

고압분사 경유-물 혼합연료의 연소특성

정 대 용[†] · 이 종 태^{*}

(2003년 3월 26일 접수, 2003년 8월 6일 심사완료)

A Study on Combustion Characteristics of Diesel-water Emulsion with High Pressure Injection

Daeyong Jeong and Jongtai Lee

Key Words: High Pressure Injection(고압분사), Diesel-Water Emulsion(경유-물 혼합연료), Combustion Characteristics(연소특성), Water Content(함수율)

Abstract

Combustion characteristics on diesel-water emulsion are analyzed in high pressure injection for several variables such as water content, injection pressure and injection timing. As a fact of well-known, maximum combustion pressure was decreased and ignition delay was elongated in accordance with increasing of water content. But these characteristics were enhanced with increase of injection pressure to high pressure. It was shown that combustion of neat diesel in case of injecting with 600bar is similar to that of 20 % diesel-water emulsion was injected at 1200 bar.

1. 서 론

디젤기관의 연료로서 경유-물 혼합연료를 사용하면 물의 증발잠열증가에 의한 연소온도의 저하, 물의 급격한 증발에 의한 유적의 미세폭발이 발생된다. 또한 수증기와 연료증기 사이의 수성 가스반응, 분무연료의 밀도증가에 의한 분무관통력의 증가 등에 의해 NOx 및 soot의 동시저감이 가능하다. 연료를 고압으로 분사하면 분무입자의 운동에너지가 증가하여 분무도달거리 및 분무각이 증가하고 분무속도 증가에 따른 전단력 증가

로 미립화가 촉진된다. 미립화 및 관통력의 증가는 연료의 기화를 촉진시키고 공기 이용율을 증가시켜 출력의 향상을 도모할 수 있다. 따라서 혼합연료를 고압으로 분사하면 물침가에 의한 출력의 저감을 고압분사에 의한 보상으로 기관출력의 감소 없이 NOx 및 soot의 배기가스를 동시에 저감하는 데 효과적일 것으로 생각된다.

Afify E. M.⁽¹⁾ 와 Crookes⁽²⁾, 등은 혼합연료사용에 따른 제반연소특성을 해석하였다. 또한 Schwartz R.⁽³⁾, Stump G.⁽⁴⁾와 Oblaender K.⁽⁵⁾ 등은 고압분사에 따른 연소특성을 해석하였다. 그러나, 혼합연료를 1000bar이상의 고압으로 분사한 경우의 연구는 아직 명확하게 보고되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 디젤기관에 경유-물 혼합연료를 초고압 분사하여 저공해, 고출력 및 고효율을 동시에 달성시킬 수 있는가를 확인하기 위한 기초단계로 혼합연료를 1200bar까지 고압분사한 경우의 연소특성을 해석하였다. 실험에는 초고압분사를 실현시킬 수 있는 단발구동형 고압분사시스템과 이를 연소시킬 수 있는 급속압축팽창연소

[†] 성균관대학교 대학원 기계공학부
E-mail : dyjeong@nature.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7472 FAX : (031)295-1937
^{*} 성균관대학교 기계공학부

장치를 사용하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 고압분사시스템

고압분사시스템은 초고압달성과 함께 분사압력의 조절이 가능하고 설계기관과 같은 분사파형이 재현되어야 한다. 그리고 요구되는 분사조건에 대응하여 제어가 가능하여야 한다. 이를 위해 제작한 고압분사장치의 개략도를 Fig. 1에 나타낸다. Fig. 2는 실물사진이다.

고압분사장치는 크게 플런저에 공급되는 연료를 1차 가압하는 1단 압축부, 가압된 연료를 플런저 펌프에 의해 2차 가압하는 2단 압축부, 작동된 플런저구동용 실린더를 원상태로 복귀시키는 복귀장치부로 구성된다. 증압실린더에 의해 1차 압축된 연료는 고압가스에 의해 가압된 작동유가 순간적으로 플런저구동실린더에 공급됨으로써 2차 압축되어 초고압의 실현이 가능한 장치이다.⁽⁷⁾

플런저 구동실린더에 의해 플런저펌프가 가압할 수 있는 연료의 최대 설계압축압력은 작동유 압력이 80bar인 경우 최대 약 12,000bar이다. 현재 4400bar의 최대분사압력이 실현되었다. plunger pump는 상용의 PE-P형을 사용하였다. 고압인젝터는 분사공이 4개, 분사공 직경이 0.26mm, 분사각이 150°, 니들리프트는 0.3mm인 DLL-S type의 직접 분사식 인젝터를 개조하여 사용하였다.

2.2 급속압축팽창 혼합연료 연소장치

혼합연료 연소장치는 고압으로 분무된 경유-물 혼합연료를 자기착화시켜 확산연소시키는 단발연소용 실험장치로서 유동연구용 단발 급속흡입압축팽창기(RICEM)를 개조하였다.

Fig. 3은 혼합연료 연소용 급속흡입압축팽창기의 실물사진이다. 혼합연료연소용 RICEM은 디젤연소용 모사실린더부, 피스톤 구동부, 피스톤 가이드부, 구동된 피스톤 가이드부를 정지시키는 제동부, 초기상태로 복귀시키는 복귀 장치부 및 오일 가열장치부로 나눌 수 있다.

주요 개조부는 혼합연료 연소용 모사실린더부이며 Fig. 4에 개략도를 나타낸다. 모사실린더부의 bore 및 stroke은 86.5mm 및 90mm이며, 압축비는 $\epsilon = 17.3$ 이다. 연소실 형상은 내경 $\phi 65$ mm 높이

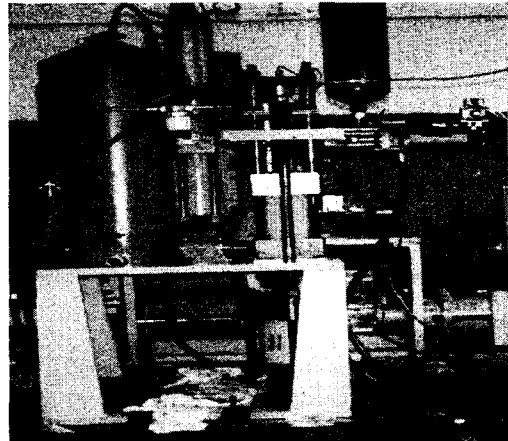


Fig. 2 Photograph of HPIS with high pressure

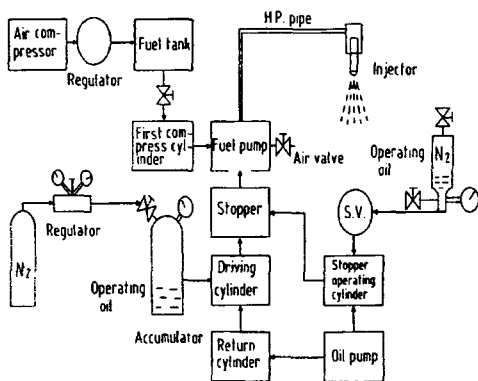


Fig. 1 Schematic diagram of HPIS

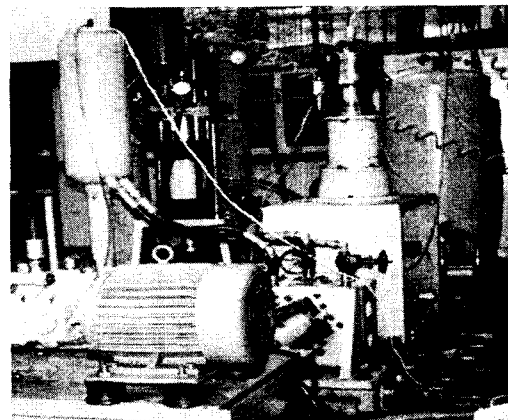


Fig. 3 Photograph of experimental apparatus

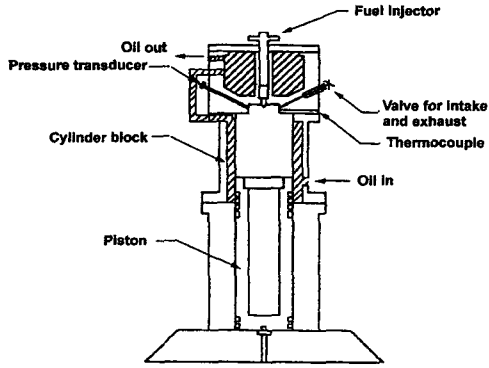


Fig. 4 Schematic diagram of simulated cylinder

9.53mm인 bowl형으로 하였다. 피스톤과 실린더 사이의 기밀 및 윤활을 위해 3개의 압축링과 1개의 오일링을 설치하였다. 피스톤 크라운 형상은 flat type으로 하였다. 연소실 외측에는 흡·배기용 니들밸브를 설치하였다. 실제기관과 같은 가스온도를 재현시키고자 가열된 고온의 오일을 실린더 헤드 및 실린더 블록 주위에 순환시켜 초기온도를 높일 수 있도록 하였다.

2.3 Data 취득장치 및 실험방법

분사압력은 측정압력이 최대 10,000bar인 초고압용 압력변환기(Kistler 6213B)를 사용하였다.

고압인젝터의 needle lift는 측정범위가 0~2mm인 gap sensor(VE-231 type)로 측정하였다. 실린더 내의 가스압력은 piezo type의 압력변환기(Kistler,601A)로 측정하였다. 실린더의 벽표면 온도는 K-type의 열전대로 측정하였다. 피스톤 변위는 피스톤 로드와 부착한 rack과 pinion을 이용하여 2상원점 출력형 TRD J 360-RZ type rotary encoder로 측정하였다. 피스톤의 상하사점은 photo sensor(BF3RF)로 검출하였다. 측정된 압력, 온도 및 각종 변위 data는 고속 A/D변환장치를 통해 PC로 입력한 후 필요한 해석을 하였다.

실험변수는 혼합연료의 함수율, 분사압력 및 분사시기이다. 함수율은 연료와 유화제에 대한 체적비로 0%에서 30%까지 단계적으로 변화시켰다. 연료분사압력의 변화는 600bar, 900bar, 1,200bar이다. 분사시기는 BTDC 15°CA, 20°CA, 30°CA로 하였다. 연료분사량은 켄트록렉을 고정시켜 모든 분사압력에 대해 동일하게 하였다.

각 실험에서 고압인젝터의 개변압은 400 bar로

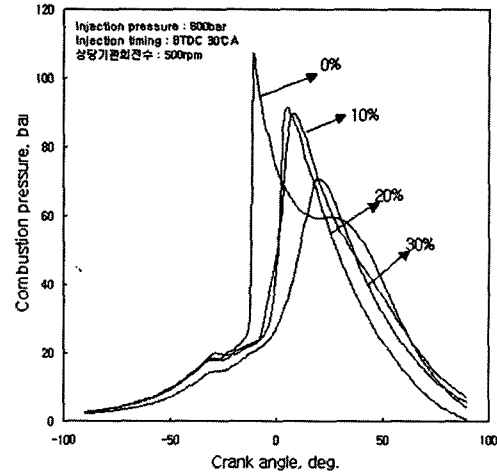


Fig. 5 Cylinder pressure curve at each water content as a function of crank angle

설정하였다. 혼합연료 연소장치 압축초기 실린더내 온도는 75℃, 상당기관회전수는 500 rpm으로 고정하였다.

3. 연소특성

3.1 함수율을 변화시킨 경우

Fig. 5는 경유-물 혼합연료를 사용한 경우의 실린더내 가스압력경과 곡선을 순수한 경유만을 사용한 경우와 비교한 것이다. 각 경우 모두 분사압력은 600bar이며, 분사시기는 BTDC 30°CA로 동일하다.

경유만을 분사한 경우, 즉 함수율 0%인 경우의 실린더내 가스압력은 연료가 분사되면서 약간 감소한 다음 착화지연기간을 거쳐 미소한 크랭크 각 변화에 대해 큰 압력구배를 가지고 급상승한 후 떨어지는 양상이다. 물을 첨가한 경우에도 실린더내 압력경과는 상기와 정성적으로 동일한 양상을 보이고 있다. 그러나, 전반적으로 연료분사 후 압력강화와 착화지연기간이 커지며, 최고연소압력이 다소 감소함을 나타낸다. 이 차이는 함수율이 증가될수록 대체로 커지는 경향이다. 이를 상세히 파악하고자 착화지연기간, 최고연소압력, 압력상승률 및 연소기간을 해석하였다.

Fig. 6은 혼합연료의 함수율을 변화시킨 경우의 착화지연기간을 나타낸 것이다. 여기서, 착화지연기간은 인젝터의 니들이 리프트되는 시점부터 열 발생시점까지로 정의하였다.

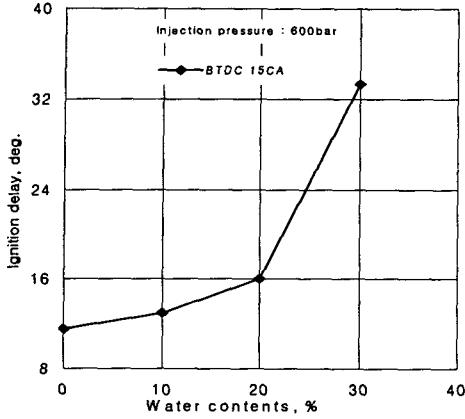


Fig. 6 Ignition delay at BTDC 15°C as a function of water content, injection pressure 600bar.

착화지연기간은 물을 첨가함에 따라 길어지는 경향이며, 함수율이 증가함에 따라 그 증가율은 현저하다. 착화지연기간이 길어지는 것은 물을 첨가함에 따라 기화잠열이 증가하고 이것이 연소 초기의 실린더내 가스온도를 강하시키는 데 의한 것으로 판단된다. 함수율 30%인 경우 착화지연기간이 현저히 길어지는 것은 큰 기화잠열에 의해 연소실안이 상대적으로 과냉되는 데 의한 것으로 볼 수 있다. 물을 30% 첨가시키는 경우의 착화지연기간은 물을 첨가시키지 않은 함수율 0%에 비해 약 3 배 정도 길어지는 것이 보여졌다.

Fig. 7은 각각의 함수율에 따른 최고연소압력 및 최고압력상승율을 나타낸 것이다.

실린더내 가스의 최고연소압력 및 최고압력상승율은 모두 함수율이 증가함에 따라 전반적으로 감소하다가 함수율 20%인 경우 약간 증가하나 그후 현저히 감소하는 경향이다. 실린더내 가스 압력 및 압력상승율이 물을 첨가함에 따라 감소하는 것은 비에너지원인 물이 연료에 첨가되는데 따른 공급열량의 감소에 주원인이 있다.

부가적으로 착화지연기간의 증가에 의한 연소체적의 증가에 기인하는 것이라 생각된다. 그리고, 함수율이 20%인 경우 공급열량의 감소에도 불구하고 연소압력 및 압력상승율이 약간 증가하는 것은 유화연료 내에 분포된 물의 미세폭발에 의해 연료연적이 재미롭화 되고 또한 연료의 질량증가에 의한 관통력 증가로 공기와 연료의 혼합

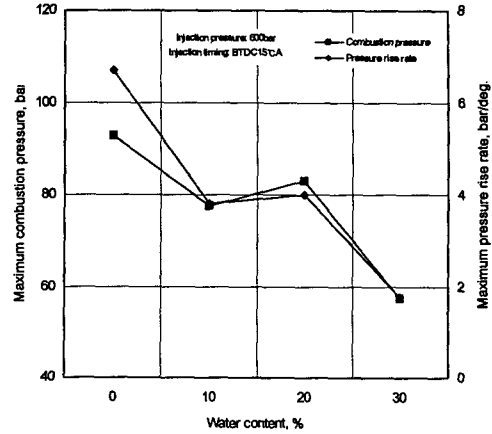


Fig. 7 Maximum combustion pressure and maximum pressure rise rate as a function of water content, injection pressure 600bar

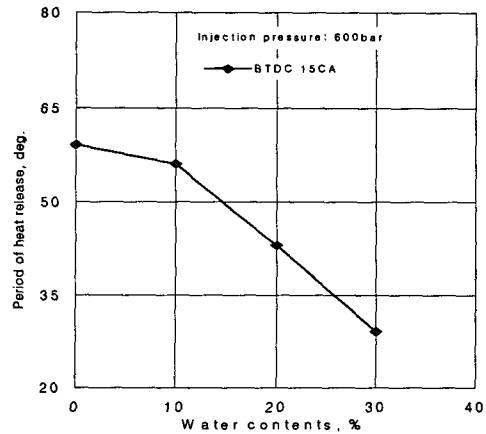


Fig. 8 Period of heat release at BTDC 15°C as a function of water content, injection pressure 600bar

를 증진에 따른 연소촉진의 영향이 공급열량의 감소영향보다 현저한데 기인하는 것으로 생각된다.

혼합연료사용에 따른 연소촉진을 파악하고자 함수율 변화에 대한 열발생기간을 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타낸다.

열발생기간은 함수율이 증가함에 따라 지속적으로 감소함을 나타낸다. 전술한 바와 같이 함수율이 증가하면 자기착화기간이 증가한다. 이 기간 동안 분사된 혼합연료양의 증가는 확산연소되는 열발생기간을 감소시키며, 또한 함수율 증가에 의한 열발생량의 감소와 물의 미세폭발에 의

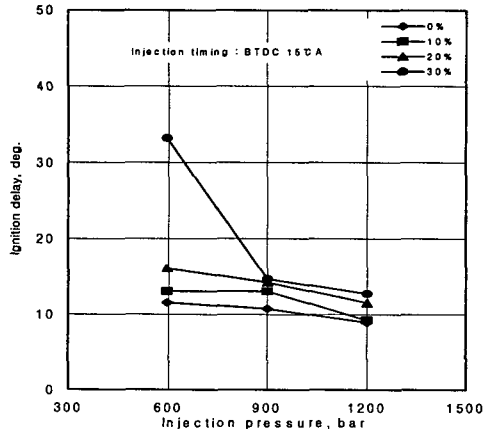


Fig. 9 Ignition delay at each water content as a function of injection pressure

한 연소촉진 등 복합적인 영향으로 연소기간이 감소되는 것으로 볼 수 있다. 함수율이 30%인 경우의 열발생기간은 순수경유만을 사용한 경우에 비해 약 2배정도 감소함을 나타낸다.

상기의 결과로부터 혼합연료를 사용하는데 따라 연소압력이 감소되어 출력은 저감되나, 증발잠열의 증가는 NOx의 저감, 혼합물의 증가는 soot의 감소, 그리고, 열발생기간의 감소는 약간의 열효율향상에 기여할 것이 예측된다.

3.2 혼합연료를 고압분사한 경우

Fig. 9는 순수경유와 혼합연료를 고압분사한 경우의 착화지연기간에 대해 나타낸 것이다. 여기서 분사압력은 인젝터쪽의 연료공급관에서 측정된 압축압력의 최대치이다.

경유만을 고압분사한 경우의 착화지연기간은 주지의 사실과 마찬가지로 분사압력의 고압화에 따른 미립화, 관통력 및 분무각의 증진에 의한 연소촉진 영향으로 지속적인 감소를 보인다. 물을 첨가한 경우에도 상기와 같은 영향으로 분사압력을 고압화하는데 따른 착화지연기간 감소의 추세는 동일하다. 그러나 함수율이 커질수록 고압화에 따른 착화지연감소율은 현저하다. 예로 함수율이 30%인 경우 분사압력을 600bar에서 900bar로 약간 증가시키더라도 착화지연기간은 약 54%이상 감소함을 보이고 있다. 이와 같은 이유는 복합적인 영향에 기인할 것이나 분사압력 증가 및 물의 첨가량이 증가하는데 따른 혼합연료의 밀도 증가로 인해 운동에너지가 크게

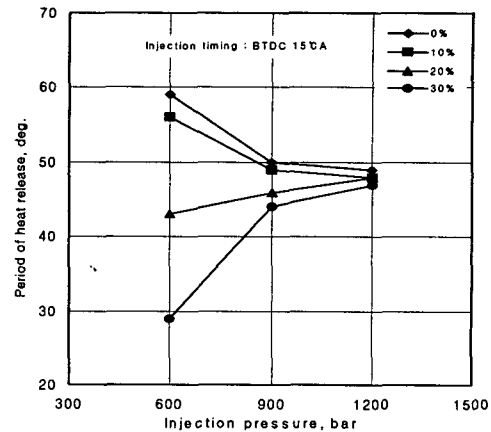


Fig. 10 Period of heat release at each water content as a function of injection pressure.

증가되는데 의한 것으로 생각된다.

상기와 같이 고압분사하는 데 따른 착화성의 향상으로 물첨가에 의한 착화지연기간의 증가가 보상된다. 이로 인해 혼합물 20%의 혼합연료를 1200bar로 고압분사한 경우의 착화지연기간이 순수 경유만을 600bar로 분사하는 경우보다 오히려 약간 짧은 것을 나타내고 있다. 이 결과는 혼합연료사용에 의한 착화지연기간의 증가를 고압 분사에 의해 보상할 수 있다는 것을 의미하는 것이다.

Fig. 10은 혼합연료를 고압분사한 경우의 열발생기간을 나타낸다.

경유만을 고압분사하는 경우의 열발생기간은 분사압력이 증가함에 따른 분무특성의 향상으로 감소되는 경향이다. 혼합연료를 고압분사하는 경우의 열발생기간은 함수율이 10%정도까지 감소된다. 그러나 이보다 물의 첨가량이 증가되면 반대로 증가되며, 첨가량이 증가할수록 증가율은 커지는 경향이다. 이 결과의 정확한 원인에 대해서는 미지이지만, 전술한 바와 같이 고압분사에 의해 착화지연기간이 짧아져 확산연소기간중의 물의 증발잠열분이 상대적으로 커지는데 따른 연소가스의 온도강하와 혼합기의 희박화로 인해 연소속도가 저하되는데 의한 것이라 예측된다.

상기와 같이 혼합연료를 고압화 하는데 따른 열발생기간의 상반된 경향에 의해 분사압력이 1200bar인 경우 혼합물이 현저히 달라도 열발생은 기간모두 대체로 한 지점에 수렴되어 그 차가

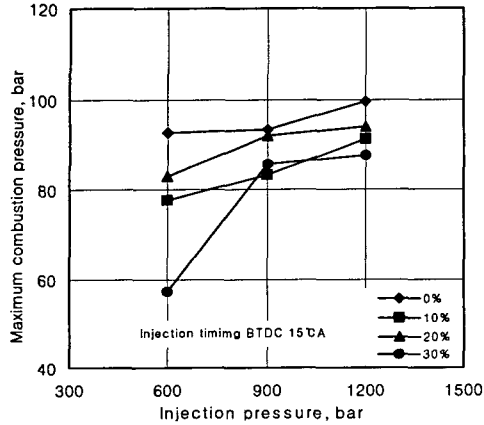


Fig. 11 Maximum combustion pressure at each water content as a function of injection pressure

약 2°CA 정도에 지나지 않는 특이한 결과를 보이고 있다.

Fig. 11은 고압분사시의 최고연소압력을 각각의 함수율에 대해 나타낸 것이다.

고압분사에 따른 미립화촉진의 영향으로 연소가 촉진되어 최고연소압력은 분사압력을 증가시키기에 따라 현저히 증가한다. 혼합연료를 사용하여도 동일하며, 함수율이 증가함에 따라 그 효과는 크게 나타난다.

이와 같은 압력상승효과에 의해 물을 20% 정도 첨가시켜 열량을 적게 공급하더라도 분사압력을 900~1200bar 정도로 고압화하면 600 bar에서 순수 경유만 분사한 경우와 대체로 동일한 최고압력이 얻어졌다.

상기와 같은 결과들은 혼합연료를 사용하는데 따른 출력의 감소 및 착화지연기간의 증가 등을 분사압력의 고압화에 의해 보상할 수 있음을 입증하는 것이다. 함수율 30%의 혼합연료를 1,200bar로 분사했을 경우와 순수경유를 600 bar로 분사했을 경우의 연소압력과 착화지연기간은 불과 5% 및 7% 정도 차이가 있는데 에 불과하다. 따라서 분사압력을 더 높이면 순수경유와 유사할 것으로 판단된다.

그리고 고압화하는 데 따라 혼합연료의 연소특성은 지속적으로 향상되는 경향이므로 앞으로 보다 고압화하는 경우의 연소특성과 원인규명 등에 관한 상세한 연구가 필요하다고 생각된다.

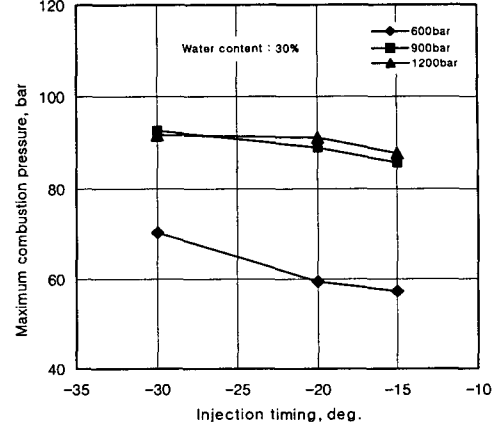


Fig. 12 Maximum combustion pressure at each injection pressure as a function of injection timing, water content 30%.

3.3 분사시기 변화

혼합연료를 고압분사하는 데 따른 착화지연기간의 변화는 분사시기를 변화시킨 것과 마찬가지로 연소초기의 연소실 체적을 변화시키는 역할을 하여 기관출력을 좌우한다. 이들의 영향을 해석하고자 고압분사를 하는 경우 분사시기변화에 대한 실린더내 가스압력을 비교하였다. Fig. 12는 대표적으로 함수율 30%의 혼합연료를 고압분사하는 경우의 최고연소압력을 분사시기변화에 대해 나타낸 것이다. 통상의 경우와 마찬가지로 분사시기를 진각시킴에 따른 연소초기의 가스온도 및 연소실체적의 감소에 의해 최고연소압력은 증가한다. 그러나 분사시기의 진각에 따른 최고연소압력의 증가율은 혼합연료를 고압화시킬수록 감소되는 경향이다. 이것은 혼합연료의 분사압력을 초고압화 하는 것에 의해 착화지연기간 변동에 의한 연소변동 발생을 완화시킬 수 있다는 것을 제시하는 것이다. 함수율이 30%인 혼합연료를 1200bar의 고압으로 분사시킨 경우 분사시기를 15°CA 진각시키는 데 따른 최고연소압력의 변화는 약 4% 미만임이 보여졌다.

4. 결 론

고압분사장치와 혼합연료 연소장치를 이용하여 경유-물 혼합연료의 함수율 및 분사압력 분사시기 변화에 따른 연소특성을 해석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 함수율을 증가시키기에 따라 열발생기간, 최

고연소압력의 감소로 배기가스의 동시 저감이 가능함을 확인할 수 하였다.

(2) 분사압력을 고압화하면 분무특성의 개선으로 연소촉진효과가 발생하여 연소특성이 개선되며 최고연소압력의 상승으로 출력성능이 향상됨을 예측할 수 있다.

(3) 분사압력을 초고압화 하면 기관의 출력성능 향상에 분사시기의 변화는 분사압력에 비해 미치는 영향이 미약함을 알 수 있었다.

(4) 함수율을 증가시키더라도 분사압력을 높이면 엔진의 출력성능을 떨어뜨리지 않고 동시에 배기가스의 저감이 가능함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(R01-2001-000-00386-0(2002)지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Afify E. M., 1985, "Performance Combustion Characteristics and Exhaust Emission of a Direct Injection Diesel Engine Using Water/Oil Emulsions. as Fuel," North Carolina State University
- (2) Crookes, R. J., Nazha, M.A.A., Janoter, M.S., Story, T., 1980, "Investigation into the Combustion of Water/Diesel Fuel Emulsion" SAE paper 80094
- (3) Stump G., Polach W., Muller N. and Warga J., 1989.: "Fuel-injection Equipment for Heavy Duty Diesel Engines for U.S. 1991/1994 Emission Limits," SAE 890851.
- (4) Schwartz R., 1985.: "High-Pressure Injection Pumps with Electronic Control for Heavy-Duty Diesel Engines," SAE 850170.
- (5) Oblaender K., Kollmann K., Kraemer M. and Kutschera I., 1989.: "The Influence of High Pressure Fuel Injection on Performance and Exhaust Emission of High Speed Direct Injection Diesel Engines," SAE Trans. paper 890438.
- (6) Daeyong Jeong, Hyunsang Ha, Jongtai Lee, 1998, "A Basic Study on Combustion of Ultra High Pressure Injection" Autumn conference proceeding of KSAE, pp. 386~392.

(1) Afify E. M., 1985, "Performance Combustion