

화상 분석에 의한 디젤기관의 연소과정에 관한 연구 - 에탄올-경유 혼합 연료의 사용 -

A Study on Combustion Process of Diesel Engine by Image Analysis - the use of ethanol-diesel oil blend fuel -

이 형 곤*, 방 중 철**
Hyungkon Lee, Joongcheol Bang

ABSTRACT

In this paper, the combustion improvement effects of alcohol-diesel oil blend fuel were investigated in a visualization engine. As a result of experiment, it was found out that the combustion of alcohol-diesel oil blend fuel was better than that of diesel oil in both the combustion chamber of deep dish type and re-entrant type at the same operation condition. However, when the content of alcohol exceeded 10% of total fuel delivery, the combustion of alcohol-diesel oil blend fuel was worse than that of diesel oil. The maximum blend quantity of ethanol which is not ignited in the re-entrant type combustion chamber was estimated at approximately 40% of total fuel delivery. So, it is necessary to blend appropriate quantity of a volatility fuel such as alcohol in order to improve combustion.

주요기술용어 : Blend fuel(혼합 연료), Combustible fuel-air mixture(가연 연료-공기 혼합기), Scavenging pressure(급기 압력), Shape of combustion chamber(연소실 형상), Visualization engine(가시화 기관)

1. 서 론

디젤기관의 연소는 연료와 공기가 연소실에서 혼합기를 형성하여 착화하는 복잡한 연소과정을

거쳐서 행하여진다. 특히, 이 과정 중에서 연료와 공기의 혼합기 형성은 디젤기관의 연소에 지배적인 영향을 미침으로 인하여 기관의 성능과 오염 배출물에 커다란 영향을 미친다. 이 때문에 디젤 기관에서는 연료와 공기의 혼합기를 양호하게 형성시켜서 연소를 개선시키려는 여러 가지 연구들이 이루어지고 있다. 이처럼 연소를 개선시키기 위해서는 연소실 내의 연소과정을 명확히 파악하

* 회원, 금오공과대학교 대학원

** 회원, 금오공과대학교 기계공학부

는 것이 무엇보다도 중요한 일이다. 연소과정의 해석방법에는 급속압축기,¹⁾ 내연기관의 연소실을 모방한 정용연소기,²⁾ 실용기관을 개조한 가시화 기관^{3~5)} 등을 이용하여 발화핵 형성과 화염 발달의 연소과정을 직접 관찰 할 수 있는 방법이 있고, 실린더내의 지압 선도(indicator diagram)를 채취하여 열발생율로부터 연소과정을 간접적으로 분석하는 방법⁶⁾이 있다. 또한 연료와 공기의 혼합을 촉진시키는 수단으로써는 연료분무의 무화성 개선,⁷⁾ 분무의 관통력 및 연소실 내에서의 분산성 개선,^{8,9)} 스월(swirl)이나 스퀴시(squish)를 이용해서 분무 속에 신기의 도입을 촉진시키는 방법,¹⁰⁾ 보조연료 분사에 의한 방법¹¹⁾ 등이 있다.

한편, 미래의 대체에너지로써 주목받고 있는 알코올을 디젤기관에 적용시켜 연소개선 효과를 얻고자 하는 연구들이 수행되어 오고 있다. 알코올은 중발이 빠르고 연료분자 안에 산소를 함유하고 있어 연소성이 양호하고 무연연소가 가능하나, 기화점열이 크고 세탄가가 극히 낮아 알코올 자체를 그대로 디젤기관의 연료로 사용하는 것은 쉽지 않다. 알코올을 디젤기관에 적용시킬 수 있는 방법은 경유에 알코올을 혼합시키거나,¹²⁾ 각각 별도로 공급하여 경유의 발화핵으로 알코올을 연소시키는 방법,¹³⁾ 알코올의 혼합기를 글로우플러그(glow plug)나 열면에 의해 착화시키는 방법^{14,15)} 등이 있다. 그러나, 이와 같은 연구들은 실제기관을 이용하여 실린더내의 지압선도, 연료소비율, 배기연농도 등을 측정하여 비교함으로써 결과에 대해서는 만족할 만한 성과를 보이고 있으나 급기압력이나 연소실 형상이 제한적이고, 특히 알코올 혼합기의 영향에 의한 착화직후의 화염의 거동이나 화염의 크기 등에 대해서는 전혀 언급이 없다.

따라서 본 연구에서는 연소실 내의 연소과정을 직접 관찰할 수 있는 가시화기관을 이용하여 연소실 형상, 급기압력 및 알코올과 경유의 혼합비율의 변화가 착화시점에서 연소종료까지의 연소과정에 미치는 영향을 조사하였다. 사용된 연료는 비교적 실용기관에 적용이 쉽다고 생각되는 알코

올을 경유에 소량 혼입시킨 혼합연료이다.

2. 실험 기관 및 실험 방법

실험 기관은 원래 농업용 수냉식 단 실린더 4 행정 예연소실식 디젤기관이었으나, 실린더 라이너에 4개의 소기공과 2개의 배기공을 뚫어 2행정 Schnürle 소기방식으로 개조하였다. 또 실린더헤드에는 Fig. 1처럼 연소경과를 활용할 수 있도록 두께 20mm, 지름 89.5mm의 강화유리를 사용해서 관찰창을 만들었다.

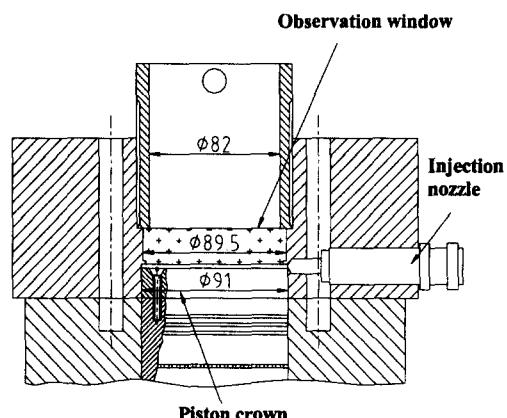


Fig. 1 Remodeling test engine and its cylinder head

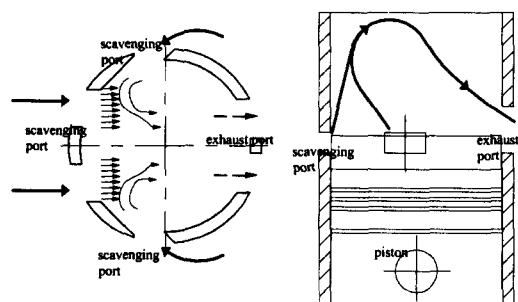


Fig. 2 The scavenging flows of experimental engine

Fig. 2는 개조된 실린더 내에서의 소, 배기류의 형성을 보여주고 있다. 피스톤 cavity는 실험목적에 적합한 연소실 형상을 설계하여 알루미늄으로 제작하고 상부에서 볼트로 고정시켰다. 한편 연료

분사는 실린더헤드 측면에 분사밸브를 설치하고 20° 하향분사 함으로써 압축행정중 분무가 피스톤 cavity 내에 들어갈 수 있도록 하였다. Fig. 3은 본 실험에 사용한 피스톤 cavity의 형상을 나타낸 것이다.

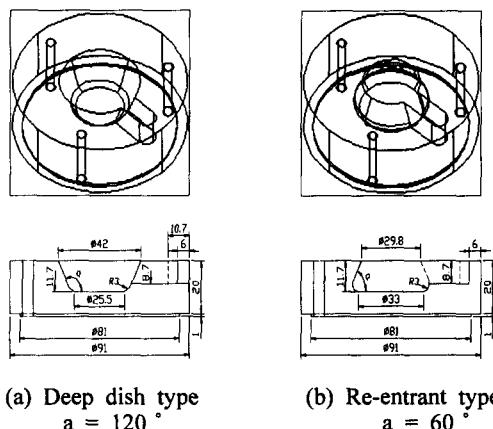


Fig. 3 The configuration dimensions of piston crowns

연소화염의 사진은 기관을 충분히 난기 운전시킨 다음 관찰창을 교체한 후 high speed video camera를 사용하여 2,000 frames/sec의 속도로 촬영하였다. 이 때 기관의 회전속도가 1100rpm이면 1 frame당 3.3° CA에 해당된다. 연료를 연속적으로 분사하면 실린더 내의 고온·고압의 가스로 인하여 관찰창의 파손이 우려되고 또 연소 생성물로 인하여 관찰창이 오염되어 가시화 촬영에 영향을 준다. 따라서 연료분사는 연료분사펌프 내의 컨트롤 랙(control rack)을 조절하여 사진을 촬영할 경우에만 수동으로 분사되도록 하였다. 촬영된 화염의 기록은 제조회사가 제공한 digital download software(version 1.0.0.1)를 사용해 개인용 컴퓨터에 저장하였다. 화염사진에 대한 피스톤의 위치를 확인하기 위하여 크랭크축에 설치한 포토 다이오드(photo diode)로부터의 출력을 발광다이오드(LED)로 점멸시켜 화염사진과 LED를 동시에 촬영하였다. 실험조건은 Table 1에 나타낸 바와 같으며, 기관은 무부하 상태이고 기관 회전속도가 변화해도 분사량이 일정한 보슈(Bosch) B형 분사

펌프를 사용하였다. 기관에 공급되어지는 혼합연료는 경유에 대한 알코올의 체적비가 각각 5%, 10%, 20%의 3 종류이며 순도 99%인 에탄올을 사용하였다.

Table 1 Experimental conditions

Items	Conditions
Engine speed(rpm)	1100
Fuel delivery(mg/st)	36
Scavenging pressure(mmHg)	785, 790
Combustion chamber	Deep dish type Re-entrant type
Nozzle	single hole nozzle
Effective compression ratio	15.3
Fuel injection timing	BTDC 24° CA
Fuel injection direction	20° down injection

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소실 형상에 따른 연소화염 특성

Fig. 4는 re-entrant형 연소실에 경유와 알코올 혼유량 5%의 혼합연료를 같은 조건에서 분사하였을 때의 화염사진이다. re-entrant형 연소실은 cavity 내에 연료를 담아두는 효과가 커서 증발과정 중 아주 농후한 혼합기를 형성하고 있기 때문에 공기와 접촉이 용이하지 않아 연소 초기에 발달된 화염을 얻기가 힘들었다. Fig. 4 (a)처럼 경유만 분사한 경우에서 볼 수 있듯이 발화핵이 형성된 이후부터 TDC에 도달하기 전까지 cavity 내에 화염이 뭉쳐져 있는 것이 관찰되어지고 압축간극부로의 화염분출이 느리게 진행되고 있다. 또 TDC를 지나면서 하강행정 중 발생되는 역스퀴시(reverse squish)의 효과로 화염이 cavity 내로 다시 유입되는 현상을 초래하여 연소상태는 더욱 악화되어져 cavity 입구 주변에서만 밝은 화염이 관찰된다. 특히, TDC 이후 연소화염 중에 검게 나타나는 부분은 공기부족으로 매연발생이 예상되어지는 부분이다. 따라서 이러한 연소실 형상의 경우에는 연료분무를 cavity 내로 집중시키기보다는 분사각을 키워 분포성을 향상시키거나, 연료 중에 기화

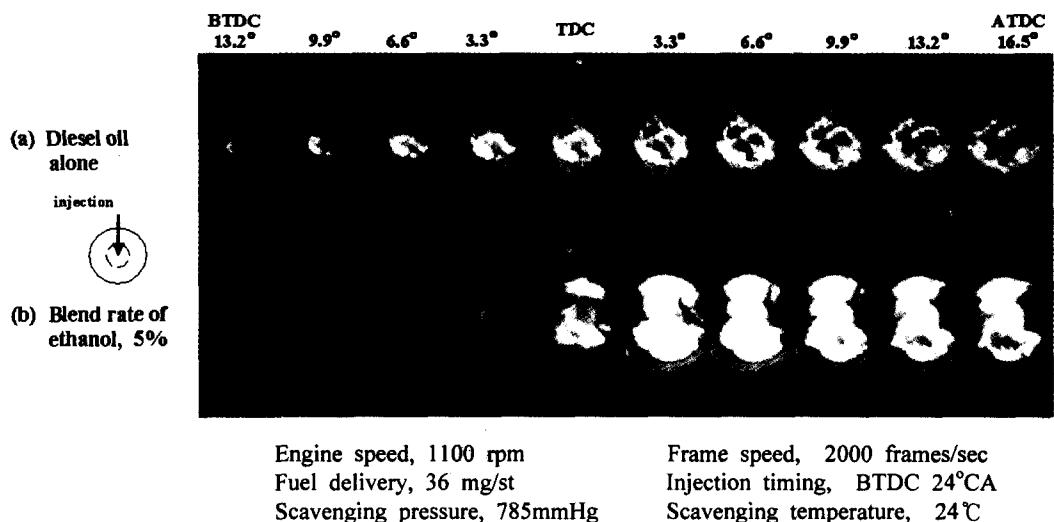


Fig. 4 High speed flame photographs of diesel oil and blend fuel in re-entrant type combustion chamber

성이 강한 연료를 혼입시켜 착화 전에 압축간극부내에 많은 가연혼합기를 형성시킴으로써 cavity로부터 압축간극부로의 화염분출이 용이해지도록 하는 것이 연소개선책이라 생각된다.

Fig. 4의 (b)는 알코올 함유량 5%의 혼합연료를 사용한 경우의 화염사진이다. 발화핵의 형성은 경

유만 분사한 경우보다 9.9° CA정도 늦게 나타났지만 착화 이후의 연소상태는 경유만 분사한 때보다 확실히 개선되어졌음이 관찰되어진다. 발화핵의 형성이 늦어진 것은 알코올의 기화잠열에 따른 연소실 내의 온도강하의 영향일 것이고, 착화 직후의 화염이 경유만의 화염과 비교해 급속

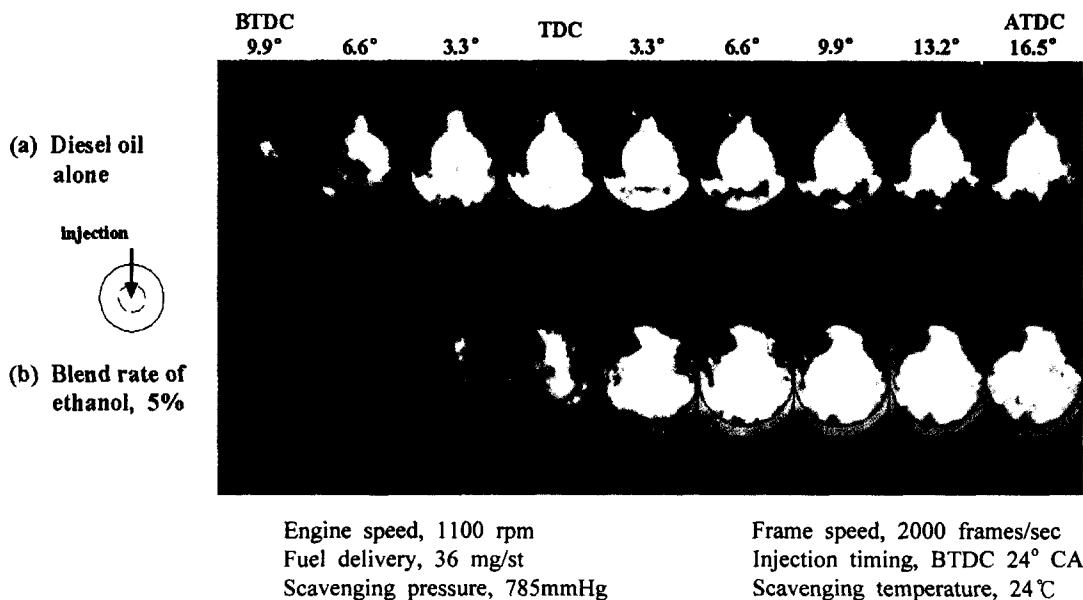


Fig. 5 High speed flame photographs of diesel oil and blend fuel in deep dish type combustion chamber

히 팽창하는 것은 기화성이 좋은 알코올이 먼저 증발하여 착화가 일어나기 전에 많은 가연혼합기를 형성하고 있었기 때문인 것으로 사료된다. 기관의 출력이 향상되기 위해서는 가장 활성화된 화염이 TDC부근에서 형성되어지는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

Fig. 5는 deep dish형 연소실에 경유와 알코올 함유량 5%의 혼합연료를 같은 조건에서 분사하였을 때의 화염사진이다. Fig. 5의 (a)는 경유만 분사한 경우이고 (b)는 혼합연료의 경우이다. deep dish형의 연소실은 cavity 외벽이 cavity 바닥과 이루는 각도가 120° 로써 cavity 내의 분무나 화염의 분출이 비교적 용이하다. Fig. 5의 (a)와 같이 경유만 분사한 경우의 연소상태는 연소가 진행되면서 화염이 연료분사 방향을 따라 연소실 한쪽 벽면에 치우쳐 나타나고 연소가 끝날 때까지 연소실 전역으로 전파되지 않음을 볼 수 있다. 이것은 연소실의 형태가 cavity 내로부터의 화염분출이 어느 정도 양호한 구조라 하더라도 2행정기관에서는 스월(swirl)의 발생이 적어 압축간극부 내의 전역으로 화염이 전파되지 못하고 분무의 진행방향으로만 발달하고 있다.¹⁶⁾ 그러나 re-entrant형 연소실의 화염과 비교하여 보면 발화핵의 형성은 약

3.3° CA정도 늦어졌으나 그 이후로 형성된 화염의 발달은 re-entrant형 연소실에 비하여 개선되어졌음을 확인할 수 있다. 발화핵의 형성이 re-entrant형 연소실보다 늦은 것은 cavity 내의 혼합기능도가 re-entrant형보다 낮아졌기 때문이거나 혼합기성이 늦어진 때문일 것으로 생각된다.

한편, Fig. 5의 (b)는 알코올 함유량 5%의 혼합연료를 사용한 경우의 화염사진이다. 발화핵의 형성은 경유만 분사한 경우보다 늦어졌으나 TDC 이후의 연소경과는 화염이 거의 연소실 전역에 걸쳐 확산되고 있어 연소상태가 상당히 개선되어졌음이 명백하다. 발화핵의 발생직후 연소에 의해 가벼워진 기연가스가 TDC에 이르러 cavity로부터 분출하게 되고 이 연소와류에 의해 압축간극부 내에 이미 형성되어 있던 알코올의 증기에 불을 당김으로써 미연소 연료의 혼합기 형성도 촉진되면서 연쇄적인 폭발로 이어졌으리라 생각된다. 위와 같은 고찰로 미루어 볼 때, 높은 비등점과 점성을 가진 경유의 물리적 특성상 혼합기 형성이 지연되는 점을 감안하여 연료 중에 소량의 알코올과 같은 휘발성 연료를 혼입시키는 것은 연소 개선 효과를 기대할 수 있는 방법 중 하나임을 알 수 있고, 특히 분사압이 낮거나 압축비가 낮아 더

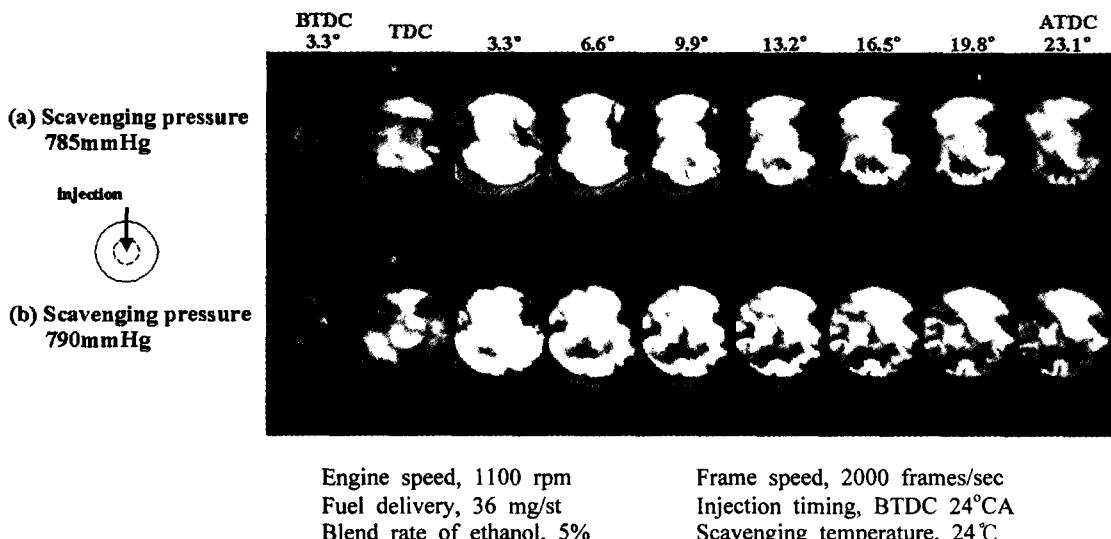


Fig. 6 High speed flame photographs for scavenging pressure variation in re-entrant type combustion chamber

육 혼합기 형성의 지연이 예상되는 경우나, 강한 스퀴시(squish)효과를 목적으로 한 re-entrant형 연소실 및 스월(swirl)의 발생이 적은 연소실 형태에 이 방법을 적용시킨다면 연료소비율의 향상, 출력의 증대, 배기연농도의 감소 등 종합적인 개선효과가 나타날 것으로 예상된다.

3.2 급기압력의 변화가 연소화염에 미치는 영향

Fig. 6은 re-entrant형 연소실에 알코올 함유량 5%의 혼합연료를 사용하여 급기압력 변화에 따른 연소과정을 촬영한 사진이다. 급기압력은 785 mmHg와 790mmHg로 공급하였다. 보다 높은 압력으로 공기를 강제로 급기시키면 피스톤헤드가 TDC에 도달하기 전이라도 연소실 내의 공기 유동

은 더욱 활발해질 것으로 예상된다. 또 본 실험에서처럼 유효압축비가 비교적 낮은 경우에도 어느 정도 연소실에 강제 급기를 함으로써 압축비가 어느 정도 보상되기 때문에 좀 더 양호한 화염 발달이 기대된다.

re-entrant형 연소실 내에서의 최초 발화핵은 급기압력 785mmHg일 때와 790mmHg일 때 모두 BT DC 3.3° CA 부근에서 cavity 내에서 형성되었다. TDC 이후의 화염사진에서 볼 수 있듯이 급기압력이 785mmHg에 비하여 790mmHg 일 때의 화염이 실린더 좌우벽면까지 넓게 퍼져 있음을 관찰할 수 있다. 이는 공급되는 급기압력이 높기 때문에 연소실 내에서 와류가 촉진되고 또 압축비 상승효과에 의한 공기온도의 상승으로 연료의 미립화 및 혼합기의 형성이 촉진되어져 화염 발달 상

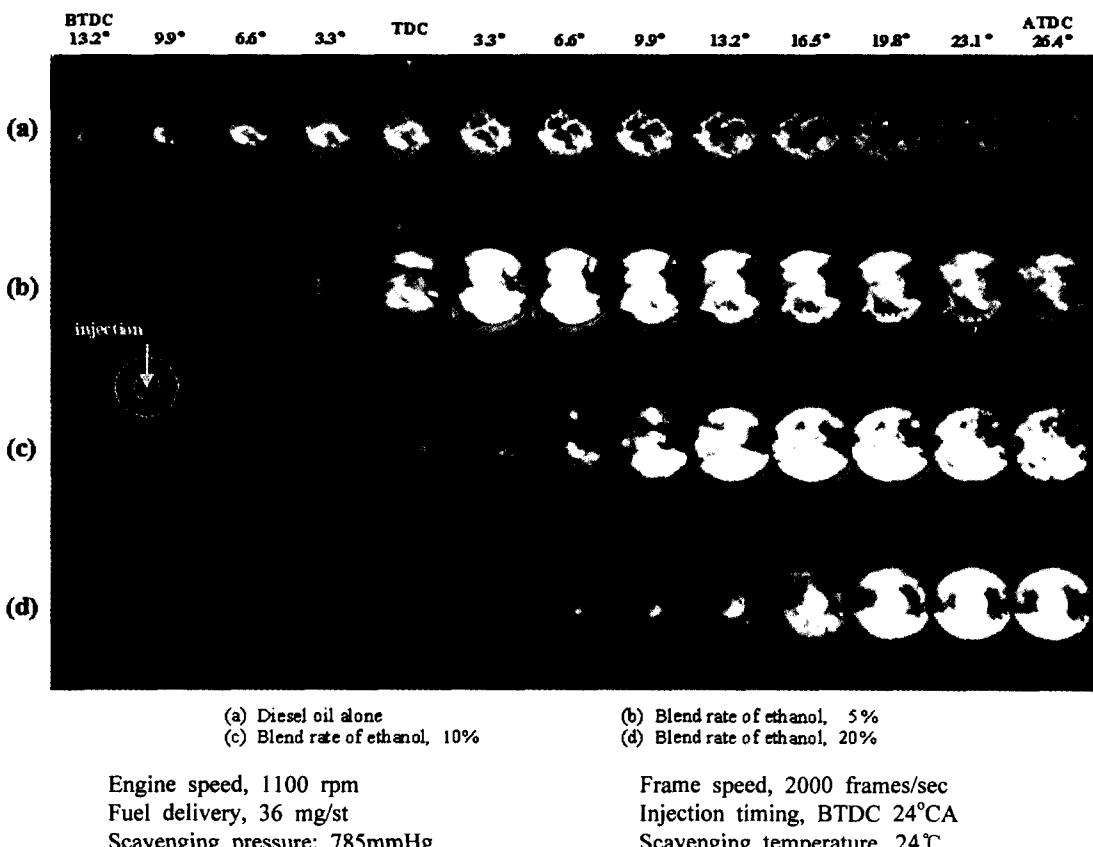


Fig. 7 High speed flame photographs for ethanol blend rates in re-entrant type combustion chamber

태가 좋아진 것으로 생각된다. 따라서 압축간극부로의 화염분출이 쉽지 않은 re-entrant형 연소실에서는 혼합연료의 사용과 급기압력의 상승을 병행 시킬 경우 실린더 내의 공기이용율을 더욱 높일 수 있을 것이다.

3.3 알코올 혼합농도가 연소화염에 미치는 영향

Fig. 7은 re-entrant형 연소실을 사용하여 경유에 알코올의 첨가량을 변화시킨 경우의 화염을 촬영한 사진이다. 알코올 첨가비율은 체적비로 5%, 10%, 20%이며 연소가 일어나지 않는 한계는 알코올 함유량이 40%일 때였다. 알코올 함유량이 증가함에 따라 발화핵이 형성되는 시기는 점차로 늦어졌으며, deep dish형 피스톤헤드에서도 알코올 함유량이 많아질수록 착화지연기간이 길어지는 같은 양상을 보였다. 이것은 동일 분사시기의 경우, 알코올 함유량이 높아질수록 기화감열 증대에 의한 연소실내 공기온도의 강하로 인하여 착화가 늦어진다. 착화 후의 연소상태를 살펴보면, 알코올 함유량이 10% 넘어서면 화염이 연소실 전역에 골고루 확산되는 모습을 보이기는 하나 과도한 함유량(예를들면 알코올 함유량 20%)에서는 착화 후 화염이 실린더 전역에 전파될 때까지 많은 시간이 걸림을 볼 수 있다. 이것은 실린더 내의 온도가 너무 낮아져 알코올 자체의 순차적인 증발도 늦어져 가연혼합기량이 감소되기 때문일 것이다. 일반적으로 기관성능에 큰 영향을 끼친다고 생각할 수 있는 착화 후 약 10° CA 사이의 화염을 관찰해보면 알코올 함유량 5%일 때의 화염은 착화직후 급속히 발달하여 6~7° CA 경과 후 가장 넓은 영역에 걸쳐 확산되어져 있으나, 알코올 함유량 10% 및 20%의 경우는 함유량 5%일 때 위에서 언급한 화염영역까지 전파되는 데에는 적어도 약 10° CA가 경과되어야 한다. 또 알코올 함유량 5%일 때 화염이 가장 발달하였던 착화 후 6~7° CA 경과시의 각 화염을 서로 비교해 보면 동일기간에 있어 알코올 함유량 10% 및 20%의 화염 발달은 알코올 함유량 5%의 경우에 비하여 절반정

도 내지는 훨씬 이하이다. 이러한 점들로 미루어 볼 때 경유에 대한 알코올 함유량이 일정비율을 넘어서면 설령 분사시기를 앞당긴다 해도 양호한 연소상태를 얻기가 어려울 것으로 생각된다. 또 이러한 경우에는 후연소기간이 길어져 연료소비율도 악화될 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 실험에서는 단 실린더 4행정의 디젤기관을 2행정 schnürle 소기방식으로 개조한 실험용 기관을 이용해서 알코올 - 경유 혼합연료의 연소개선 효과를 고속도 화염사진으로부터 고찰하였다. 결과를 요약하면 아래와 같다.

1) 경유의 물리적 특성상 혼합기 형성이 지연되는 점을 고려하여 적정량의 알코올과 같은 휘발성 연료를 경유에 혼합시키는 방법은 연소개선 효과가 기대되는 방법중의 하나이다.

2) re-entrant형의 연소실처럼 cavity로부터의 연소와류를 얻기 힘든 연소실 형상 또는 스월의 발생이 어려운 2행정기관 등에 휘발성 연료가 함유된 혼합연료를 사용하면 cavity로부터의 화염분출이 용이해지고, 화염을 연소실 전역에 확산시키는 효과가 있다. 또 여기에 급기압력을 조금 증대시키면 연소개선 효과가 더욱 향상된다.

3) 휘발성연료의 함유량은 실린더내의 공기온도에도 영향을 끼침으로 일정비율을 초과하면 연소개선 효과가 저하된다.

참 고 문 헌

- 1) S. Matsuoka, "Creation of Image on Diesel Spray and Flame by Means of Rapid Compression Machine and D.I Diesel Engine", SAE 830447, pp.2.249-2.264, 1983.
- 2) H. Kuniyoshi, H. Tanabe and G. Takeshi Sato, "Investigation on the Characteristics of Diesel Fuel Spray", SAE 800968, pp.2998-3014, 1980.

- 3) 방중철, 太田幹郎, “가스체 연료를 사용하는 압축착화기간에 관한 기초적 연구”, 한국자동차공학회논문집 제4권 제2호, pp.147-157, 1996.
- 4) E. Winklhofer, H. Fuchs, and H. Philipp, “Diesel Spray Combustion - An Optical Imaging Analysis”, SAE 930862, pp.1154-1163, 1993.
- 5) L. Zhang, T. Minami, T. Takatsuki, and K.Y okota, “An Analysis of the Combustion of a DI Diesel Engine by Photograph Processing”, SAE 930594, pp.734-742, 1993.
- 6) Y. Yamaki, S. Komuro, H. Kamikubo, T. Katou, “Combustion Characteristics with Pilot Injection”, The 11th Internal Combustion Engine Symposium, JSME · JSAE, pp.1-6, 1993.
- 7) H. Hiroyasu and M. Arai, “Structures Fuel Sprays in Diesel Engines”, SAE 900475, pp.1050-1061, 1990.
- 8) M. Arai, M. Tabata and H. Hiroyasu, M. Shimizu, “Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel jet Injected by a Diesel Nozzi”, SAE 840275, pp.2.358-2.371, 1984.
- 9) K. S.Varde and D. M. Popa, “Diesel Fuel Spray Penetration at High Injection Pressures”, SAE 830448, pp.2.265-2.278, 1983.
- 10) C. Espey, J. A. Pinson and T. A. Litzinger, “Swirl Effects on Mixing and Flame Evolution in a Research DI Diesel Engine”, SAE 902076, pp. 2079-2088, 1990.
- 11) M. Alperstein, W. B. Swim and P. H. Schweitzer, “Fumigation Kills Smoke-Improves Diesel Performance”, SAE, Vol.66, pp.574-588, 1958.
- 12) T. Murayama, N. Miyamoto, T. Yamada, and J. Kawashima, K. Itow, “A Method to Improve the Solubility and Combustion Characteristics of Alcohol-Diesel Fuel blends”, SAE 821113, pp.3485-3503, 1982.
- 13) 堀政彦, 須藤英夫, 小林伸治, 瀬古俊之, “メタノールディーゼル機関の開発研究”, 日本自動車技術会論文集, No.28, pp.34-42, 1984.
- 14) 齊藤史彦, 高森勇治, 齊藤博昭, “混合氣貯留型グローアシスト直噴メタノール機関の燃焼特性”, 日本自動車技術会論文集, Vol.22 No.3, pp.13-18, 1991.
- 15) 柄澤隆夫, 川口暁生, 志賀聖一, 倉林衝雄, “アルコールディーゼルの熱面による着火輔助効果とその機構”, 日本機械學會論文集(B編) 54卷 503號, pp.1848-1855, 1988.
- 16) 방중철, 太田幹郎, “직접분사식 디젤기관의 연소실 형상과 화염의 발달”, 大韓機械學會論文集 第11券 第1號, pp.44-52, 1987.