 분사 시 같은 부하 조건에서 점화시기의 지각 정도를 알아보기 위해 부하를 고정하고 실험을 수행하였다.

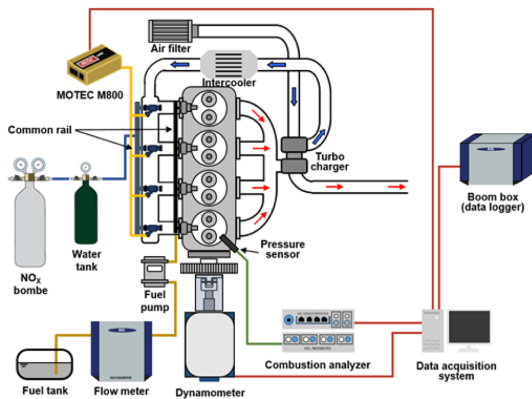


Fig. 1 Schematic diagram of experimental devices including test engine

Table 2 Specifications of test engine

Description	Specification
Number of cylinders	4
Displacement	1998cc
Bore × Stroke	86 mm × 86 mm
Compression ratio	10.2
Fuel injection system	Direct injection
Valve system	VVT
Maximum power	180.2 kW at 6,000 rpm
Maximum torque	36 kg × m at 4,000 rpm

3. 실험 결과 및 고찰

Figure 2는 낮은 부하 운전 조건에서 물 분사비율 변화에 따른 연비 변화특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 엔진 속도에서의 연비는 물을 분사하지 않았을 때 보다 분사하였을 경우 연비가 향상됨을 알 수 있으며, 물의 분사비율이 증가 할수록 연비는 오히려 저감됨을 확인하였다. 연비는 최대 1.8%(3000rpm)까지 향상되었다. 물 분사에 따라 연비가 향상되는 이유는 물을 분사할수록 점화시기가 최대토크가 나타나는 점화시기(MBT, Maximum spark advance for best torque)에 가까워졌기 때문이다. 엔진의 회전속도가 증가 할 경우 해당 조건에서 노킹이 발생하는 점화시기(DBL, Detonation boarder line)가 MBT보다 지각되어 나타나기 때문에 점화시기를 진각시켜 최적연소를 이루고자 하더라도 노킹에 발생하여 불가능하기 때문이다. 그러나

Table 3 Experimental conditions

Parameter	Conditions
Fuel	Gasoline
Engine speed (rpm)	2000, 3000, 4000
Engine Torque (Nm)	110
Water injection ratio (%)	10,15,20,25,30,40,50
Water injection pressure (Bar)	7
Water injection time (IVO+°)	0
Intake air temperature (°C)	25
Coolant temperature (°C)	85
Equivalence ratio (λ)	1

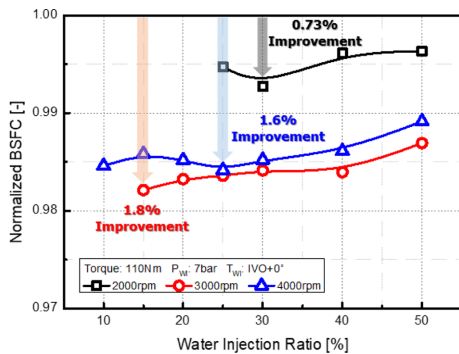


Fig. 2 Normalized BSFC characteristics regarding to water injection ratio at different engine speed conditions

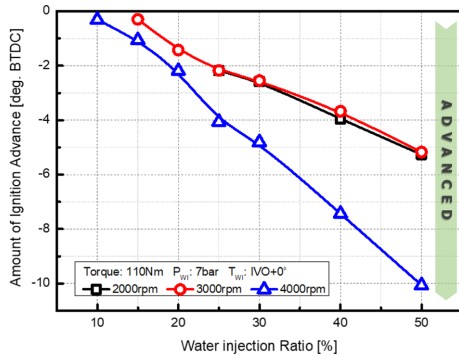
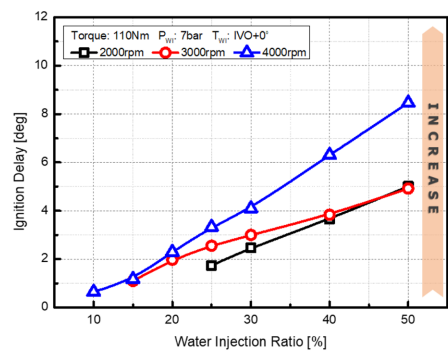


Fig. 3 Amount of advanced of ignition timing by water injection ratio

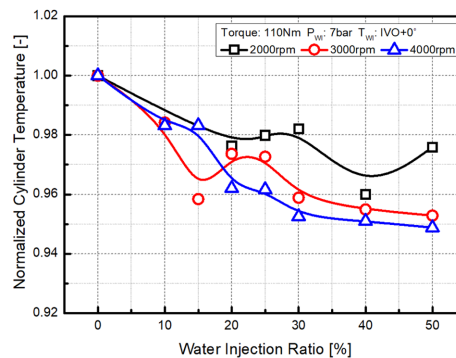
흡기 포트 내 물을 분사할 경우 DBL의 위치 이동에 의해 연소 개선이 가능하다. 물을 분사하여 실린더 온도를 저감시킬 경우 DBL은 MBT에 근접하거나 MBT보다 더 앞으로 위치시킬 수 있다. 한편, 물 분사비율이 점차 증가함에 따라 연비는 다시 낮아지는 것을 확인하였다.

Figure 3은 물 분사 비율 증가에 따른 각 엔진 회전속도에서 점화시기의 상대적 진각 정도를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 물 분사의 적용으로 노킹의 발생없이 점화시기를 진각 할 수 있음을 확인할 수 있었다. 점화시기 진각은 물 분사율 50%에서 최대 10도(4000 rpm), 최소 5도(2000 rpm)까지 점화시기를 진각시킬 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 점화시기 진각으로 연소실 내 최고압력 발생 시기를 MBT에 근접시킬 수 있어 연비 향상에 기여할 수 있다.

Figure 4는 점화 지연 시간과 최고 연소 압력 지점에서의 연소실 온도를 나타낸 그래프 이다. 점화 지연은 점화시기부터 CA10(누적 열발생량이 총 열 발생량의 10%



(a) Ignition delay

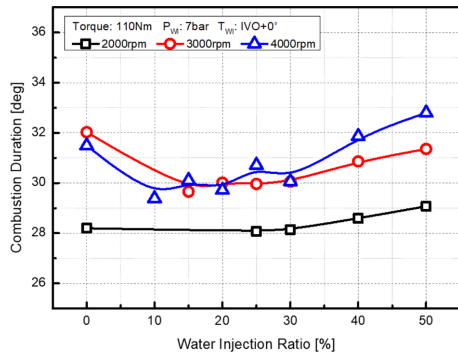


(b) Normalized cylinder temperature

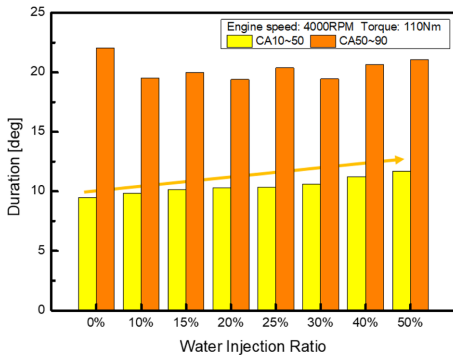
Fig. 4 Ignition delay and cylinder temperature on water injection

에 도달하는 지점)까지이며 연소실 온도는 이상기체 방정식을 이용하여 온도가 압력과 체적의 곱에 비례하는 것으로 계산하였으며, 물 분사를 하지 않은 조건에 대한 상대 온도값을 표시하였다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 점화 지연 시간은 물의 분사 비율이 높아질수록 모든 엔진속도 조건에서 길어졌다. 이는 점화 지연 시간에 영향을 끼치는 연소실 내 온도의 저감 때문으로 판단된다. Fig. 4(b)에서 확인할 수 있듯이 같이 물의 분사 비율이 증가 할수록 연소실 내 최고 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 점화 지연 시간과 온도는 반비례관계를 가지고 있으며<sup>9)</sup>, 아레니우스 식의 형태로 표시되는 점화 지연 시간은 온도가 높을수록 반응속도상수가 높아진다. 물을 분사할 경우 실린더 내부의 온도는 감소하게 되고 그에 따라 반응속도가 느려져 발화점까지 도달하는 시간이 길어지게 되고 결국 점화 지연 시간이 증가하게 된다.

Figure 5은 물 분사에 따른 연소시간의 변화와 엔진속도 4000 rpm에서의 CA10~50, CA50~90의 특성을 나타낸 것이다. 연소시간은 총 누적 열 발생량의 10%와 90%에 해당하는 누적 열발생량이 발생한 지점들 사이



(a) Combustion duration



(b) CA10~50 & CA50~90

Fig. 5 Effects of water injection ratio on combustion duration, CA10~50 / CA50~90

의 기간을 연소기간이라 정의하였다. 연소기간은 물 분사 시 감소한 후, 물 분사 비율의 증가와 함께 연소기간도 점차 길어지는 것을 확인할 수 있었다. 연소기간의 증가는 최소 1도(2000 rpm)에서 3.4도(4000 rpm)로 엔진속도가 높아질수록 연소기간의 증가폭은 커졌다. 점화지연과 마찬가지로 연소기간 또한 물의 증발에 의한 열 흡수로 인해 증가하는 것으로 판단된다. 이는 점화지연 기간의 증가와 CA10~50 구간의 증가를 통해 알 수 있다.

Figure 5(b)는 4000 rpm에서 CA10~CA50, CA50~CA90 연소기간을 나타낸 것이다. 물 분사비율이 증가함에 따라 CA10~CA50 연소기간은 점진적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 물 분사로 인해 연소 전 연소실 내 온도가 낮아져, 초기 연소의 증가에 영향을 준 것으로 판단할 수 있다. 반면, CA50~90의 구간은 물 분사에 의한 연소특성이 뚜렷하지 않았으나, 전체적인 연소기간 증감의 형태와 유사한 것으로 보아, CA50~CA90 연소기간 특성이 전체 연소기간에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 이에 대한 심화 연구가 필요 할 것으로 판

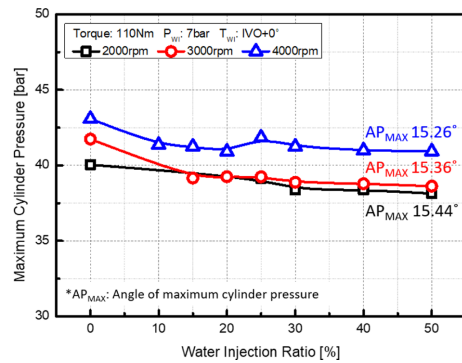


Fig. 6 Effects of water injection ratio on maximum cylinder pressure

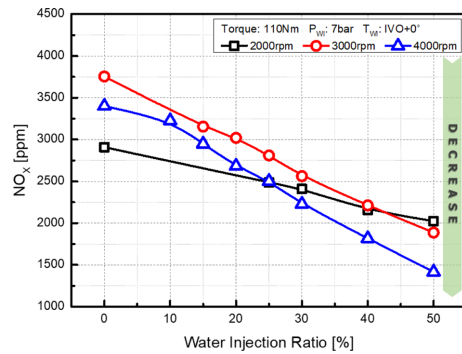


Fig. 7 Effects of water injection ratio on NO<sub>x</sub> production

단된다.

Figure 6은 물 분사 비율의 변화에 따른 최고 연소압력을 나타낸 그래프이다. 최고 연소압력이 나타나는 지점은 평균값으로 표기를 하였다. 이는 실험 조건인 110 Nm은 저부하 조건으로 물을 분사하지 않았을 때에도 노킹이 일어나는 점화시기가 최적 점화시기에 근접해 있어 통상적으로 연소가 잘 일어났다고 판단되는 최고 연소압력의 발생지점이 ATDC 15도에 나타날 때까지 진각 시켰기 때문에 그 차이는 크지 않아 평균값으로 표기하였다. 최고 연소압력은 물의 분사비율이 증가할수록 지속적으로 감소한다. 이는 연비의 개선(Fig. 2 참고)으로 인한 총 열량의 감소와 물 분사에 의한 연소실 온도감소(Fig. 4(b) 참고) 때문으로 판단된다.

Figure 7은 다양한 엔진 속도 조건에서 물 분사에 따른 질소산화물 배출특성을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 물 분사 비율의 증가에 따라 엔진속도와 관계없이 질소산화물 배출량은 대체로 감소하는 것을 확인하였다. 이것은 물의 분사 비율이 증가함에 따라 물의

증발에 따른 연소실 내의 온도 감소와 연비 향상에 따른 사용 연료의 감소가 질소산화물의 생성량 저감에 영향을 주었기 때문에 판단된다. 질소산화물의 생성량은 최대 66%(4000 rpm)까지 감소하는 것을 확인 하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 직접분사식 가솔린엔진의 저부하 운전 영역에서 흡기 포트 내 물 분사에 따른 연소 특성을 실험적으로 분석하고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 물을 흡기 매니폴드에 분사할 경우 물의 증발 잠열에 의해 실린더 내부의 온도가 감소하고, 노킹 저항력이 증가하여 물을 분사하지 않았을 때 보다 점화시기를 진각 시켜 점화시기를 최적 연소 지점에 위치시킬 수 있다. 따라서 동일 토크를 생성하기 위해 필요한 연료량이 감소하여 연비는 향상된다.

(2) 물 분사 시 물의 증발현상으로 인하여 연소실 내 온도는 낮아지며, 점화지연기간 및 연소기간은 증가한다.

(3) 물 분사 시 물의 증발현상에 의한 연소실 온도 감소로 질소산화물의 배출을 상당히 저감할 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 현대자동차의 산학협동연구, 한국연구재단의 지역대학우수과학자지원사업(2016R1D1A3 B03935537)과 기초연구실지원사업(2015R1A4A1041 746)의 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- (1) J. Kim, Y. Jang, S. Choi, J. Kim, C. Seo and J. Son, "Estimation of gaseous hazardous air pollutants emission from vehicles", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 2013, pp. 1~9.
- (2) Y. D. Yoon, J. S. Lee, H. C. Kim and J. M. Cho, "Development of High Performance Gasoline Engine for Compact/Midsize Car", *KSAE Spring Conference Proceedings*, 2010, pp. 442~448.
- (3) J. Lee and Y. Lee, "The combustion and emission characteristics with increased fuel injection pressure in a gasoline direct injection engine", *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 22(1), 2017, pp. 1~7.
- (4) J. Park and S. Park, "Study on macroscopic spray and spray pattern characteristics of gasoline direct injection injector for the variation of injection pressure", *Journal of ILASS-Korea*, Vol.23(1), 2018, pp. 22~29.
- (5) T. Pauer, M. Frohnaier, J. Walther, P. Schenk, A. Hettinger and S. Kampmann, "Optimization of gasoline engines by water injection", *Internationales Wiener Motoren Symposium*, 2016.
- (6) W. Mingrui, N. T. Sa, R. F. Turkson and L. Jinping, "Water injection for higher engine performance and lower emissions", *Journal of the Energy Institute*, Vol.90(2), 2017, pp. 285~299.
- (7) C. Tornatore, D. Siano, L. Marchitto, A. Iacobacci, "Water injection: a technology to improve performance and emissions of downsized turbocharged spark ignited engines", *SAE International Journal of Engines*, Vol.10(5), 2017, pp. 2319~2329.
- (8) M. Battistoni, C. N. Grimaldi, V. Cruccolini and G. Discepoli, "Assessment of port water injection strategies to control knock in a GDI engine through multi-cycle CFD simulations", *SAE Technical Paper*, 2017-24-0034, 2017.
- (9) J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988, pp. 543.
- (10) A. Rohit, S. Satpathy, J. Choi and J. Hoard, "Literature survey of water injection benefits on boosted spark ignited engines", *SAE Technical Paper* 2017-01-0658, 2017.
- (11) J. Worm, J. Naber, J. Duncan, S. Barros, "Water injection as an enabler for increased efficiency at high-load in a direct injected, boosted SI Engine", *SAE International Journal of Engines*, Vol.10(3), 2017, pp. 951~958.
- (12) V. D. Bellis, F. Bozza, L. Teodosio, and G. Valentino, "Experimental and numerical study of the water injection to improve the fuel economy of a small size turbocharged SI engine", *SAE International Journal of Engines*, Vol.10(2), 2017, pp. 550~561.
- (13) A. Iacobacci, L. Marchitto, and G. Valentino, "Water injection to enhance performance and emissions of a turbocharged gasoline engine under high load condition", *SAE International Journal of Engines*, Vol. 10(3), 2017, pp. 928~937.
- (14) F. Hoppe, M. Thewes, J. Seibel, A. Balazs and J. Scharf, "Evaluation of the potential of water injection for gasoline engines", *SAE International Journal of Engines*, Vol.10(5), 2017, pp. 2500~2512.