

# DME 분사 시기 조절을 통한 수소-DME 부분 예혼합 압축착화 연소 제어

전지연\* · 배충식\*\*

## Combustion Control through the DME Injection Timing in the Hydrogen-DME Partially Premixed Compression Ignition Engine

Jeeyeon Jeon and Choongsik Bae

### ABSTRACT

Hydrogen-dimethyl ether(DME) partially premixed compression ignition(PCCI) engine combustion was investigated in a single cylinder compression ignition engine. Hydrogen and DME were used as low carbon alternative fuels to reduce green house gases and pollutant. Hydrogen was injected at the intake manifold with an injection pressure of 0.5 MPa at fixed injection timing, -210 °CA aTDC. DME was injected directly into the cylinder through the common-rail injection system at injection pressure of 30 MPa. DME injection timing was varied to find the optimum PCCI combustion to reduce CO, HC and NOx emissions. When DME was injected early, CO and HC emissions were high while NOx emission was low. As the DME injection was retarded, the CO and HC emissions were decreased due to high combustion efficiency. NOx emissions were increased due to the high in-cylinder temperature. When DME were injected at -30 °CA aTDC, reduction of HC, CO and NOx emissions was possible with high value of IMEP.

**Key Words** : Hydrogen, Dimethyl ether(DME), CO<sub>2</sub> reduction, Partially premixed charge compression ignition(PCCI)

### 기 호 설 명

$\gamma$  : Specific heat ratio  
P : Cylinder pressure  
V : Cylinder volume

$Q_{ch}$  : Fuel chemical energy release  
 $Q_{ht}$  : heat transfer energy

## 1. 서론

최근 에너지의 지속가능성이 화두가 되고 있다. 화석연료는 그 매장량이 한정되어 있고, 또한 특정 지역에 편중되어 매장되어 있기 때문에 수급 및 지속성에 많은 문제를 내포하고 있다는 단점이 있다. 또한 석유 매장량에 따른 유가 상승의 불안은 가중되고 있는 실정이며, 탄소계 연료의 사용으로 인한 온실가스 배출은 여전히 풀어야 할 과제로 남아 있다. 이에 따라 석유계 연료를 대체할 수 있는 친환경 대체 연료를 개발하고 이용하려는 노력은 세계 각국에서 활발히 진행되고 있다. 특히 대체 연료 중 고옥탄가 연료인 수소는 그 양이 거의 무한에 가깝고 연소 생성물이 물뿐

이라는 장점을 갖는다. 이에 가장 유망한 대체 연료 중 하나로 주목받고 있으며, 수소의 사용 방법 중 하나가 내연기관 내에서의 연소라 할 수 있겠다. 수소 내연기관은 기존 내연기관에 가솔린이나 디젤 대신 수소를 연료로 공급하는 것으로, 기존 엔진 기술에 접목하여 상대적으로 저렴한 개발 비용으로 수소를 이용할 수 있다[1,2].

최근 활발하게 연구되고 있는 청정 엔진 연소기술의 경향중 하나는 예혼합 압축착화방식이다. 압축착화 엔진은 매우 높은 효율을 나타내는 장점이 있으며, 승용디젤자동차에서부터 트럭, 선박에 이르기까지 응용될 수 있는 크기가 다양하므로 청정한 압축착화 방식 엔진 연구가 필요하다. 특히 예혼합 압축착화 방식은 낮은 연소온도로 인하여 압축착화 엔진의 가장 큰 문제점 중 하나로 지적되어 온 질소산화물 저감을

\* 한국과학기술원(KAIST)

† 연락저자, csbae@kaist.ac.kr

함께 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 예혼합 압축착화 방식에서는 연소상을 제어하기 어렵고 탄화수소와 일산화 탄소의 배출이 많다는 단점도 함께 존재한다[2,3]. 따라서 수소를 사용을 통하여 예혼합 압축착화를 구현한다면 예혼합 압축착화의 가장 큰 문제점 중 하나인 탄화수소와 일산화탄소 배출의 저감을 이룰 수 있을 것으로 예상된다.

수소는 자발화 온도가 매우 높은 연료로서 스파크점화 엔진 내에서의 연구는 활발하게 진행되고 있으나, 압축착화 방식에 도입하기에는 어려움이 따른다[5,6]. 수소 압축착화 엔진을 흡기 가열이나 과급없이 상용 디젤엔진 정도의 압축비를 사용하여 압축착화를 하려면, 보조 연료의 도입이 필요하다[7-11]. DME는 자화화 온도가 508 K 정도로 낮고 압축 착화성을 나타내는 세탄가가 55 이상으로 높아 압축착화 엔진의 착화제로 사용하기 용이하다[12]. 또한, 최근 DME를 수소저장매체로 이용하기 위한 연구가 주목받고 있다. DME의 수증기 개질 반응을 통하여 수소를 발생시켜 사용하는 연구이다. 이는 다른 수소 저장매체에 비하여 친환경적이고 저장과 취급이 용이한 것으로 알려져 있다. DME를 착화제로 사용할 경우, DME의 개질 반응을 통하여 수소를 공급하고 DME와 수소를 혼소하는 전략을 통하여 연료 혼소의 특성상 두 가지 연료를 공급해야 하는 불편함을 해소하는데도 도움이 될 것이다[13].

본 연구에서는 수소-DME 예혼합 압축착화 연소를 구현하여 예혼합 압축착화 방식의 가장 큰 문제점으로 지적되고 있는 연소상 제어와 일산화탄소 및 탄화

수소의 배출 문제를 해결할 수 있는 방향을 제시하고자 한다.

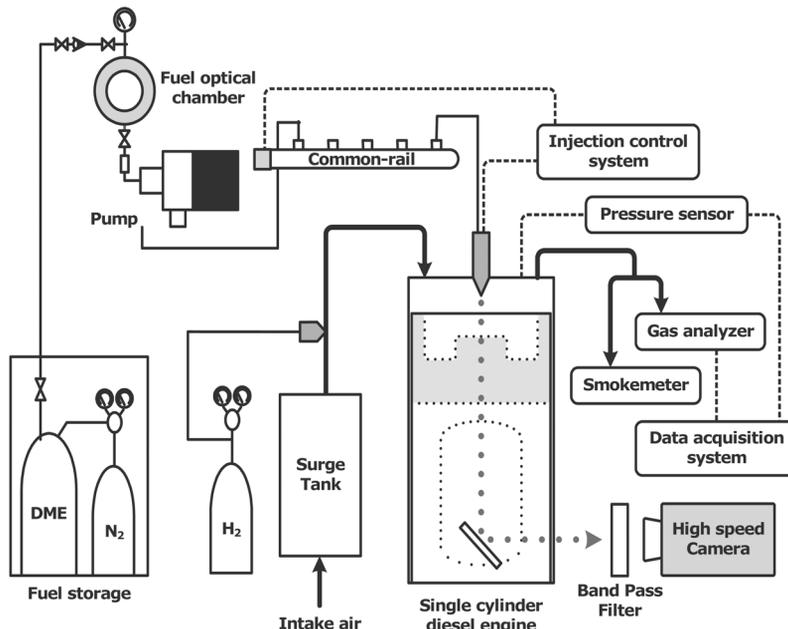
## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 실험 장치

수소-DME 압축착화 연소 실험을 위하여 커먼레일 분사 시스템을 장착한 직접 분사식 디젤 엔진을 사용하였다. 4기통 2리터의 배기량을 갖는 소형 디젤엔진을 연구의 목적에 맞게 단기통으로 개조하였다. 엔진의 보어는 83 mm, 행정 92 mm, 배기량 498 cm<sup>3</sup>이며, 압축비는 17.3 : 1이다. 자세한 엔진의 제원은 Table 1에 나타내었으며, 엔진의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

**Table 1.** Engine specifications

Specifications	Resources
Research engine type	Single-cylinder direct injection compression ignition engine
Valves per cylinder	4(2 intake and 2 exhaust)
Bore × Stroke	83 mm × 92 mm
Connecting rod length	145 mm
Displacement per cylinder	498 cm <sup>3</sup>
Intake valve timing	Open at 23 bTDC Close at 65 aBDC
Exhaust valve timing	Open at 75 bBDC Close at 45 aTDC



**Fig. 1** Experimental setup of single cylinder direct injection diesel engine.

동력계(dynamometer)는 단기통 엔진의 구동을 위해 엔진의 크랭크축에 연결하고 회전수를 제어하였다. 엔진의 크랭크축에 장치되어있는 엔코더(360 pulse/rev)의 신호를 이용하여 분사시기를 제어하였고 연료 분사량을 제어하기 위해 전용 분사기 구동 장치(TDA 3000H, TEMS Ltd)를 통하여 제어하였다. 연소로부터 배출되는 가스 중 HC, NO<sub>x</sub>, CO 등의 측정에는 배기 가스 분석장치(HORIBA Ltd., MEXA1500D)를 사용하였다. 이 장치는 각각의 배기 가스를 측정하는 장비들이 통합된 장치로, 각 성분들마다 다른 측정 원리가 적용된다. HC의 경우, HC가 연소될 때 배출되는 전자와 양이온의 배출로부터 탄소 원자수를 산출하는 화염이온화 감지법(FID; Flame Ionization Detector)을 사용하며, CO와 CO<sub>2</sub>는 비분산 적외선 흡수법(NIDR; Non-dispersive Infrared Absorption)을 이용한다. NO<sub>x</sub>는 화학발광법(CLD; Chemiluminescence Detection)을 이용하여 측정하였다.

사용된 연료는 수소와 DME이다. 99.999% 순도의 수소는 가압된 탱크에서 0.8 MPa의 압력으로 레귤레이터를 통하여 흡기관에 분사되었다. 분사기로는 수소용으로 개조한 상용 압축천연가스(CNG; Compressed Natural Gas)용 솔레노이드 타입 single hole 인젝터(Bosch)를 사용하였으며 분사기 구동장치를 제작하여 구동하였다. DME의 경우 99.9%의 순도를 가진 연료에, 낮은 점성 보안을 위한 윤활 향상제(Infinium R655)를 500 ppm 첨가하였다. DME는 상용 커먼레일 연료분사시스템을 통해 공급되었는데, 액상 공급을 위하여 외부에서 2 MPa로 가압하여 공압펌프로 공급되었고, 공압펌프로 압축하여 30 MPa의 압력으로 커먼레일 분사 시스템으로 공급되었다. 연료 분무에는 솔레노이드 타입의 상용 7 hole 디젤 인젝터(Bosch)를 사용하였고, 분사기 구동장치(TEMS Ltd., TDA 3200H)를 통하여 구동하였다. 분사압력, 분사량, 분사시기 등의 연료 분사 인자는 인젝터 제어 시스템(Zenobalti CO., IDU 5000B)을 통해 제어되었다.

## 2.2. 실험 방법

엔진 실험은 상온, 상압 조건에서 수행되었으며, 냉각수 온도와 같은 주변 조건은 일정하게 유지하였다. 실험 조건은 Table 2에 나타내었다. 사용된 연료는 DME와 수소이다. 흡입 공기는 303 ± 1 K으로 일정하게 유지시켜 흡입하였고 냉각수 온도는 353 ± 2 K로 일정하게 유지하였다.

수소-DME의 연소 제어와 배기 저감을 위하여, 수소를 0.8 MPa의 압력으로 포트에 분사하고, DME는 커먼레일을 통하여 실린더 내에 직접분사하는 방식을 채택하였다. 수소의 분사시기는 밸브 열림 시기에서, 피스톤 하사점 이전 가장 늦은 시기에 분사하여,

**Table 2.** Operating conditions

Fuel	H <sub>2</sub> + DME(with additive 500 ppm)	
Intake temperature	303 ± 1 K	
Coolant temperature	353 ± 2 K	
Engine speed	1200 rpm	
Fuel injection quantity	H <sub>2</sub>	2.16 mg(256 J)
	DME	5 mg(144 J)
Injection pressure	H <sub>2</sub>	0.8 MPa
	DME	30 MPa
Injection timing	H <sub>2</sub>	-210 °CA aTDC
	DME	-80~-5 °CA aTDC

수소의 누설 위험을 최소화 하였으며, DME의 분사시기는 적절한 연소 시기 제어를 위하여 -80~-5 °CA aTDC로 변경하는 전략을 사용하였다. 전체 연료 분사량은 각 연료의 발열량의 합으로 계산하여 400 J로 분사하였다.

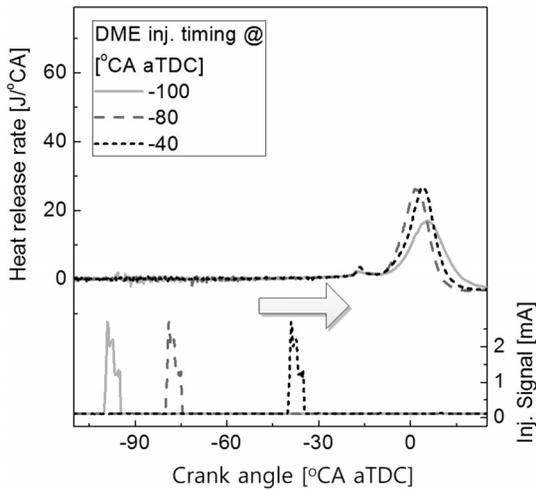
수소를 주 연료로 사용하고, DME를 착화제로 이용한 압축착화 엔진의 연소 해석은 압력 센서를 통해 측정된 실린더 내 압력으로부터 열방출량 분석(heat release analysis)을 통해 계산하였다. 틸사체적으로 엔탈피 변화와 연소실벽면으로의 열전달량을 고려하여 열역학 제 1법칙을 이용하여 식 (1)과 같이 계산하였다[14]. 열전달 모델은 Woschni의 모델을 사용하였다[15].

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{dQ_{ch}}{d\theta} - \frac{dQ_{ht}}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{1-\gamma} V \frac{dP}{d\theta} \quad (1)$$

## 3. 실험 결과

### 3.1. DME 분사시기에 따른 연소 특성

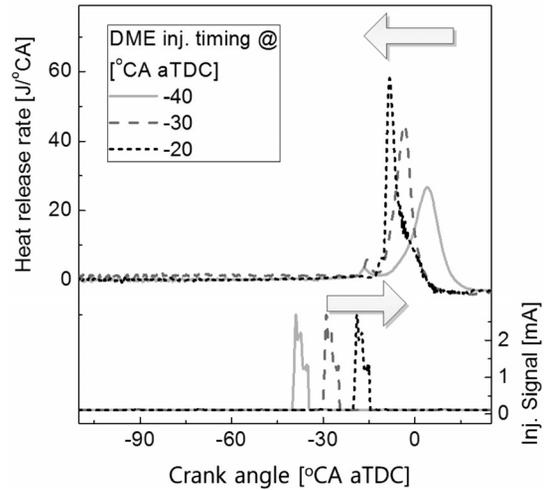
수소를 흡기관 내에 분사한 후 DME의 분사시기를 조절하면서 DME의 분사 시기에 따른 열 방출 특성을 살펴보았다. DME의 분사량은 5 mg으로 고정하였으며, 전체 분사된 연료의 발열량의 약 36.5%에 해당한다. DME의 분사량이 5 mg보다 작은 경우, 본 실험조건에서는 실화의 발생 빈도가 높아 실험이 제한되었다. 본 실험에서는 최소한의 탄소계 연료를 사용하여 엔진을 안정적으로 운전하기 위한 최소량인 DME 5 mg을 사용하였다. Fig. 2에서 4까지는 DME 분사 시기에 따른 열방출률 곡선 및 분사 신호를 나타낸다. 분사 시기는 아주 이른 시기인 -80 °CA aTDC부터 -5 °CA aTDC까지 변화시켰다. 각 그래프에 윗부분에 해당하는 것이 열 방출 곡선이며 아랫부분에 해당하는 것이 DME의 분사 신호이다. 분사 신호에 따른 열방출 경향은 크게 세 가지로 나눌 수 있으며 이



**Fig. 2.** Heat release rate and DME injection signal when DME is injected early, DME 5 mg, hydrogen 2.16 mg, DME injection timing at  $-80\sim-40$  °CA aTDC.

에 따라 각각의 그래프를 분리하였다. Fig. 2의 그래프는 DME의 분사시기가 이른  $-80$  °CA aTDC부터  $-40$  °CA aTDC의 경우에 해당한다. 이 그래프에서는 분사시기가 차례로 지각하고 있으나, 열방출 곡선의 연소상은 거의 일정함을 보인다. DME는 기화 특성이 좋은 연료이고, 실제로 상온, 상압 상태에서 기체이다. 따라서 DME가 엔진 연소실 내에 이른 시기에 분사된 경우 DME는 빠른 속도로 기화되며, 기화된 DME는 수소-공기 혼합기와 섞이게 된다. DME가 자발화하기 이른 시기에 분사되었으므로, DME가 충분히 균질화 된 혼합기를 형성할 시간이 존재하기 때문에 이 경우 엔진 내에는 균질화 된 연료-공기 혼합기가 형성되었다고 말할 수 있겠다. 특히 수소의 분사시기와 착화 연료인 DME의 분사시기 모두 매우 이른 경우이므로, 두 가지 연료를 동시에 사용한 예혼합 압축 착화 연소라 할 수 있다. 따라서 엔진 피스톤이 압축하면서 실린더 내 분위기 온도와 압력이 올라감에 따라 연료-공기 혼합기는 연소를 시작한다. 이때의 연소는 DME의 저온산화반응과 함께 시작되며 이 반응은 실린더 내 분위기 온도와 압력에 의하여 제어된다. DME의 분사 시기에 따라 조금 차이는 있겠으나, 분위기 온도와 압력에 따른 화학적 반응 속도에 따라 제어되는 본 경우에는 분사 시기에 따른 연소상의 변화가 크지 않다.

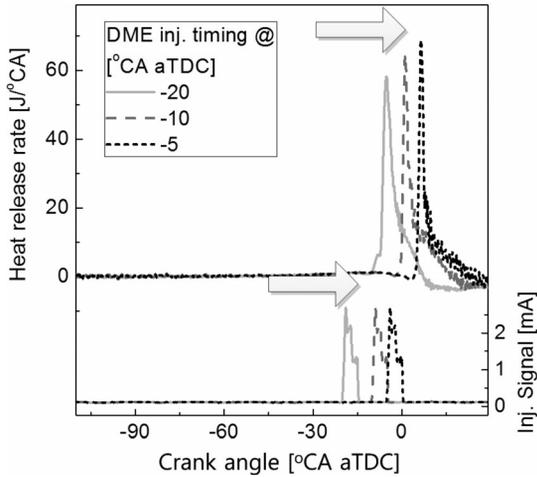
Fig. 3은 DME의 분사시기가  $-40$  °CA aTDC부터  $-20$  °CA aTDC까지 변화된 경우의 열방출 곡선을 나타낸다. DME의 분사 시기가 지각됨에 따라 열방출 곡선은 반대로 지각하고 있으며, 방출률이 높고 연소기간이 짧아지는 것을 볼 수 있다. DME의 분사시기가 지각함에 따라 혼합기는 매우 이른 시기 분사와 비



**Fig. 3.** Heat release rate and DME injection signal when DME is injected early, DME 5 mg, hydrogen 2.16 mg, DME injection timing at  $-40\sim-20$  °CA aTDC.

교하여 DME가 수소-공기의 혼합기와 충분히 섞일 시간이 적다. 따라서 DME의 분포는 Fig. 2에 비하여 성층화되어 있다고 볼 수 있다. DME의 분사량이 매우 적기 때문에 이 경우, DME의 기준으로 볼 때, 매우 희박한 구간부터 상대적으로 덜 희박하여 이론공연비에 비교적 가까운 구간까지 고르게 분포하게 된다. 이러한 현상은 DME의 분사 시기가 상사점 근처로 지각 될수록 커지게 되며, 더 성층화된 연료-공기 혼합기를 형성한다. 따라서 이 구간에서는 DME의 분사 시기가 지각된 경우 좀 더 잘 섞인 혼합기로 인하여 화학적 효과가 커지겠지만, DME가 잘 섞였기 때문에 전체적으로 희박한 구간이 상대적으로 많이 분포하여 연소의 시작이 지각된다. 반면 DME의 분사가 지각될 때에는 상대적으로 이론공연비에 가까워지는 구간이 많아지면서 연소가 앞당겨지게 된다. 수소는 DME의 연소와 함께 그 이후 연소하게 되므로, 전체 연료의 연소 또한 DME의 연소 시작에 의존한다. 따라서 좀 더 한꺼번에 많은 열방출이 가능한 DME의 연소가 지각된 경우가 더 한꺼번에 수소가 연소할 수 있는 환경을 만들게 되므로, 전체적인 연소 기간이 짧아지고 방출률이 높아지는 현상을 만든다. 이 때 착화제의 분사 시기는 상용 디젤연소보다는 이르지만 충분히 성층화된 혼합기를 만들 수 있는 PCCI(PCCI; partially premixed compression ignition) 구간이 된다.

Fig. 4는 DME의 분사시기가  $-20$  °CA aTDC부터  $-5$  °CA aTDC까지로 지각된 경우의 열방출 곡선을 나타내고 있다. 앞서 보인 두 경우와는 다르게 DME의 분사 시기가 뒤로 지각되면서 전체적인 연료의 연소 시작 또한 지각되고 있는 것을 볼 수 있다. 이 경우 DME가 분사되는 시기에는 이미 실린더 내 분위기 온



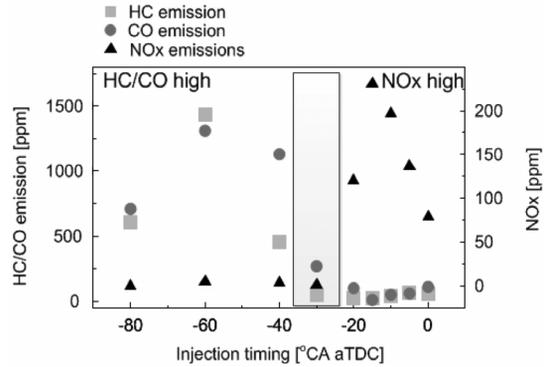
**Fig. 4.** Heat release rate and DME injection signal when DME is injected early, DME 5 mg, hydrogen 2.16 mg, DME injection timing at -20~-5 °CA aTDC.

도 및 압력은 충분히 높아 DME가 연소할 수 있는 조건이 형성되어 있다. 따라서 DME는 연료-공기 혼합기를 형성할 시간을 충분히 갖지 못한 채 잠깐의 착화 지연 후 급격한 산화 반응을 보이게 된다. 이 때 연소 열을 방출하게 되므로, 점화에너지가 작은 수소는 이와 함께 급격하게 함께 산화된다. 이에 따라 DME의 분사 시기가 매우 지각된 경우 분사 시기를 변경하면서 전체적인 연소상을 제어하기에 용이하다. 이 경우 전체적인 연소 시간의 차이는 크지 않고, DME 분사 시기 변화에 따라 연소 시작점, 연소 종료점이 순차적으로 변화하고 있다. 이 때 DME는 상용디젤연소를 보이는 구간에 분사되었다 볼 수 있다.

### 3.2. 분사 시기에 따른 배기 및 IMEP 특성

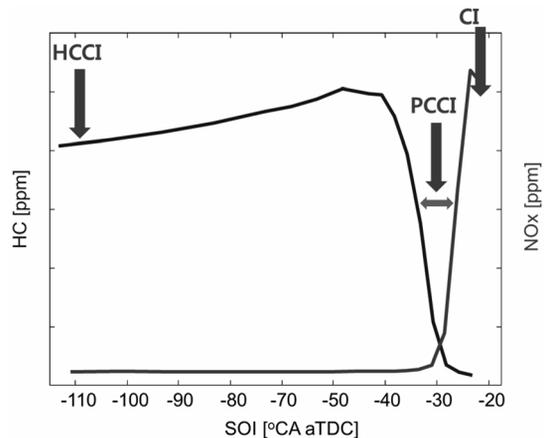
DME의 분사량을 5 mg으로 고정시키고, 분사시기를 -80 °CA aTDC에서 -5 °CA aTDC까지 변화시켰을 때의 질소 산화물, 일산화탄소, 탄화수소의 배기배출량의 변화를 나타낸다.

DME의 분사시기 변화에 따른 질소산화물 배기배출량의 변화를 보면, 질소산화물의 생성은 온도의 함수로 알려져 있으며, 온도가 높을수록 많은 양의 질소산화물을 생성한다. Fig. 5에서 각 분사시기 변화에 따른 질소산화물의 배출을 보면, 분사시기가 -30 °CA aTDC 이후부터 질소산화물의 배기배출이 증가하고 있음이 보인다. DME 분사시기에 따른 열방출률 곡선을 살펴보면, 이 분사시기에는 열방출률이 급격하고 빠른 시간에 연소가 일어나게 된다. 따라서 이로 인하여 압력의 상승도 빨라지며, 더 높은 온도에서 연소가 이뤄지게 되므로 질소산화물의 생성이 많아지게 된다. 각 조건에 따른 일산화탄소와 탄화수소의 배출



**Fig. 5.** HC, CO and NOx emissions depending on the DME injection timing, DME 5 mg, hydrogen 2.16 mg.

을 함께 살펴보면, 일산화탄소는 탄화수소가 산화된 후 이산화탄소로 산화되기 전 생성되는 불완전연소 생성물이다. 따라서 일산화탄소의 배출물이 적은 경우는 분사된 탄소의 양이 적거나 연소가 활발하게 일어나 연소 효율이 높은 경우이다. DME의 분사가 -30 °CA aTDC 이후에 일어난 경우는 일산화탄소의 배출량이 0 ppm에 가까웠으며, 이는 온전히 연소 효율에 기인한 것이라고 볼 수 있다. 탄화수소의 배기배출량은 일산화탄소의 배기배출량과 비슷한 경향을 갖는다. Fig. 6은 각 분사시간에 따른 연소 방법을 나타낸다. 본 연구에서도 일반적인 HCCI, PCCI, 상용디젤연소와 유사한 배기 경향을 보인다. DME를 이른 시기에 분사하게 되면 착화제의 희박 연소로 인하여 탄화수소 배출이 상당량 증가하고 낮은 연소온도로 인하여 질소산화물 배출이 낮은 HCCI구간이 나타난다. DME를 상사점 근처에서 분사한 경우의 배기특성은 탄화수소가 감소하고 질소산화물이 증가하는 경향을 나타낸다. 일반적으로 PCCI구간은 탄



**Fig. 6.** Introduction of PCCI (partially premixed compression ignition).

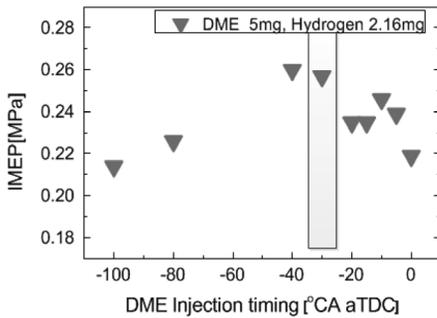


Fig. 7. Indicated mean effective pressure depending on the DME injection timing, DME 5 mg, hydrogen 2.16 mg.

화수소의 배출이 줄어들고 질소산화물의 배출이 증가하기 전 분사시기의 짧은 영역을 기반으로 하고 있다. 본 연구에서도 이러한 구간이 나타나며 매우 짧은 구간에서 나타난다. 특히 분사시기가  $-30^{\circ}\text{CA aTDC}$  인 경우에 두 가지 배기배출물이 동시에 가장 많이 저장된다. DME 분사량 변화 및 분사시기 변화에 따른 도시평균유효압력 변화를 Fig. 7에서 나타내었다. DME의 분사가 이른 시기로 진각된 경우, 5 mg의 DME는 매우 작은 양이며, 따라서 실린더 내에서 희박한 혼합기를 형성한다. 또한 수소로 인하여 DME의 저온 산화반응은 매우 억제된다[16]. 그러나 전체적으로 모두 DME가 희박한 영역으로 분포해 있는 경우 과산화수소의 생성이 많기 때문에, DME가 잘 섞이는  $-80^{\circ}\text{CA aTDC}$  이전 분사의 경우에는 DME로부터 과산화수소의 생성이 충분히 일어날 수 있다. 과산화수소의 생성은 수소의 자발 점화를 진각 시킨다고 알려져 있으므로, DME의 저온산화반응이 수소에 의하여 많이 억제되어도 DME와 수소는 함께 연소 가능하다[17]. 이후 DME의 분사 시기를 지각 시키면, DME는 비교적 높은 온도와 압력 조건에서 분사된다. 또한 국부적으로 이론 공연비에 가까운 영역을 생성하므로 저온 산화반응을 통하여 비교적 많은 열을 방출하기 때문에 생성된 저온산화반응열과 중간생성물을 생산과정을 거쳐 수소의 고온 산화반응으로 이어질 수 있다. 따라서,  $-40^{\circ}\text{CA aTDC}$  이후의 분사시기에 대하여, 비교적 안정적인 연소를 보이며 높은 IMEP값을 갖는다. 특히 앞서 보였던 일산화탄소, 탄화수소의 배기 배출과 함께 질소 산화물 생성 또한 적은 PCCI 연소 구간에서 높은 수준의 IMEP를 나타내고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수소 압축착화 엔진 구현에 있어서 가장 문제가 되는 자발화 특성을 보완하기 위하여

DME를 착화제로 선정하였다. DME는 기존 디젤연료에 비해 기화와 혼합이 용이하고 압축착화 특성이 우수하여 수소의 착화에 직접적인 영향을 주었다. DME의 다양한 분사 전략을 통하여 좀 더 효과적으로 수소 엔진을 구동하여 높은 출력과 낮은 배기를 얻고자 하였다. 또한 고옥탄 연료와 고세탄 연료의 동시 사용을 통하여, 두 연료의 연소시 생기는 화학적 메커니즘을 구명하고자 하였다. 이를 위하여 각각의 연료의 분사 시기를 제어 변수로 하여 엔진 운전에 미치는 영향을 살펴 보았으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

수소와 DME의 혼합 정도에 따른 연소 영향을 살펴보기 위하여 DME의 분사시기를  $-80^{\circ}\text{CA aTDC}$ 에서  $-5^{\circ}\text{CA aTDC}$ 까지 변화시켰다. 착화제 분사시기에 따른 수소 압축착화 엔진의 영향을 보면, 착화제의 예혼합기가 형성되는 이른 분사시기에는 희박한 예혼합기로 인하여 착화제의 저온 산화반응열이 낮았다. 이로 인하여 수소의 연소 또한 활발하지 않았다. 연소실 내 압축 행정 말기 착화제가 분사하는 경우에는 고온 고압 상태가 형성되어 있으므로, DME의 저온 산화반응과 함께 고온 산화반응이 일어나게 되며 이로 인하여 수소의 산화 또한 급격히 일어남을 알 수 있다.  $-30^{\circ}\text{CA aTDC}$  이후의 연소는 CO, HC의 배출이 줄었으며, 상사점 근처로 연소상이 미뤄져, 도시평균유효압력이 증가함을 보였다.

착화제의 분사 시기가 이른 경우, 즉 DME의 연소가 잘 일어나 탄화수소와 일산화탄소의 배출이 거의 없으나 연소온도가 높지 않아 질소산화물의 배출이 낮은 시기인  $-30^{\circ}\text{CA aTDC}$ 의 경우와 다른 분사시기 간의 배기, 출력 등의 결과를 비교한 결과 수소-DME 연소는 PCCI연소가 다른 분사 전략에 비하여 타당함을 보였다.

#### 후기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2010T100100440).

#### 참고문헌

- [1] Verhelst S, Wallner T, Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Int J Hydrogen Energy* 2009; 35: 490-527
- [2] White CM, Steeper RR, Lutz AE, The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review, *Int J Hydrogen Energy* 2006;32:1292-1305
- [3] Akagawa H, Miyamoto T, Harada A, Sasaki S, Shimazaki N, Hakeshi T, Approaches to solve pro-

- blems of the premixed lean diesel combustion control, SAE Technical Paper, 1999-01-0183, 1999, DOI: 10.4271/1999-01-0183
- [4] Kook S, Bae C, Combustion control using two-stage diesel fuel injection in a single-cylinder PCCI engine, SAE Technical Paper 2004-01-0938, 2004, DOI: 10.4271/2004-01-0938
- [5] Szwaja S, Grab-Rogalinski K, Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. *Int J Hydrogen Energy* 2009;24:4413-4421
- [6] Narioka Y, Yokoyama T, Lio S, Takagi Y, HCCI combustion characteristics of hydrogen and hydrogen-rich natural gas reformer supported by DME supplement. SAE Technical Paper, 2006-01-0628, 2006, DOI: 10.4271/2006-01-0628
- [7] Inagaki K, Fuyuto T, Nishikawa K, Nakakita K, Dual-fuel PCI combustion controlled by in-cylinder stratification, SAE Technical Paper 2006-01-0028, 2006, DOI: 10.4271/2006-01-0028
- [8] Shudo T, Ono Y, HCCI combustion of hydrogen, carbon monoxide and dimethyl ether, SAE Technical Paper, 2002-01-0112, 2002, DOI: 10.4271/2002-01-0112
- [9] Guo H, Hosseini V, Neill WS, Chippior WL, An experimental study on the effect of hydrogen enrichment on diesel fueled HCCI combustion. *Int J Hydrogen Energy* 2011;36:13820-13830
- [10] Yeom K, Jang J, Bae C, Homogeneous charge compression ignition of LPG and gasoline using variable valve timing in an engine, *Fuel*, 2007, Vol 86, No 4, pp 494-503
- [11] Yeom K, Bae C, Gasoline-di-methyl ether homogeneous charge compression ignition engine, *Energy and fuels*, 2007, Vol 21, No 4, pp1942-1949
- [12] Arcoumanis C, Bae C, Crookes R, Kinoshita E, The potential of di-methyl ether(DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: A review. *Fuel*, Vol 87, No 7, pp 1014-1030, 2008.
- [13] Park CH, Kim KS, Jun JW, Cho SY, Lee YK, Thermodynamic Analysis of DME Steam Reforming for Hydrogen Production, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, Vol. 20, No. 2, April 2009, 186-190, 186
- [14] Heywood JB, *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill (1998).
- [15] Woschni G, A Universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine. SAE Technical Paper 670931 1967, DOI: 10.4271/670931
- [16] Shudo T Yamada H, Hydrogen as an ignition-controlling agent for HCCI combustion engine by suppressing the low-temperature oxidation. *Int J of Hydrogen Energy* 2007;32:3066-3072
- [17] Imuta T, Hata R, Tsujimura T, Tokunaga Y, Senda J, Fujimoto H, Combustion method of diesel engine fueled with hydrogen for high efficiency, COMODIA 2008, FL1-2