

〈논 문〉 SAE NO. 97370073

# Ar과 CO<sub>2</sub>첨가에 따른 디젤기관의 성능에 관한 연구

## A Study on Diesel Engine Performance with Ar and CO<sub>2</sub> Addition

정 영 식\*, 이 상 만\*\*, 채 재 우\*\*\*  
Y. S. Jeong, S. M. Lee, J. O. Chae

### ABSTRACT

The request to develop the engines that are able to run without air or with very little oxygen condition is raised with the interest of ocean science or the mines. This research had already begun before the world war II, but had been stagnant owing to the appearance of nuclear power. Recycle diesel engines have ability to run under the above-mentioned condition. the recycle diesel engine recirculates exhaust gases into intake port and consumes additional oxygen supplied by oxygen tank. Carbon dioxide is controlled by the absorber. The combustion and emission characteristics of recycle diesel engines are quite different with conventional one because the working fluids of recycle diesel engines consist of Ar, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> as well as N<sub>2</sub>.

Recycle diesel engine is therefore different with general diesel engine from the viewpoint of intake air composition. It is required to investigate the effect of intake composition on the combustion and emission to know recycle diesel engine. In this study, NOx concentration, smoke and cylinder pressure are measured with the variation of Ar and CO<sub>2</sub>. Results show that the addition of Ar reduces NOx but increases smoke. Otherwise CO<sub>2</sub> reduces smoke and NOx simultaneously. Only CO<sub>2</sub> increases the ignition delay and both gases increase fuel consumption. Ar addition is superior to CO<sub>2</sub> addition for the performance of recycle diesel engine system but CO<sub>2</sub> has the advantage with respect to emission.

주요기술용어 : Intake Air Composition(흡기조성), Recycle(재순환), NOx(질소산화물), Smoke(배연), CO<sub>2</sub>(이산화탄소)

\* 정희원, 서울대학교 터보동력기계연구센터

\*\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 정희원, 인하대학교 기계공학과

### 1. 서 론

공기를 이용할 수 없는 곳에서 운전가능한

Recycle 디젤기관에 대한 연구가 2차대전전부터 세계적으로 많은 나라에서 연구되어졌다. 이러한 연구는 수중운동체에서의 주동력원이 그 일반적인 목적이었다. 그러나 전후의 팔목할 만한 핵동력원의 개발로 Recycle 디젤기관은 운전단계까지 연구되기 직전에 일시적으로 중단되었다. 최근, 국제적인 규모로 해양개발에 대한 연구가 시도되고 있다. 이 연구들은 수중 또는 지하에서 외부의 도움없이 운전가능한 독립적인 동력원의 개발을 필요로 하고 있다. Recycle 시스템은 지하 혹은 해저와 같이 외부로부터 지속적으로 공기를 공급받기 어려운 지역에서 사용된 것으로서 엔진으로부터 배출되는 배기가스중의 CO<sub>2</sub> 일부를 흡수하고 전량 흡기매니폴드로 공급하며 이때 원활한 연소를 위해 필요한 산소를 별도로 설치된 고압용기로부터 공급받게 되어 있다. 이때 연소조건은 흡기매니폴드로 공급되는 흡기의 조성 및 온도, 그리고 압력이 다르므로 기존의 대기상태에서 운전되는 디젤기관이나 EGR(Exhaust gas recirculation)과 상이하게 된다.<sup>1-5)</sup>

한편, 디젤기관은 다른 열기관에 비해 근본적으로 열효율이 높고 장기간 사용에 대한 고장이 적으며 신뢰성이 높기 때문에 이러한 분야에서의 동력원으로 각광을 받고 있다. 현재까지 흡기 조성 변화에 따른 엔진의 성능 및 배기가스 특성에 관한 연구는 대부분이 배기가스의 일부를 흡기와 혼합하여 공급하는 EGR 시스템이 대부분이었으며 Recycle 디젤기관의 경우와 같이 불활성가스의 변화에 따른 영향에 대한 연구는 거의 이루어져 있지 않다.<sup>6-7)</sup> 특히, 흡기의 압력이 대기압부근이 아니라 고압의 경우에 대해서는 앞으로 더욱 많은 연구가 필요한 것이 사실이다.

따라서, 본 연구에서는 Recycle 디젤기관에 대한 기초연구로서 대기압 이상의 흡기압력 조건에서 흡기조성(Ar, CO<sub>2</sub>)을 변화시켜 흡기의 비열비 및 산소농도변화가 실린더내의 연소상태 및 배기특성에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하며 이를 바탕으로 실제 Recycle 디젤기관에서 일어날 수 있는 현상을 예측하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구의 실험장치는 직접분사식 단기통 디젤기관, 동력계, 흡기조성형 가스실린더, 연료 및 공기량측정장치 등으로 구성되어 있다. 또한 측정장치로는 온도 측정장치, 가스분석기, 실린더 압력측정장치, 상사점 및 크랭크각도 측정장치, 데이터 취득장치 및 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 본 실험장치의 개략도는 Fig.1 과 같다.

#### 2.1.1 기관 및 유량측정장치

본 연구에 사용된 디젤기관은 직접분사식 4 사이클 기관으로서 그 제원은 Table 1과 같다. 기관과 동력계는 유니벌설 조인트로 연결한 후, 1/100mm 다이얼 게이지를 이용하여 축을 맞추었으며 동력계는 일본 Tokyo Meter사에서 제작한 것을 사용하였다. 흡기량을 측정할 수 있는 오리피스 유량계(FLG 25, float, flow cell, Japan)를 설치하였고 기관의 운전 중에 흡기의 맥동에 의한 흡기량 측정오차를 감소시키기 위

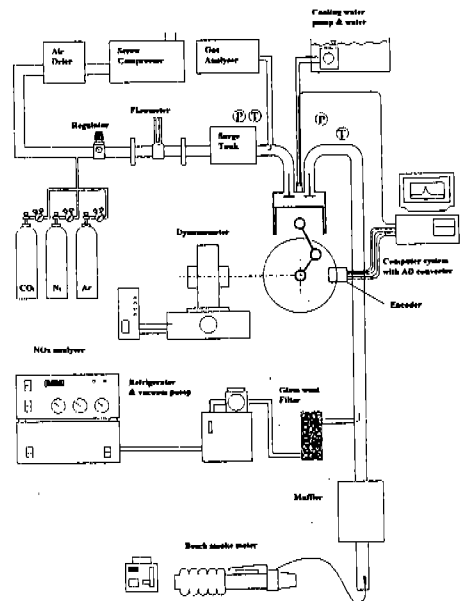


Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

Table 1 Specification of Test Engine

Description	Specification
Type	4 Cycle water cooled D. I diesel engine
No. of cylinder	1
Piston displacement	0.638 l
Bore×Stroke	95×95(mm)
Compression ratio	18
Rated power	7.35/2200(kW/rpm)
Maximum power	9.56/2400(kW/rpm)
Injection timing	14° BTDC
Fuel injection pressure	23 MPa
Injection nozzle	Multi hole nozzle (4-∅ 0.28 mm)
Dry weight	130kg

한 서지 탱크[Surge tank(400×500×1000mm<sup>3</sup>)]를 설치하였다. 연료량측정을 위하여 30cc, 50cc, 100cc의 플라스크가 수직으로 연결된 연료 소비량 측정장치(Fuel consumption meter, Tokyo Meter, Japan)를 사용하였다.

### 2.1.2 흡기조성 공급 및 측정장치

흡기조성가스를 공급하기 위해서 50 l 용량의 가스실린더를 각각 준비하였다. 각각의 가스는 구리관을 통하여 흡기라인과 연결하였으며 레귤레이터를 이용하여 흡입량을 조절하였다. CO<sub>2</sub>의 경우에는 가스의 특성상 열용량이 다른 가스에 비해 크므로 흡기공기를 상당히 냉각시킨다. 따라서, 별도의 가열장치를 마련하여 흡기공기의 냉각을 방지하여 동일한 흡기온도조건을 만들었다. 흡기조성을 파악하기 위해서 가스분석기(ECOM A<sup>1</sup>, ECOMER AMERICA, USA)를 사용하였다. 흡기조성은 각각의 흡기조성가스를 첨가한 후 가스분석기에서 O<sub>2</sub>의 농도를 측정하여 그 첨가정도를 측정하였다.

### 2.1.3 온도 및 압력측정장치

온도측정은 K-type 연전대를 사용하였다. 열전대의 온도보상은 물의 빙점, 대기온도, 비등

점을 이용하여 보상하였다. 본 연구에서는 흡기 온도, 배기온도, 기관 냉각수온도, 기관 오일온도 등을 측정하였고, 계수형 온도계(16 Channel thermocouple monitor, SR630)를 이용하여 온도값을 읽었다. 압력을 측정하기 위하여 현재 가장 널리 쓰이고 있는 압전식 압력 트랜스듀서(Piezoelectric pressure transducer, type 6061B, Kistler사)를 실린더 헤드에 장착하여 사용하였고 자료취득장치로는 A/D Converter board(DT2821-G-16-SE, Data Translation co.)를 사용하였다.

### 2.1.4 배기가스 분석장치

배기가스측정을 위한 샘플링 프르브를 배기관내에 설치하였으며 배기가스는 진공펌프를 사용하여 가스분석기로 유입되도록 하였다. 배기가스중에는 가스분석기에 유해한 여러 가지 입자상물질과 수증기를 포함하고 있기 때문에 유리섬유를 사용한 필터로 입자상물질을 제거하였고 수증기를 제거하기 위해서 샘플링라인을 웅축하여 수분을 제거하였다.

배기가스중의 NO<sub>x</sub>를 측정하기 위하여 NO<sub>x</sub> 분석기(Chemiluminescent NO<sub>x</sub> analyzer, Model 911, Teledyne, USA)를 사용하였으며 스모크의 측정에는 Bosch smoke meter(Diesel smoke evaluator, type : ETD 020.50, Bosch, Germany)를 사용하였다.

## 2.2 실험방법

본 연구에서는 흡입구에 가스라인을 설치하여 Ar, CO<sub>2</sub> 등을 흡입가스에 첨가시키고 샘플링 프르브를 흡기라인에 설치하여 산소농도를 측정함으로써 첨가가스의 양을 측정하였다. 또한, 각각의 흡입가스의 첨가량을 변화시키면서 실린더내의 압력, 배기가스온도, NO<sub>x</sub>, 스모크 등을 측정하였다. 각각의 경우에 기관소도는 1800rpm, 부하는 중부하로 고정하였으며 분사시기의 영향을 알아보기 위해서 19, 17, 14 및 9° BTDC로 분사시기를 변화시켜 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 가스의 조성번호를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Gas Composition Variation with the CO<sub>2</sub> and Ar addition

	Gas components		
	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	N <sub>2</sub> [%]
CO <sub>2</sub> addition	21.0	0.0	79.0
	20.9	0.5	79.5
	20.6	1.9	77.5
	20.5	2.4	77.1

	Gas components		
	O <sub>2</sub> [%]	CO <sub>2</sub> [%]	N <sub>2</sub> [%]
Ar addition	20.0	4.8	75.2
	18.8	10.5	70.7
	17.8	15.2	67.0
	16.7	20.5	62.8
	15.9	24.2	59.9

3. 결과 및 고찰

3.1 Ar과 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 Polytopic exponent의 변화

Fig.2는 분사시기 14° BTDC, 공급연료량 30.2 mg/cycle, 기관회전속도 1800rpm, 흡기온도 300 K, 압축비 13.2의 실험조건에서 Ar과 CO<sub>2</sub>첨가에 따른 폴리트로픽지수를 LogP-LogV선도의 기울기로부터 계산하여 나타낸 것으로서<sup>8-10)</sup> 폴리트로픽지수와 Ar과 CO<sub>2</sub>의 첨가에 따라 변화하는 흡기중의 산소량과의 관계를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 Ar 첨가에 따라 O<sub>2</sub>농도가 21.0%에서 약 15.9%로 변화하였으며 O<sub>2</sub> 농도가 낮아짐에 따라 일반적으로 폴리트로픽지수의 값은 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 Fig.3에서 단열압축과정으로 가정한 비열비의 값으로도 예측할 수 있으며 약 1.399의 비열비를 갖는 O<sub>2</sub>에 비해 값이 큰 Ar이 첨가되기 때문이다. 이와는 달리 O<sub>2</sub>에 비해 비열비가 작은 CO<sub>2</sub>첨가에 의한 폴리트로픽지수는 Ar첨가의 경우보다 작게 나타났다. 그림에서 알 수 있듯이 본 연구에서는 EGR을 하는 기관에 비해 압축비가 낮으며 과급에 의해 혼합기가 희박하여 CO<sub>2</sub>첨가에 의해 기관의 성능이 악화되어 O<sub>2</sub>를 20.5%이하로 낮출 수 없었다.

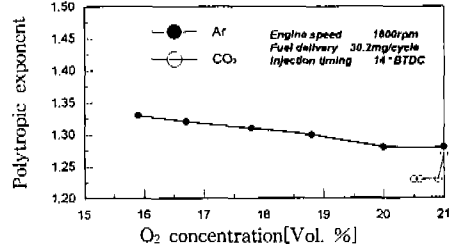


Fig.2 Variation of Polytopic Exponent in Compression Period with O<sub>2</sub> Concentration

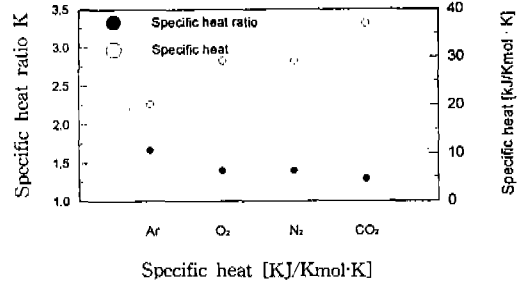


Fig.3 Specific Heat Ratio and Specific Heat of Gases

3.2 Ar과 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 착화지연기간의 변화

Fig.4는 Ar과 CO<sub>2</sub>첨가에 따른 착화지연기간을 나타내고 있다. Ar첨가의 경우에는 첨가량의 변화에 관계없이 착화지연기간이 약 11° BTDC로 거의 일정하였으나 CO<sub>2</sub>첨가는 착화지연기간을 급격하게 변화하여 22° BTDC까지 증가하였다. 일반적으로 공기보다 높은 비열값을 갖는 기체의 첨가는 분사시 연소실내 온도를 낮추어 착화지연기간이 길어지게 되므로 CO<sub>2</sub>첨가의 경우 O<sub>2</sub>농도가 감소함에 따라 착화지연기간이 증가하게 된다. 이와는 달리 Ar의 경우에는 비열값이 공기에 비해 낮기 때문에 착화지연기간에 영향을 주지 않았다.

Fig.5는 Ar과 CO<sub>2</sub>첨가와 분사시기변화에 따른 착화지연기간의 변화를 나타낸 것으로 Ar의 경우에는 연구에 사용된 디젤기관의 본래의 설계값인 14° BTDC의 경우에서 착화지연기간이 가장 짧았으며 진각 혹은 지각의 경우는 착화지연기간이 4~5° 증가하였다. 한편, CO<sub>2</sub>의 경우에는 14° BTDC를 기준으로 분사시기를 진각 혹은

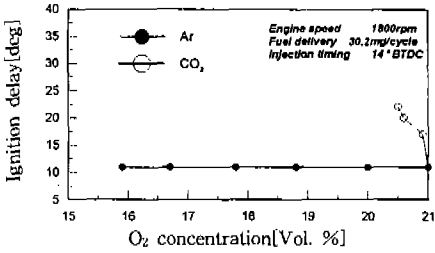


Fig.4 Variation of Ignition Delay in Compression Period with O<sub>2</sub> Concentration

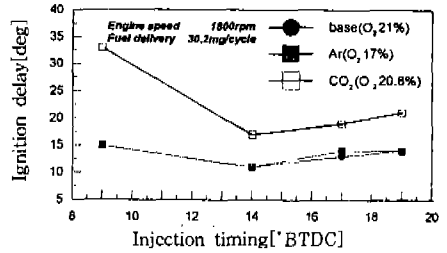


Fig.5 Variation of Ignition Delay in Compression Period with Injection Timing

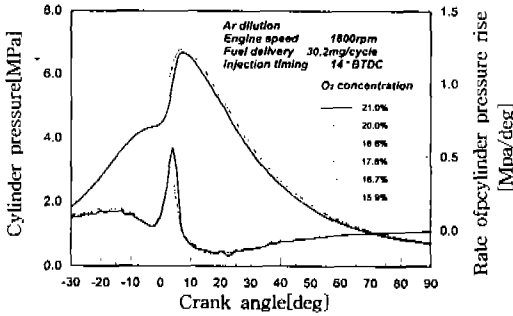


Fig.6 Variation of Cylinder Pressure and Rate of Cylinder Pressure with O<sub>2</sub> Concentration in Ar Dilution

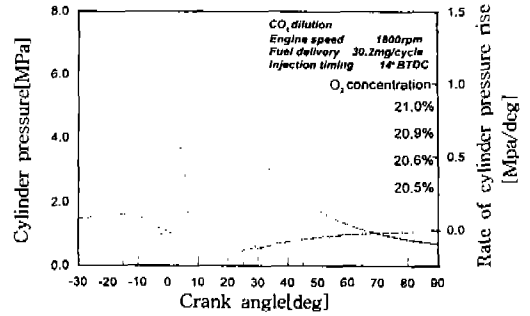


Fig.7 Variation of Cylinder Pressure and Rate of Cylinder Pressure Rise with O<sub>2</sub> Concentration in CO<sub>2</sub> Dilution

지각함에 따라 착화지연기간이 증가하여 그 증가폭이 최고 15°에 이르렀으며 소량을 첨가함에도 불구하고 전 분사시기에서 Ar첨가의 경우에 비해 착화지연기간이 크게 증가하였다.

### 3.3 Ar과 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 연소실압력의 변화

Fig.6과 7은 각각 Ar과 CO<sub>2</sub>첨가에 따른 연소실압력 및 압력상승률을 나타낸 것이다. Ar첨가량이 증가하는 경우 O<sub>2</sub>농도가 감소함에도 불구하고 최대폭발압력은 거의 변화하지 않음을 볼 수 있다. 이는 Ar의 낮은 비열값에 기인하며 이러한 경향은 분사직전의 연소실압력에서 두드러진다. 또한, 착화지연후 압력이 급상승하는 크랭크 각도가 3° BTDC로 거의 일정함을 알 수 있으며 이는 차과지연을 증가시키는 O<sub>2</sub>농도 감소에 의한 효과와 착화지연을 감소시키는 Ar첨가에 의한 압축말기 압력·온도의 증가에 의한 효과가 서로 상충되어 착화지연기

간이 변하지 않기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 Ar첨가에 관계없이 예혼합연소의 시작시기가 동일할 것으로 추측되고 O<sub>2</sub>농도의 감소로 인하여 연소온도가 감소하여 NO<sub>x</sub>가 감소될 것이라는 것을 예상할 수 있다. 이와는 달리 CO<sub>2</sub>첨가량 증가에 따라 착화지연기간은 17°에서 33°로 증가하였고 최대폭발압력은 6.68MPa에서 3.9MPa로 감소하였다. 이는 CO<sub>2</sub>첨가량 증가에 따른 비열값 상승 및 O<sub>2</sub>농도의 감소로 인한 착화지연의 증가로 연소기간이 팽창과정중에 놓이기 때문이다. 또한, CO<sub>2</sub>첨가에 따라 최고연소실압력이 나타나는 크랭크각도가 점차적으로 늦추어져 O<sub>2</sub>농도가 20.5%인 경우에는 착화지연이 길어져 이에 따라 연소실압력이 낮아지기 때문에 최고압력이 모터링의 경우와 유사하게 상사점 부근에서 나타났다.

### 3.4 Ar과 CO<sub>2</sub> 첨가에 따른 성능 및 배기특성의 변화

Fig.8과 9는 Ar과 CO<sub>2</sub>첨가에 따른 성능 및 배기특성을 나타낸 것이다. Ar과 CO<sub>2</sub>첨가량에 따라 O<sub>2</sub>농도감소로 배기가스온도는 다소 낮아지나 그 차이는 크지 않으며 연료소비율은 특히 CO<sub>2</sub> 첨가에 의해 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 연료소비율 증가는 높은 비열값으로 인한 연소실압력의 저하 때문에 성능이 감소함으로 나타났다. NO<sub>x</sub>농도는 일반적으로 연소온도와 고온으로 유지되는 시간, 그리고 O<sub>2</sub>농도에 의해 영향을 받으므로 연소온도가 저하, NO<sub>x</sub>는 감소하는 경향을 나타냈으며 O<sub>2</sub>농도변화에 따라 410ppm에서 115ppm으로 약 70%의 변화를 보이고 있다.<sup>11)</sup> 또한, Ar첨가에 따라 NO<sub>x</sub>농도는 전영역에서 CO<sub>2</sub>첨가의 경우보다 높게 나타났으며 이는 Ar의 낮은 비열값에 기인한다. 한편, 매연의 경우는 NO<sub>x</sub>와 상반된 생성 및 소멸조건을 갖는다. 디젤기관에서 매연의 농도는 온도의 함수로, 온도가 증가할수록 매연은 감소하며 또한 일단 생성된 매연은 O<sub>2</sub>와 접하여 산화되기도 한다. 따라서, Ar첨가의 경우, 첨가량이 증가할수록 온도가 감소하므로 매연의 생성량은 증가하였으나 CO<sub>2</sub> 첨가에 의해서는 점차적으로 낮아져 거의 검출되지 않았다. 그리고, CO<sub>2</sub>첨가에 의해 착화지연기간과 예혼합연소기간이 길어지고 이에 따라 상대적으로 짧아진 후연소기간중에 매연이 생성이 감소, Ar첨가의 경우보다 매연이 소량첨

가에도 불구하고 상당히 낮아짐을 알 수 있다.

또한, 그림에서 볼 수 있듯이 분사시기 14° BTDC를 기준으로 진각 혹은 지각되는 경우, 매연은 감소하였으며 NO<sub>x</sub>농도는 진각하는 경우 증가, 지각하는 경우에는 감소하였다. 일반적으로 분사시기를 진각하는 경우에는 착화지연기간이 길어지고 이에 따라 예혼합연소기간중에 많은 양의 연료가 연소되어 고온의 연소가스를 생성하게 되기 때문에 NO<sub>x</sub>농도는 증가, 매연은 감소하게 된다. 한편, 분사시기가 과도하게 지각이 되면 착화지연기간 및 예혼합기간이 길어지나 연소가 팽창과정중에 놓이기 때문에 연소가스의 온도의 저하로 NO<sub>x</sub>생성이 줄어들고 후연소기간의 감소로 매연 또한 줄어든다. CO<sub>2</sub>첨가에 의해 매연은 Fig.8에서와 마찬가지로 전영역에서 극히 낮은 값을 보였으며 NO<sub>x</sub>농도 또한 소량첨가에도 불구하고 O<sub>2</sub>농도 21%의 경우보다 낮아짐을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 단기통 직접분사식 디젤기관을 대상으로 흡기조성(Ar, CO<sub>2</sub>) 변화에 따라

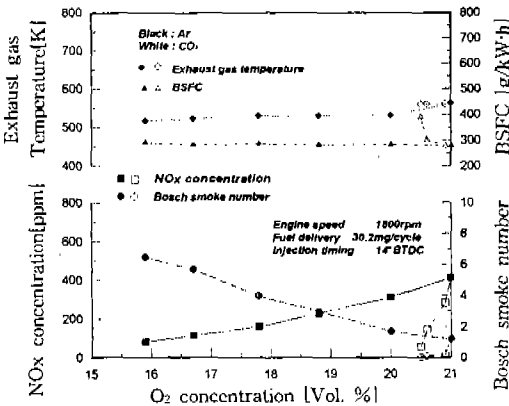


Fig.8 Performance and Emission Characteristics with O<sub>2</sub> Concentration

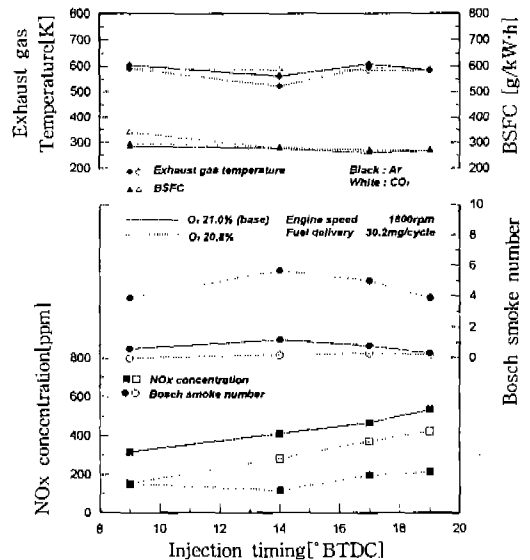


Fig.9 Emission Characteristics with Injection Timing

연료분사시기 14° BTDC, 공급연료량 30.2mg/cycle, 기관회전속도 1800rpm, 흡기온도 300K, 압축비 13.2의 실험조건에서 실린더내의 압력, 배기가스온도, NO<sub>x</sub>, 매연, 연료소비율 등을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 플리트로픽 상수는 Ar첨가량에 비례하여 증가하고 CO<sub>2</sub>첨가량에는 반비례하여 감소하였다.
- 2) Ar의 첨가는 착화지연기간 변화에 영향을 미치지 못하였으나 CO<sub>2</sub>첨가에 의해서는 첨가량의 증가에 따라 크게 증가하는 경향으로 나타났다.
- 3) Ar첨가에 따라 연소실압력은 점차적으로 증가하였으나 CO<sub>2</sub>첨가에 의해서는 오히려 낮아지는 경향을 나타내었다. 또한, CO<sub>2</sub>첨가에 있어서는 착화지연에 의해 연소실 최고압력이 나타나는 크랭크각도가 점차적으로 늦추어지는 것을 알 수 있었다.
- 4) Ar첨가는 NO<sub>x</sub>농도를 감소시켰으나 매연을 증가시켰다. NO<sub>x</sub>는 분사시기를 지각 시킴에 따라 가장 낮은 값을 나타냈으나 매연은 14° BTDC를 기준으로 이보다 분사시기가 진각 혹은 지각되는 경우에 감소함을 보였다.
- 5) CO<sub>2</sub>첨가는 NO<sub>x</sub>농도와 매연을 동시에 감소시켰으나 연소성의 악화로 인하여 연료소비율의 큰 증가현상을 보였다.
- 6) 실제 Recycle디젤기관의 경우, Ar과 CO<sub>2</sub>의 첨가는 공히 연료소비율의 증가를 가져왔으나 반면에 기관성능 측면에서는 Ar첨가가, 배기가스측면에서는 CO<sub>2</sub>첨가가 유리하다는 것을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. G. Stumpp, and W. Banzhaf, "An Exhaust Gas Recirculation System for diesel Engines", *SAE 780222*, pp. 934~945, 1979.
2. T. Asada, and M. Nagai, "Investigation

- on Recycle and closed-Cycle diesel Engines", *SAE 800964*, pp. 2967~2986, 1980.
3. K. Narusawa, M. Odaka, N. Koike, Y. Tsukamoto, and K. Yoshida, "An EGR Control Method for Heavy-Duty diesel Engines under Transient Operations", *SAE 900444*, pp. 991~1004, 1990.
4. N. Uchida, Y. Daisho, T. Saito, and H. Sugano, "Combined Effects of EGR and Supercharging on diesel Combustion and Emissions", *SAE 930601*, pp. 769~775, 1993.
5. D. L. Mitchell, J. A. Pinson, and T. A. Litzinger, "The Effects of Simulated EGR via Intake Air Dilution on Combustion in an Optically Accessible DI diesel Engine", *SAE 932798*, pp. 2313~2331, 1993.
6. 엄종호, 정동수, N. Koike, M. Odaka, "CO<sub>2</sub> 가스첨가에 의한 배기가스 및 연소특성해석에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회, pp. 523~528, 1993.
7. 김세원, 이재규, "흡기 조성 변화가 디젤기관의 성능에 미치는 영향", 한국자동차공학회 논문집 제2권, 제2호, pp. 49~58, 1994.
8. Edward F. Obert, "Internal combustion Engine and Air Pollution", Third Edition, 1973, 9. J. F. Heywood, "Internal combustion engine Fundamentals", McGraw Hill, 1988.
9. J. F. Heywood, "Internal Combustion engine Fundamentals", McGraw Hill, 1988.
10. J. A. Gatowski, E. N. Balles, K. M. Chun, F. E. Nelson, J. A. Ekchian and J. B. Heywood, "Heat Release Analysis of Engine Pressur Data", *SAE 841359*, pp. 961~977, 1984.
11. R. C. Flagan, "Fundamentals of Air Pollution Engineering", Prentice Hall, 1988.