

# 희박과급에 의한 수소 예혼합 압축착화 기관의 운전영역 확장에 관한 실험적 연구

안병호<sup>1</sup> · 이종구<sup>1</sup> · 이종민<sup>1</sup> · 이종태<sup>2†</sup>  
<sup>1</sup>성균관대학교 대학원, <sup>2</sup>성균관대학교 기계공학부

## An Experimental Study on Expansion of Operation Range by Lean Boosting for a HCCI H<sub>2</sub> Engine

BYUNGHOO AHN<sup>1</sup>, JONGGHO LEE<sup>1</sup>, JONGMIN LEE<sup>1</sup>, JONGTAI LEE<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Sungkyunkwan University, Sungkyunkwan University, 300, Chunchun-dong Janan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 440-746, Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 300, Chunchun-dong Janan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 440-746, Korea

**Abstract** >> Hydrogen engine with homogeneous charged compression ignition can achieve high efficiency by high compression ratio and rapid chemical reaction rates spatially. However, it needs to expansion of the operation range with over-all load conditions which is very narrow due to extremely high pressure rise rate. The adoption of the lean boosting in a HCCI H<sub>2</sub> engine is expected to be effective in expansion of operation range since minimum compression ratio for spontaneous ignition is decreased by low temperature combustion and increased surround in-cylinder pressure. In order to grasp its possibility by using lean boosting in the HCCI H<sub>2</sub> engine, compression ratio required for spontaneous ignition, expansion degree of the operation range and over-all engine performance are experimentally analyzed with the boosting pressure and supply energy.

As the results, it is found that minimum compression ratio for spontaneous ignition is down to the compression ratio( $\epsilon=19$ ) of conventional diesel engine due to decreased self-ignition temperature, and operation range is extended to 170% in term of the equivalence ratio and 12 times in term of the supply energy than that of naturally aspirated type. Though indicated thermal efficiency is decreased by reduced compression ratio, it is over at least 46%.

**Key words** : Hydrogen engine(수소기관), Homogeneous charged compression ignition(예혼합 압축착화), Lean boosting(희박과급), Operation range(운전영역), Minimum compression ratio for spontaneous ignition (착화가능 최소압축비)

### 1. 서 론

수소-공기 균질 희박혼합기를 압축착화 시키는 예

혼합 압축착화는 공간적인 자기착화에 의한 급속연소와 고압축비 사용에 의해 열효율을 획기적으로 증가시킬 수 있는 신연소기술의 하나이다. 하지만 수소의 자기착화온도가 높아 수소공기 예혼합기를 자기착화시키는데 요구되는 압축비는 자연흡기 및 냉시동 시 약  $\epsilon=32$  정도의 고압축비가 요구된다. 또한 수

<sup>†</sup>Corresponding author : jtlee@skku.edu

[ 접수일 : 2013.12.11 수정일 : 2013.12.30 게재확정일 : 2013.12.31 ]

Copyright © 2013 KHNES

소연료의 빠른 화학반응 등의 복합적인 영향에 의해 압력상승률이 급격히 증가하여 공급열량을 미소하게 증가시켜도 노크와 같은 이상연소현상이 발생하게 된다. 이로 인하여 수소공기 예혼합 압축착화 기관의 정상운전 가능한 운전영역은 다른 연료를 사용하는 예혼합 압축착화기관에 비해 상대적으로 매우 좁은 문제점이 있다<sup>1-3,6)</sup>. 예혼합 압축착화 수소기관에서 야기되는 급격한 압력상승률을 저감시키기 위한 방법에는 저온연소기술 중 하나인 희박과급(lean boosting)이 있다<sup>4-5)</sup>. 희박혼합기를 과급하는 기술인 희박과급은 신기질량 증가에 의한 연소가스온도 감소와 과급에 의한 압축말기압력의 증가로 수소의 자기착화온도가 감소될 뿐만 아니라 기관의 성능역시 증가되는 효과가 있다. 이들의 영향에 의해 자기착화 가능한 압축비가 결정되지만 신기질량 증가에 의한 공급열량증가로 착화가능 압축비가 감소하여 압력상승률이 저감되므로 운전영역이 확장될 것으로 예측된다. 하지만 수소 예혼합 압축착화기관의 연구도 초기상태이며 더욱이 희박과급 결부에 의한 압축비 감소 및 운전영역의 확장여부 등은 아직 명확히 밝혀진 바 없다.

본 연구에서는 수소공기 예혼합 압축착화 기관에 고희박과급법을 접목하는 경우 착화가능한 압축비가 감소하고 운전영역 확장이 가능한가의 여부에 관심을 두었다. 이를 위해 연구용 희박과급 예혼합 압축착화 수소기관을 사용하여 과급압과 공급열량 변화에 따른 착화가능 압축비, 운전영역 확장성 및 제반 기관성능특성을 실험적으로 해석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험에 사용된 수소기관은 발화운전 중 압축비를 수소의 자기착화온도까지 연속적으로 가변 할 수 있는 가변 고압축비 시스템, VHCR(Variable High Compression Ratio)이 장착된 연구용 단기통 기관이



Fig. 1 Hydrogen HCCI research engine with variable compression ratio

Table 1 Specification of the test engine

Engine type	4-stroke single cylinder
Bore X Stroke	87mm × 92mm
Displacement vol.	546.6cc
Valve type	SOHC
Cooling type	Water cooling
Compression ratio	$\epsilon = 8 \sim 47$

다. 연구용 가변 고압축비 수소기관의 실물 사진을 Fig. 1에 나타낸다. 실험기관의 압축비 가변은 실린더 이동방식을 채택하였으며 가변 가능한 압축비의 범위는  $\epsilon = 8 \sim 47$  범위이다. 실험용 기관의 제원은 4행정 단기통 기관으로 보어 87mm, 스트로크 92mm의 장행정기관이며 행정체적은 547cc이다. 주요제원은 Table 1과 같다. 과급은 희박과급에 의한 영향을 극대화하기 위하여 과급기 부착에 의한 기관성능변화를 최소화할 수 있는 외부과급방식을 채택하였다.

Fig. 2는 전체 성능실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 전술한 가변 고압축비 수소기관, 동력계, 수소공급계, 흡배기계통, 냉각계통, 데이터 취득부 및 과급장치로 구성된다. 수소는 고압수소 봄베에 150bar로 충전되어 1차 및 2차 감압을 거쳐 3bar의 일정한 압력으로 흡기관에 공급된다. 외부과

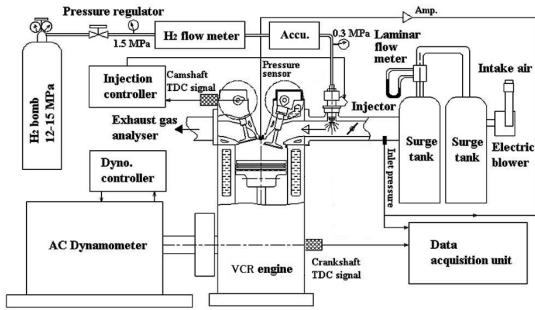


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

급기는 피스톤 type의 공기압축기를 병렬로 연결하여 사용하였다. 과급장치에는 boost 압력을 제어하기 위해 공기압축기 출구에 공압 레귤레이터와 유량조절용 밸브를 설치하였다. 과급기 출구와 서지탱크 입구 사이에 수냉식 인터쿨러를 장착하여 흡기온도를 일정하게 유지하였다. 또한 과급에 의한 맥동현상을 감소시키기 위하여 2개의 서지탱크를 장착하였으며, 서지탱크 사이에 공기유량계를 설치하였다.

## 2.2 실험방법

실험변수는 각각의 boost 압력에서 자기착화가 가능한 압축비와 당량비이다. Boost압력은 희박과급에 의한 압축비 감소를 파악하기 위하여 자연흡입 상태에서 1.3bar까지 0.1bar 간격으로 단계적으로 변화시켰다. 1.3bar이상의 과급압에서는 압축비 감소에도 불구하고 노크 및 역화의 발생으로 연속구동 및 정상운전이 불가능하였으므로 이 값을 과급압의 상한치로 설정하였다. 압축비는 자연흡입 및 냉시동 상태에서 착화가능한 압축비  $\epsilon=32$ 에서 발화 운전하여 과급압과 공급열량을 증가시키며 자기착화가 불가능한 압축비까지 감소시켰다. 기관회전수는 최대 토크 발생 회전수인 1600rpm, 흡입공기 온도는 25℃, 냉각수 온도는 80℃로 고정하여 실험하였다.

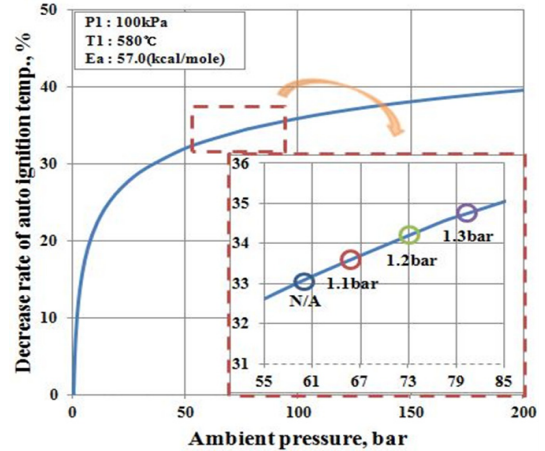


Fig. 3 Decrease rate of auto ignition temperature versus ambient pressure about hydrogen gas

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 희박과급에 의한 착화가능 압축비의 감소

Fig. 3은 분위기압력 변화에 따른 수소의 자기착화 온도의 감소율을 나타낸 것이다. 여기서 자기착화 온도는 Semenov의 착화한계식으로 산출하였다<sup>5)</sup>. 수소의 자기착화 온도의 감소율은 분위기압력 증가에 따라 급격하게 증가하다가 완만한 구배를 갖는 경향을 나타낸다. 난기운전이 가능한 최소압축비  $\epsilon=26$ 에서 모터링한 경우 대기압 대비 수소의 자기착화 온도의 감소율은 약 33%정도이다. Boost압을 1.3bar로 증가시키면 자기착화온도는 상기에 비해 약 6%정도 더 감소하며 이때의 수소의 자기착화온도는 약 375℃부근이 된다. 또한 과급에 의한 유효압축비 증가로 자기착화가 가능한 압축온도에 도달하는 시점은 점차 진각하게 된다.

상기와 같은 희박과급 시의 자기착화온도 감소 및 유효 압축압력의 증가에 의해 자기착화 가능한 압축비가 얼마나 되는가 파악하기 위해 난기운전 중 각각의 희박과급압에서 착화 가능한 압축비와 당량비의 영역을 나타낸 것이 Fig. 4이다.

그림에 나타난 바와 같이 착화 가능한 최소 압축

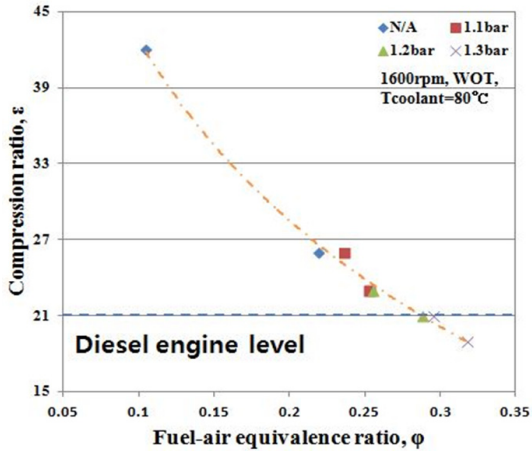


Fig. 4 Boosting pressure versus compression ratio range at minimum fuel-air equivalence ratio

비는 자연흡입 상태인 경우  $\epsilon=26$  부근이지만 희박과급압이 증가하는데 따라 점차 감소하는 경향을 보인다. 감소된 압축비에서의 착화가능한 당량비의 최소 값은 압축비 감소에 따른 압축온도의 감소로 자기착화온도까지 가스온도를 높이는데 요구되는 공급열량이 증가되어 점차 농후해지는 것을 나타낸다. 이러한 압축온도와 공급열량의 상관관계에 의하여 착화가능한 압축비의 범위는 희박과급압이 증가할수록 감소하는 것이라 볼 수 있다. 희박과급압을 1.3bar까지 증가시킨 경우 착화가능 압축비는 약  $\epsilon=19$ 부근까지 감소하는 것을 나타낸다. 이 압축비는 통상의 상용 디젤기관에서 사용하는 압축비의 범위이다. 따라서 상기 결과는 통상의 디젤기관 하에서 순수한 수소공기 예혼합기를 압축착화 시킬 수 없지만 lean boosting을 접목하여 희박과급압을 높이면 착화보조방식을 사용하지 않아도 예혼합 압축착화가 가능하다는 것을 의미하는 것이다. 단 상기의 값은 난기운전 중의 자기착화 가능 압축비이며 냉시동 시에는 압축비  $\epsilon=32$  부근의 고압축비가 요구된다.

감소된 자기착화가능 압축비와 실린더 내 압력과 상관관계를 파악하기 위해 자기착화 가능 최소 압축비에서의 압력상승률을 각각의 희박과급압에 대

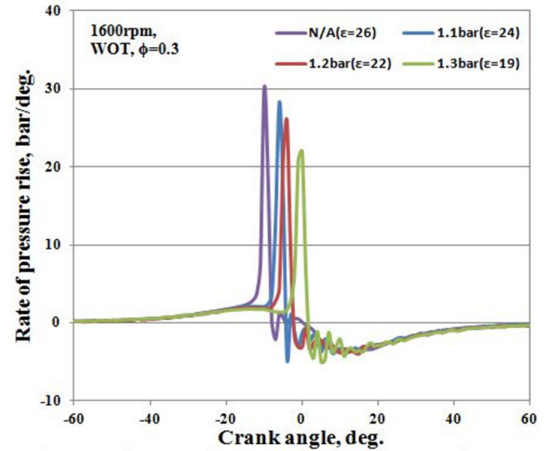


Fig. 5 Rate of pressure rise for each boosting pressure at minimum fuel air equivalence ratio

해 나타낸 것이 Fig. 5이다. 여기서 당량비는 가능한 유사하게 유지하였다. 각각의 과급압에서 착화시키는 점차 지각되며 압력상승률 또한 과급압 증가에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 희박과급압 1.3bar에서의 압력상승률의 최대치는 약 22bar/deg 정도이다. 이 값은 자연흡입상태와 비교하여 약 25% 정도로 현저히 감소된 값이므로 수소 예혼합 압축착화기관에서 야기되는 고압축비 사용에 의한 급격한 압력상승률의 저감에 희박과급법의 사용이 유용하다는 것을 의미하는 결과이다.

### 3.2 희박과급에 의한 운전영역 확장

Fig. 6은 희박과급 시의 운전영역, 즉 각각의 압축비에서 정상운전이 가능한 당량비를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 정상운전이 가능한 당량비의 범위는 압축비 감소에 따라 상대적으로 농후해지는 당량비에 의해 증가된 공급열량으로 노크가 발생되어 점차 좁아지는 양상을 보인다. 압축비 감소에 따라 저하되는 압축온도의 영향성 보다 공급열량 증가에 의한 연소 최고온도가 높게 형성되므로 노크가 발생하는 당량비가 상대적으로 희박한 영역에서 발생되기 때문에 착화가능한 당량비의 범위가 점차 좁

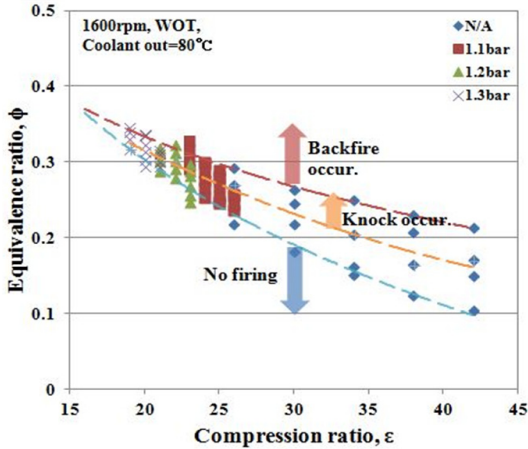


Fig. 6 Compression ratio versus Fuel air equivalence ratio as function of the boosting pressure

아지는 것으로 볼 수 있다. 이러한 경향을 바탕으로 하면 선도에 표시한 바와 같이 착화가능한 최소 당량비와 최대 당량비가 수렴하는 점이 존재할 것이라 예상된다. 그러나 압축비  $\epsilon=19$  이하에서는 공급열량 및 과급압의 증가 시 노크가 발생하자마자 역화로 전이되어 정상적인 발화운전이 불가능 하므로 착화 가능한 최소 당량비와 최대 당량비가 수렴하는 지점의 파악에 한계가 있었다. 이 결과로부터 예혼합 압축착화기관의 감소 가능한 최소 압축비는  $\epsilon=19$ 로 제한하였다.

희박과급압 1.3bar, 압축비  $\epsilon=19$  에서의 운전영역은 자연흡기 상태의 최소압축비  $\epsilon=26$ 의 운전영역인  $\Phi=0.033$ 보다 60% 감소한 약  $\Phi=0.02$ 의 당량비의 폭을 갖는다. 여기서 당량비의 폭은 착화가능한 최소 당량비에서 노크가 발생되기 직전의 당량비인 노크 한계 당량비까지를 나타내는 것으로, 정상운전 가능한 운전영역을 의미하는 것이다. 압축비 감소에 따른 자기착화온도 증가를 보상하기 위해 공급열량을 증가시키므로 저압축비로 갈수록 운전 가능한 당량비의 폭은 점차 좁아지게 된다. 그러나 고압축비의 경우보다 농후한 혼합기이므로 공급열량의 관점으로서의 운전영역은 확장될 것이라 생각된다.

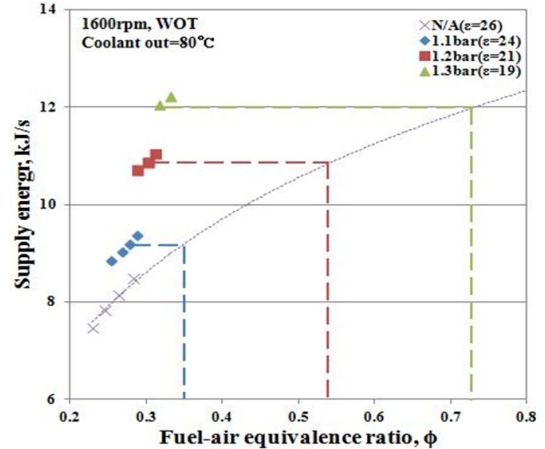


Fig. 7 Supply energy and conversion equivalence ratio at knock limit

공급열량 증가 관점에서의 운전영역의 확장성을 파악하기 위해 각각의 압축비에서 정상운전 가능한 최대 공급열량을 자연흡기대비 상당 당량비로 환산한 것을 Fig. 7에 나타낸다. 각각의 과급압에서 정상운전 가능한 당량비에서의 공급열량은 압축비 감소 및 과급압 증가에 따라 점차 증가되는 양상을 보인다. 과급압 1.3bar에서 정상운전이 가능한 공급열량의 최대치는 약 12kJ/s정도로 자연흡입상태와 비교하여 약 47.7% 증가된다. 증가된 공급열량을 자연흡입 대비 상당 당량비로 환산하면 자연흡입 시에는  $\Phi=0.33$ , 과급압 1.3bar에서는  $\Phi=0.73$ 가 된다. 이는 자연흡입 대비 170% 증가한 것에 상응한다. 그리고 정상운전 가능한 당량비의 범위는 약  $\Phi=0.45$ 정도로서 자연흡기 대비 약 12배 확장되는 것을 보인다. 상기의 결과로부터 수소 예혼합 압축착화기관에 희박과급의 접목하면 착화 가능한 압축비의 감소뿐 아니라 공급열량이 증가하여 운전영역 확장에도 유용함을 확인할 수 있다.

### 3.3 운전영역 확장에 따른 기관성능특성

Fig. 8은 희박과급에 의해 확장된 운전영역에서의 도시평균유효압력을 나타낸 것이다. 그림에서 보는



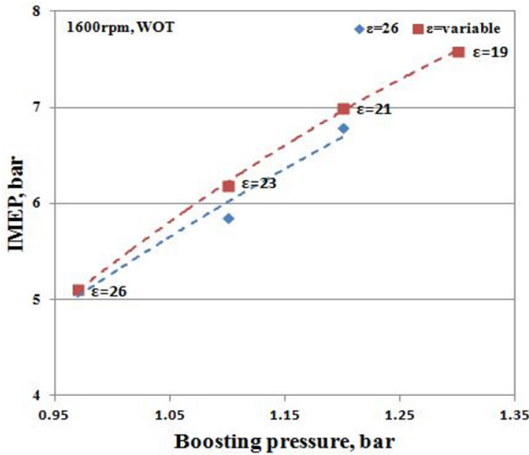


Fig. 8 Supply energy and conversion equivalence ratio at knock limit

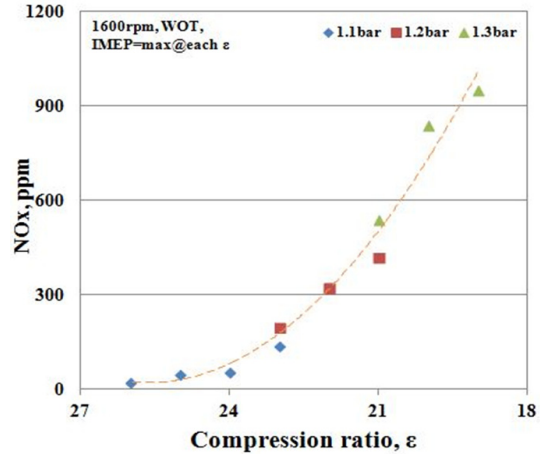


Fig. 10 NOx emission at minimum equivalence ratio each boosting pressure

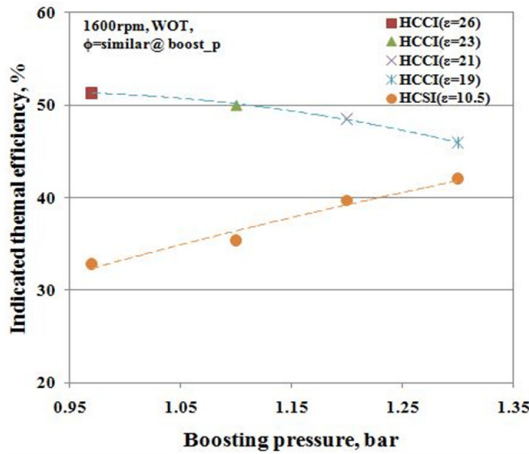


Fig. 9 Supply energy and conversion equivalence ratio at knock limit

바와 같이 도시평균유효압력, IMEP는 과급압 증가 및 압축비 감소에 의한 공급열량의 증가로 인해 점차 증가되는 경향이다. 도시평균 유효압력은 과급압 1.3bar 압축비  $\epsilon=19$ 에서 최대 약 7.6bar 정도로서 압축비를  $\epsilon=26$ 으로 고정하여 희박과급을 적용한 경우보다 약 11%정도 증가된 것을 나타낸다. 또한 자연흡입상태에 비하여 약 49% 증가된 값이다. 이는 압축비 감소에 따른 착화가능한 당량비가 점차 농후해짐에 따라 상대적으로 증가된 공급열량과 과급에 의한 연소압력의 증가가 도시평균 유효압력의 증가로

이어진 것으로 생각된다.

Fig. 9는 희박과급시 수소공기 예혼합 압축착화기관의 도시열효율을 나타낸 것이다. 도시열효율은 압축비  $\epsilon=26$ 에서 약 50%정도를 보이며 압축비 감소에 따라 증가되는 IMEP에도 불구하고 약간 감소된 46%의 열효율을 확인할 수 있다. 열효율의 감소는 도시평균유효압력의 증가율보다 공급열량의 증가율이 더 커 감소한 것이라 생각되지만 상기와 동일한 영역에서의 수소 예혼합 강제착화 기관에 비해 높은 열효율을 확인할 수 있다. 이는 주지의 사실과 같이 압축착화에 따른 강제착화기관에 비해 고압축비의 사용과 급속연소에 의해 열효율이 더 증가된 것이라 볼 수 있다.

Fig. 10은 각각의 희박과급압에서 감소가능한 압축비의 최소 당량비에서의 NOx배출량을 나타낸 그림이다. NOx는 각각의 압축비에서 착화가능한 최소 당량비임에도 불구하고 점차 배출량이 증가되는 것을 나타낸다. 자연흡입 상태의 압축비  $\epsilon=26$ 에서 약 20ppm 배출되는 NOx는 희박과급압 1.3bar의 감소가 가능한 최소 압축비  $\epsilon=19$ 에서는 약 950ppm에 이른다. NOx 배출량은 압축비 감소에 의한 압축온도의 저감과 희박과급에 따른 혼합기 질량 증가에 의해 감소

돼야 하지만 그 영향은 미미하고 압축비 감소에 따라 증가되는 공급열량에 의한 영향성이 더 커 압축비 감소에 따라 점차 증가되는 것이다.

#### 4. 결 론

수소 예혼합 압축착화 연구용기관을 사용하여 희박과급압과 공급열량 변화에 따른 착화가능 압축비와 운전영역 확장성을 해석한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 희박과급에 의한 압축비 감소효과에 의해 착화 가능한 압축비는 통상의 디젤기관의 압축비  $\epsilon=19$ 에서도 착화가 가능함을 알 수 있다.
- 2) 운전영역은 상대적으로 농후해지는 당량비로 당량비의 폭은 감소하지만 공급열량 측면에서는 확장되어 자연흡기 대비 약 12배의 확장에 이른다.
- 3) 희박과급의 사용에 의해 확장되는 농후 운전영역에 의해 도시평균유효압력과 NOx의 배출량은 증가하며 도시열효율은 저온연소효과에 의한 냉각손실감소가 있더라도 압축비의 현저한 감소에 의해 약간 저하되는 것을 나타낸다.
- 4) 상기로 부터 수소 예혼합 압축착화 기관에 희박과급을 접목하는 방식은 착화가능 압축비의 감소와 운전영역의 확장성에 유효하지만 실용화에 이르기 위해서는 보다 확장시켜야 하며 또한 NOx 배출량의 동시 저감에 관한 다양한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### 후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013R1A1A2013405).

#### References

1. K.J. Lee\*, Y.R. Kim, C.H. Byun, J.T. Lee "Feasibility of compression ignition for hydrogen fueled engine with neat hydrogen-air pre-mixture by using high compression", IJHE, 2008, pp1-10.
2. Oakley, A., Zhao, H., Ladommatos, N., and Ma, T., "Dilution Effects on the Controlled Auto-Ignition (CAI) Combustion of Hydrocarbon and Alcohol Fuels", SAE Technical Paper 2001-01-3606 (2001).
3. Kitae Yeom, Jinyoung Jang, Choongsik Bae, "Knocking and Combustion Characteristics at Rich Limit of Gasoline HCCI Engine", KSAE, Vol. 14, No. 6, pp. 9-16 (2006).
4. Kwang-ju Lee, Thanh Cong Hyun and Jong-tai Lee, "A study on realization of high performance without backfire in a hydrogen-fueled engine with external mixture", IJHE 35, vol. 35, no. 23, pp. 13078-13087, 2010.
5. A. P. Roskilly, J. M. Gomes Antunes, R. Mikalsen, "An investigation of hydrogen-fuelled HCCI engine performance and operation", IJHE 33, 2008, pp. 5823-5828.
6. P. A. Caton, J. T. Pruitt, "Homogeneous charge compression ignition of hydrogen in a single-cylinder diesel engine", Int. J. Engine Res. 2008, Vol. 10, pp. 45-63.