

## 압축착화기관용 가변밸브 듀레이션(VVD)시스템의 제어전략에 따른 유동 및 연소성능 해석

조인수\* · 김우택\*\* · 이진욱\*\*†

### Flow and Combustion Characteristics according Control Strategy of Variable Valve Duration System for Compression Ignition Engine

Insu Cho, Wootack Kim, and Jinwook Lee

**Key Words:** Variable Valve Duration(가변밸브 듀레이션), Variable Valve Timing(가변밸브 타이밍), Compression Ignition(압축착화), Engine Modeling(엔진모델링), Volume efficiency(체적효율)

#### Abstract

Recently, global warming and environmental pollution are becoming more important, and fuel economy is becoming important. Each automobile company is actively developing various new technologies to increase fuel efficiency. CVVD(Continuously Variable Valve Duration) system means a device that continuously changes the rotational speed of the camshaft to change the valve duration according to the state of the engine. In this paper, VVT(Variable Valve Timing) and CVVD were applied to a single-cylinder diesel engine, and the characteristics of intake and exhaust flow rate and in-cylinder pressure characteristics were analyzed by numerical analysis. In order to analyze the effect of CVVD on the actual engine operation, the study was performed by setting the valve control and injection pressure as variables in two sections of the engine operating region. As a result, In the case of applying CVVD, the positive overlap with the exhaust valve is maintained, thus it is possible to secure the flow smoothness of air and increase the volumetric efficiency by improving the flow rate. The section 2 condition showed the highest peak pressure, but the pressure rise rate was similar to that of the VVT 20 and CVCD 20 conditions up to 40 bar due to the occurrence of ignition delay.

#### 1. 서 론

오늘날 이산화탄소 배출량 증가로 인한 지구온난화와 유해 배기가스로 인한 환경오염 등이 세계적인 관심사로 주목받는 시장 상황에서 연비는 중요한 기준이 되고 있다.

유럽의 자동차 회사들은 직접분사방식과 다운사이징 터보차저 기술을 통해 저연비 및 고출력을 지향하고 있다. 반면, 일본은 종래와 같은 자연급기식 포트분사방식을 일반적으로 많이 채택하고 있다. 그 대신 고압축비(13~14:1)와 늦은 흡기밸브 닫힘 시기 및 EGR기술을 적용하여 엔진의 열효율을 향상시키고 있다<sup>(1)</sup>.

이러한 신기술 중 흡배기를 제어하는 기술로, 국내 완성차에서 세계최초로 개발한 CVVD시스템의(Continuously Variable Valve Duration) 엔진 흡배기밸브 컨트롤 샤프트의 정밀 제어를 위한 스마트 구동기를 개발 중에 있으며, 향후 밸브트레인 내 일체화한 소형경량화 시스템으로 고도화할 계획으로 알려져 있다<sup>(2)</sup>.

(Received: 29 Oct 2019, Received in revised form: 13 Dec 2019, Accepted: 18 Dec 2019)

\*승실대학교 대학원 기계공학과

\*\*승실대학교 기계공학부

†책임저자, 분무공학회 중신회원

E-mail : immanuel@ssu.ac.kr

TEL : (02) 820-0929

CVVD 시스템은 엔진의 상태에 따라 연속적으로 캠 샤프트의 회전속도를 변화시켜 밸브 듀레이션을 변화시키는 장치를 의미한다<sup>(3)</sup>.

주요 목적은 첫째, 가솔린 엔진의 단점인 저속 시의 토크저하를 개선, 둘째, 실용구간(저/중속 RPM구간)에서의 연비 및 유해 배출가스를 저감하는 것이다. CVVD 시스템의 기능은 Fig. 1과 같이, ECU는 CAN통신을 통하여 목표 위치를 액추에이터에 전달하고 액추에이터는 모터를 동작하여 엔진 기구부를 목표하는 위치로 제어한다. 엔진 기구부의 위치가 바뀔때 따라 가변기구들은 캠 샤프트의 회전 속도를 변화시키게 되며 그에 따라 밸브의 열고 닫히는 시점이 변경된다<sup>(4)</sup>.

Figure 2에 나타난 국내 완성차 업체의 특허 내용에 따르면<sup>(5)</sup>, 흡기 및 배기 밸브의 타이밍을 최적으로 제어하는 방법에 따라 펌핑손실 저감, 연비 저감, 엔진 성능을 향상시키는 이점이 있다. 또한, 유효 압축비를 증가시켜 시동 연료량 저감, 시동성 개선 및 촉매 가열 시간을 단축시켜 배기가스를 감소시킬 수 있다. 또한, 배기 밸브에 2단계 조절식 가변 밸브 듀레이션 장치로 원가를 절감하면서도 동력 성능을 유지할 수 있다.

디젤 엔진에 VVT 및 VVL을 적용하면 높은 부하 조건에서 펌핑 손실을 증가시키지 않으면서 swirl 강도를 향상시키고 유효 압축비를 감소시켜 배기가스 재순환을 증가시킬 수 있는 등의 장점이 있다. 제어 방법에 따라 유효 압축비를 높여 탄화수소 배출을 감소시키는데 효

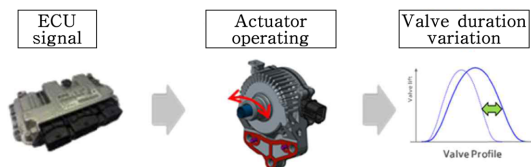


Fig. 1 Operation sequence of CVVD system<sup>(4)</sup>

과적인 것으로 알려져 있다<sup>(6)</sup>.

따라서 본 연구에서는 단기통 디젤 엔진에 VVT와 CVVD 개념을 적용하여 Fig. 2의 중저속 부하에 해당하는 section1과 section2의 음영 박스로 표시한 영역을 대상으로, 흡배기 유량특성과 연소 압력 특성을 수치해석법을 통해 상호비교 분석하고자 수행하였다.

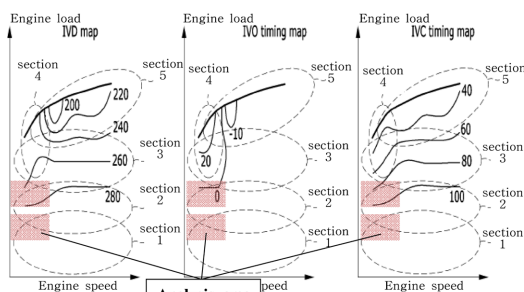
## 2. 단기통 엔진 해석모델링

### 2.1 해석조건

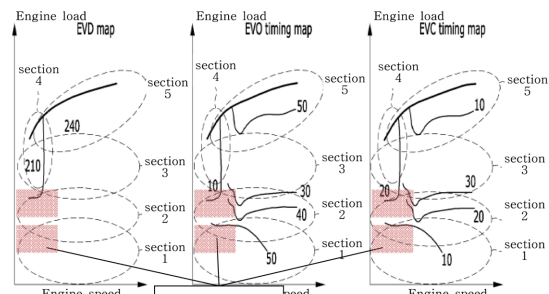
본 연구에서는 AMESim 해석툴을 사용하여 단기통

Table 1 Specification of single engine

Type	Single diesel engine (N/A)	
Bore (mm)	84	
Stroke (mm)	90	
Volume (cc)	498	
Valve type	SOHC	
Compression ratio	16:1	
Engine speed (rpm)	1200	
A/F	14.9	
IVO (CAD)	-10 ATDC	
IVC (CAD)	28 ABDC	
EVO (CAD)	54 BBDC	
EVC (CAD)	4 ATDC	
	Pilot	Main
Injection timing (deg)	15 ATDC	5 ATDC
Injected quantity (mg)	1.4	11.1



(a) Intake valve control



(b) exhaust valve control

Fig. 2 CVVD control strategy for driving condition<sup>(5)</sup>

Table 2 Numerical analysis conditions

Variation		value		
Engine speed (rpm)		1200		
Injected quantity (mg)		12		
Injection pressure (bar)		600	1200	
		(section1)	(section2)	
Crank angle				
	ATDC IVO	ABDC IVC	BBDC EVO	ATDC EVC
Ref.	-20	56	108	8
VVT 20	0	76		
VVT 40	20	96		
CVVD 20		76		
CVVD 40		96		
CVVD section1			50	10
CVVD section2	0	80	10	20

엔진을 대상으로 해석모델을 개발하였다. 단기통 엔진의 기본사양은 Table 1에 요약하였으며, Table 2에 본 연구에서 적용한 VVT 및 CVVD 변수를 나타내었다. Table 1 표시된 흡배기 타이밍은 일반적인CAD로 나타내었으며, 엔진 내부 유동 및 연소특성을 중점적으로 설명하기 위하여 Table 2부터 Crank angle 기준으로 표시하였다.

먼저 VVT와 CVVD 제어를 적용 시 기본적인 유동특성을 파악하기 위하여, VVT는 duration을 고정 한 상태로 지각시켰으며, CVVD는 IVO는 유지한 조건에서 duration을 10CAD씩 증가시켰다. 또한 실제 엔진작동에 CVVD의 영향을 분석하고자 Fig. 2에 나타난 구역 중 section1과 section2를 대상으로 밸브 제어와 분사압력을 변수로 설정하여 해석에 적용하였다.

Figure 3은 실선은 흡배기 밸브의 기본 작동 프로파일로, 본 연구에서 흡기밸브에 적용한 VVT(dash) 및 CVVD(dot) 프로파일을 함께 나타내었다. VVT 제어는 전체 흡기밸브가 지각되며, CVVD 제어시, IVO는 고정된 채 20, 40 CAD만큼 IVC가 증가한 특징이 있다. 그리고 각 그래프 범례의 단위는 Crank angle이다.

Figure 4는 실제 엔진에 적용된 section1과 section2를 고려한 CVVD 프로파일을 나타낸 것이다.

2.2 해석모델 검증

Figure 5는 본 연구에서 AMESim을 통해 모델링한 전

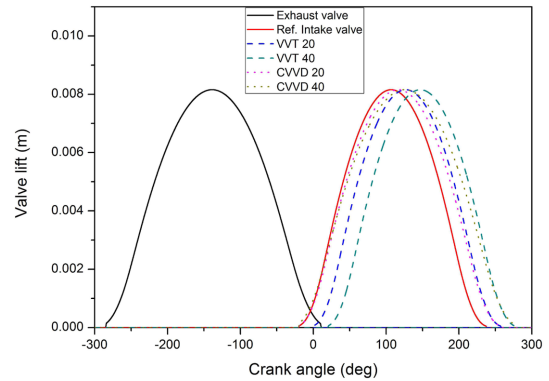


Fig. 3 Intake valve profile for VVT & CVVD

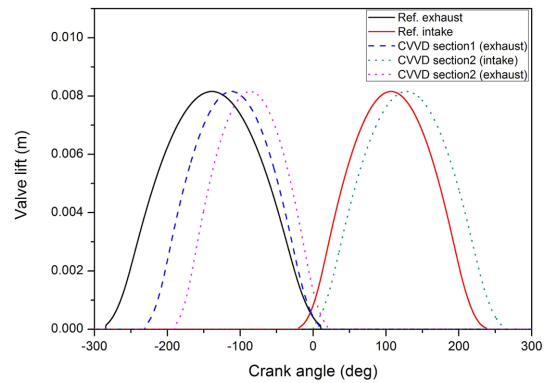


Fig. 4 Valve profile for section1 & section2

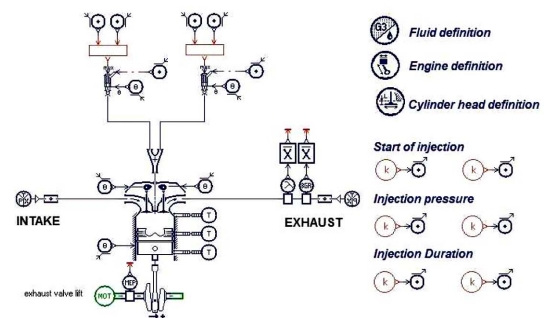


Fig. 5 AMESim Numerical model of single engine

체 단기통 디젤엔진의 해석모델을 나타낸 것이다. 2단 분사를 구현하기 위해 전자식 인젝터를 사용하여 각기 다른 시점에 분사할 수 있도록 하였다. 그리고 본 연구에서는 AMESim 기반 흡기 및 배기밸브 제어를 위한 밸브트레인 해석모델과 단기통 압축착화방식 적용 연소실 모델(re-entrant type)을 단기통 실제엔진 사양에 적합하도록 개발한 특징이 있다.

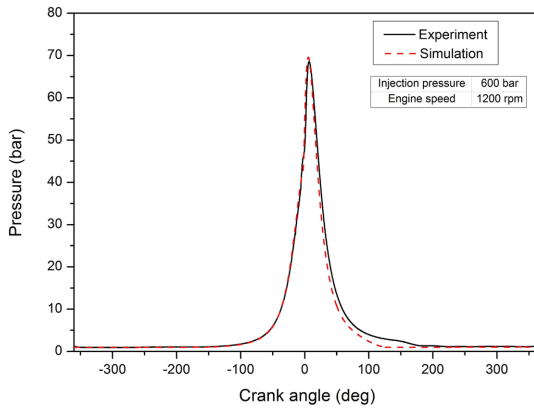


Fig. 6 Pressure in cylinder between experimental result and simulation

Figure 6은 동일한 조건에서 실험된 단기통 디젤엔진의 내부 압력선도로, AMESim 해석결과를 비교해서 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 압력선도는 매우 유사한 경향성을 보임을 알 수 있는데 이를 통해 본 연구의 해석모델에 대한 신뢰성을 먼저 확보할 수 있었다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 VVT 및 VVD 특성 비교

Figure 7은 VVT를 크랭크 각도 기준 20°, 40° 적용한 경우, 흡배기 밸브를 통한 mass flow rate를 나타낸 것이다. 먼저, 20° 지각시킨 경우 배기밸브와의 짧은 positive overlap이 존재함을 알 수 있었다. 흡기행정 초반에 발생하는 유량율의 감소는 상대적으로 낮고, IVC가 지각된 각도만큼 흡기밸브를 통해 역류되는 흡기 유량이 증

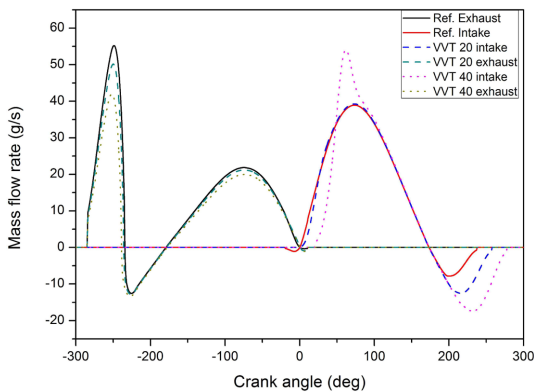


Fig. 7 Mass flow rate with VVT control

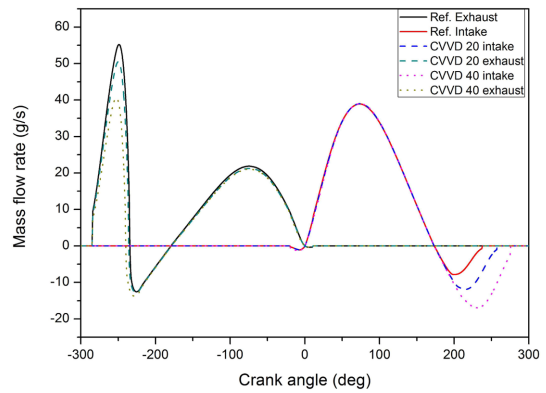


Fig. 8 Mass flow rate with CVVD control

가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 40° 지각시킨 조건에서는 negative overlap으로 배기밸브가 닫힌 후 신기가 유입되는 과정으로 20° 지각 조건대비 흡입되는 공기의 유동 발생 시점이 현격하게 지각됨을 알 수 있었다. 또한, 50° 근방에서 다른 유동과 다르게 최대 유량율의 최대값을 보인다. 이는 높아진 내부압력으로 흡기 밸브 열림 초반에 늦어진 기체교환이 순간적으로 발생한 결과로 판단된다.

Figure 8은 CVVD를 크랭크 각도 기준 20°, 40° 적용시, 흡배기 밸브를 통한 mass flow rate를 나타낸 것이다. 이는 IVO를 고정시키고 IVC를 지각시킨 조건으로, 배기밸브와 positive overlap은 유지되고 있기에 overlap 구간에서 유량의 변화는 나타나지 않으며, IVC 지각으로 인한 공기량 역류 증가만 나타남을 확인할 수 있었다.

Figure 9는 VVT와 CVVD를 흡기밸브에 적용하였을 때, 체적효율을 비교해서 나타낸 것이다. IVC가 동일하

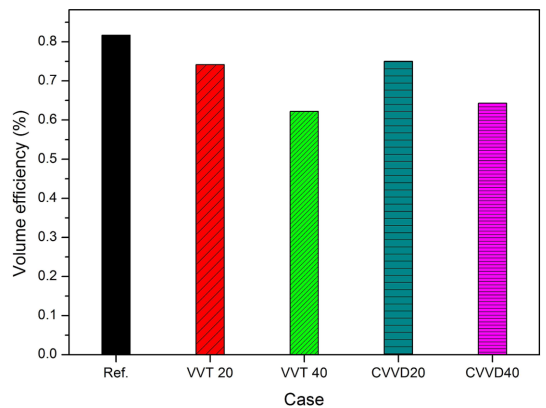


Fig. 9 Volume efficiency of each valve control

게 지각되는 경우, 체적효율의 감소는 지각 각도에 따라 선형적으로 감소되는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 동일한 IVC 지각기간이 적용되더라도 CVVD를 적용을 통해 overlap 구간을 유지하면 유동의 원활성을 확보할 수 있고 유동을 향상으로 체적효율을 높일 수 있는 장점이 있음을 이를 통해 알 수 있었다.

### 3.2 CVVD 작동 특성

Figure 10은 실제 CVVD가 적용되는 엔진 작동 구간에서의 흡·배기 유동을 나타낸 것이다. 기준 밸브 대비 각 section 구간에서 배기밸브로 배출되는 시기가 지각되며 최대 배출유량은 유사한 특성을 가짐을 알 수 있었다.

Figure 11은 실제 CVVD가 적용되는 엔진 작동 구간에서 체적효율을 나타낸 것이다. 배기밸브 duration이

변화된 section1 조건은 기본 프로파일과 유사한 정도의 체적효율을 나타내지만, section2 조건은 흡기밸브의 지각과 배기밸브 duration 감소로 실린더 내부에 유입된 공기량이 감소된 체적효율을 나타냄을 알 수 있었다.

Figure 12는 본 연구에서 적용한 밸브제어를 적용했을 시, 실린더 내부 압력 그래프를 나타낸 것으로 VVT 20과 CVVD 20 조건은 유사한 최대 압력 및 패턴을 나타냄을 알 수 있었다.

Section1 조건은 기본 조건과 유사한 체적효율임에도 최대 압력이 약 6 bar 하락했는데 이는 EVO 지각으로 유효한 내부유동 감소에 의한 것으로 판단된다. section2(1200 bar)조건은 기본조건보다 낮은 체적효율과 2배 높은 분사압력으로, 상대적으로 가장 높은 최대 압력을 나타내지만 착화지연의 발생으로 40 bar 상승까지 VVT 20 및 CVVD 20 조건과 유사한 압력상승을 보

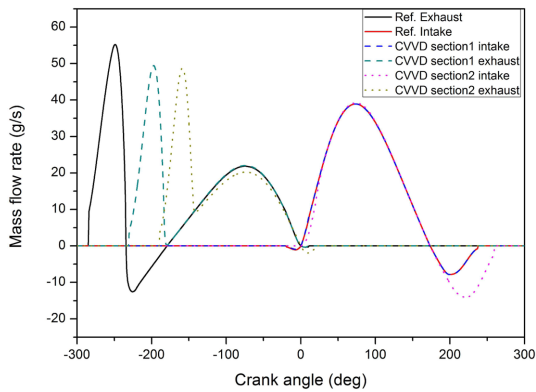


Fig. 10 Mass flow rate with CVVD control with different injection pressure and valve control

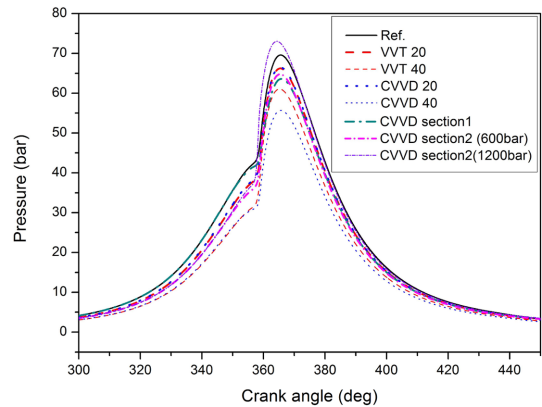


Fig. 12 Comparison of Pressure in cylinder with VVT and CVVD control

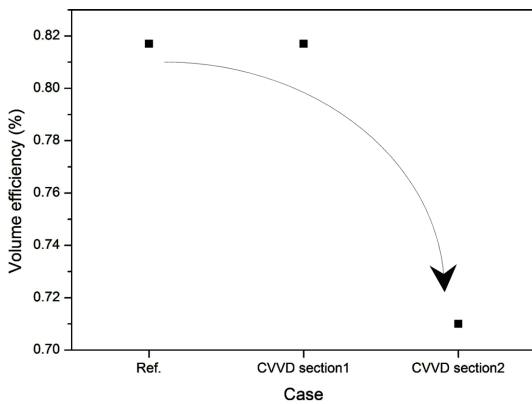


Fig. 11 Volume efficiency of CVVD control with different injection pressure and valve control

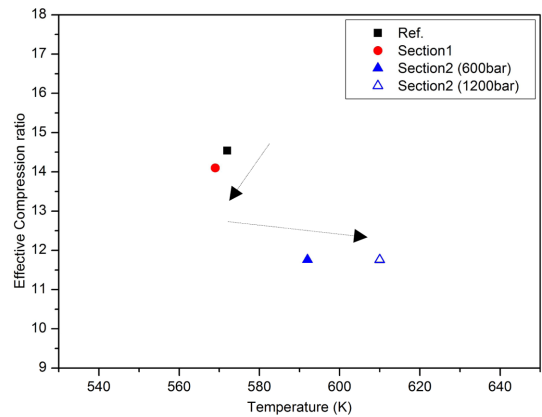


Fig. 13 Effective Compression ratio versus Temperature at exhaust line

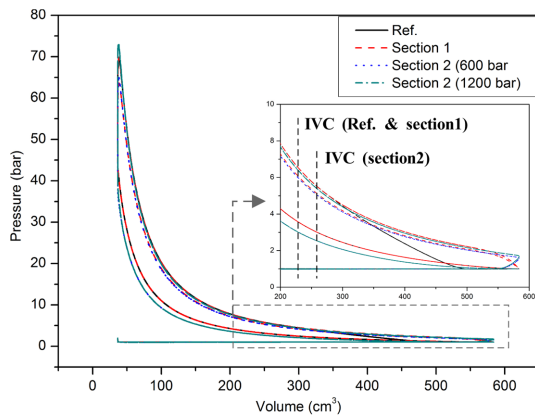


Fig. 14 P-V diagram of section1 and section2 with CVVD control

임을 알 수 있었다.

Figure 13은 section1과 section2 IVC 기준으로 산출한 유효압축비와 그에 따른 배기관에서의 온도를 나타낸 것이다. 기본 밸브제어 대비 EVO 및 배기duration이 감소한 section1은 배기밸브 열림 감소로 인한 배출유량의 감소로 압축비가 감소된 것으로 판단되며 이로 인해 다소 배기온도가 감소한 것으로 판단된다. section2의 경우 상대적인 흡기밸브 지각으로 인한 역류로 신기 감소와 배기밸브 열림 감소로 전반적으로 낮은 비율의 유체로 작동되어 압축비가 현저히 낮아졌지만, 고압분사로 연소성능이 향상되어 배기관내 배기가스의 온도가 상승한 것으로 판단된다.

Figure 14은 section1과 section2 조건의 P-V선도로, section2에서 압축행정 중 낮은 압력을 확인할 수 있으며, 압축행정보다 팽창행정이 높게 유지되는 것을 이를 통해 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구는 경유 차량의 운전 상황에 따라 연비 효율 향상을 위해 밸브 듀레이션을 변경하는 가변밸브 기구 (VVT, CVVD)를 적용할 경우, 단기통 디젤 엔진의 흡배기 유량과 연소압력 특성을 수치해석을 통해 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) IVC가 지각된 각도만큼 흡기밸브를 통해 역류되

는 흡기 유량이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, negative overlap 기간의 증가로 높은 흡기 유량을 보이는데 이는 높아진 실린더 내부압력으로 인한 흡기밸브 열림 초반에 늦어진 기체교환이 순간적으로 발생한 결과로 판단된다.

(2) IVO가 고정된 CVVD를 적용한 경우, 배기밸브와 positive overlap은 유지되고 있기에 신기의 유동 원활성을 확보할 수 있고 유동을 향상으로 체적효율을 높일 수 있는 장점이 있음을 알 수 있었다.

(3) section2 조건은 기본조건보다 낮은 체적효율과 2배 높은 분사압력 조건에서, 상대적으로 가장 높은 최대 압력을 나타내지만 착화지연의 발생으로 40 bar 상승까지 VVT 20 및 CVVD 20 조건과 유사한 압력상승율을 보임을 알 수 있었다.

(4) CVVD가 적용된 section2 결과를 통해, 기존의 밸브 제어대비 상대적으로 낮은 압축비로 압축손실을 줄이고, 고압분사를 적용하여 유효한 일을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- (1) 이기형, 내연기관의 현실과 미래. 오토저널, 40(3), 44-47, 2018.
- (2) 박정국, 자동차 파워트레인 전망과 현대캐피코 전략. 오토저널, 40(11), 16-18, 2018.
- (3) Oudumbar Rajput, Youngchul Ra, Kyoung-Pyo Ha and You-sang Son, Numerical Analysis of a Six-Stroke Gasoline Compression Ignition (GCI) Engine Combustion With Continuously Variable Valve Duration (CVVD) Control, ASME Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, 2018.
- (4) 최지훈, 서영택, 김래겸, 김남규 (2019). BLDC 모터를 이용한 CVVD 액추에이터 개발. 한국자동차공학회 춘계학술대회, 152-157, 2019.
- (5) 류인상, 하경표, 발명의 명칭: 연속 가변 밸브 듀레이션 엔진의 밸브 타이밍 제어 시스템 및 방법, 출원번호 10-2015-0176334.
- (6) Tomoda, T., Ogawa, T., Ohki, H., Kogo, T., Nakatani, K., & Hashimoto, E., Improvement of Diesel Engine Performance by Variable Valve Train System. International Journal of Engine Research, 11(5), 331-344. (2010).