

직접분사식 디젤기관의 연소실내 공기유동강화가 연소과정에 미치는 영향

방 중 철*

금오공과대학교 기계공학부

The Effect of Combustion Process by Intensifying the Air Flow in Combustion Chamber of D.I. Diesel Engine

Joong Cheol Bang*

School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongbuk 730-701, Korea
(Received 2 January 2007 / Accepted 25 April 2007)

Abstract : The performance of a direct-injection type diesel engine often depends on the strength of air flow in the cylinder, shape of combustion chamber, the number of nozzle holes, etc. This is of course because the process of combustion in the cylinder was affected by the mixture formation process.

In the present paper, high speed photography was employed to investigate the effectiveness of holes penetrated from the bottom of cavity wall to piston crown for some more useful utilization of air. The holes would function to improve mixing of fuel and air by the increase of air flow in the cylinder.

The results obtained are summarized as follows,

- (1) Activated first of the combustion by shorten of ignition timing and rapid flame propagation
- (2) Raised the combustion peak pressure, more close to TDC the formation timing of peak pressure.

Key words : D.I diesel engine(직접분사식 디젤기관), Visible engine(가시화 기관), Swirl(와류), Combustion process(연소과정), High speed flame photographs(고속도 화염사진)

1. 서론

연비 향상과 저공해를 실현시킬 수 있는 엔진의 개발은 동서고금을 막론하고 관심의 대상이 되어왔다. 그 동안 많은 사람들의 노력으로 발전을 거듭해 왔으나, 추구하는 목적의 지표는 화석연료를 사용하는 한은 끊임없이 이어져 갈 것이다. 시대에 따라 주목을 받는 엔진의 종류도 바뀌어져 왔지만, 근래에 이르러서는 직접분사식 디젤엔진의 소형경량화, 고속화 및 고출력화 등에 관심이 모아지며 다시 주목을 받고 있다.

기관의 고속화나 고출력화를 위해서는 무엇보다

도 연소기간의 단축이 이루어져야 하며, 혼합기의 형성에서부터 착화지연기간, 후연소기간 등의 연소기간 전 과정에 걸쳐서 단축이 일어날 수 있도록 공기의 공급을 원활하게 하여 주어야 한다. 그러나 직접분사식 디젤기관에 있어서 혼합기 형성에 허용되는 시간은 가솔린 기관의 약 1/18에 지나지 않으며 실린더내의 공기이용율도 가솔린 기관은 거의 100%인데 비하여 약 60~70%에 지나지 않는다. 따라서 소형고속디젤기관에 있어서 기관의 구조상 스월의 형성이 어려운 경우에는 6~12공의 다공노즐을 사용하여 분무속(束)의 전개에 의해 혼합기 형성을 촉진시키나, 일반적으로는 분공수를 3~4공으로 하여 분공을 키우는 한편 연소실 구경비를 작게한 것

*Corresponding author, E-mail: bjc@kumoh.ac.kr

은 캐비티를 만들어 스윙과 스퀴시를 병용하여 혼합기의 형성을 촉진시킨다. 특히 스윙은 실린더 축을 중심으로 하는 자유소용돌이가 되어 연료분무와 측면으로 접함에 따라 신기를 공급하고 연소가스를 몰아내는 역할을 한다. 그러나 스윙은 일반적으로 압축행정 중에 감쇠되어 약 30% 정도만이 남아 연소에 관여하게 되므로 스퀴시와 병행하여 압축행정의 말기에 형성되는 수평·수직의 복합와류의 강도 또한 감소하게 되어 연소에 미치는 영향이 줄어들게 된다.¹⁾

따라서 본 연구에서는 감쇠되는 공기유동 강도를 보완할 수 있도록 압축행정시에도 오히려 스윙과 같은 선회류가 얻어질 수 있는 구조의 피스톤을 고안하고, 이 피스톤을 사용하였을시 얻어질 수 있는 연소개선 효과를 화상으로 입증하였다. 특히 이러한 피스톤을 기관의 구조상 스윙의 발생이 어려운 기관이나 2행정 기관에 사용하면 연소기간을 단축시키고 출력을 향상시킬 수 있는 유효한 수단이 될 것으로 예상된다.

현재까지 스윙이나 스퀴시와 같은 공기유동에 관련된 국·내외의 연구 동향은 거의 대부분이 흡기 포트나 흡기밸브 등 흡기계(系)의 형상변화에 의한 유동현상의 고찰²⁻⁹⁾이거나 캐비티의 형상 변경에 따른 유동현상의 고찰 및 연소특성 등¹⁰⁻¹²⁾이 주류를 이루고 있다.

2. 실험장치 및 방법

실험기관은 원래 수냉식 단실린더의 4행정 예연소실식 디젤기관이었으나, 실린더헤드를 떼어내고 실린더 라이너에는 4개의 소기공과 2개의 배기공을 가공하여 schnürle 소기방식의 직접분사식 2행정 디젤기관으로 개조하였다. 떼어낸 실린더헤드 대신에 Fig. 1과 같이 화염의 발달경과를 직접 촬영할 수 있도록 두께 20mm, 직경 89.5mm의 강화유리를 사용하여 관찰창을 설치한 별도의 헤드를 가공하여 결합시켰다.

연료의 분사는 각 분공으로부터 형성되는 화염간의 간섭을 배제하고 주어진 인자만의 영향을 고찰하기 위하여 단공노즐을 사용하였으며 실린더 헤드의 측면에 설치하여 20° 하향분사 함으로써 압축행

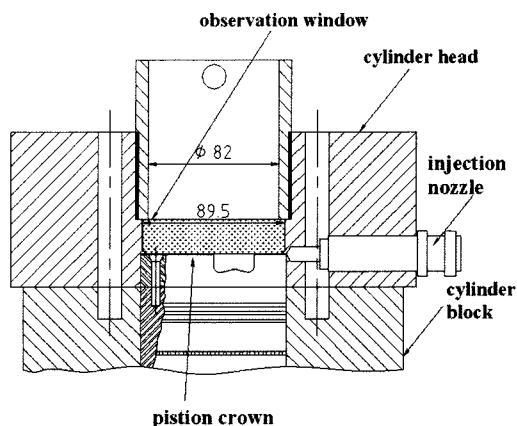


Fig. 1 Remodeling of cylinder head on experimental engine

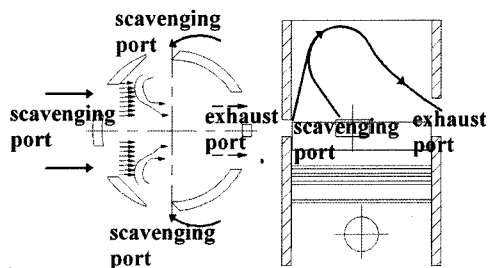


Fig. 2 The scavenging flow of experimental engine

정중에 분사된 연료분무가 피스톤헤드의 캐비티 중심부에 위치하도록 하였다.

실린더내에서의 소·배기 유동은 Fig. 2에 나타내었으며 소기효율을 높이기 위하여 라이너 벽면을 이용하여 소기공의 측면과 윗면에 45°의 각도를 주어 가공하였다.

일반적으로 직접분사식 디젤기관에 사용되는 피스톤에는 스퀴시와 같은 공기유동이 얻어질 수 있도록 다양한 형상의 캐비티를 가지고 있다. 압축행정시 피스톤이 상사점에 근접하게 되면 압축간극부에 있던 공기가 캐비티내로 빠른 속도로 밀려들어와 공기밀도가 높아지게 되고 상사점을 전후하여 한순간 캐비티내의 압력이 압축간극부의 압력보다 높아질 것으로 생각된다. 따라서 캐비티의 하부벽면에서 점선방향으로 피스톤 상부를 관통하여 압축간극부로 연통되는 다수개의 나선형 홀을 가공하면 압축행정시 캐비티내에서 압축된 공기의 일부가 이 홀을 통하여 압축간극부로 분출되면서 강한 선회류를 형성시킬 것으로 예상된다. 이 선회류의 방향이

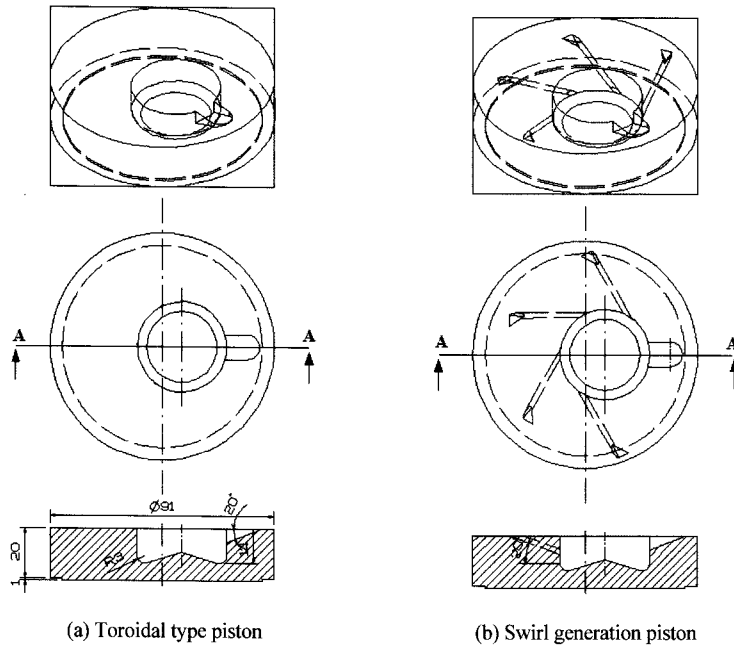


Fig. 3 The schematic drawing of combustion chamber

흡입행정시 발생하는 스월의 방향과 일치되도록 설계하면 스월의 강도가 보강되어 혼합기형성의 촉진은 물론이고 착화이후에도 실린더내의 공기이용율을 높여 연소과정이 크게 개선될 것으로 기대된다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 연소실 형상을 나타낸 것으로 소형 고속 디젤기관에서 주로 사용되는 Toroidal type의 피스톤을 기본으로 하여 언급한 관통 홀을 가공하였다. 단, 선회류의 발생을 위해서는 나선형의 관통 홀을 가공하는 것이 바람직하나 이미 제작된 피스톤에 있어서는 곡선의 후가공이 어려워 그림에서와 같이 직선형의 관통 홀을 가공하였다. 이하 이 홀이 가공된 피스톤은 Swirl generation piston으로 칭한다.

연소화염의 촬영은 기관을 충분히 난기운전 시킨 후 강화유리로 제작된 관찰창으로 교체하고 high speed video camera(motion analyzer, Redlake Motion Xtra HG-TH)를 사용하여 5000frames/sec의 속도로 화염의 발달경과를 촬영하였다. 이 촬영속도에서는 기관의 회전속도가 1000rpm이면 화염사진 1frame당 간격은 1.2°CA이다. 또한 화상에서 피스톤의 TDC 위치를 확인하기 위하여 플라이휠에 설치한 포토다이오드로부터의 신호를 발광다이오드(LED)

로 점멸시키고 연소화염과 동시에 촬영하여 TDC를 나타내었다. 뿐만 아니라 화염촬영을 위한 관찰창 대신에 그 중심부에 압력센서(kistler, piezoelectric pressure transducer)를 부착한 강철창을 이용하여 화염촬영시와 동일한 실험조건에서 실린더내의 압력변화를 측정하여 화염발달에 따른 특징을 비교하였다. 한편 2행정기관으로 개조함에 따른 유효압축비의 저하를 보충하고 소기효율을 높이기 위하여 루츠블로어를 설치하였으며 그 회전속도를 제어하여 소기압을 105kPa과 110kPa로 조정하였다.

일반적으로 실린더 내에서의 연소과정은 매우 복잡하고 직접 또는 간접적으로 영향을 미치는 인자가 많다. 그러므로 어느 특정인자의 연소에 미치는 영향을 고찰하기 위해서는 가능한 한 연소과정을 단순화시켜 그 인자만의 영향을 관찰하여야 한다. 본 연구에서는 고안된 피스톤 구조에 의한 연소성 개선의 고찰을 목적으로 하였기 때문에 기관의 회전수를 배기연의 배출이 많은, 차량의 출발 시에 해당하는 1000rpm에 고정시키고 소기압 외의 다른 인자들의 영향은 고찰에서 배제하였다. 이와 같은 저속회전에서는 실린더 내에서 발생하는 공기유동이 낮아지므로 고안된 피스톤의 관통홀에 의한 유동강

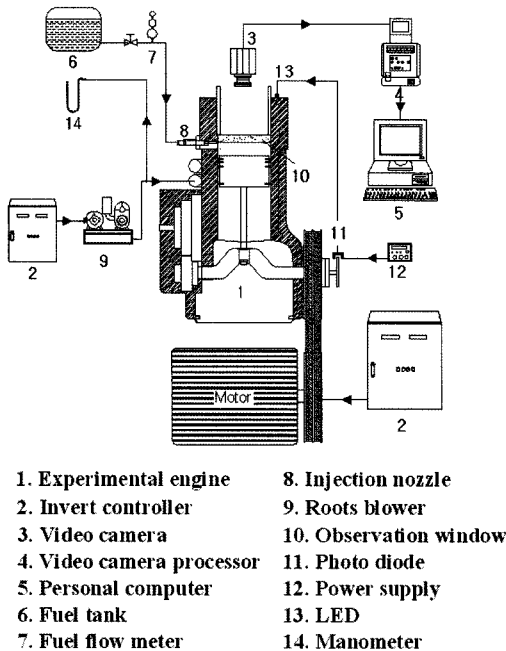


Fig. 4 The schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 The specifications of experimental engine

Items	Specifications
Engine type	2-stroke D.I. Diesel Engine
Bore stroke	92 × 70 (mm)
Compression ratio	15.3
Scavenging port open	ATDC 132° CA
Scavenging port close	ABDC 48° CA
Exhaust port open	ATDC 118° CA
Exhaust port close	ABDC 62° CA
Cooling type	Air-cooling

Table 2 Experimental conditions

Items	Conditions
Engine speed	1000 (rpm)
Combustion chamber	Toroidal type piston Swirl generation piston
Fuel delivery	22.3 (mg/st)
Injection nozzle type	single hole nozzle
Nozzle opening pressure	17.16 (MPa)
Fuel injection timing	BTDC 22° CA
Scavenging pressure	105 (kPa) 110 (kPa)

화효과를 보다 명확히 읽을 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 4는 실험장치의 개략도이며, Table 1과 Table 2는 실험기관의 제원 및 실험 조건을 각각 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화염사진에 의한 연소과정의 평가

2행정 기관에서는 소기류 그 자체를 이용해 스월을 발생시키는 경우가 대부분이나 흡기포트를 이용하여 적극적으로 스월을 발생시키는 4행정 기관에 비하면 스월의 강도가 많이 약한 편이다. 따라서 2행정 기관에서는 소기압력을 높여 스월 강도의 증가와 체적효율 향상의 2가지 목적을 달성한다. 일반적으로 무과급 기관의 소기압력은 약 110kPa~166 kPa(0.14~0.7at, gauge pressure)^{13,14)}이 널리 쓰인다.

Fig. 5는 기관자체의 스월강도를 낮추고 Swirl generation piston의 연소에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 기관회전수 1000rpm에 있어서 소기압을 표준대기압에 가까운 105kPa로 유지시킨채 Toroidal type piston과 Swirl generation piston에서의 연소경과를 촬영한 것이다. 그림에서 (a)는 기관 고유의 Toroidal type piston의 화염사진을, (b)는 직경 2mm의 직선형 관통 홀을 가공한 피스톤을 사용하였을 시의 화염사진이다.

본 실험에 사용한 연소실처럼 좁고 깊은 캐비티를 가진 연소실의 경우, 연소실 구경마가 작기 때문에 분무의 도달거리는 매우 짧고, 따라서 분사초기에는 대부분의 연료가 직접 캐비티 벽면에 충돌할 것으로 생각한다. 이 충돌과정에서 재미립화되고 주변공기와 혼합되면서 빠른 속도로 증발해 가연혼합기가 형성될 것이다.

Fig. 5에서 살펴보면 양 연소실 모두 최초의 착화는 ATDC 1.2° CA를 전후하여 분무의 충돌이 일어난 캐비티 내의 몇 곳에서 발생된 발화핵으로부터 시작된다. 착화후 가벼워진 연소가스가 열혼합효과에 의해 캐비티 중심부로 이동하면서 혼합이 촉진되어 캐비티 전역으로 화염이 확산된 후 압축간극부로 분출되는 모습을 보인다. Swirl generation piston을 사용한 경우도 기본적으로는 Toroidal type의 연소실이므로 연소형태는 같은 양상을 띄게 된다. 그러나 연소의 진행속도에 주목하여보면 그 효과를

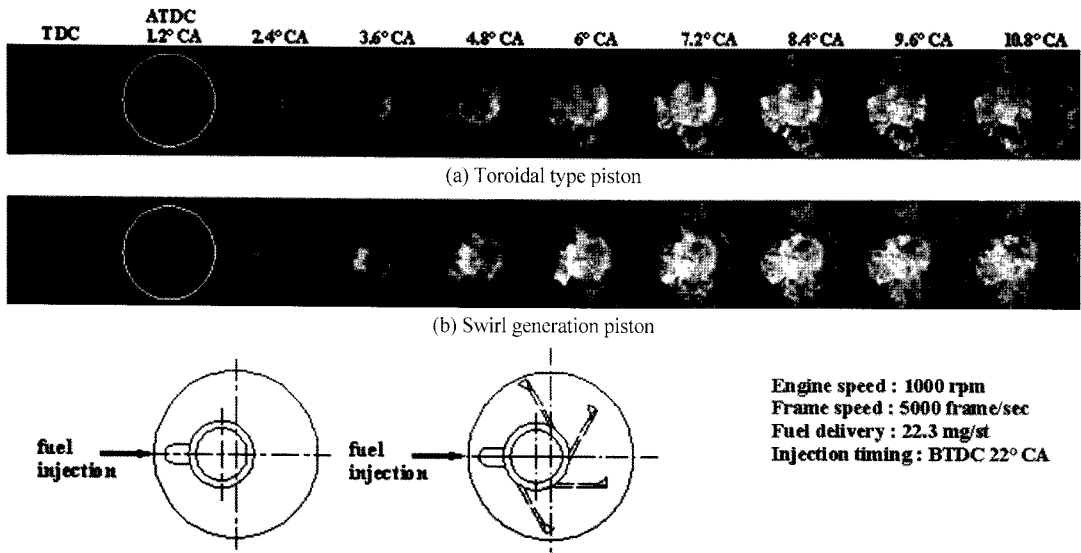


Fig. 5 High speed flame photographs of each piston in scavenging pressure 105kPa

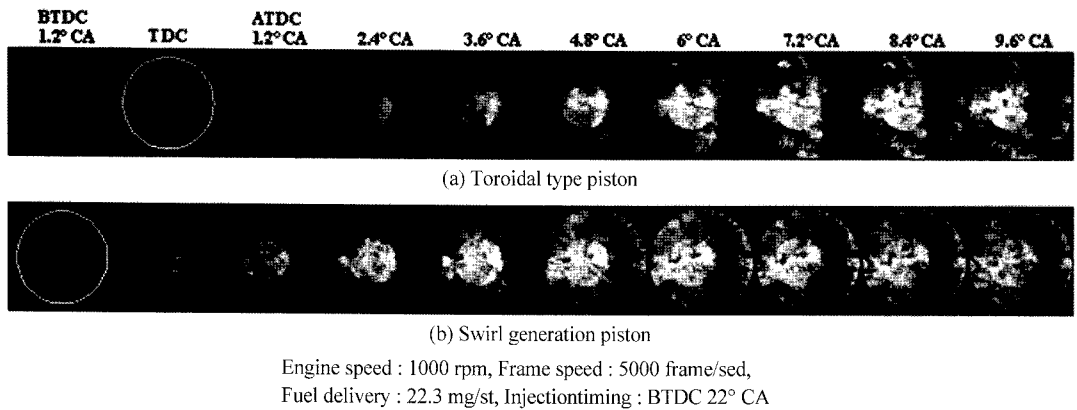


Fig. 6 High speed flame photographs of each piston in scavenging pressure 110kPa

뚜렷이 알 수 있다. 이 피스톤의 경우, 착화 이후 캐비티전역으로의 화염확산이 빠르고, 캐비티로부터 압축간극부로의 화염분출 범위도 넓을 뿐 아니라 분출력도 강하다. 또한 화염의 중심부에서 발달하는 황백색 열염의 발생시기나 발생범위에 있어서도 보다 활성화되어 있다. 이러한 황백색의 휘염은 가연혼합기내에서도 가장 공기의 공급이 원활하고 지속적인 부분에서 발생하게 된다.

기관자체에서 발생하는 연소실내 공기유동과 급기밀도를 최대한 억제시킨 이와 같은 운전조건에서도 Swirl generation piston의 사용은 연소실 내의 공기유동을 증가시켜 혼합기의 형성을 촉진시키고 연

료분부에 신기를 지속적으로 공급하는 등 연소성에 향상시킴에 있어 큰 역할을 하는 것으로 생각된다.

이번에는 2행정 기관의 상용소기압력의 범위인 110kPa에 있어서의 연소경과를 비교하여 보기로 한다. Fig. 6은 기관회전수 1000rpm, 소기압 110kPa에서 (a) Toroidal type piston, (b) Swirl generation piston에 있어서의 연소화염 사진이다.

일반적으로 소기압을 높이면 급기 온도가 높아지게 되고 그에 따라 압축온도도 올라가게 된다. 또한 급기밀도도 높아져 압축압력도 증가하게 된다. 따라서 주변공기와의 마찰이 증가해 혼합이 더욱 촉진되고 착화가 빨라지게 된다. Fig. 5(a)와

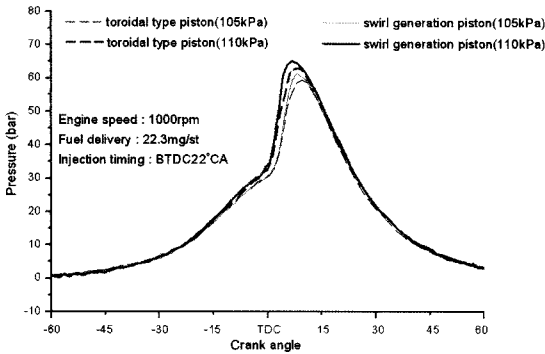


Fig. 7 Cylinder pressure diagrams of each piston and scavenging pressure

Fig. 6(a)의 비교에서 볼 수 있듯이 소기압증가에 따른 연소경과의 차이는 착화시기의 전진과 화염의 확산속도증가, 화염회도의 향상등이다. TDC에서 발화핵이 형성되어 착화시기가 약 1.2° CA 정도 당겨졌고, 착화 이후에는 연소가스의 급팽창에 의해 캐비티내의 다량의 공기가 화염의 중심부로 공급되면서 연소 중기까지 넓은 범위에 걸쳐 매우 밝은 황백색의 열염을 발생시켜 바람직한 확산연소의 형태를 띄게된다. 한편, Fig. 6의 (b) 처럼 소기압의 증가와 더불어 Swirl generation piston을 사용한 경우에는 더욱 양호한 연소경과를 얻을 수 있다. 착화시기의 단축은 물론이고, 연소초기 동일한 시각에 형성된 캐비티내에서의 가연혼합기량이나 캐비티로부터의 분출력, 압축간극부에서의 화염전파영역 등에서 비교가 되지 않을 정도로 연소상태가 향상되어 있음을 뚜렷이 볼 수 있다. 동일한 소기압 임에도 불구하고 이처럼 연소과정이 개선될 수 있음은 관통홀에 의한 캐비티와 압축간극부 사이의 공기유동 증가에 기인한 것으로 직접분사실식의 연소실이면서도 마치 부실식인 와류실식에서와 같은 공기유동 효과를 노린 것이다.

3.2 지압선도에 의한 연소과정의 평가

화염의 고속도 촬영사진에 의한 연소과정의 화상 해석법은 실린더 내에서 일어나는 연소경과의 정성적인 고찰에는 가장 적절한 방법 중의 하나이나, 정량적인 자료의 제시는 불가하다. 따라서 본 절에서는 화상으로부터 확인된 연소성 향상효과를 정량적으로 제시하기 위하여 화염사진 촬영과 동시에 채

취한 지압선도로부터 연소과정을 평가한다. Fig. 7은 Fig. 5와 Fig. 6의 실험조건하에서 취득한 실린더내의 압력변화를 TDC를 중심으로 하여 나타낸 것으로 매 cycle당 변동성을 고려하여 20cycle분을 평균한 것이다. Fig. 7에서 Swirl generation piston의 사용에 의한 지압선도상의 큰 변화는 연소최고압력의 상승과 최고압력 도달시기의 단축이다. 여기에서 Toroidal type piston에 105kPa의 소기압을 공급하였을시의 연소최고압력(60bar)과 최고압력 도달시기(ATDC 10° CA)를 기준으로 하여 비교하여 본다. 이 Toroidal piston에 110kPa로 소기압을 증압시키면 연소최고압력은 약 63bar로 3bar 정도 증가하며 그 최고압력의 도달시기는 ATDC 8° CA로써 TDC 쪽으로 2° CA 당겨진다. 반면 Swirl generation piston에 110kPa의 소기압이 공급되면 그 효과는 배가 된다. 연소최고압의 상승은 5bar에 달하게 되고 연소속도는 더욱 빨라져 ATDC 7° CA에서 최고압력에 도달하게 된다. 소기압을 증가시키면 실린더내의 체적효율이나 급기밀도가 높아지게 되어 연소가 촉진됨으로써 연소최고압력이 상승하고 연소속도가 빨라지는 것은 당연한 결과라 하겠으나, 소기압의 증가와 더불어 연소실내의 공기유동을 강화시킬 수 있는 구조적인 방법의 모색은 직접분사식 디젤기관에 있어서 한층 효과적인 연소개선책이 될 것으로 생각한다.

이상 화상 및 지압선도를 이용한 고찰의 결과들을 종합하여 보면 필자가 고안한 이 피스톤의 구조는 기존의 상용피스톤에 간단한 홀만을 가공했음에도 불구하고 연소실 전역에 걸쳐 공기이용율이 높아져 TDC 근처에서의 초기연소량이 증대되고 화염이 연소실 전역으로 신속히 전파되는 등 정적연소에 보다 가까워진 연소경과를 보임으로써 실제 차량에 적용 시에는 연료소비율과 출력의 향상, 배기연농도의 저감, 기관의 고속화 등에서 큰 효과가 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 압축행정시에도 연소실 내에 선회류가 얻어질 수 있도록 고안된 피스톤(이를 Swirl generation piston이라 칭하였다.)과 기관 고유의 피

스톤을 사용하여 연소과정을 비교·고찰하였다. 얻어진 성과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Swirl generation piston에서는 캐비티와 압축간극 체적내의 공기유동이 증가됨으로써 혼합기 형성이 촉진될 뿐 아니라 공기이용율도 높아져 착화시기가 단축되고 화염의 전파속도가 빨라져 초기 연소가 활성화 되었다. 그 결과 연소최고압력이 증대되고, 최고압력의 형성시기가 TDC로 접근하게 된다.
- 2) 위 1)과 같은 연소성 향상효과는 급기압력을 대기압보다 조금 증대시킨 상태에서 더욱 크게 나타났다. 따라서 기관자체의 공기유동이 낮은 저속운전에서도 일정 급기압력이 유지되면 연소상태는 크게 개선된다.
- 3) 특히 스월의 발생이 어려운 2행정 기관이나 기관의 구조상 공기유동이 낮은 기관 등에 적용시키면 연료소비율이나 출력이 향상되고 배기연 농도는 저감되는 등 기관성능의 개선효과가 뚜렷할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교에서 지원하는 학술연구비에 의해 수행되었습니다. 아울러 Fig. 5 및 Fig. 6의 사진은 원래 컬러이였으나 인쇄과정에서 흑백으로 전환되었음을 양해하여 주시기 바랍니다.

References

- 1) 長尾不二夫, 內燃機關講義(上), pp.283-287, 養賢堂, 1975.
- 2) Y. T. Han, K. M. Hwang and K. H. Lee, "An Experimental Study on the Measurement of Flow Field in a Direct Diesel Engine Using a Single Cylinder Visualization Engine," Transactions of KSAE, Vol.14, No.1, pp.129-137, 2006.
- 3) J. K. Yoon and K. O. Cha, "Effects of Intake Swirl and Combustion Parameters on the Performance and Emission in a V8 Type Turbocharged Intercooler Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.13, No.4, pp.135-144, 2005.
- 4) K. H. Lee, Y. T. Han, H. Y. Jeong and Y. C. Leem, "A Study on the Effects of Intake Port Geometry on In-Cylinder Swirl Flow Field in a Small D.I. Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.6, pp.38-45, 2004.
- 5) J. W. Chung, K. H. Lee and C. S. Lee, "A Study on the Effects of Swirl Flow Generated by SCV on the Combustion Characteristics of the D.I. Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.10, No.2, pp.31-39, 2002.
- 6) J. K. Lee, D. J. Kim, S. J. Kang and B. J. Rho, "An Experimental Study on the Characteristics of the In-Cylinder Eccentricity Swirl Flow with Intake Port Shapes in a 4 Valve Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.6, No.1, pp.59-72, 1998.
- 7) K. S. Jeong, "An Experimental Study of In-Cylinder Flow Characteristics of a High Speed Direct Injection Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.4, No.3, pp.22-30, 1996.
- 8) Yufeng Li, Lili Li, Junfeng Xu and Xiaohui Gong, "Effects of Combination and Orientation of Intake Ports on Swirl Motion in Four-Valve D.I. Diesel Engines," SAE 2000-01-1823, 2000.
- 9) Paul C. Miles, "The Influence of Swirl on HSDI Diesel Combustion at Moderate Speed and Load," SAE 2000-01-1829, 2000.
- 10) S. S. Lee, H. N. Kim, B. G. Kim and J. Y. Ha, "Influence of Cavity Geometry on Combustion Characteristics and Particulate in D.I. Diesel Engine," Journal of KSAE, Vol.12. No.6, pp.40-47, 1990.
- 11) S. I. Kwon, "Effect of Reentrant Type Bowl Geometry on Combustion Characteristics in a D.I. Diesel Engine," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.125-132, 1994.
- 12) S. I. Kwon, "Effect of Reentrant Type Bowl Geometry on Combustion Characteristics in Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.3, No.3, pp.37-45, 1995.
- 13) W. W. Pulkrabek, Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, p.197, Prentice Hall, New Jersey, 2000.
- 14) 長尾不二夫, 內燃機關講義(上), p.121, 養賢堂, 1975.