

협각 인젝터를 이용한 예혼합 압축착화 연소에서의 디젤 노킹 가시화

박성산* · 정용진* · 배충식**

Diesel Knock Visualization of Premixed Charge Compression Ignition Combustion with a Narrow Injection Angle

Stephen S. Park*, Yongjin Jung*, Choongsik Bae**

ABSTRACT

In this work, in-cylinder pressure measurements and high-speed direct imaging of the flame were performed in an optically accessible single cylinder diesel engine with premixed charge compression ignition combustion and a narrow injection angle. The results show that the frequency ranges of pressure ringing were 8.35 to 9 kHz and 12.2 to 13.1 kHz. The frequencies of the flame movement were shown as 8.7 kHz and 13 kHz. It was found that there is a direct relationship between the pressure ringing and the flame movement.

Key Words : Diesel Knock, PCCI(Premixed Charge Compression Ignition), Flame Visualization, Narrow Injection Angle

디젤 엔진은 고압축비를 통해 높은 열효율을 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 이론 공연비 영역에서는 높은 온도로 인하여 질소 산화물(NOx; nitrogen oxides)이, 농후한 영역에서는 입자상 물질(PM; particulate matter)이 발생하는 단점이 있다 [1].

날로 배기 규제가 강화되는 상황에서 이러한 단점을 극복하기 위한 노력으로 기존 디젤 연소 방식과는 다른 신연소 기술의 연구가 다방면에서 이루어져 왔고, 그 중 한 방식으로 예혼합 압축착화(PCCI; premixed charge compression ignition) 연소 기술이 도입되었다 [2-3]. 하지만 비교적 이른 시기에 연료를 분사함에 따라, 낮은 연소실 압력, 온도 그리고 공기 밀도로 인하여 분무 도달 거리가 증가하게 되고, 기존 디젤 연소에 비해 탄화수소(HC; hydrocarbon)와 일산화탄소(CO; carbon monoxide)의 배출이 늘어나게 된다 [4]. 기존 연구에서는 예혼합 압축착화의 이점을 유지하면서 단점을 해결하기 위하여 분사각과 분사공의 개수가 서로 다른 인젝터를 시험한 결과 분사각이 좁은 협각 인젝터를 사용한 경우 탄화수소와 일산화탄소의 배출을 저감할 수 있음을 보였다 [5].

스파크 점화 엔진에서의 노킹은 일반적으로 자발화과 같은 비정상적인 연소에 의해 발생하며, 압력 곡선의 떨림을 통하여 관측될 수 있다. 또한 자발화에 의한 노킹을 가시화 기법을 적용하여 연소실 내 압력과의 촬영을 통해 보였다 [1].

디젤 엔진의 경우에는 노킹의 탐지, 제어 그리고 제거에 초점을 맞춘 연구들이 이루어졌다. 하지만 이는 연소실 내 압력의 취득을 통하여 이루어져 왔을 뿐, 연소실 내의 가시화를 통한 연관성을 보여주지는 못하였다.

본 연구에서는 디젤 노킹 발생 시의 압력 곡선과 연소실 내 화염의 움직임 간의 연관성을 살피기 위하여 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하여 사용하였다. 엔진은 단기통 직접분사식 디젤엔진으로 Table 1에 나타난 제원과 같이 배기량은 980cc이고, 압축비는 17.4이다. 엔진 회전수는 1200 rpm으로 고정하였다. 연료 분사 장치는 Table 2에 나타난 바와 같이 커먼레일 시스템(common-rail system, Bosch)을 사용하였으며 전용 분사기 제어장치(peak and hold driver, Zenobalti)와 분사 압력 조절 장치(PCV driver, Zenobalti)를 사용하여 연료 분사압력과 분사량, 분사 시기를 제어하였다. 인젝터는 분사각이 70°로 협각이고, 분사공 8개인 것을 사용하였다.

연소실 내 압력은 압전 방식의 압력 센서(Typ

* 한국과학기술원 엔진연구실

† 연락저자, csbae@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3044 FAX : (042)350-5044

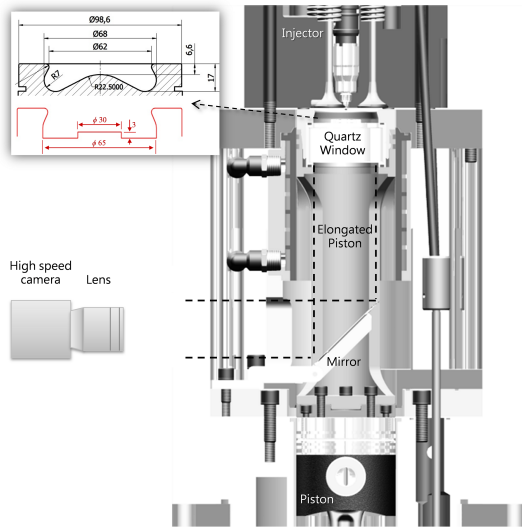


Fig. 1 Schematic diagram of the optical engine setup for diesel knock visualization.

e 6052C, Kistler)를 이용하여 0.2° CA(crank angle) 간격으로 취득하였고, 연소실 내 화염은 고속카메라(Phantom v7.1, Vision Research)를 사용하여 해상도 256×256, 노출시간 9 μs로 초당 26,000 프레임(fps)으로 촬영하였다. 프레임 간 간격은 38.46 μs로 약 0.28° CA에 해당한다. 렌즈는 Nikon AF Micro Nikkor 105-mm 1:2.8 D 단렌즈를 사용, 조리개 값 f/11로 설정하였다. 데이터는 엔진이 모터링(motoring)하는 중간 5번의 분사와 동시에 압력데이터를 취득하였고, 그 중 4번째 분사 시점에 카메라 트리거 신호를 발생시켜 영상을 촬영하였다.

Table 1 Engine specifications and operating conditions

Engine speed	1200 rpm
Displacement (single-cylinder)	980 cc
Bore × Stroke	100 × 125 mm
Compression ratio	17.4 : 1
Valves per cylinder	2 intake, 2 exhaust

Table 2 Fuel injection system

Type	Bosch common-rail
Number of holes	8
Nozzle diameter	0.146 mm
Injection angle	70°
Rail Pressure	160 MPa
Injection duration	473 μs
Injection timing	40° CA BTDC

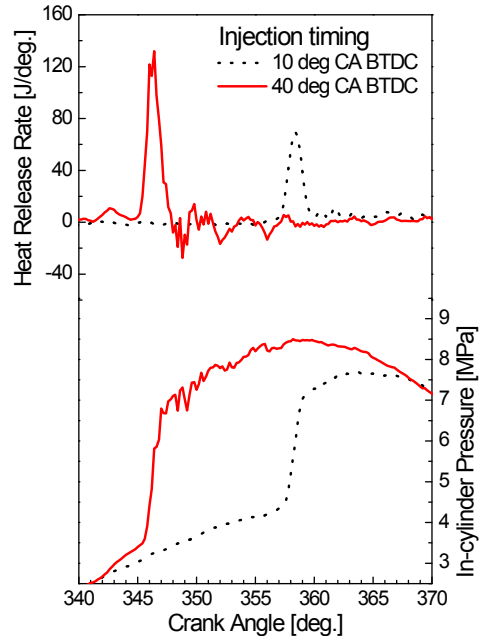


Fig. 2 Heat release rate and in-cylinder pressure trace over two injection timings.

각각 10° CA BTDC와 40° CA BTDC에 연료를 분사한 경우의 연소실 내 압력 곡선과 열방출율이 Fig. 2에 나타나 있다. 두 경우를 비교하였을 때 이른 시간에 분사가 된 40° CA BTDC의 경우 압력 곡선의 떨림이 있어 노킹이 확연하게 보임을 알 수 있다. 그에 반해 10° CA BTDC에 분사한 경우는 상사점(top dead center; TDC) 근방에서 압력 곡선이 완만하다.

Fig. 3은 노킹의 주파수 성분을 알아보기 위해 고속 푸리에 변환(FFT; fast fourier transform)

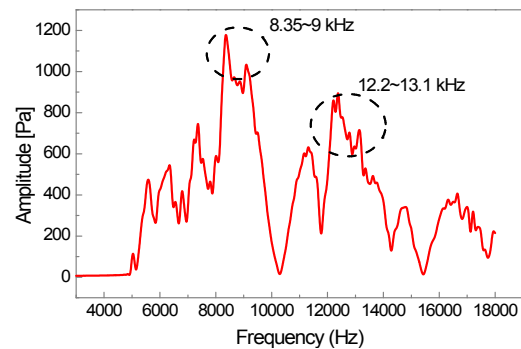


Fig. 3 Fast fourier transform of in-cylinder pressure with start of injection timing at 40° CA BTDC

을 수행한 결과이다. 압력 데이터는 FFT를 수행하기 이전에 노킹의 주파수 대역만을 살펴보기 위해 5 kHz에서 20 kHz 대역의 밴드 패스 필터(BPF; band pass filter)를 적용하였다. 결과를 살펴보았을 때 8.35 kHz와 9 kHz 사이, 12.2 kHz와 13.1 kHz 사이에서 피크를 보였다.

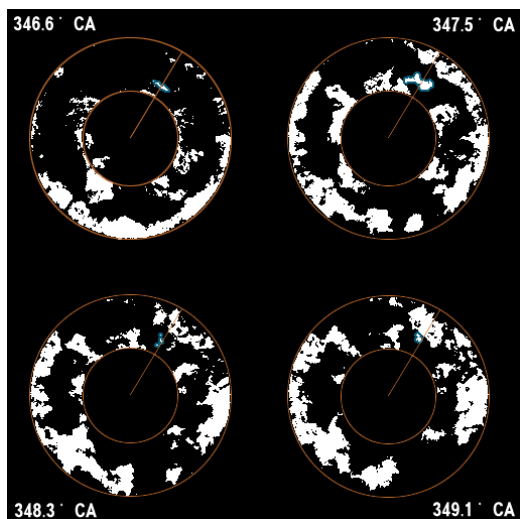


Fig. 4 Converted version of direct imaging of the cylinder with selected flame

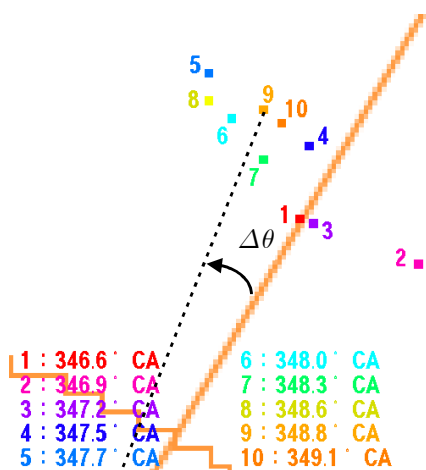


Fig. 5 Centroids of the selected flames

Fig. 4는 고속카메라를 이용한 실린더 내부 화염의 직접 가시화 영상을 프레임 마다 Otsu's method를 이용한 레벨 값 설정을 통해 엣지 감지 후 그 중 작은 화염 하나를 선택하여 추적한 결과이다 [6-7]. 추적은 346.6° CA부터 총 10 프레임을 이용하였다. Fig. 5는 10 프레임 각각에서의 화염의 중심(centroid)을 구하여 도식한 것이

다.

Fig. 5에서 각각의 프레임에 대해 346.6° CA(Fig. 5의 1)의 중심으로부터 몇 도가 움직였는지를 측정된 후 압력 곡선으로부터 얻은 데이터와의 비교를 위하여 동일하게 5 kHz에서 20 kHz 대역의 밴드 패스 필터를 적용한 결과가 Fig. 6에 나타나있다. 초기에는 2 프레임 주기로 진동을 하다가 이후에 3 프레임 주기로 진동을 하는 것을 확인할 수 있다. 이를 주파수로 변환하면 각각 13 kHz와 8.7 kHz이다. 실린더 내부의 화염이 항상 스월(swirl) 유동의 방향에 따라 시계 방향으로만 움직이는 것이 아니라, 스월의 반대 방향으로 역행하는 경우가 있으며, 이는 화염을 움직이게 하는 다른 힘이 존재한다는 것을 나타낸다. 이 힘이 노킹에 따른 실린더 내의 압력파에 의한 것으로 유추할 수 있으며, 화염의 움직임으로부터 얻은 주파수와 압력 곡선으로부터 얻은 주파수 대역간의 관계가 존재함을 보여줌으로써 증명할 수 있다.

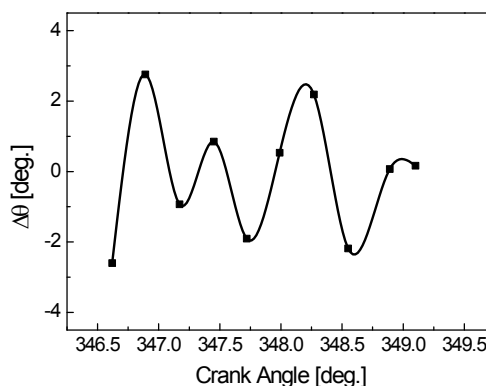


Fig. 6 Band pass filtered $\Delta\theta$ from the centroid at 346.6° CA

가시화가 가능한 단기통 디젤 엔진에서 험각 인젝터를 이용한 예혼합 압축착화 연소를 할 때, 압력 센서를 이용한 압력 곡선 취득과 고속 카메라를 이용한 실린더 내 화염의 직접 가시화를 통하여 노킹에 대한 연구를 수행하였다. 결과적으로 압력 곡선으로부터 얻은 노킹의 주파수 대역은 8.35 ~ 9 kHz와 12.2 ~ 13.1 kHz이고, 실린더 내 화염의 직접 가시화 영상의 선택된 화염의 움직임으로부터 얻은 주파수가 8.7 kHz와 13 kHz로 각각의 주파수 대역 안에 포함되는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 직접 가시화를 통해 얻은 화염 움직임의 주파수와 노킹의 주파수 대역 간에 직접적인 연관성이 있고, 서로를 유추해 낼 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부 지원 아래 산업원천기술 개발사업의 하나로 수행되었으며, 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

- [1] J.B. Heywood, "Internal Combustion Fundamentals," McGraw-Hill, 1988.
- [2] T.W. Ryan III and T.J. Callahan, "Homogeneous Charge Compression Ignition of Diesel Fuel," SAE J. of Fuels and Lubricants Vol. 105, pp.928-937, 1996.
- [3] Y. Iwabuchi, K. Kawai, T. Shoji and Y. Takeda, "Trial of New Concept Diesel Combustion System - Premixed Compression-Ignited Combustion -," SAE Technical Paper 1999-01-0185, 1999.
- [4] J.E. Dec, "Advanced Compression Ignition Engines-Understanding the In-cylinder Process," Proceedings of the combustion institute, Vol. 32, No. 1, pp.2727-2742, 2009.
- [5] Y. Jung, J. Jang, C. Bae and D. Kim, "Improvement of Premixed Compression Ignition Combustion using Various Injector Configurations," SAE Technical Paper 2011-01-1357, 2011.
- [6] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histogram," IEEE Transactions on System Man Cybernetics, Vol. SMC-9, NO. 1, pp.62-66, 1979.
- [7] A.M. Rusly, R. Zhang, S. Kook and E.R. Hawkes, "Diesel Knock Visualisation in a Small-Bore Optical Engine," Proceedings of the Australian Combustion Symposium, ACS050, 2011