

공학석사 학위논문

디젤기관의 피스톤 크라운 캐비티 형상에 따른  
배기 배출 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Exhaust Gas Emission Characteristics  
according to the Piston Crown Cavity of Diesel Engine

지도교수 배종욱

2003年 2月

한국해양대학교 대학원

기관공학과 정태평

本 論 文 을 鄭 兌 平 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

위 원 장      崔 在 星      (인)

위    원      趙 權 回      (인)

위    원      裴 鍾 旭      (인)

2 0 0 2 年 1 2 月 1 5 日

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

機 關 工 學 科 鄭 兌 平

## 목 차

List of nomenclature .....	ii
Abstract .....	iii
1. 서론 .....	1
2. 실험장치 및 방법 .....	3
2. 1 피스톤 형상 .....	3
2. 2 실험장치 .....	6
2. 3 실험방법 .....	9
3. 실험 결과 및 고찰 .....	14
3. 1 최대 토크곡선 비교 .....	14
3. 2 2단연소형 피스톤의 배출가스 특성 비교 .....	18
3. 3 충돌 스윙형 피스톤의 배출가스 특성 비교 .....	31
3. 4 IMO NOx Regulation 비교 .....	42
3. 5 연소실 압력 및 열발생률 .....	44
4. 결 론 .....	47
참고문헌 .....	49

## List of nomenclature

$\lambda$	Excess air ratio
	Theoretical air ratio
$L_o$	Dry combustion gas quantity
$V_g$	Fuel consumption rate
$b$	Exhaust gas emission quantity
$e$	Exhaust gas concentration
$x$	Exhaust gas molecular quantity
$M$	

**An Experimental Study on Exhaust Gas Emission Characteristics  
according to the Piston Crown Cavity of Diesel Engine**

Tae-Pyung, Jeong

*Department of Marine Engineering  
The Graduate School of Korea Maritime University*

Key word : 2-stage combustion, Impinge, Cavity, Heat Release

**Abstract**

Recently the environment of the world has been exposed to the severe air pollution emitted from the rapid developing industries. And the necessity of controlling the emission from the diesel engines such as NO<sub>x</sub>, PM, SO<sub>x</sub>, CO<sub>x</sub> also has been raised up gradually. Among them the NO<sub>x</sub> emission from the oceangoing vessels has been layed under regulation from international convention of MARPOL Annex VI of IMO, dated from 1st January, 2000.

Various measures have been tried to reduce the NO<sub>x</sub> emission from diesel engine but with partial success, because the mechanisms of NO<sub>x</sub> formation and PM formation appear to have trade-off relation between each other. Therefore it has been known to be difficult to reduce NO<sub>x</sub> emission and PM emission simultaneously.

Two stage combustion method ie. a combustion process which has rich combustion stage and lean combustion stage one by one, has been developed successfully to reduce NO<sub>x</sub> formation in continuous combustion chambers such as in the boilers. But until yet it is not successful to apply the same method in intermittent combustion chamber like in the diesel engine cylinder, as it was, only several research works were carried out.

In this study the various modification of configurations of piston crown and spray impingement was attempted to attain a geometry that realize the two stage combustion in the diesel engine cylinder and to acquire a simultaneous reduction of NO<sub>x</sub> and PM.

It was found that the NO<sub>x</sub> emission decreased significantly at various condition of operation both with the two stage combustion type engines & impinge swirl type engines of this series of configuration, but other values such as smoke, CO and specific fuel consumption deteriorated as usual. And it was suggested that the weakening of swirl intensity due to the existence of radial division of rich-lean combustion region and reduction of penetrating momentum due to the spray impingement act as a reason of ineffectiveness of this series of combustion chamber geometry.

## 1. 서론

지금까지 박용 디젤기관의 개발과제는 주로 연료의 경제성, 기관의 신뢰성, 출력 및 내구성의 향상에 주력하여 왔으나, 환경단체의 압력이나 국제협약 규정에 의하여 선박용 기관에도 관심의 초점이 변화를 보이게 되었다.

날로 심각해져 가는 대기오염을 방지하기 위해 국제사회는 대기오염에 대한 규제를 강화해 나가고 있다. 해상에서도 IMO(국제해사기구, International Maritime Organization)를 통하여 130 kW 이상의 엔진을 탑재하고, 국제항해에 종사하는 선박에 대하여 기관의 배기가스 중 지구 온난화, 광화학 스모그, 암 유발 등 각종 질병을 유발시키는 질소산화물(NOx)에 대한 배출규제가 단계적으로 강화될 예정이다. 이에 따라 기관제조자들도 기관의 출력을 증가시키면서 대기오염 물질을 적게 배출하는 환경 친화적 기관을 개발하는데 주력하고 있다.

일반적으로 내연기관의 배기가스 오염물질에는 질소산화물(NOx), 유황산화물(SOx), 탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 미립자 물질(PM, Particulate Matter)등이 있다. 디젤기관은 모든 열기관 중에서도 가장 CO<sub>2</sub> 배출율이 적으며 평균 공기과잉율이 높기 때문에 불꽃점화기관에 비해 HC와 CO의 배출이 낮다. SOx는 전적으로 연료유 중의 유황 함량에 의해 좌우되고 연소과정에서 조절할 수 없으며 석유의 정제과정에서 탈황과정을 거쳐, 저유황유를 사용할 수밖에 없다. 그러므로 선박용 디젤기관에서는 NOx와 PM의 배출억제가 가장 중요한 문제로 취급된다. 따라서 이들의 저감을 위한 연구가 중점적으로 진행되고 있으나, NOx와 PM의 저감방법은 서로 교환관계에 있기 때문에 효과적인 동시 저감 방법의 개발이 어려운 실정이다.

질소는 연소과정에서 대부분이 반응하지 않고 배출 되지만 소량은 산화하여 여러 가지 형태의 질소산화물 NO, NO<sub>2</sub> 등을 형성하는데 그 양은 연소온도가 높을수록, 잔존 산소농도가 높을수록 발생률이 높아지며, 이러한 조건에 잘 맞는 디젤기관에서 많이 발생한다. 즉, 이론공연비( =1.0) 부근에서 발생율이 최대가 되며 공기과잉율  $\lambda$ 가 0.8 이하의 과농 연소상태 또는  $\lambda$ 가 1.4 이상의 희박한 연소상태에서는  $\lambda$  발생율이 현저히 감소되는 특징이 있다. 이러한 점을 이용한 2단 연소법은 1차 공기를  $\lambda < 1.0$ 에서 공급하여 연료 과농상태에서 1차적으로 연소시켜 질소화합물이 NO로 전환되는 것을 막고 2차 공기에 의해서 잔존하는 미연성분의 연소완결과 질소산화물의 분해를 촉진하는 방법이다.

본 연구에서는 2단연소의 실현을 위해서 피스톤 캐비티 형상을 개조하여 크라운 정부 중앙부에 분무 충돌방식에 의하여 혼합기의 균일화를 이루고 연소실의 구획을 과농 연소영역과 희박 연소영역으로 나누어 연소실내에서의 연소가스 유동을 유효하게 유도하는 방법에 대해서 실험하였다. 또한, 분사된 연료가 크라운 돌출면에 충돌하여 연료 액적이 더욱 작은 액적들로 분쇄되면서 튀어나가거나 충돌면에 유막을 형성함으로써 혼합을 촉진시키고 연소가스의 충돌스웰에 의한 희박연소에 의해서 질소산화물(NOx)을 저감시킬 수 있는 방법에 대하여 여러 가지 피스톤 크라운 캐비티 형상에 분사각도, 분사압력의 변화를 주어 실험을 통하여 연구하였다.



## 2. 실험장치 및 방법

### 2. 1 피스톤 형상

연소실 체적이 631cc, 압축비가 19인 기존의 고와류형 피스톤을 동일 압축비를 갖는 상태에서 NOx 저감을 위하여 피스톤 크라운 캐비티 형상을 개조하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 피스톤 캐비티 형상을 나타내고 있다.

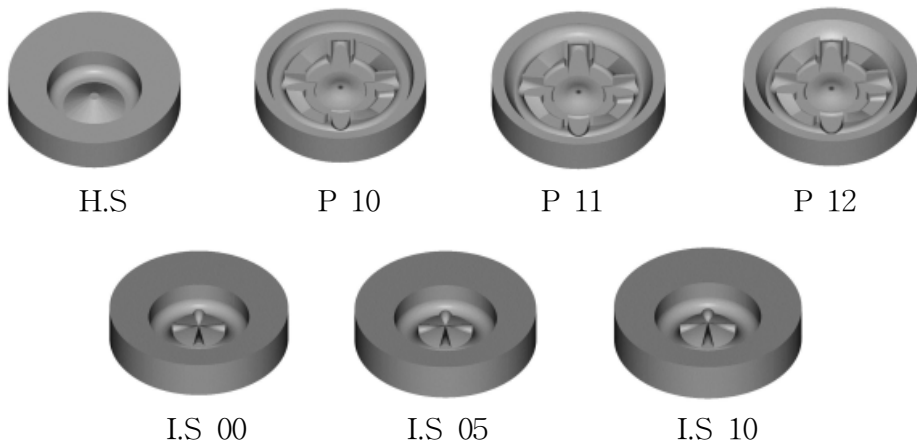


Fig. 1 Configurations of various piston crowns used for test.

기존의 고와류형 피스톤은 4개의 노즐 분사공에서 분사된 연료가 깊은 원형의 공간에서 강한 와류에 의한 공기의 흐름으로 신속히 혼합되어 연소되는 연소과정을 형성한다. 본 연구에서는 기존의 고와류형 피스톤을 H.S라 명명한다.

2단연소를 목적으로 개조한 2단연소형 피스톤의 연소실에서는 분무가 피스톤 상측 중앙부에서 방사상으로 충돌한 후 2단계의 연소과정을 갖게 되며 초기에는 연료 과농상태로, 후기에는 연료 희박상태로 연소하도록 구성하였다.

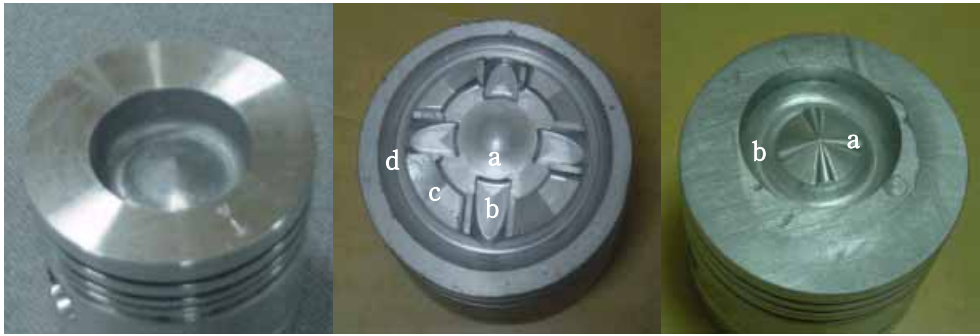
기존의 노즐 분사각 144°에서는 피스톤 상부에서 충돌하지 않으므로 노즐의 분사각도를 100°로 개조하였으며 개조전의 분사각도 144°의 것과 비교 실험하였다. 충돌 2단연소형 피스톤 캐비티 형상의 특징은 Fig. 2 b)에 나타낸 것과 같이 충돌면 a부, 과농연소부 b부, 희박연소부 c부 및 환상의 와류부 d부로 이루어지고, 원활한 연소가스의 흐름을 위하여 b부의 연소가스 유동통로 단면 형상의 폭 × 깊이를 각각 10 × 7, 11 × 7.5 및 12 × 8 mm의 반원 모양으로 다르게 제작하였다. 또한, c부에는 캐비티 주위로 원형 통로를 주어 와류가스와 미연소가스가 피스톤 팽창행정시 희박연소를 실현할 수 있도록 하였으며, 압축비를 같게 하기 위해 나머지 캐비티 체적을 조절하여 제작하였고, Fig. 1에 나타낸 것과 같이 각각 P 10, P 11 및 P 12라고 명명하였다.

4개의 분사공에서 분사된 연료가 분사되면서 충돌면 a부에서 충돌하여 b부로 향하게 되며 b부에서 일단 과농한 상태로 연소가 이루어진다. 과농연소된 b부의 가스는 팽창하여 c부와 d부에 혼입하여 가면서 희박연소가 이루어진다. b부에 잔존하는 과농한 연소가스는 피스톤 팽창행정시 역 스퀴시 흐름에 의하여 d부에 있는 공기와 혼합되면서 2차적으로 희박연소를 진행하게 된다.

신속한 희박 혼합연소를 목적으로 개조한 충돌 스월형 피스톤은 노즐 분사각도 100°로 분사된 분무가 피스톤 상측에 있는 충돌면에 충돌하여 액주가 없는 분무의 상태로 분사되도록 한 것이다. 분무들은 캐비티 외주의 와류공기와 신속 혼합됨으로써 가능하면 이론 혼합기 상태에 체류하는 시간을 최소화하여 연소가 진행될 수 있도록 캐비티 형상을 구성하였다.

피스톤 캐비티 형상의 특징은 Fig. 2 c)에서 나타낸 것과 같이 피스톤의 상중양부에 4개의 돌출면이 있는 충돌면 a부와 그 바깥에 있는 환상의 와류부 b부로 이루어진다. 충돌면 돌출부의 경사각은 각각 0°, 5° 및 10°로 구분하여 제작하여 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 각각 I.S 00, I.S 05 및 I.S 10이라 명명하였다. Fig. 2는 기존의 고와류형 피스톤과 개조하여 제작된 2단연소형 피스

톤 및 충돌 스윙형 피스톤의 크라운 캐비티 형상의 사진을 나타낸다.



a) High swirl                      b) 2-stage combustion    c) Impinge swirl

Fig. 2 Photos of 3 types of pistons.

## 2. 2 실험장치

본 실험에 사용된 기관은 631cc, 단기통 4행정 직접분사식 디젤기관(대동, ND80DI)이며 수동력계를 이용하여 부하를 조절하였고, 기관의 주요 사항은 Table 1과 같다.

Table 1 The specification of test engine.

Description	Specification	Remarks
Model	ND80DI	Daedong, Korea
Engine type	Single, water-cooled 4 stroke diesel engine	
Piston displacement (cc)	631 cc	
Cylinder bore x stroke (mm)	92 × 95	
Max. power (kW / rpm)	5.88 / 2,200	
Compression ratio	19	
Fuel injection pressure (MPa)	18 MPa	18 MPa, 21 MPa 24 MPa
Nozzle injection angle (°)	144°	144°, 100°

실험장치는 공시기관, 수동력계, 연소분석기(Quintox), 엔코더, 실린더 압력 측정장치(Lab View), 스모크미터 등으로 구성되어 있다. 실험기관은 631cc, 압축비 19의 고와류형 기관이며 2단연소용으로 개조된 피스톤은 압축비를 동일하게 하기 위해 피스톤 크라운 캐비티의 체적을 동일하게 하였고, 연소가스 유동통로를 Fig. 2와 같이 10, 11 및 12 mm 3가지로 설계하여 노즐 분사각도를 기존의 144°와 100°로 분사압력 18 MPa에서 실험하였다. 또한, 충돌 스월

형 피스톤은 노즐 분사각도를  $100^\circ$ 로 개조한 노즐을 이용하여 노즐 분사압력을 18 MPa, 21 MPa, 24 MPa로 변화시키면서 충돌면에 분사된 연료의 충돌 스월에 의한 연소를 실험하였다. Fig. 3은 실험장치의 개략도를 나타낸다.

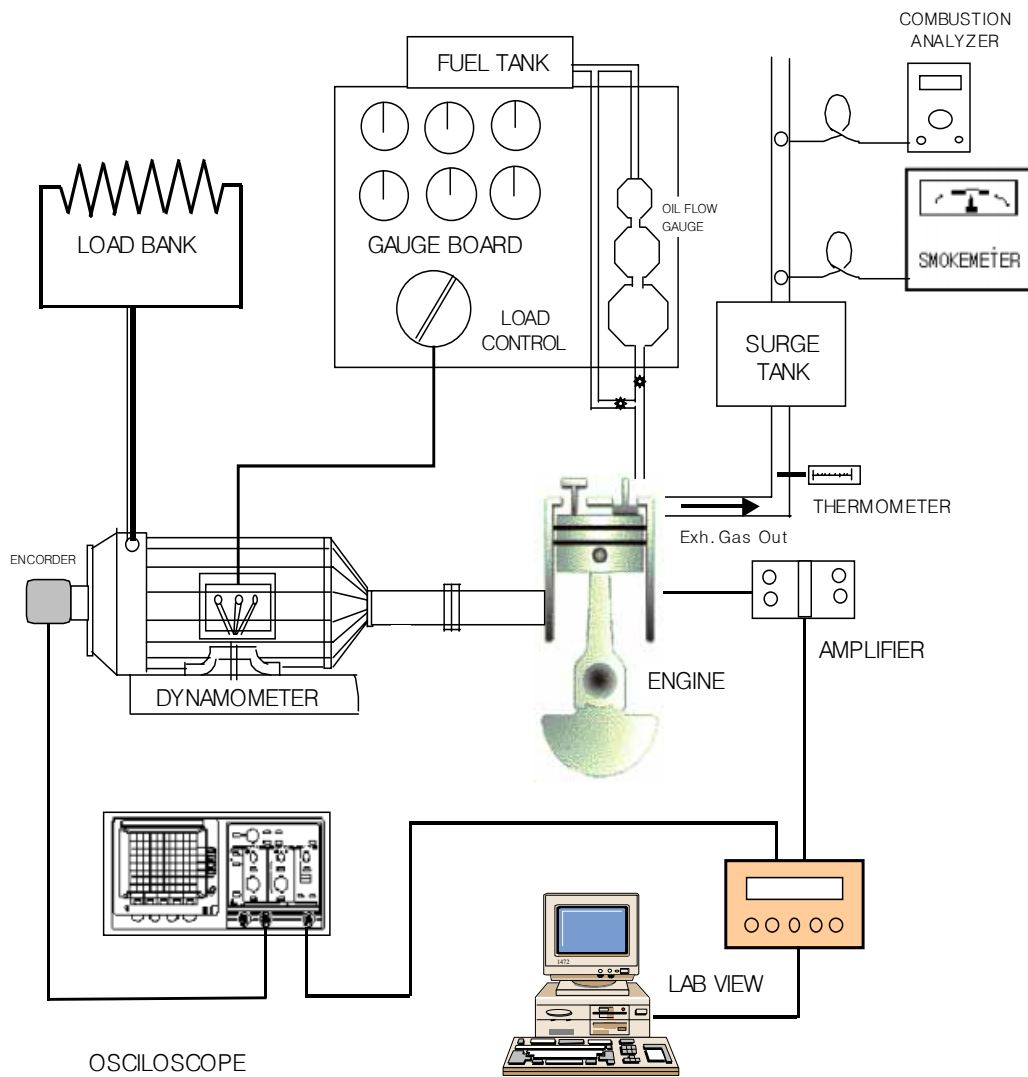


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus.

실험에 사용한 연료는 시판의 경유로서, 유류시험 분석 업체에 의뢰하여 얻은 유류분석 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Properties of test fuel.

Parameter	Value
Density, 15°C	0.8359 g/cm <sup>3</sup>
Kinematic viscosity, 40°C	2.751 mm <sup>2</sup> /s
Flash point	69 °C
Sulfur	0.031 W/W %
Water & Resident	0.005 V/V %
Calorific value(Net)	10,252 kcal/kg
Carbon residue	0.08 W/W %
Cetane index	54
Ash	0.001 W/W %
Nitrogen	40.7 mg/kg
Carbon	86.59 W/W %
Hydrogen	13.31 W/W %
Stoichiometric ratio	14.44 kg/kg

### 2. 3 실험방법

시험연료는 연료탱크에서 중력에 의해 유량계를 거친 후 기관에 공급되고 동력계에 의한 출력과 유량계를 통하여 구한 연료소비량으로부터 BSFC를 계산하였다. 기관의 냉각수는 기관의 부하에 따라 60℃에서 ±3℃ 정도로 일정하게 유지하였으며 또한, 샘플가스 채취시의 맥동을 감소시키기 위해서 배기가스 라인에 서지탱크를 설치하였다.

기관 운전 및 동력 측정에 사용된 동력계의 제원은 Table 3과 같다. 직류발전기식 동력계의 출력 측에는 기관에 부하를 조절하기 위한 전기 저항을 설치하였으며, 토크는 로드 센서를 이용하여 조절하였다.

Table 3 Specification of dynamometer.

Model	D-10A (Japan)
Max. capacity	7.36 kW (10 ps)
Max. speed	2,200 rpm
Max. measuring torque	49 Nm

배기가스의 측정은 NO<sub>x</sub>를 포함한 기타의 배출가스의 성분을 분석할 수 있는 KANE-MAY의 QUINTOX 연소분석기와 매연의 양을 % 단위로 측정할 수 있는 스모크미터를 사용하였다. Table 4는 연소분석기, Table 5는 스모크미터의 사양을 나타낸다.

Table 4 Specification of combustion analyzer.

Model	KANE-MAY QUINTOX 9006
Measuring object	Range (accuracy)
O <sub>2</sub>	0 ~ 25 % (±0.2)
CO	0 ~ 4,000ppm (±20)
NO	0 ~ 5,000ppm (±5%)
NO <sub>2</sub>	0 ~ 800ppm (±5%)

Table 5 Specification of smoke-meter.

Model, Company(nation)	P8340, G Cussions (England)
range	0~100 %

측정된 배기가스 중 NO<sub>x</sub> 및 CO의 배출 농도는 다음의 식을 이용하여 kW 시간 당 배출률로 환산하였다<sup>[4]</sup>.

연료 1 kg 중에 C, H, O, S, N, 회분 및 수분이 각각  $c, h, o, s, n, a$  및  $w$  kg 함유되어 있다고 하면 이론적 공기량( $L_o$ )은

$$L_{ov} = 11.49c + 34.5(h - o/8) + 4.31s \quad \text{kg/kg} \quad [1]$$

$$L_{ov} = 8.89c + 26.7(h - o/8) + 3.33s \quad \text{Nm}^3/\text{kg} \quad [2]$$



식 [1]은 이론 중량 공기량, [2]는 이론 체적 공기량을 나타내는데 측정된 가스농도는 체적 농도로 되어 있으므로 본 연구에서는 이론 체적 공기량 ( $\text{Nm}^3/\text{kg}$ )을 사용하였다.

연료를 완전 연소시키기 위해서는 이론적 공기량 이상의 많은 공기량을 공급해야 하는데 연료 1 kg의 연소에 실제로 공급한 공기량을  $L$  kg이라 하면,

$$L = mL_o \quad [3]$$

여기서  $m$ 은 연소실 평균 공기과잉계수이며  $m$ 이 크면 연소온도가 낮아져서 전열량이 감소되고 배출되는 가스량의 증가로 열손실이 증가된다.

연료 1 kg의 연소에서 생기는 건연소 가스량( $G_v$ )은 습연소 가스량( $G_v'$ )에서 수증기 함을 제거함으로써 즉,  $h=0, w=0$ 를 대입함으로써 구할 수 있다.

$$G_v = (m - 0.21) L_{ov} + \frac{22.4}{12} c + \frac{22.4}{2} h + \frac{22.4}{32} s + \frac{22.4}{18} w + \frac{22.4}{28} n \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad [4]$$

$$G_v' = (m - 0.21) L_{ov} + \frac{22.4}{12} c + \frac{22.4}{32} s + \frac{22.4}{28} n \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}] \quad [5]$$

최고탄산가스량( $\text{CO}_2$ )<sub>max</sub>은 연료의 조성 및 연소가스 분석에 의해서 구할 수 있는 연료 고유의 값으로 연료분석 결과에 의한 ( $\text{CO}_2$ )<sub>max</sub>와 연소가스 분석 결과에 의한 것은 실제로  $\pm 2.5\%$  정도 차이가 생기는데 본 연구에서는 연료분석 결과를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$(CO_2)_{\max} = \frac{21}{1 + 2.37 \times \frac{(h-o/8)}{c}} \quad [\%] \quad [6]$$

여기서  $(CO_2)_{\max}$ 를 바탕으로 실제 연소가스 분석 결과에 의해서 공기과잉계수  $m$ 을 구할 수 있다.

$$m = \frac{100 - (CO_2)}{0.79 \times \frac{(CO_2)_{\max}}{(CO_2)}} + 0.21 \quad [7]$$

여기서 시간당 건연소 가스량( $Nm^3/kg$ )을 계산하면

$$V_g' = \frac{G_v' \times b}{1,000} \quad [Nm^3/kg] \quad [8]$$

$V_g'$  : kW당 시간당 건연소 가스량 ( $Nm^3/kg$ )  
 $b$  : 연료소비율 (g/kWh)

연소가스 분석 결과에서  $NO_x$  및  $CO$ 는 ppm으로 나타나기 때문에 다음 식에 의해 중량배출률(g/kWh)로 환산하였다.

$$e = \frac{x \cdot V_g \cdot M}{22.4 \times 10^3} \quad [9]$$

$e$  : 배출농도 ppm의 kW당 시간당 배출량 (kg/kWh)  
 $x$  : 가스 배출농도 (ppm)  
 $M$  : 배출가스 분자량

NO<sub>x</sub> 혼합물의 분자량은 NO와 NO<sub>2</sub>의 농도 ppm으로부터 체적분율 즉, 몰분율을 이용하여 계산하면

[10]

$$M = M_{x1} \frac{n_{x1}}{n_t} + M_{x2} \frac{n_{x2}}{n_t}$$

$M$  : 혼합물 분자량  
 $M_{x1}, M_{x2}$  : NO, NO<sub>2</sub>의 분자량  
 $n_t$  : 총 몰 수  
 $n_{x1}, n_{x2}$  : NO, NO<sub>2</sub>의 몰 수

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3. 1 최대토크곡선 비교

기존의 고와류형 피스톤과 개조된 2단연소형 및 충돌 스월형 피스톤 사용 시의 배기를 측정 후 비교 분석하였다. 측정은 2단연소형의 경우에는 각 피스톤에 대하여 1,000 rpm, 1,200 rpm, 1,500 rpm, 1,800 rpm, 2,000 rpm, 2,200 rpm의 속도별로 5 Nm 단위로 부하를 증가시키며 행하였으며, 충돌 스월형의 경우에는 고부하 영역(2,000~2,200 rpm)에서 불완전한 상태를 보여 2,000 rpm까지 동일한 방법으로 측정하여 비교하였다.

2단연소형 피스톤에서는 원래의 분사각인 144°와 100°로 개조한 노즐을 사용하여 비교 실험하였고, 충돌 스월형 피스톤에서는 노즐 분사각을 100°로 하고 분사압력을 기존의 18 MPa에서 21 MPa, 24 MPa로 증가시키면서 각각 연소가스의 배출특성, 연료소비율 및 최대 토크를 비교하였다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 기존의 고와류형 피스톤과 2단연소형 피스톤을 이용한 기관에서의 rpm별, 분사각도별 최대 토크를 측정한 결과이다. 2단연소형 피스톤을 사용하여 운전할 때 분사각도를 기존의 144°로 하여 충돌면에 충돌이 일어나지 않게 한 경우를 무충돌 2단연소형이라 명명하고, 분사각도를 100°로 개조한 노즐을 사용하여 충돌면에 충돌한 경우를 충돌 2단연소형이라 명명한다. 2단연소형 피스톤 사용 시 전반적으로 최대 토크는 감소하였으며 저속에서는 큰 차이가 없었으나 고속으로 갈수록 감소폭이 커지는 것으로 나타났다. 충돌 2단연소형 피스톤 사용 시 최대 토크는 1,800 rpm에서 무충돌 2단연소형 피스톤보다 더욱 낮게 나타나고 있다. 이는 분무 연료가 충돌면에 충돌 후 관통력 저하로 연소실내에 신속한 분산이 이루어지지 않음으로써 초기 불완전 연소로 인한 최고압력저하로 추정된다.

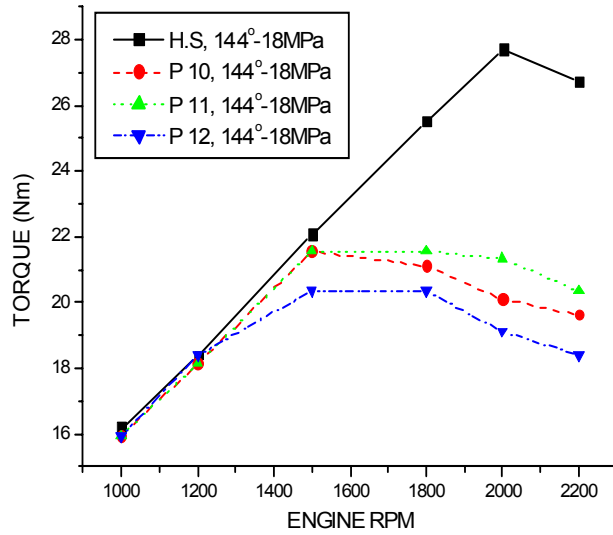


Fig. 4 Max. torque curves of unimpinged 2-stage combustion type pistons at various rpm.

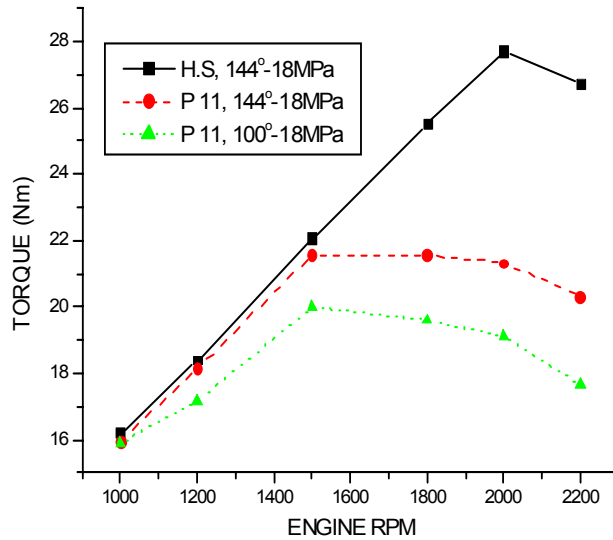


Fig. 5 Max. torque curves of impinged and unimpinged 2-stage combustion type pistons at various rpm.

Fig. 6 및 Fig. 7은 기존의 고와류형 피스톤과 충돌 스월형 피스톤을 이용한 기관에서의 rpm별, 분사각도별, 분사압력별 최대 토크를 측정된 결과를 나타내고 있다. 충돌 스월형 피스톤 사용 시 최대 토크가 고와류형에 비해서 약간 감소하였으며, 특히 각 조건에서 분사압력이 낮을수록 높게 나타나고 있다. 또한, 충돌 스월형 피스톤의 경우 2,000 rpm에서 최대 토크를 나타내고 있다..

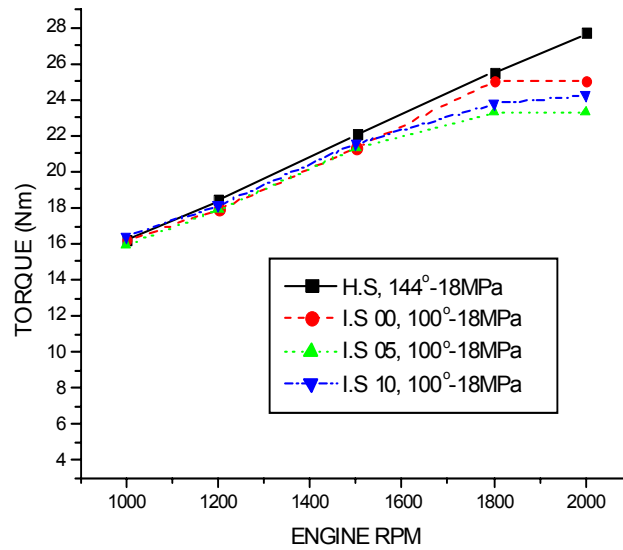


Fig. 6 Max. torque curves of impinge swirl type pistons at various rpm.

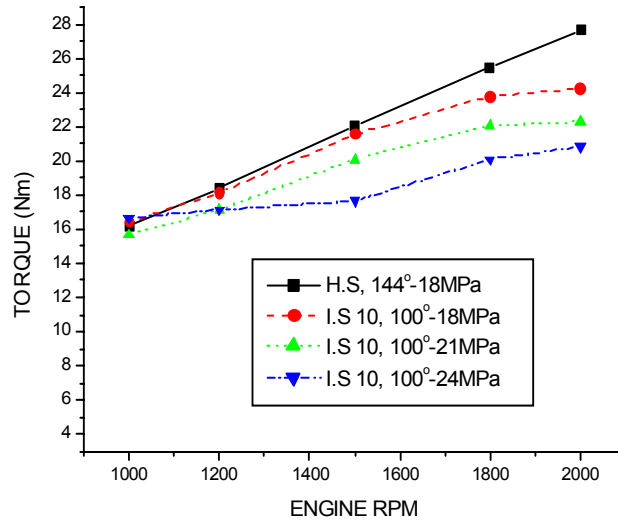


Fig. 7 Max. torque curves of impinge swirl type pistons at various rpm.

이에 따라 본 연구에서는 2단연소형 피스톤의 경우 1,800 rpm, 층돌 스월형 피스톤의 경우는 2,000 rpm을 기준으로 배기가스 및 BSFC 특성을 비교하여 고찰하였다.

### 3. 2 2단연소형 피스톤의 배출가스 특성 비교

Fig. 8 및 Fig. 9는 충돌 2단연소형 피스톤과 무충돌 2단연소형 피스톤의 NOx 배출률을 고와류형 피스톤의 경우와 비교하여 나타낸다. Fig. 8에서 충돌 2단연소형 피스톤은 기존의 고와류형 피스톤과 비교하여 NOx 배출률이 매우 낮게 나타나고 있으며, 노즐 분사각도를 100°로 한 충돌형의 경우에 더 낮게 배출된다. 저속영역에서 NOx 배출률이 높게 나타나고 있는 이유는 실제로 측정되는 순간 배출량(ppm)은 낮게 나타나지만 출력이 낮으므로 배출률은 높기 때문이다. 또한, Fig. 9에서 충돌 2단연소형 피스톤 P 10, P 11, P 12를 비교하면 거의 비슷한 NOx 배출률을 보이고 있다.

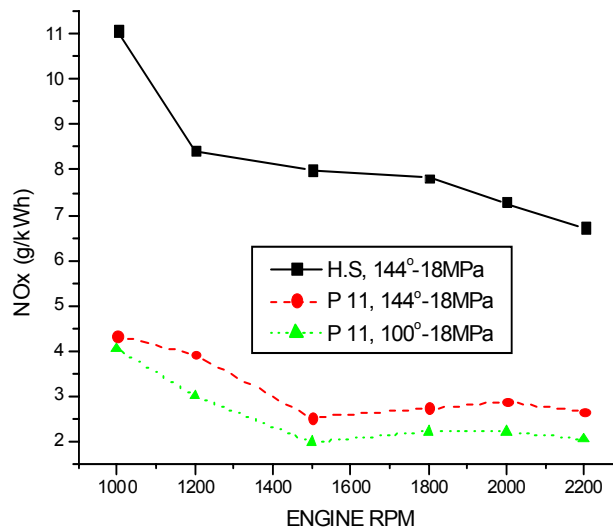


Fig. 8 NOx emission curves of impinged and unimpinged 2-stage combustion type pistons at various rpm.



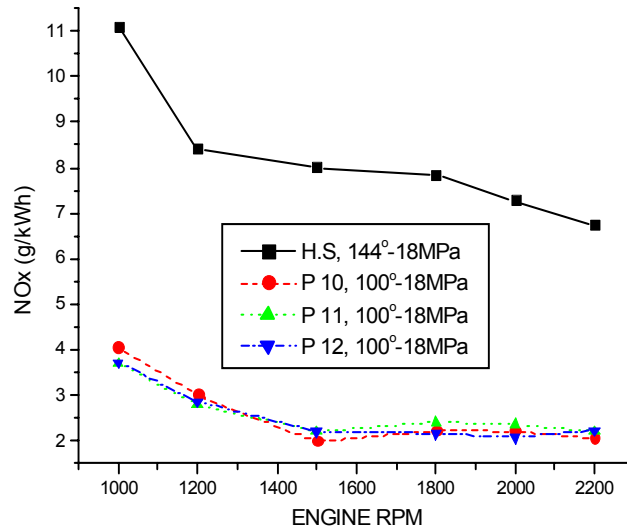


Fig. 9 NOx emission curves of impinged 2-stage combustion type pistons at various rpm.

Fig. 10 및 Fig. 11은 2단연소형 피스톤의 최대 토크점인 1,800 rpm에서 측정된 토크 변화에 따른 NOx 배출률을 비교하여 나타내고 있다. Fig. 10은 무충돌 2단연소형의 경우를 Fig. 11은 충돌 2단연소형의 경우를 나타내며, NOx의 배출률은 모든 부하조건에서 고와류형에 비하여 현저히 낮게 나타난다. P 10, P 11, P 12에 의한 NOx 배출률은 유의할만한 차이를 나타내지 않고 있다.

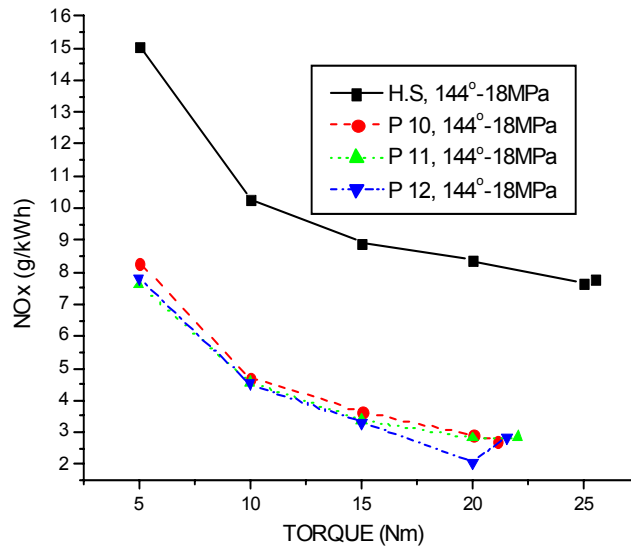


Fig. 10 NOx emission curves of unimpinged 2-stage combustion type pistons at 1,800 rpm.

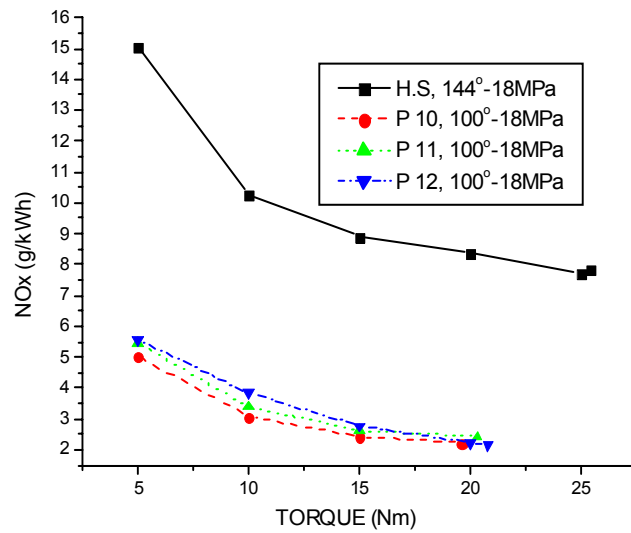


Fig. 11 NOx emission curves of impinged 2-stage combustion type pistons at 1,800 rpm.

Fig. 12 및 Fig. 13은 충돌 2단연소형 피스톤과 무충돌 2단연소형 피스톤에서의 CO 배출률을 고와류형의 경우와 비교하여 나타낸다. 전체적으로 2단연소형 피스톤의 경우에 CO 배출률이 전 범위에 걸쳐 매우 높고, 충돌 2단연소형의 경우가 무충돌 2단연소형의 경우보다 높게 나타나고 있다. 이는 충돌 2단연소의 경우에 충돌 후 분산된 분무의 관통력이 감소되고 벽면에 접촉되어 불완전 연소하는 부분이 많아지기 때문이라 추정된다. Fig. 13에서 rpm 대부분의 영역에서 P 12의 CO 배출률이 충돌 2단연소형 피스톤 중에서 가장 낮은 점은 분무의 진행 통로가 그 중에서 가장 넓기 때문에 그나마 벽면 접촉이 완화되고 있기 때문이라고 관찰된다.

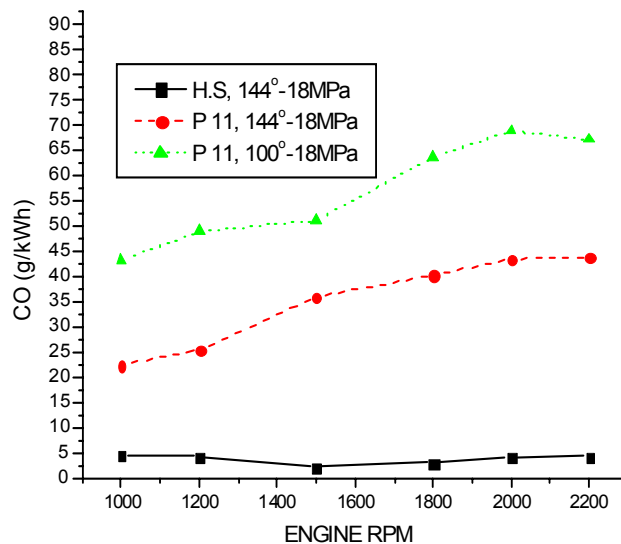


Fig. 12 CO emission curves of impinged and unimpinged 2-stage combustion type pistons at various rpm.

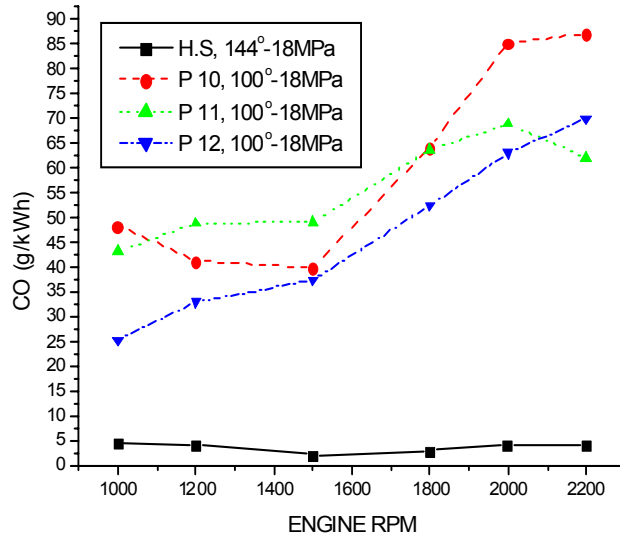


Fig. 13 CO emission curves of impinged 2-stage combustion type pistons at various rpm.

Fig. 14는 1,800 rpm에서 충돌 2단연소형 피스톤과 무충돌 2단연소형 피스톤의 CO 배출률을 토크의 변화에 따라 고와류형과 비교하여 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 15는 충돌 2단연소형 피스톤의 P 10, P 11, P 12의 CO 배출률을 토크의 변화에 따라서 고와류형과 비교하여 나타낸다. 충돌 2단연소형 피스톤의 경우 CO 배출률은 무충돌 2단연소형 피스톤의 경우보다 높게 나타나고 있으며 분무의 진행통로가 클수록 즉, P 12의 경우에 CO 배출률이 가장 낮다.

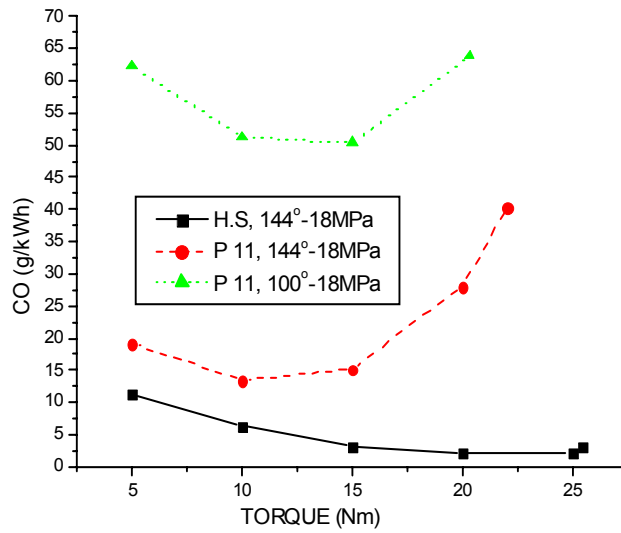


Fig. 14 CO emission curves of impinged and unimpinged 2-stage combustion type pistons at 1,800 rpm.

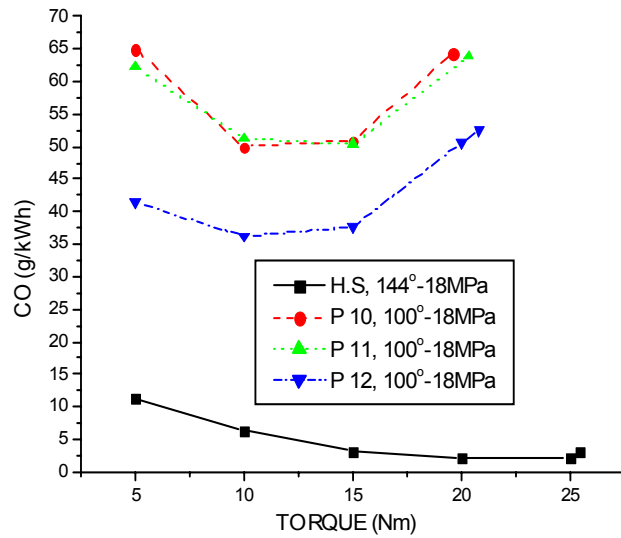


Fig. 15 CO emission curves of impinged 2-stage combustion type pistons at 1,800 rpm.

Fig. 16 및 Fig. 17은 매연 배출량을 비교하여 나타낸다. 기존의 고와류형 피스톤에 비해 2단연소형 피스톤에서 현저히 높게 배출되고 있고, 충돌 2단연소형의 매연이 CO의 경우와는 반대의 경향을 나타내어 무충돌 2단연소형의 경우보다 낮게 배출되고 있다. 그 이유는 충돌 후 액주가 사라짐으로써 액적의 분해 확산연소의 비율이 감소되는데 따른 결과로 보인다.

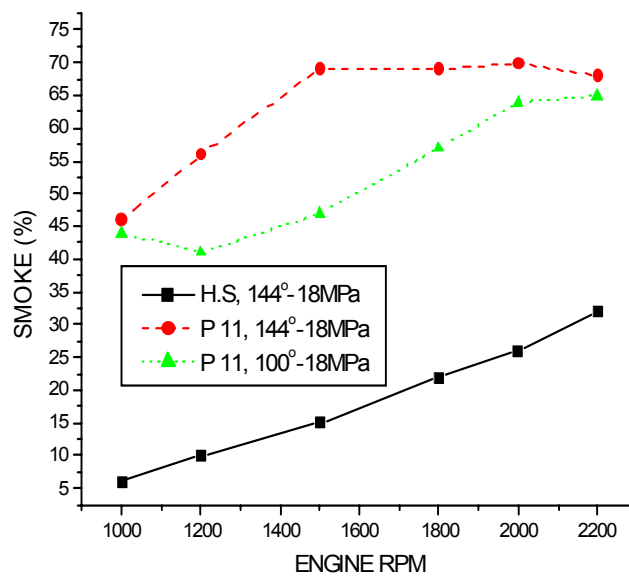


Fig. 16 Smoke curves of impinged and unimpinged 2-stage combustion type pistons at various rpm.

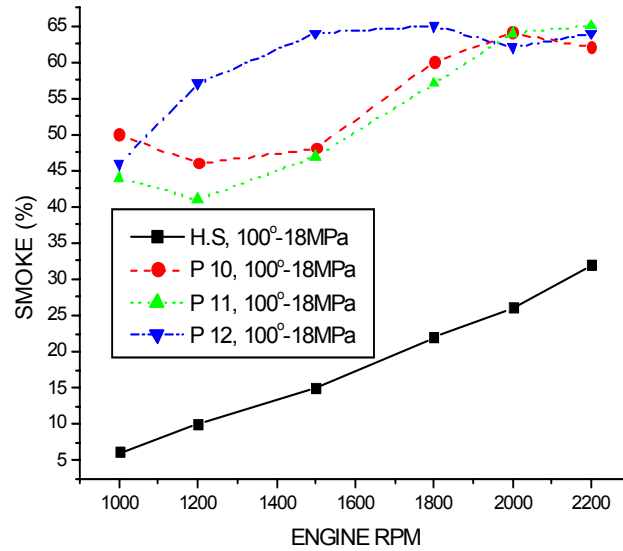


Fig. 17 Smoke curves of impinged 2-stage combustion type pistons at various rpm.

Fig. 18은 충돌 2단연소형과 무충돌 2단연소형 피스톤의 매연 배출량을 토크 변화에 따라 비교하여 나타내고 있다. 충돌 2단연소형 피스톤의 경우가 저부하 영역에서 매연 배출량이 낮다가 고부하 영역에서는 무충돌 2단연소형 보다 높게 나타나고 있다. 이처럼 고부하에서 충돌 2단연소형 피스톤의 경우가 매연 배출량이 낮게 나타나는 이유는 충돌 후 액주가 사라짐으로써 액적의 확산연소의 비율이 감소함에 따른 결과로 보인다. Fig. 19는 충돌 2단연소형 피스톤의 매연 배출량을 고와류형과 비교하여 나타낸 것이며, 충돌 2단연소형 피스톤의 경우가 전 부하에 걸쳐 높게 배출되고 있다.

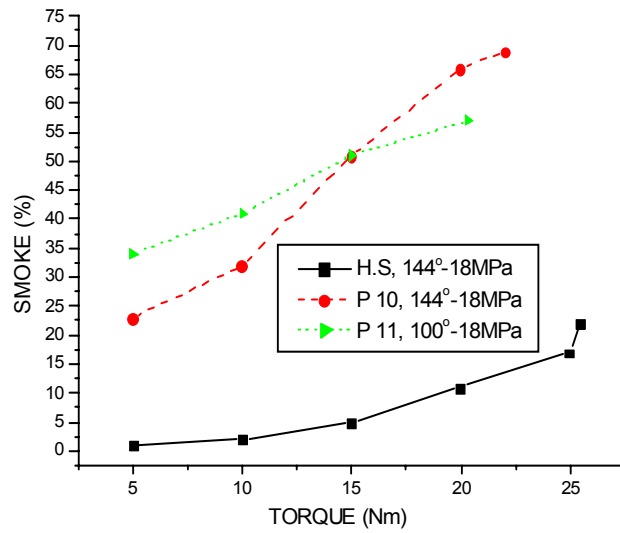


Fig. 18 Smoke curves of impinged and unimpinged 2-stage combustion type pistons at 1,800 rpm.

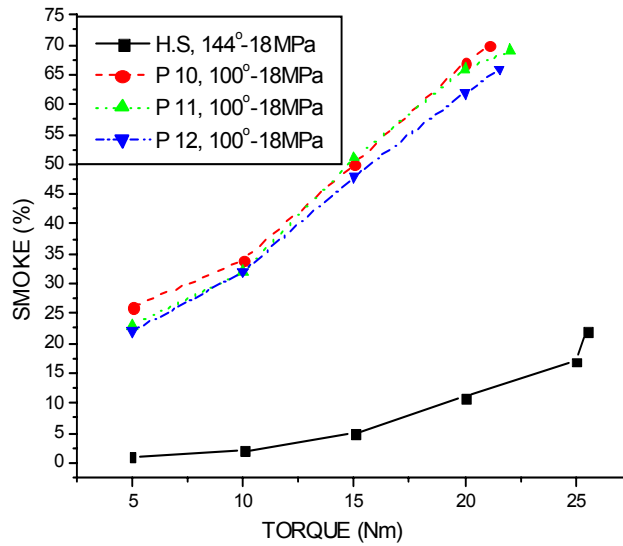


Fig. 19 Smoke curves of impinged 2-stage combustion type pistons at 1,800 rpm.



Fig. 20 및 Fig. 21은 충돌 2단연소형 피스톤과 무충돌 2단연소형 피스톤의 연료소비율을 고와류형 피스톤과 비교하여 나타낸다. 2단연소형 피스톤이 전반적으로 연료소비율이 높게 나타나고 있으며, P 12, P 11, P 10의 순으로 높아지고 있다. 이는 연소가스 유동통로가 좁아질수록 1단연소시의 혼합비가 과농해져서 초기 불완전연소로 인한 최고압력 저하에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, 충돌 2단연소형은 무충돌 2단연소형 보다 연료소비율이 높게 나타난다. 이는 충돌 후의 관통력 저하로 연소실내에 신속한 분산이 이루어지지 않은 것에 기인하는 것으로 추정된다.

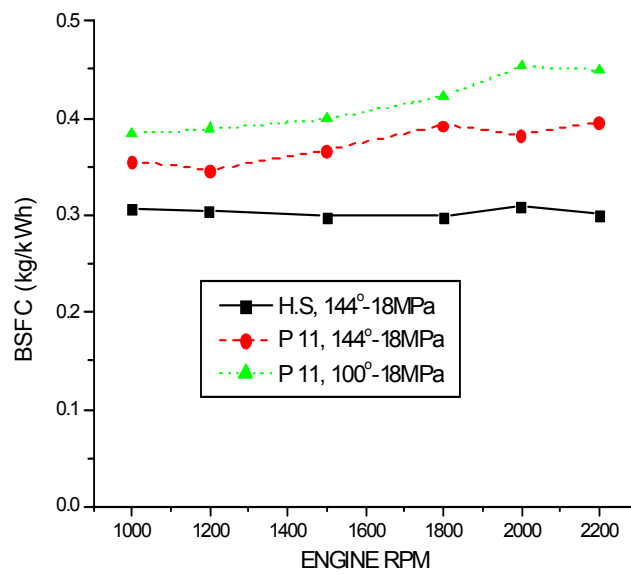


Fig. 20 BSFC curves of impinged and unimpinged 2-stage combustion type pistons at various rpm.

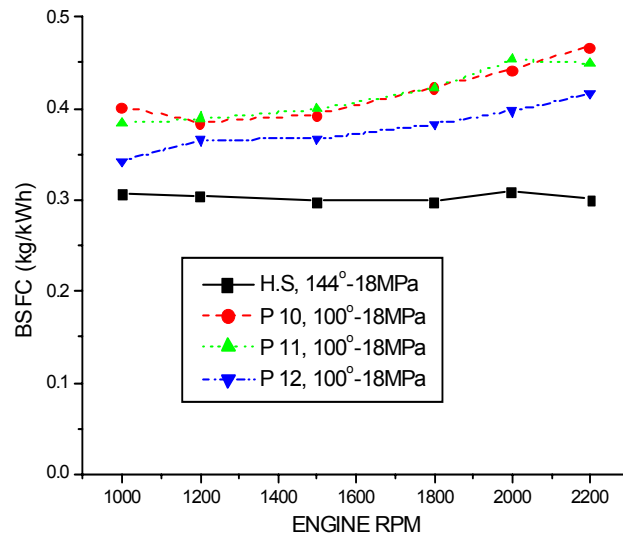


Fig. 21 BSFC curves of impinged 2-stage combustion type pistons at various rpm.

Fig. 22는 충돌 2단연소형 피스톤과 무충돌 2단연소형 피스톤의 연료소비율을 고와류형 피스톤과 비교하여 나타내고 있으며, 충돌 2단연소형 피스톤의 연료소비율이 전 범위에서 무충돌 2단연소형 피스톤보다 높게 나타나고 있다. Fig. 23은 충돌 2단연소형과 고와류형 피스톤의 연료소비율을 토크 변화에 따라 비교하여 나타내고 있다. 전 부하에 걸쳐 충돌 2단연소형 피스톤의 경우가 높게 나타나고 있으며, 이는 충돌 후 관통력 저하 및 불완전 연소에 의한 것으로 추정되며 연소가스 유동통로가 넓은 P 12의 경우가 가장 낮게 나타남을 알 수 있다.

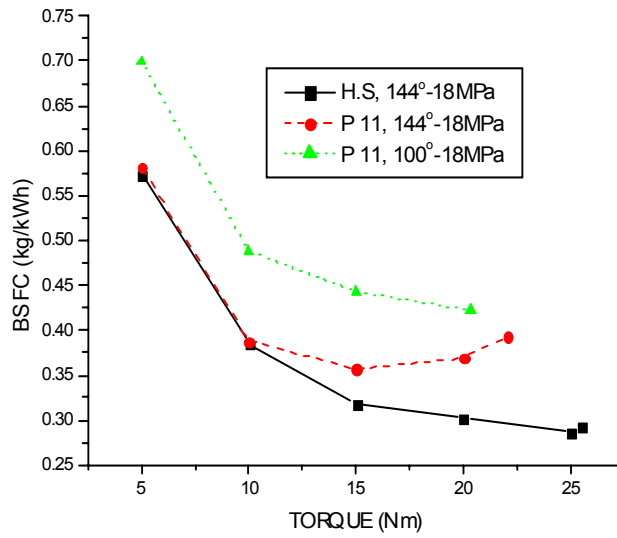


Fig. 22 BSFC curves of impinged and unimpinged 2-stage combustion type pistons at 1,800 rpm.

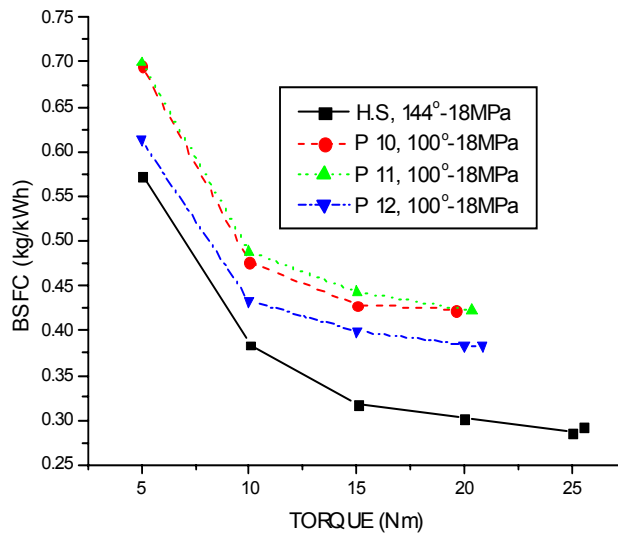


Fig. 23 BSFC curves of impinged 2-stage combustion type pistons at 1,800 rpm.

이상의 층돌 2단연소형 피스톤, 무층돌 2단연소형 피스톤 및 고와류형 피스톤 사용시의 NO<sub>x</sub> 배출률, CO 배출률, 매연 배출량 및 BSFC의 자료를 종합적으로 비교 검토하면 다음과 같다.

2단연소를 위하여 분무의 과농영역을 가지는 연소실에서는 심한 와류의 저하로 인하여 CO, 매연 및 BSFC의 증가를 초래하는 것으로 추정된다.

층돌 후 과농영역을 통과하게 하는 층돌 2단연소형 피스톤의 연소실에서는 층돌에 의한 횡방향 분산으로 매연은 무층돌 2단연소형 피스톤에 비하여 감소하였으나 벽면 접촉의 증가로 추정되는 CO의 증가, 관통력의 저하로 추정되는 BSFC의 증가를 초래한다. 다만, NO<sub>x</sub>는 무층돌 2단연소형 및 층돌 2단연소형 피스톤에서 불완전 연소에 기인하는 탓도 있겠지만 2단연소의 효과가 가세하여 현저히 감소하는 것으로 관찰되었다.

### 3. 3 충돌 스윙형 피스톤의 배출가스 특성 비교

Fig. 24는 충돌 스윙형 피스톤의 NOx 배출률을 기존의 고와류형 피스톤과 비교하여 나타낸다. 연료가 충돌하는 돌출면의 경사가 큰 I.S 10의 경우가 NOx 발생률이 현저히 낮게 나타나고 있다. 여기서 NOx 배출률은 kW당 시간당의 배출량으로 표시된다. Fig. 25는 충돌 스윙형 피스톤 I.S 10을 분사압력 18 MPa, 21 MPa, 24 MPa로 변화시키면서 측정된 NOx 배출량을 고와류형과 비교하여 나타낸다. 분사압력을 상승시킴에 따른 NOx 배출률의 변화는 일정치 않으나 21 MPa에서 18 MPa, 24 MPa 보다 낮게 나타난다. 이는 경사면에 충돌 후 분무의 방향이 스퀴시 흐름의 방향을 따르므로 관통력 및 분산상태가 타 조건에 비해 양호한 것으로 보인다.

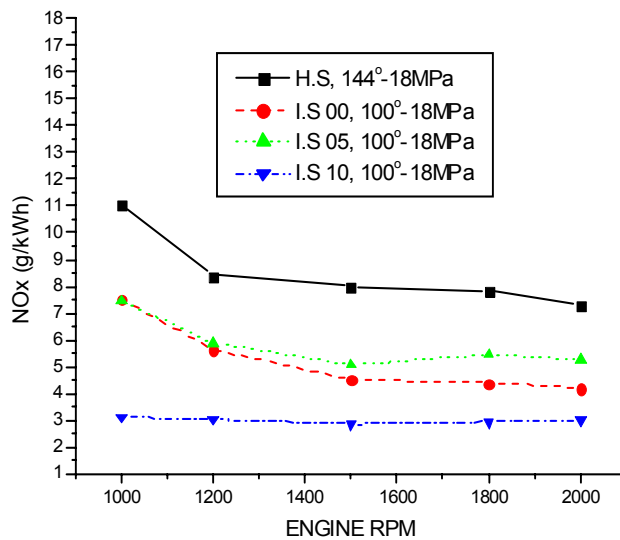


Fig. 24 NOx emission curves of impinge swirl type pistons at various rpm.

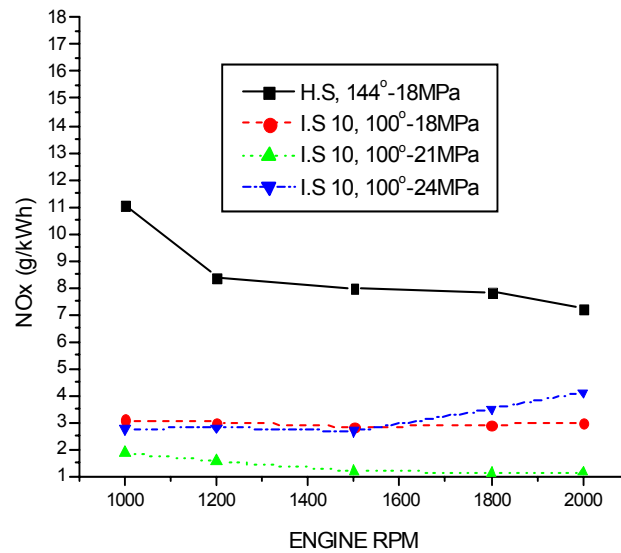


Fig. 25 NOx emission curves of impinge swirl type pistons at various rpm.

Fig. 26 및 Fig. 27은 토크 변화에 따른 충돌 스월형 피스톤의 NOx 배출률을 고와류형 피스톤의 경우와 비교하여 나타낸다. 충돌 스월형 피스톤의 경우 NOx의 배출률은 고와류형에 비교하여 현저히 저감된 것으로 나타난다. 특히, I.S 10 피스톤이 가장 낮고 I.S 00이 그 다음이고 특이하게 충돌면의 경사가 중간정도인 I.S 05의 경우가 가장 저감 비율이 낮다. 이는 I.S 00의 경우 충돌 후의 분무의 방향이 강한 와류의 방향으로 가로지르기 때문이라 생각되며 I.S 10의 경우는 분무축과 충돌면의 경사가 가장 작기 때문에 관통력의 저하가 그중 가장 낮은 경우이고 충돌 후의 분무의 방향은 스퀴시 흐름의 방향을 따르고 있기 때문이라고 추정된다.

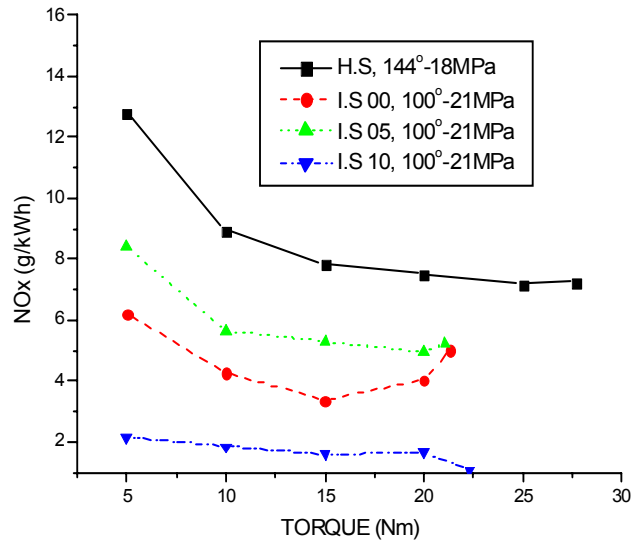


Fig. 26 NOx emission curves of impinge swirl type pistons at 2,000 rpm.

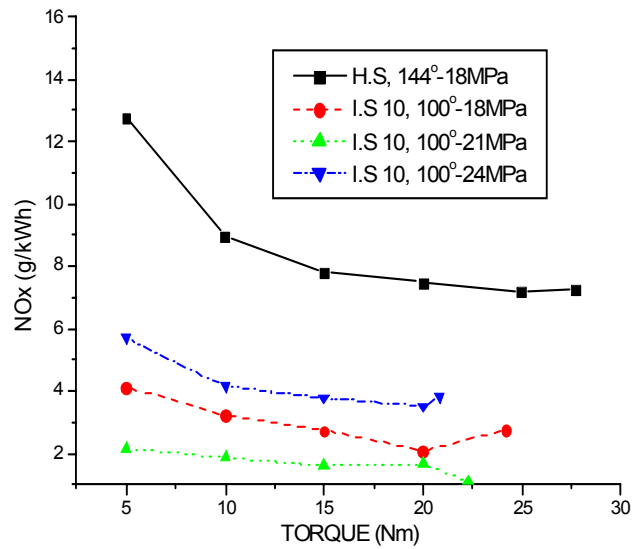


Fig. 27 NOx emission curves of impinge swirl type pistons at 2,000 rpm.

Fig. 28 ~ Fig. 31은 층돌 스월형 피스톤의 CO 배출률을 회전속도와 부하 조건에서 고와류형 피스톤과 비교하여 나타낸다. CO 배출률은 전체적으로 층돌 스월형이 고와류형 피스톤 보다 높게 나타나고 있으며, I.S 00의 경우가 층돌 스월형 중에서 가장 낮으며 I.S 10이 그 다음으로 나타났다. 연료분사압력을 높여서 24 MPa로 하였을 때에 CO 배출률의 악화는 크게 완화되었다. 토크의 변화에 따른 CO의 배출률에서는 낮은 토크 범위에서 I.S 00 및 I.S 10의 경우 고와류형 피스톤 보다 오히려 낮게 나타나는 경우도 있으나 토크의 증가에 따라 반전되었다.

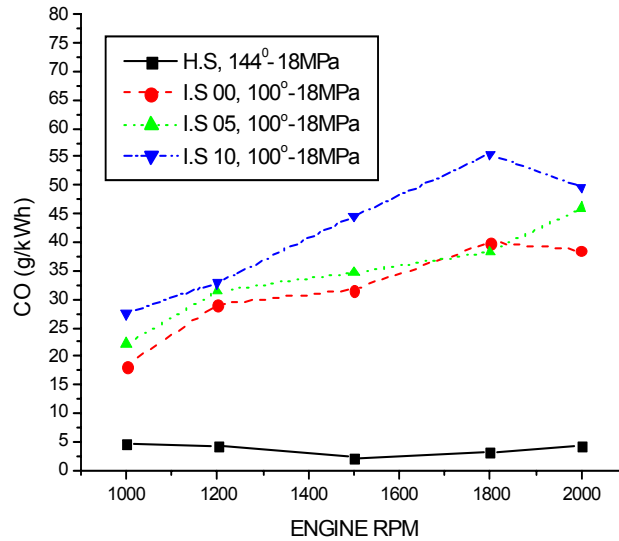


Fig. 28 CO emission curves of impinge swirl type pistons at various rpm.



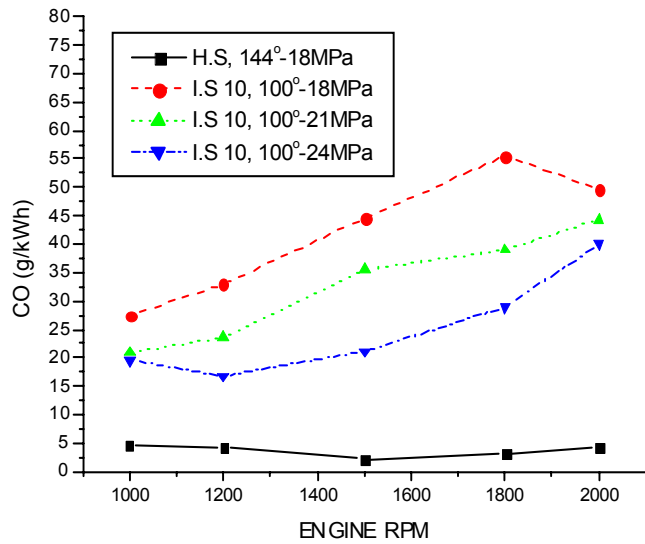


Fig. 29 CO emission curves of impinge swirl type pistons at various rpm.

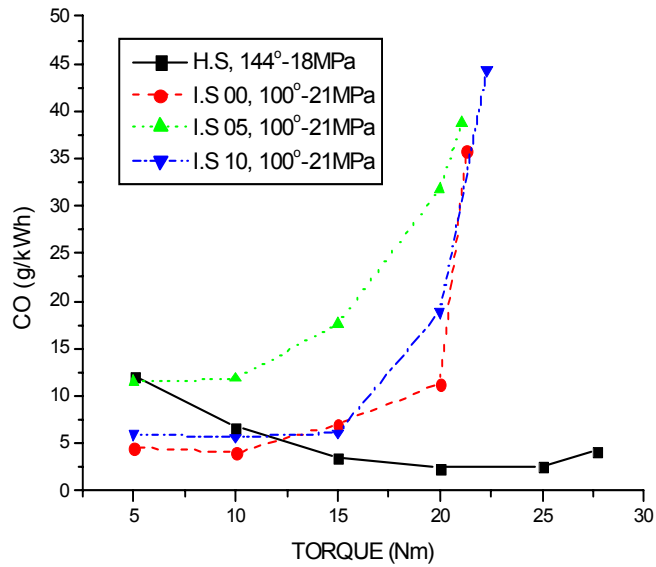


Fig. 30 CO emission curves of impinge swirl type pistons at 2,000 rpm.

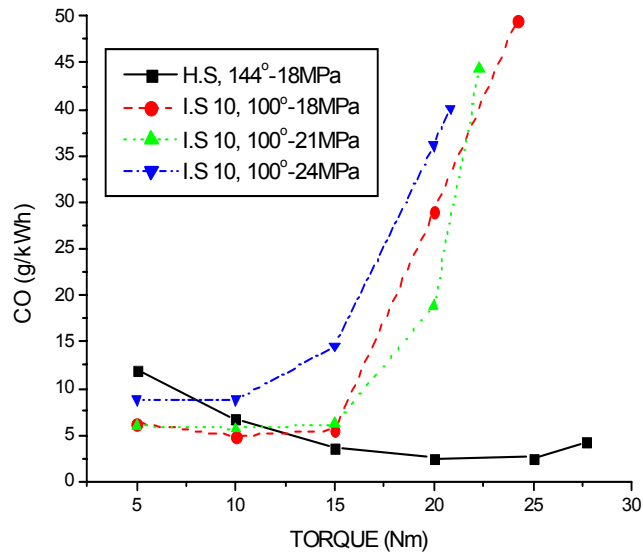


Fig. 31 CO emission curves of impinge swirl type pistons at 2,000 rpm.

Fig. 32 ~ Fig. 35는 충돌 스윙형 피스톤의 매연 배출량을 고와류형의 경우와 비교하여 나타낸다. 충돌 스윙형 피스톤의 매연 배출량은 고와류형에 비하여 상당히 높게 나타난다. 그 중에서 I.S 00의 경우가 가장 낮고 I.S 10의 경우가 가장 높다. Fig. 33에서 나타내듯이 분사압력을 높여서 24 MPa로 하였을 때 매연 배출량의 악화는 상당히 완화되는 것을 알 수 있다. 이는 회전수가 증가함에 따라 스윙의 강도가 높아짐에 따른 결과로 보인다.

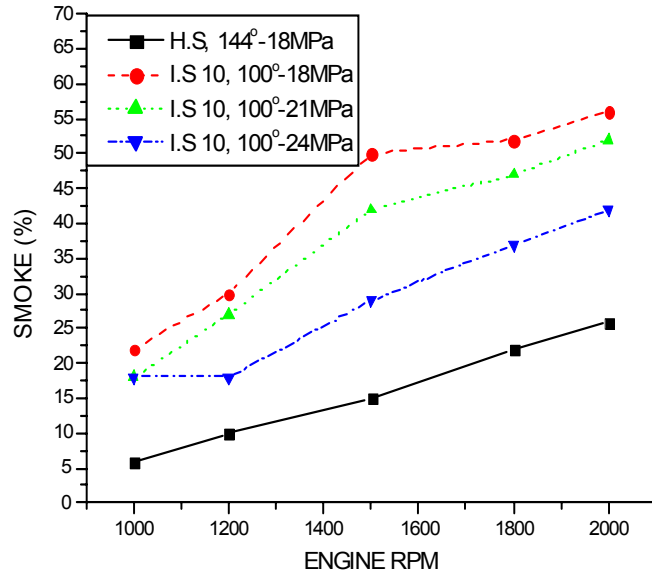


Fig. 32 Smoke curves of impinge swirl type pistons at various rpm.

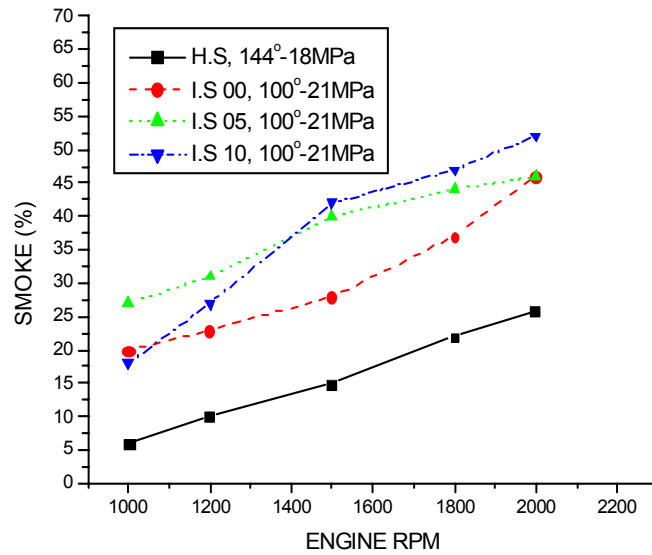


Fig. 33 Smoke curves of impinge swirl type pistons at various rpm.

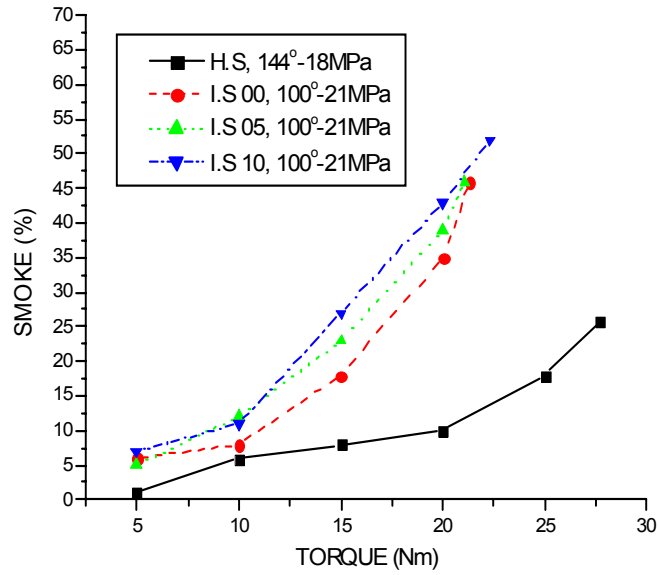


Fig. 34 Smoke curves of impinge swirl type pistons at 2,000 rpm.

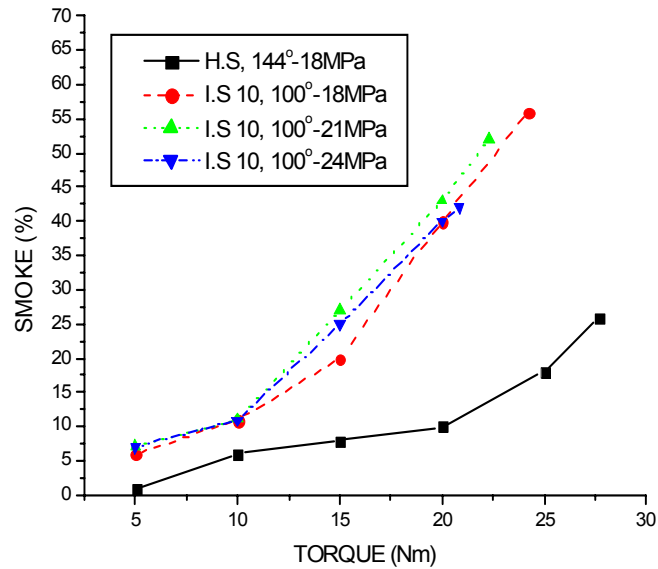


Fig. 35 Smoke curves of impinge swirl type pistons at 2,000 rpm.

Fig. 36 ~ Fig. 39는 충돌 스윙형 피스톤의 연료소비율을 기존 고와류형 피스톤과 비교하여 나타낸다. 충돌 스윙형 피스톤이 전체적으로 연료소비율이 약간 높게 나타나고 있다. 이는 충돌 후의 관통력 저하로 캐비티의 벽면까지 도달하지 못하는 것에 기인한다고 생각된다. 또한, 저부하 영역에서는 고와류형 피스톤이 약간 높으나 부하가 증가함에 따라 충돌 스윙형 피스톤의 연료 소비율이 높게 나타나고 있다.

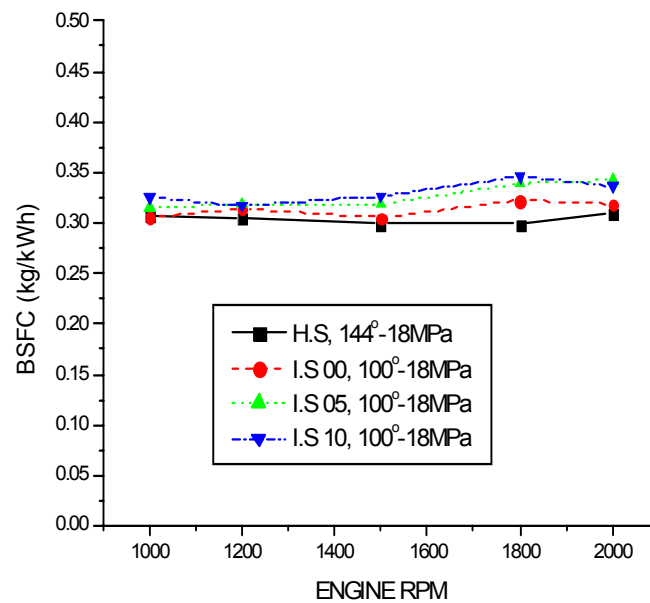


Fig. 36 BSFC curves of impinge swirl type pistons at various rpm.

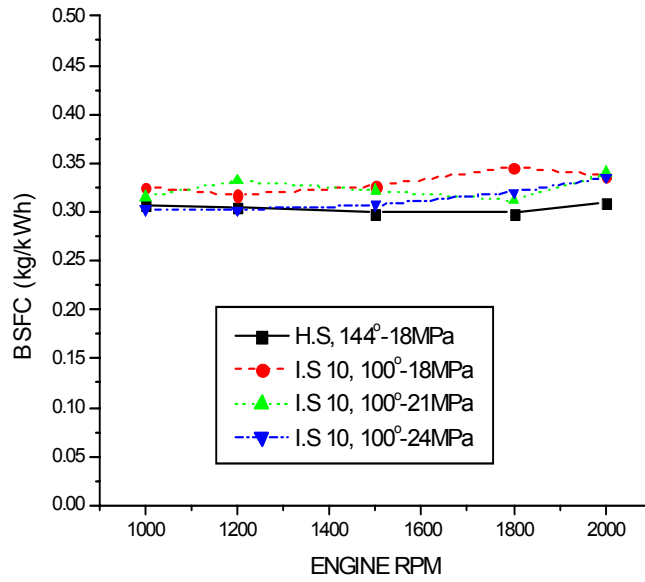


Fig. 37 BSFC curves of impinge swirl type pistons at various rpm.

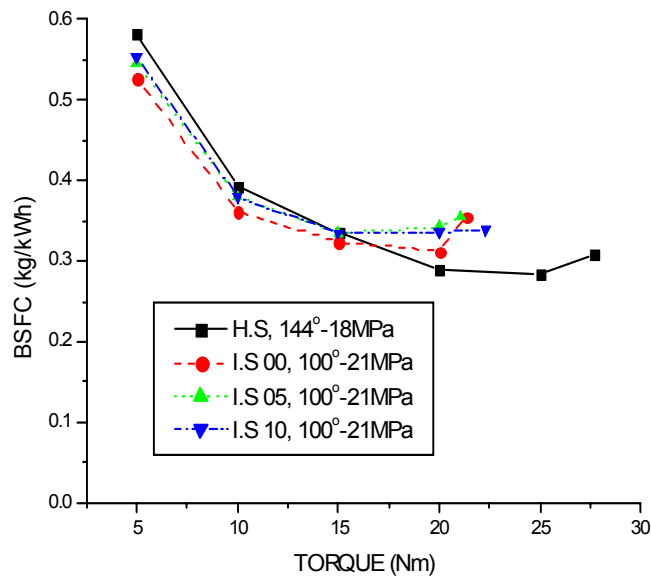


Fig. 38 BSFC curves of impinge swirl type pistons at 2,000 rpm.

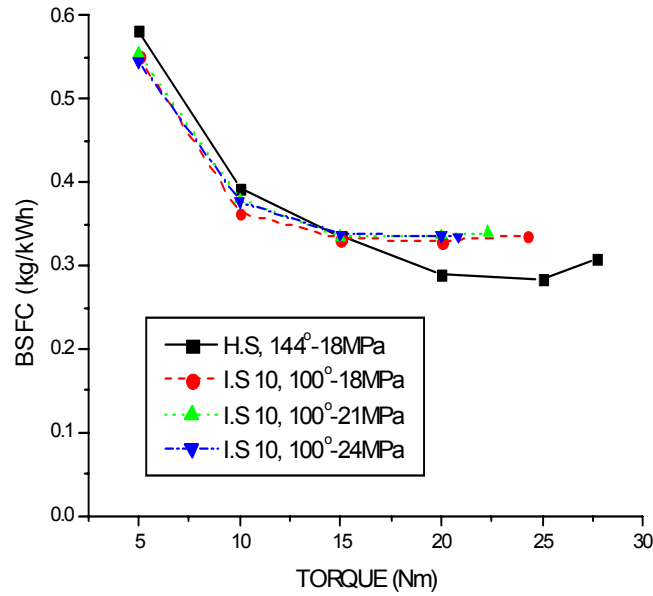


Fig. 39 BSFC curves of impinge swirl type pistons at 2,000 rpm.

이상의 충돌 스월형 피스톤과 고와류형 피스톤 사용시의 NO<sub>x</sub> 배출률, CO 배출률, 매연 배출량 및 BSFC의 자료를 종합적으로 비교 검토하여 다음과 같다.

CO 배출률, 매연 배출량 및 연료소비율에 있어서 IS 10 및 IS 00 피스톤이 IS 05 피스톤 보다 양호한 값을 나타내면서 NO<sub>x</sub> 배출률에서도 낮은 값을 나타내었다. 이는 IS 00에서는 충돌 후 강한 와류에 의한 혼합에 기인하며 IS 10에서는 충돌 후 스쿼시 흐름쪽으로 흐르면서 혼합되며 관통력의 저하가 상대적으로 적은 데에 기인하는 것으로 추정된다. 고와류형에 비교할 때 관통력 저하에 의한 성능의 저하를 피할 수 없었던 것으로 판단된다.

### 3. 4 IMO NOx Regulation 비교

전 세계적으로 환경오염 규제가 크게 강화되고 있는 가운데, 국제해사기구 IMO가 MARPOL 73/78에 『선박으로부터 대기오염 방지』에 관한 신 부속서 VI를 채택하였고, NOx 배출규제(규칙 13)의 경우 2000년 1월 1일 이후 선박에 탑재하는 출력 130 kW 이상의 디젤기관은 다음의 배출허용기준을 만족하지 못하면 탑재를 금지하게 된다.

- 1) 130 rpm 이하인 경우 : 17.0 g/kWh
- 2) 130 이상 2000 rpm 이하인 경우 :  $45.0 \times n^{(-0.2)}$  g/kWh
- 3) 2,000 rpm 이상의 경우 9.8 g/kWh

단,  $n$  은 기관의 Crankshaft 1분당 회전수를 의미한다.

실험에 사용된 기관은 5.88 kW/2,200 rpm 디젤기관이므로 IMO NOx 배출 규정 3)의 규정에 해당하나 본 연구에서는 각 rpm별 NOx 배출률을 IMO rule 상에 비교하여 보았다. Fig. 40은 기존의 고와류형 피스톤과 2단연소형 피스톤 기관을 운전하여 IMO NOx 배출허용기준을 비교하였다. 2단연소형 피스톤 기관의 경우 IMO NOx 배출허용기준 보다 훨씬 낮은 배출량을 나타내고 있으며, 기존의 고와류형 피스톤은 대체로 높게 나타나고 있으나 규제 범위내에 있다. Fig. 41은 기존의 고와류형 피스톤 기관과 충돌 스월형 피스톤 기관의 IMO NOx 배출허용기준을 비교하였다. 전 범위에서 규제 범위내에 있으며 고와류형 피스톤에 비해 그 배출량이 적게 나타나고 있다.



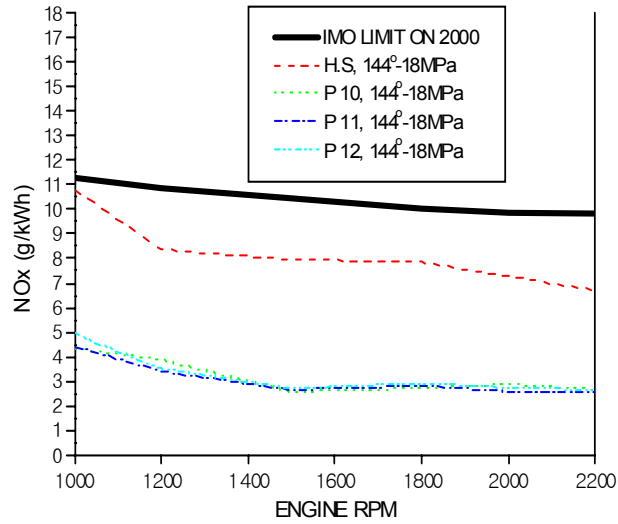


Fig. 40 NOx emission curves of unimpinged 2-stage combustion type pistons compared with IMO regulation.

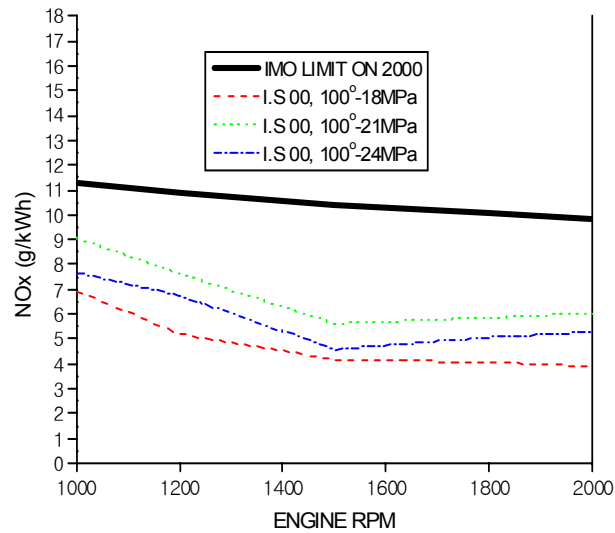


Fig. 41 NOx emission curves of impinge swirl type pistons compared with IMO regulation.

### 3. 5 연소실 압력 및 열발생률

Fig. 42는 2단연소형 피스톤 기관과 기존 고와류형 피스톤 기관을 동일한 속도와 부하조건에서 운전하였을 때의 실린더 압력과 열발생률을 함께 나타낸다.

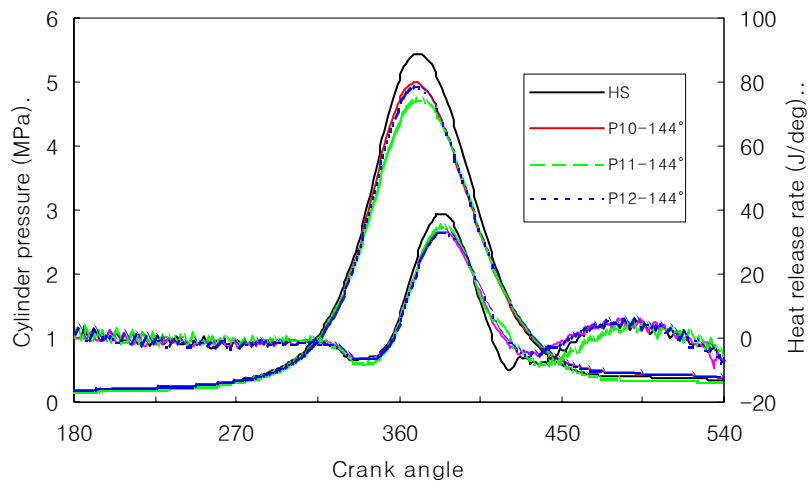


Fig. 42 Cylinder pressure curves & Heat release rate of high swirl type and 2-stage combustion type pistons at 1,800 rpm and at Max. torque with injection angle 144°.

고와류형 피스톤 기관에 비하여 2단연소형 피스톤 기관에서는 연소실의 최고압력이 상당히 낮게 나타나고 있다. 이것은 피스톤 형상에 의한 초기 과농 연소가 분리되어 연소되므로 기존의 고와류형 피스톤 기관과 같은 폭발적인 연소가 상당히 억제되고 있는 것으로 판단된다.

또한 열발생률은, 기존 고와류형 피스톤 기관에서 대부분이 전술한 폭발적

연소에 의해서 이루어지고 있으나 2단연소형 피스톤 기관에서는 상사점 부근에서의 폭발적 연소에 의한 열발생이 기존 고와류형 피스톤 기관보다 현저히 낮으며, 상사점 후 약 40° 부근을 통과하면서 열발생률이 고와류형 피스톤 기관보다 더 크게 나타난다. 이는 2단연소에서 연소에 소요되는 시간이 길어지기 때문에 초기의 과농한 연소기간 동안 연소하지 못한 잔여 혼합기가 팽창행정 동안 피스톤의 하강에 의해 발생하는 역 스퀴시 현상에 의해 연소되고 있는 것으로 판단된다. 그러나 P 10, P 11 그리고 P 12형 피스톤 기관에서의 압력과 열발생률 선도에는 일관된 경향을 나타내지는 않았다.

Fig. 43은 기존 고와류형 피스톤 기관과 충돌 스월형 피스톤 기관을 동일한 속도와 부하조건에서 운전하였을 때의 실린더 압력과 열발생률을 함께 나타낸다.

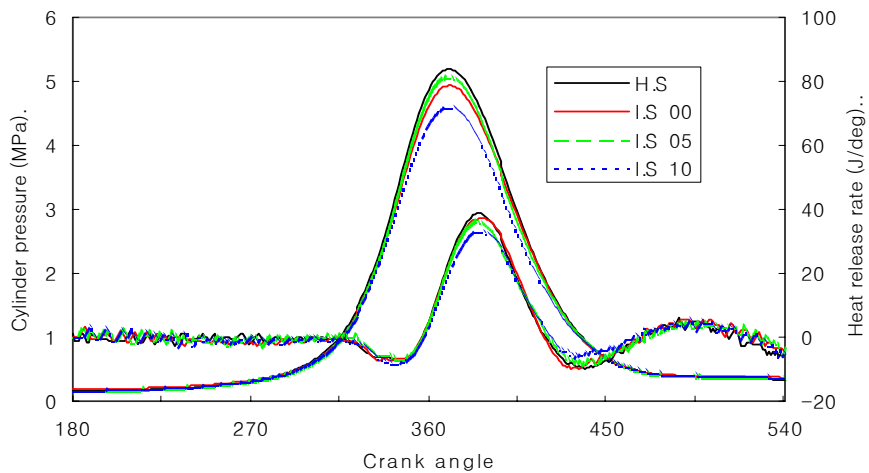


Fig. 43 Cylinder pressure curves & Heat release rate of high swirl type and impinge swirl type pistons at 2,000 rpm and at Max. torque with injection pressure 18 MPa.

충돌 스윙형 피스톤 기관에서는 2단연소형 피스톤 기관과 같은 심한 최고 압력 강하는 나타나지 않았으나 고와류형 피스톤 기관에 비해서는 연소실의 최고압력이 낮게 나타나고 있다. 이것은 연료가 피스톤의 충돌면에 충돌된 후 관통력이 감소되어 연소하므로 폭발적인 연소가 상당히 완화되고 있는 것에 기인한다고 판단된다.

그리고 기존 고와류형 피스톤 기관에서는 대부분의 열발생이 폭발적 연소에 의해서 이루어지고 있으나 충돌형 피스톤 기관에서는 상사점 부근에서의 폭발적 연소가 적기 때문에 열발생이 기존 고와류형 피스톤 기관보다 현저히 낮으며, 상사점 후 약 50° 부근을 통과하면서 열발생률이 고와류형 피스톤 기관보다 더 크게 나타난다. 이는 충돌연소에 의한 관통력 감소로 연소실 전체의 시간적 연료 분포가 저하되어 연소되기 때문에 초기의 연소기간 동안 연소하지 못한 잔여 혼합기가 팽창행정 동안에 연소되고 있는 것으로 판단된다. 그러나 I.S 00, I.S 05 그리고 I.S 10형 피스톤 기관에서의 압력과 열발생률 선도에도 일정한 경향을 나타내지는 않았다.

## 4. 결론

디젤기관에서 NO<sub>x</sub>의 배출과 매연을 동시에 저감하는 것을 목적으로 피스톤 크라운 캐비티의 형상을 다양히 변화시키면서 다양한 운전조건에서 오염물질 배출률과 연료소비율을 비교 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 2단연소형 피스톤 사용 시에 최대 토크는 전반적으로 감소하였으며, 약 1,800 rpm에서 최대 토크를 나타냈고, 충돌 2단연소형 피스톤의 경우가 무충돌 2단연소형 피스톤의 경우보다 더 낮게 나타났다. 충돌 스월형 피스톤 사용 시에는 전체적으로 약간 낮게 나타났고, 2,000 rpm에서 최대 토크를 나타냈으며 분사압력이 낮을수록 높게 나타났다.
2. 2단연소형 피스톤에서 NO<sub>x</sub> 배출률은 전반적으로 큰 저감 효과를 나타내었고, 충돌 2단연소형 피스톤의 경우가 무충돌 2단연소형 피스톤의 경우보다 더 낮게 배출되었다. 충돌 스월형 피스톤 사용시에도 기존의 고와류형 피스톤보다 낮은 배출률을 보였다.
3. CO 배출률은 2단연소형 피스톤이 기존 고와류형 피스톤에 비하여 전반적으로 아주 높게 나타났고, 충돌 2단연소형 피스톤의 경우가 무충돌 2단연소형에 비해 더 높게 나타났다. 충돌 스월형 피스톤의 경우는 토크 증가에 따라 상승하고, 분사압력이 높을수록 적게 배출되었다.
4. 매연 배출량은 2단연소형 피스톤에서 기존 고와류형 피스톤에 비해 현저히 높게 나타났고, 충돌 2단연소형 피스톤의 경우가 대체로 더 낮게 배출되었다. 충돌 스월형 피스톤은 전 부하에 걸쳐 높게 나타났다.
5. 연료소비율은 2단연소형의 경우가 기존의 고와류형 피스톤에 비하여 전 범위에 걸쳐 높게 나타났고, 충돌 스월형 피스톤의 경우에는 전체적으로 조금

높게 나타났으며 저부하 영역에서는 연료소비율이 고와류형 보다 낮다가 고속 영역에서는 더 높게 나타났다.

본 연구에서는 NO<sub>x</sub> 배출률을 CO 배출률 및 매연 배출량과 동시에 저감시키는 방법으로써 과농연소를 위한 통로가 있는 피스톤 크라운 캐비티와 충돌 후 와류에 의한 신속 혼합을 꾀하는 피스톤 크라운 캐비티로 시도 하였다. 그러나 본 실험에 사용된 2단연소형 및 충돌 스월형 피스톤 크라운 캐비티 형상은 와류 감소 및 관통력 저하로 좋은 결과를 얻지 못했다. 2단연소 또는 신속 혼합 희박연소는 일반적으로 NO<sub>x</sub>를 저감시키는 명백한 방법이므로, 와류를 저하시키지 않으면서 동시에 2단연소를 시킬 수 있는 다른 새로운 피스톤 크라운 캐비티의 설계 및 연구가 필요하다고 생각된다.

## 참고문헌

1. 진선호, 2단 연소 개념의 연소실을 갖는 디젤기관의 NO 저감에 관한 연구, 한국해양대학교, 2002
2. 이상석, 이태원, 하종률, 직분식 디젤엔진에서 CAVITY 형상에 따른 Soot의 농도와 운전 조건과의 관계 연구, 한국연소학회지, vol. 3 NO. 1, 1998
3. 박권하, 디젤분무의 벽면충돌모델, 한국액체미립화학회지, 제 5권 제 4호, 2000
4. 전대회, 선박유류관리, 일중사, pp. 138 ~ 151, 1990
5. 한국선급, IMO 대기오염방지 협약
6. 전효중, 내연기관강의, 효성출판사, pp 487~492, 1997
7. 채재우, 안수길, 홍명석, 연소공학, 원창출판사, 1998