Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society(2015. 2), Vol. 26, No. 1, pp. 28~34
DOI: http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2015.26.1.028
ISSN 1738-7264
eISSN 2288-7407

# 예혼합 압축착화 수소기관의 역화현상에 관한 실험적 연구

이종민[1] · 이종구[1] · 이광주[2] · 이종태[2†]
[1]성균관대학교 대학원, [2]성균관대학교 기계공학부

# An Experimental Study on Phenomenon of Backfire in H2 HCCI Engine

JONGMIN LEE[1], JONGGOO LEE[1], KWANGJU LEE[2], JONGTAI LEE[2†]
[1]Grad. School of Sungkyunkwan Univ., 300 Chunchun-dong Janan-gu, Suwon-Si, Gyeonggi-do, 440-746, Korea
[2]School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ., 300, Chunchun-dong Janan-gu, Suwon-Si, Gyeonggi-do, 440-746, Korea

**Abstract >>** HCCI (Homogeneous Charged Compression Ignition) hydrogen engine has relatively narrower operation range caused by backfire occurrence due to the rapid pressure rising by using higher compression ratio and significant reaction velocity. In this study, to grasp of backfire process and characteristic in the HCCI research hydrogen engine, in-cylinder pressure, intake pressure and backfire limit range are analyzed with compression ratio and intake valve open timing, experimentally.
As the result, it is observed that knock is occurred just before backfire occurrence in HCCI hydrogen engine but not spark igntion type, this phenomenon is always the same for the above variables. Also backfire limit range are expanded up to 50% for the more retarding intake valve open timing in this operating conditions.

**Key words :** Homogeneous charge compression ignition(예혼합 압축착화), Backfire(역화), Knock(노크), High compression ratio(고압축비), Intake valve open timing(흡기밸브 열림시기)

## 1. 서 론

수소 예혼합기를 압축착화시키는 방식은 실린더 내에서의 동시다발적인 착화에 따른 급속연소로 연료전지에 버금가는 고효율 달성이 가능하다. 그러나 순수한 수소 예혼합기를 압축착화 시키기 위해서는 냉시동시 압축비 ε = 32 이상의 고압축비가 필요하다[1)]. 이러한 고압축비 사용은 급격한 압력상승으로 이어지며, 이는 수소연료의 독특한 연소특성에 의해 노크 또는 역화발생으로 이어져 좁은 운전영역을 갖는다는 문제점이 있다. 특히 역화는 실린더 내부에 잔류하는 모종의 점화원이 신기와 접촉하는데 기인한 것으로, 역화발생은 실화에 의한 기관의 운전정지로 이어지기 때문에 예혼합 압축착화(Homogeneous Charge Compression Ignition : HCCI) 수소기관의 운전영역 확장을 위해서는 반드시 해결 되어야 한다.

본 연구실에서는 예혼합 강제착화 수소기관의 흡기밸브 열림시기를 TDC로 지각시켜 역화를 억제시킨 바가 있다[2)]. 그러나 예혼합 강제착화 수소기관과 달리 고압축비로 자기착화를 시키는 예혼합 압축착화 수소기관에 서는 예상치 못한 역화가 발생하여 흡기밸브 열림시기를 TDC로 지각시켜도 역화가 발생되어 역화억제 방법으로 유효하지 않은 것으로 확

†Corresponding author : jtlee@skku.edu
Received : 2015.02.18 in revised form 2015.02.27 Accepted: 2015.02.28
Copyright ⓒ 2015 KHNES

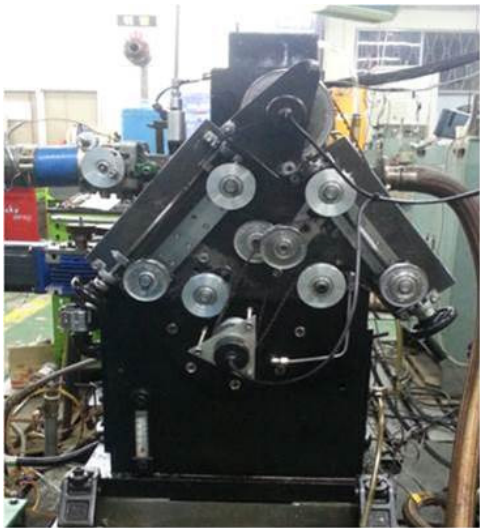

**Fig. 1** H2 research engine with VCR + MCVVT system

인되었다[3]. 예혼합 압축착화 수소기관의 역화억제를 위해서는 역화현상에 대한 구체적인 연구가 진행되어야 하지만, 예혼합 압축착화 수소기관에 대한 연구는 아직까지 초기인 관계로 역화현상에 관한 연구는 아직까지 구체적으로 진행된 바가 없다.

본 연구는 예혼합 압축착화 수소기관의 역화현상 파악을 위한 기초연구로 본 실험에서는 역화현상 해석을 위해서 압축비와 흡기밸브 열림시기 변화시 역화 발생 전·후의 실린더내부와 흡기관내 압력 변화와 예혼합 강제착화 기관과의 역화현상의 차이를 해석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 실험에 사용된 연구용 수소기관이다. 기관의 제원은 Table 1과 같으며, 4행정 단기통 흡기관분사식 수소기관으로 발화운전 중 압축비를 ε = 8 ~ 47 범위 내에서 가변시킬 수 있는 가변압축비(VCR : Variable Compression Ratio) 시스템이 장착되어 있다. 그리고 흡기밸브 열림시기와 배기밸브 닫힘시기

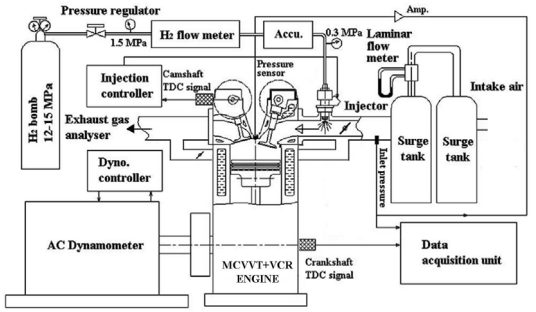


**Fig. 2** Schematic diagram of the experimental setup

**Table 1** Specification of the test engine

| | |
|---|---|
| Engine type | 4-stroke single cylinder |
| Bore x Stroke | 87mm X 92mm |
| Displacement vol. | 546.6cc |
| Valve type | SOHC |
| Cooling type | Water cooling |
| Compression ratio | ε = 8 ~ 47 |

를 각각 BTDC 20° ~ ATDC 20° 가변이 가능한 SOHC 연속기계식 가변밸브타이밍(MCVVT : Mechanical Continuous Variable Valve Timing) 시스템도 장착되어 있다. Fig. 2은 전체 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실험장치는 전술한 예혼합 압축착화 수소기관, 동력계, 수소공급계, 냉각계통 및 데이터 취득부로 구성되어 있다. 수소는 150bar로 충전된 고압가스 봄베로부터 1차, 2차 감압기를 거쳐 어큐뮬레이터를 통해 3bar의 일정한 압력으로 실험 기관에 공급된다.

### 2.2 실험방법

실험변수는 압축비와 당량비이다. 압축비는 난기운전시 착화가능 최소 압축비 ε = 26부터 냉시동시 착화가능 최소 압축비인 ε = 32 까지 압축비를 2 씩 단계적으로 증가시켰다. 또한 흡기밸브 열림시기는 BTDC 10°에서 지각 가능한 최대 흡기밸브 열림시기인 ATDC 20°까지 10°씩 지연시켰다. 당량비는 각각의 운전조건에서 착화 가능한 최소 당량비에서 역화

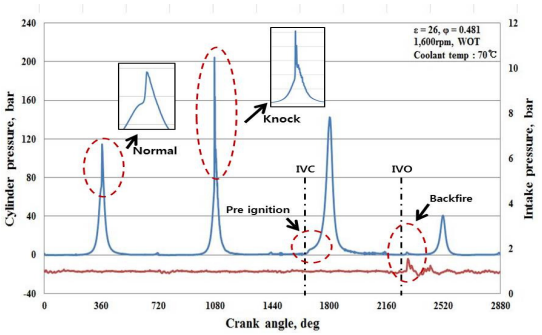


**Fig. 3** Backfire process at ε = 26

가 발생할 때까지 증가시켰다. 각각의 실험에서 기관 회전수는 기관 최대토크 발생 회전수인 1,600rpm, 흡기온도는 25℃, 냉각수 출구온도는 70 ℃로 고정하였다.

## 3. 예혼합 압축착화 수소기관의 역화발생 천이과정

### 3.1 예혼합 압축착화 수소기관의 역화현상

Fig. 3 은 예혼합 압축착화 수소기관의 역화발생 과정의 일례를 나타낸 것으로, 난기운전 중 착화가능한 최소 압축비 ε = 26 에서의 실린더 내부와 흡기관 내부의 압력경과를 나타낸 것이다. 예혼합 압축착화 수소기관의 역화발생 과정은 정상운전 중 고압축비 사용에 따른 압력상승률 증가에 의해 노크가 발생한다.4) 노크 이후 역화발생 직전 사이클에서 조기점화가 발생한 뒤 역화가 발생하는 것을 볼 수 있다. 여기서 역화발생 직전 사이클이 조기점화인 이유는 흡기밸브가 열리기 바로 직전부터 실린더 압력이 상승하기 시작하며, 압축과정 초기부터 연소가 진행되면서 부의 일이 증가되고 압축과정이 길어지는 현상 등을 종합하여 조기점화로 판단하였다. 역화 발생 직후 사이클을 보면 압력이 모터링 압력보다 낮게 나타난 것을 볼 수 있는데, 이는 역화로 인해 흡기관내 온도가 증가하여 밀도가 감소된 흡기관내의 기연가스의

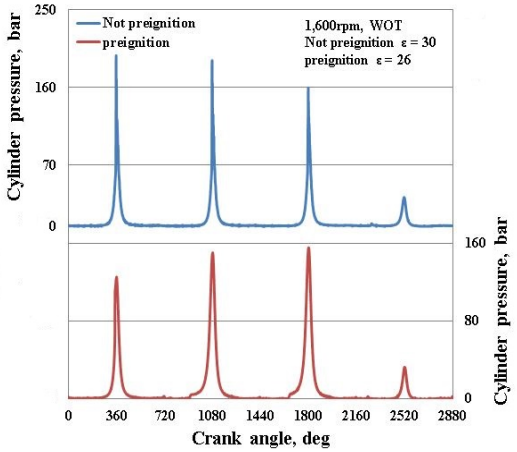


**Fig. 4** Backfire process at not pre ignition and preignition

유입에 기인한 것이라 생각된다. 예혼합 압축착화 수소기관의 역화발생과정은 상기와 같이 노크 및 조기착화 발생 후 역화로 천이되는 과정이 공통적으로 나타난다. 또한 운전 조건에 따라 비주기적으로 Fig. 4 와 같이 조기점화 없이 노크 직후 역화가 발생하거나 여러 번의 조기점화 후 역화가 발생하는 경우가 나타난다. 조기점화가 발생하지 않는 경우는 압축비 ε = 30 이상에서 급격한 공급열량의 증가나 흡기밸브 열림시기가 ATDC 10°이상일 경우 비주기 적으로 조기점화가 발생하지 않고 노크 직후 역화가 발생한다. 이와 반대로 여러번의 조기점화가 발생하는 경우는 주로 노크한계 당량비 근처에서 역화가 발생할 때 나타난다.

### 3.2 강제착화기관과의 역화현상 비교

예혼합 압축착화 수소기관과 예혼합 강제착화 수소기관의 역화현상의 차이점을 확인하기 위해 Fig. 5 는 착화방식에 따른 역화발생 과정을 실린더 압력경과를 통해 나타낸 것이다. 앞에서 기술한 바와 같이

예혼합 압축착화 수소기관은 노크가 먼저 발생한 뒤 역화가 발생하지만, 강제착화 수소기관에서는 노크 없이 조기점화 발생 후 역화가 발생하는 것을 볼

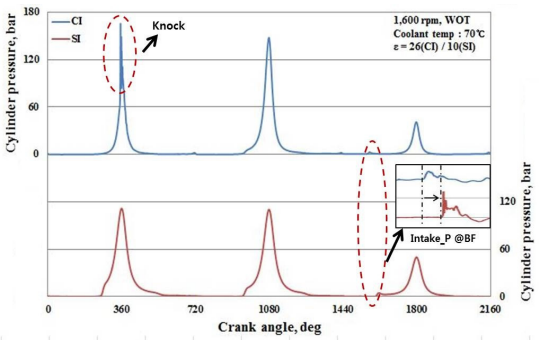


**Fig. 5** Cylinder pressure of each ignition type

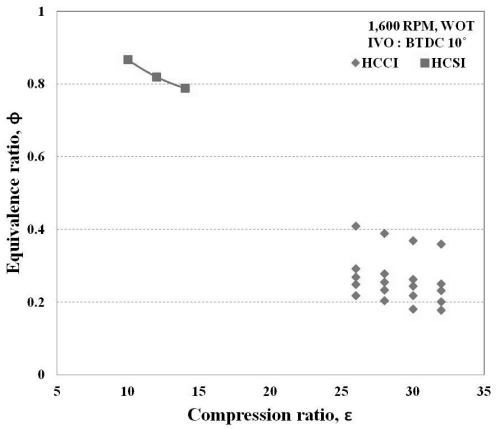


**Fig. 6** Operating area at each ignition type

수 있다.

이와 같은 역화현상의 차이는 착화방식에 따른 압축비와 공급열량의 차이에 기인한 것으로, 이를 자세히 알아보기 위해 강제착화 수소기관과 압축착화 수소기관의 운전영역을 나타낸 것이 Fig. 6 이다. 압축착화 수소기관은 강제착화 수소기관 보다 희박한 영역에서 역화가 발생된 것을 볼 수 있다. 이는 높은 공급열량에 따른 연소온도의 상승에 의한 연소실 내부의 hot spot 생성이 역화의 원인이 되는 강제착화 수소기관의 역화현상과 달리 압축착화 수소기관은 2 ~ 3 배 이상의 고압축비의 사용이 역화현상에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 이는 노크발생 유무와 역화발생시기를 통하여 알 수 있는데, 압축비가 높은 압축착화 수소기관의 역화발생시점이 강제착화 수소기관

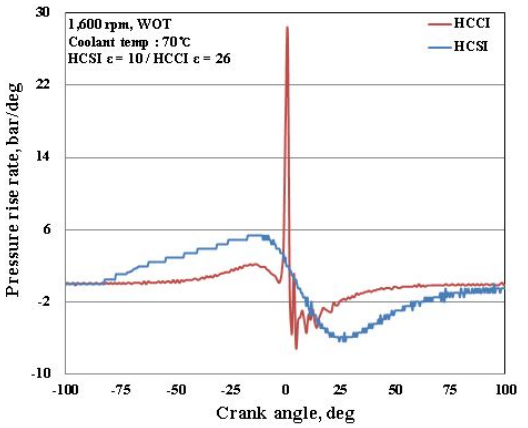


**Fig. 7** Pressure rise rate at each ignition type

의 역화발생 시점보다 다소 진각된 것으로 나타난다.

두 착화방식의 역화발생에 압축비의 영향을 확인하기 위해 강제착화 수소기관은 노크가 발생하지 않는 압축비 ε = 10, 압축착화 수소기관은 착화가능 최소 압축비 ε = 26 에서의 각각의 역화한계 당량비에서의 압력상승률을 나타낸 것이 Fig. 7 이다. 압력상승률의 최대값은 희박한 운전영역에서 운전하는 압축착화 수소기관의 경우가 상대적으로 농후한 영역에서 운전하는 강제착화 수소기관의 압력상승률의 최대값보다 약 5배 정도 높은 것을 볼 수 있다. 이러한 사실들을 종합하여 수소 예혼합 압축착화기관의 역화발생과정의 차이는 고압축비에 의한 것임을 알 수 있다.

## 4. 역화천이과정중의 노크발생 현상 검토

### 4.1 압축비변화시의 역화현상

예혼합 압축착화 수소기관의 역화발생 이전에는 노크가 수반되는데, 압축비 변화에도 노크가 먼저 발생하는지 알아보기 위해서 압축비별 실린더 내부와 흡기관 내부의 압력경과를 나타낸 것이 Fig. 8 이다. 압축비가 변화에도 노크를 수반하는 것을 보인다. 또한 조기점화도 역화직전 사이클에서 발생하는 것으

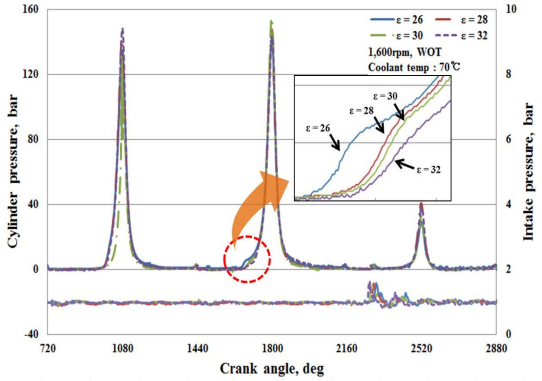


**Fig. 8** Backfire process of each compression ratio

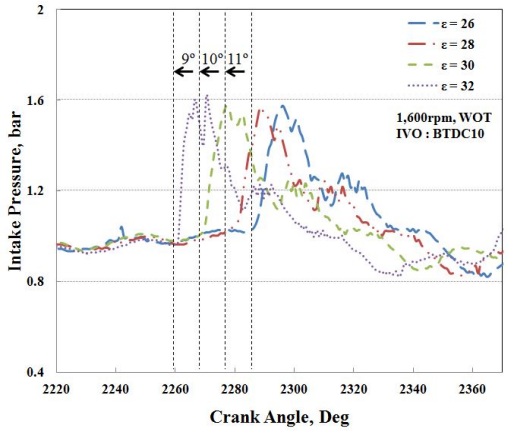


**Fig. 9** Cylinder pressure at occurrence of backfire

로 보아 압축비에 관계없이 예혼합 압축착화 수소기관의 역화현상에는 노크를 수반한다는 것을 알 수 있다.

다만, 역화 직전 사이클에서 나타나는 조기점화는 압축비에 따라 다르게 나타나는데, 조기점화시 압력이 상승하는 지점은 압축비가 변화해도 거의 동일하지만 압력 상승폭이 압축비가 증가할수록 점차 완만해 지는 것을 볼 수 있다. 이는 희박영역에서 반응속도가 현저하게 감소하는 수소의 독특한 특성에 기인한 것으로, 압축비가 증가할수록 희박한 혼합기를 사용함에 따른 것이라 생각된다[5].

압축비 변화에 따른 또 다른 역화특성은 역화발생시점인데, 역화발생시점의 흡기관내 압력을 나타낸

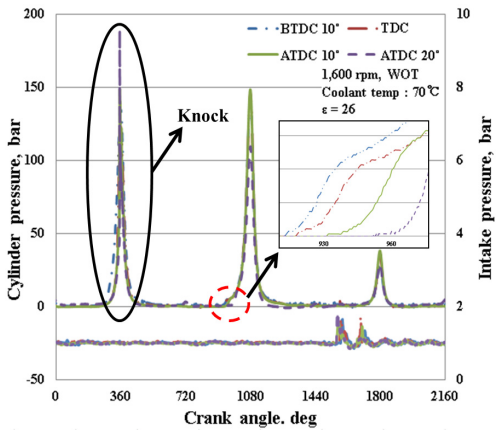


**Fig. 10** Backfire process of each intake valve open timing

것이 Fig. 9 이다. 역화발생시점은 압축비가 증가할수록 점차 진각되는 것으로 나타난다. 역화시점의 진각폭은 압축비가 증가 할수록 진각폭이 점차 감소하는 경향을 보이며, 본 실험에서는 압축비가 ε = 26에서 ε = 28로 증가할 때의 진각폭은 약 11° 정도지만, 압축비가 ε = 30 에서 ε = 32로 증가할 때는 약 9° 정도 진각되는 것을 볼 수 있다. 이는 압축비 증가에 따른 연소실 내부의 crevice 내부에서 존재하는 혼합기가 압축비 증가에 따라 실린더 내의 잔류가스가 감소되어 crevice 틈새에서 실린더내로 역류하는 시점이 빨라지는 것에 기인한 것이라 생각된다.

## 4.2 흡기밸브 열림시기 지각의 경우

예혼합 강제착화 수소기관의 점화시기를 지각시킬 경우 노크가 억제되는데 이와 동일하게 예혼합기를 압축열로 자기착화 시키는 예혼합 압축착화 수소기관의 흡기밸브 열림시기를 TDC 보다 더 지각시킨다면, 실린더 내부의 모종의 점화원과 신기가 접촉을 지연시켜 역화발생 과정에 영향을 미쳐 역화한계 운전 영역이 확장될 것으로 예상된다. 먼저 흡기밸브 열림시기 지각에 따른 역화현상을 알아보기 위해서 각 밸브타이밍별 역화발생 과정시 실린더의 압력을 나타낸 것이 Fig. 10 이다. 그림을 보면 흡기밸브 열

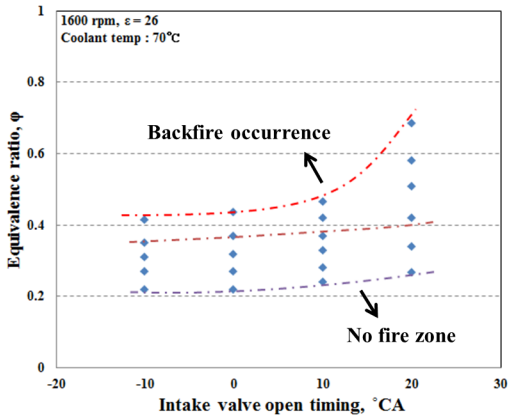


**Fig. 11** Operation area at each intake valve open timing

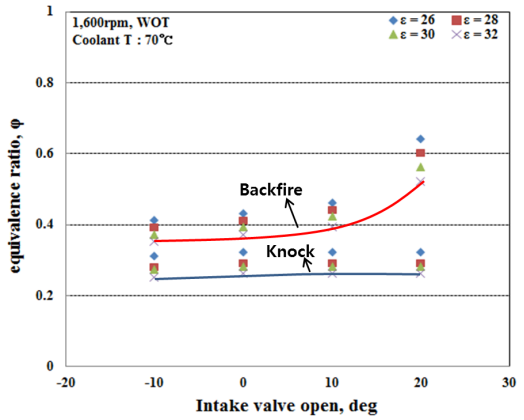


**Fig. 12** Backfire limit and knock limit area of each intake valve open timing

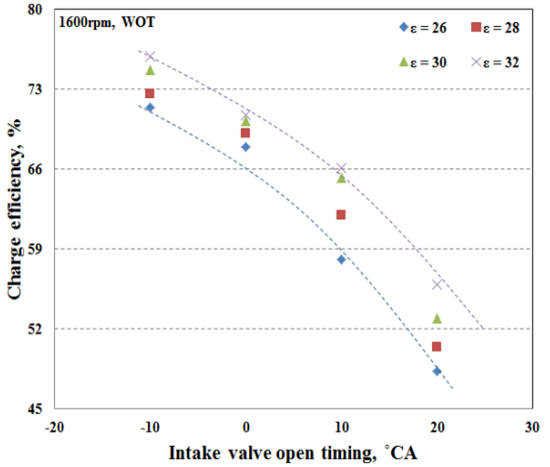


**Fig. 13** Chargn efficiency at each intake valve open timing

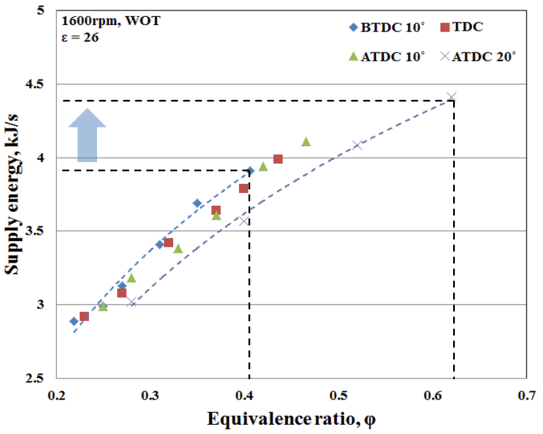


**Fig. 14** Operation range vs equivalence at each IVO.

림시기 변화에 따른 역화발생과정은『정상운전 - 노크 - 조기착화 - 역화』의 과정을 크게 벗어나지 않는 것을 볼 수 있다. 또한 흡기밸브 열림시기가 지각된 데 따라 조기착화시점 또한 지각된 것으로 나타난다. 흡기밸브 열림시기 지각에 따른 운전영역의 변화를 알아보기 위해 밸브타이밍 별 운전영역을 나타낸 것이 Fig. 11 이다. 그림에서 밸브타이밍을 지각 할수록 확연하게 보이는 차이는 역화한계 당량비의 증가폭이다. 특히 TDC 이후로 역화한계 당량비는 급격하게 확장되며 흡기밸브 열림시기 ATDC 20°에서의 역화한계당량비의 확장 정도는 TDC 대비 약 50% 정도 확장된 것을 볼 수 있다. 이러한 경향이 압축비 변화에도 유사한지를 알아보기 위해 각 압축비에서 흡기밸브 열림시기별 노크한계 당량비와 역화한계 당량비와 노크한계 당량비를 나타낸 것이 Fig. 12 이다. 그림에서 보이는 바와 같이 압축비 증가에 따른 역화한계 당량비가 소폭 감소하는 경향이 있으나 흡기밸브 열림시기 지각에 따른 역화한계 당량비의 확장 경향은 유사하게 나타난 것을 볼 수 있다.

이러한 흡기밸브 열림시기 지각에 따른 역화한계 당량비의 확장은 Fig. 13 에서 보이는 바와 같이 흡기밸브 열림시기가 지각 될수록 충전효율이 감소하기 때문이다. 이러한 충전효율의 감소는 동일 당량비

에서의 공급열량의 감소로 이어지게 되며, 이와 같은 사실에 기인하여 역화한계 당량비가 증가한 것이다. 그러나 흡기밸브 열림시기 지각에 따른 역화억제 효과로 인해 각 밸브타이밍별 최대 공급열량은 Fig. 14에서 보이는 바와 같이 약 12% 정도 증가한 것을 볼 수 있으며, 이는 흡기밸브 열림시기 지각이 역화억제에 다소 효과가 있다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

예혼합 압축착화 수소기관의 역화현상 파악을 위해 압축비와 흡기밸브 열림시기를 변화시킨 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 예혼합 압축착화 수소기관의 역화발생 직전에는 노크 후 조기점화가 수반되는 것이 관찰된다. 다만 일부 운전조건에서는 비주기적으로 노크발생 직후 바로 역화가 발생한다.
2) 예혼합 강제착화 수소기관과 달리 예혼합 압축착화 수소기관의 역화발생 천이과정에는 노크가 관여하며 이는 고압축비 사용에 따른 급격한 압력상승률에 기인한 것으로 생각된다.
3) 압축비 변화 및 흡기밸브 열림시기 지각시 약간의 연소특성 차이가 있지만 역화천이과정은 동일하다. 흡기밸브 열림시기 지각에 의해 역화한계 당량비는 점차 증가하며 상사점대비 ATDC 20°에서의 증가율은 약 50% 정도에 이른다.
4) 상기와 같이 예혼합 압축착화 수소기관의 역화발생에는 항상 노크가 수반되므로 추후 노크와 역화의 상관관계에 대한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

## 후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2013R1A1A2013405).

## References

1. Kwangju Lee, Thanh Cong Huynh, Joonkyoung Kang, Jongtai Lee, "Back-Fire Control of a Hydrogen-Fueled Engine with External Mixture by Using Intake Valve Opening Timing", KSAE Spring Conference Proceedings, pp. 600-605, 2008.
2. Kwangju Lee, “A Study on the Development for a Compression Ignition Engine with Hydrogen-air Pre-mixture, Ph. D. Dissertation, Sung kyunkwan University, Suwon, 2013.
3. K. J. Lee, Y. R. Kim, J. G. Lee, C. H. Byun, J. T. Lee, “The Characteristic of Abnormal Combustion by Compression Ignition with Neat Hydrogen Pre-mixture, KHNES, OHU-01, pp. 159-162, 2011.
4. Saurabh S. Patwardhan, K.N. Lakshm isham "Auto ignition of turbulent hydrogen jet in a coflow of heated air", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 33, pp. 7265-7273, 2008.