2단분사 디젤분무의 거동

Behavior of 2-Stage Injection on Diesel Spray

박병덕*, 권 순익**, 오 재건***, 김 상진****
B.D.Park, S.I.Kwon, J.G.Oh, S.J.Kim

The behavior of the 2-stage spray was studied by using the schlieren method with the high pressure common-rail injection system. The spray injected 2 times with the interval of 0.3ms~1.5ms between the 1st and the 2nd spray in a modeled combustion chamber of constant volume bomb. In this case, the quantity of injected fuel of 1st and 2nd also changed. The schlieren photograph shows that the 2nd spray goes further away than the 1st spray when the quantity of the 1st spray is less than that of the 2nd spray. The dispersion of the vapour to the combustion chamber is not affect in a 10% of 1st spray quantity. When the 1st spray quantity is more than the 2nd spray, the vapour scattering of spray is good.

주요기술용어 : 2-Stage Injection(2단분사), Diesel Spray(디젤분무), Vapour Scattering (증기분산), Schlieren(슈리렌), Penetration(도달거리)

1. 서 론

직접분사식 디젤엔진은 그 경제성과 범용성에서 뛰어나 대형 선박에서부터 소형의 농업 기계까지 동력원으로서 폭 넓게 이용되고 있으나, 근년에 이르러 디젤기관에 의한 배기배출물이 대기오염의 주범이라는 측면에서 사회 문제화되고 있다. 이 때문에 배기배출물의 저감을 위해 연소효율 개선, 연료 및 재료 등의 여러 측면에서의 연구가 진행되고 있다. 그 중, 연소효율 개선의 측면에서 최근에는 연료분사를 사이클당 한 번에 분사하지 않고 여러 번에 걸쳐 나누어 분사시키는 2단분사방법[(1)~(5)]이 연구되고 있다.

Tow 등[(1)]은 단기통 직분 디젤엔진에 축압식 유니트 인젝터를 설치하여 연료량을 50:50으로 나누어 2단분사를 실시하였다. 분사간의 시간 간격을 변화시켜 실험을 한 결과 시간 간격을 길게 한 조건에서 입자상물질이 저감된다고 발표하였다. Nehmer 등[(2)]은 분사율 패턴을 50:50과 25:75에 주목하여 분사시기를 Trade-off한 결과, 입자상물질의 증가 없이 질소화합물의 저감이 가능하다는 결론을 얻고 있다. 天谷 등[(3)]은 3대의 분배형 연료분사 펌프를 연결하여 독립적으로 제어함으로서 2단분사를 하는 장치를 고안하였다. 이 장치를 이용하여 분무의 거동을 가시화하여 분무의 도달거리 및 분무각 등을 측정하였다. 이러한 기존의 2단분사에 의한 연구 결과들의 대부분은 입자상물질과 질소화합물의 동시 저감에 유효하다는 결론은 얻고 있

* : 상주대학교 자동차공학과
** : 두원공과대학 기계과
*** : 두원공과대학 자동차공학과
**** : 대림대학 자동차공학과

으나, 2단분사 분무의 거동에 대해서는 아직 불명확한 점이 많다.

이에 본 연구에서는 축압식 고압분사 시스템과 고속도 비디오 카메라 등을 이용하여 고온 고압분위기중에 분사된 2단 분무의 거동을 조사하기 위해 실제 엔진의 연소실 형상을 모델화한 모의 연소실을 정용 용기내에 설치하여 2단분사의 분사비율과 분사간의 시간 간격을 변화시켜 분무의 거동을 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험은 Ar^+레이저에서 발생하는 빔(Beam)을 팽창기(Expander)로서 직경 φ=100mm로 확대하여 평행 광속을 만든 후, 고온 고압 용기내의 관찰창을 통해 노즐로부터 분사되는 연료분무에 조사한다. 이것을 슈리렌 미러(Schlieren Mirror)에서 집광시킨 후, 초고속도 비디오 카메라로서 촬영하였다. 실험장치의 전체적인 개략도를 Fig.1에 나타낸다.

실험에 사용된 연료분사 시스템은 분사 최고압력이 120MPa의 초고압 분사와 4단까지 2단 분사가 가능한 Commonrail 축압식 고압분사 시스템(DENSO사, ECD-U2)을 이용하였다. 이 분사시스템은 인젝터 내부의 연료통로에 설치된 플런저를 전자제어 함으로서 연료분사를 제어할 수가 있으며, 컨트롤러에 의해 분사압력과 분사단수는 각각 1MPa과 1단분사씩, 2단분사에서의 각 분사기간 및 분사 간격은 각각 최소 0.001ms와 0.1° CA씩 임의로 변경할 수 가 있다.

분무 사진 촬영에는 촬영속도가 9,000~40,500 frame/sec(분할frame시)인 초고속도 비디오 카메라(Kodak사, Ektapro HS4540)를 사용하였으며, 연료분사 시스템의 분사개시 신호와 동시에 기록 촬영이 되도록 동기 시켰다.

광원은 최대출력 6W의 Ar^+레이저(Spectra-Physics 사, 2017-06S)로서 출력 파장은 λ=457.9~514.5nm의 가시광 및 λ=333.6~363.8nm의 자외선광이다.

고온 고압의 실험조건을 만들어 주는 정용용기

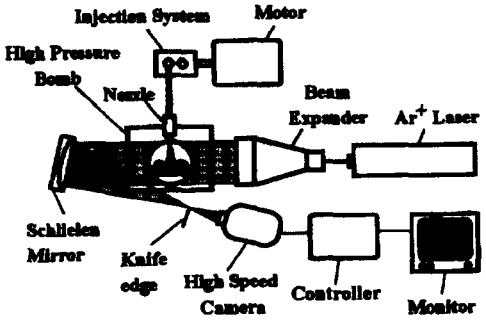


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

내에는 4KW와 2KW의 원통 히터가 설치되어 있으며, 용기내에 질소를 충전시킴에 따라 용기내의 분위기 온도를 900K까지, 분위기 압력을 4MPa까지 올릴 수 가 있다. 용기내의 온도는 K형 열전대를 사용하여 계측하였으며, 용기의 양측면에는 직경 120mm의 합성 석영유리로 된 관찰창이 설계되어 있다. 용기내에는 실제 중형 엔진의 연소실형상을 모델화 한 모의 연소실이 설치되어 있으며, 재질은 알루미늄 합금으로 그 형상의 상세한 것은 Fig.2에 나타낸다.

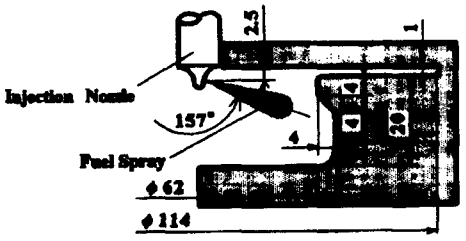


Fig. 2 Details of Model Combustion Chamber

2.2 실험조건

실험 때의 온도와 압력은 실제 엔진의 분사 시기에서의 연소실내의 분위기를 재현하기 위해 각각 833K 및 4.0MPa로 하였다. 사용한 노즐은 분공경 0.22mm의 4홀 노즐이며, 사진 촬영은 1개의 홀의 분무에서만 실시하고 나머지 3홀의 분무는 사진 촬영하는 분무에 간섭이 되지 않도록 노즐 주위에 커버를 씌워 분무의 비산을 방지하였다. 연

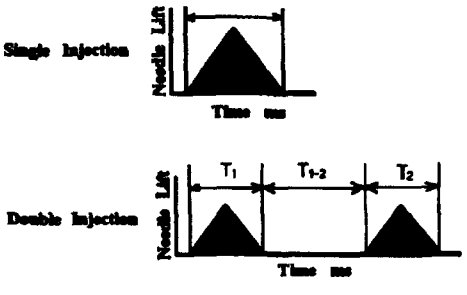
Table 1 Test Conditions

Ambient Gas	
Ambient Temperature	833K
Ambient Pressure	4.0MPa
Injection Pressure	90MPa
Amount of Fuel Injected	43.7mg/st
Injection Nozzle	
Number of Hole	4
Hole Diameter	0.220mm
Opening Pressure	19.6MPa
Combustion Chamber	
Cavity Diameter	62mm
Piston Diameter	114mm
Top Clearance	1mm
Nozzle Protrusion	1mm

료의 1회 분사량은 실제 엔진1300rpm, 100%부하 때의 분사량을 기준으로 43.7mg으로 하였으며, 본 실험은 미연소 상태에서의 분무의 관찰이 목적이므로 고압 용기 내에서 연소를 일으키지 않는 질소를 충전하였다. 또 고속도 비디오 카메라의 속도는 화상의 해상도가 양호한 9,000frame/sec로 하였다. 상세한 실험조건을 Table 1에 나타낸다.

2.3 2단 분사 패턴의 결정방법

각 2단분사에서의 분사 비율의 결정은 우선 1단 분사때의 분사량을 기준으로 첫 번째의 분사기간을 설정한 후, 분사간의 간격을 조정한다. 다음에 두 번째의 분사량이 기준 분사량과 같도록 분사기간을 설정한다.



T_1 : Interval of First Injection
T_2 : Interval of Second Injection
T_{1-2} : Interval between First and Second Injection

Fig. 3 Definition of Injection Pattern

Table 2 Test Parameters

Injection Pattern	P_{inj} (MPa)	T_1 (ms)	T_{1-2} (ms)	T_2 (ms)
Single	90	1.3		
D10-90-0.30ms	↑	0.3	0.30	1.15
-0.50ms	↑	0.3	0.50	1.15
-0.75ms	↑	0.3	0.75	1.15
-1.00ms	↑	0.3	1.00	1.15
-1.50ms	↑	0.3	1.50	1.15
D25-75-0.30ms	↑	0.45	0.30	1.00
-0.50ms	↑	0.45	0.50	1.00
-0.75ms	↑	0.45	0.75	1.00
-1.00ms	↑	0.45	1.00	1.00
-1.50ms	↑	0.45	1.50	1.00
D50-50-0.30ms	↑	0.75	0.30	0.75
-0.50ms	↑	0.75	0.50	0.75
-0.75ms	↑	0.75	0.75	0.75
-1.00ms	↑	0.75	1.00	0.75
-1.50ms	↑	0.75	1.50	0.75
D75-25-0.30ms	↑	1.0	0.30	0.45
-0.50ms	↑	1.0	0.50	0.45
-0.75ms	↑	1.0	0.75	0.45
-1.00ms	↑	1.0	1.00	0.45
-1.50ms	↑	1.0	1.50	0.45

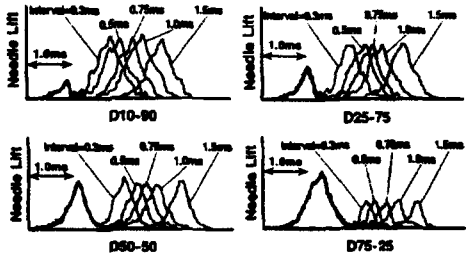


Fig. 4 Shape of Injection Rate of 2 Stage Injection

분사시스템의 컨트롤러로서 설정한 1단 및 각 2단분사 패턴의 정의를 Fig.3에, 실험에 설정된 분사패턴의 설정 인자를 Table 2에 나타낸다. 또한 분사패턴의 설정인자를 기준으로 한 니들 리프트의 실제 형상을 Fig.4에 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 자유분무

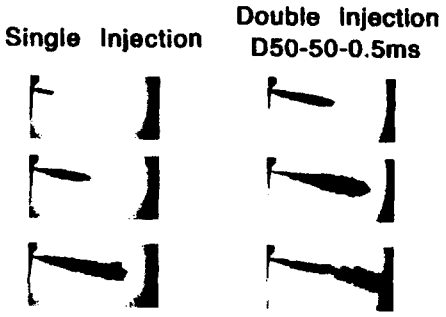


Fig.5 Photograph of Free Spray on Shadow Method

1단분사 및 2단분사를 하였을 때의 새도우 그래프(Shadow graph)법에 의한 자유 분무의 화상을 Fig.5에 나타낸다. 2단 분사의 경우, 후속의 분무가 선행하는 분무 내에서 성장할 때, 선행 분무에 대해 그 분무각을 증대시키는 등의 큰 혼란을 일으키는 현상은 보이지 않는다. 이것으로 부터 2단 분사에 의한 분무와 주위 분위기와의 관계, 즉 분무 내로의 공기 도입량의 증대 등의 효과는 그다지 없는 것으로 생각된다.

3.2 자유분무의 도달거리

새도우 그래프법을 이용하여 2단분사 때의 분무의 도달거리를 측정할 때에는 2단째의 분무가 그 전에 분사된 분무와 중첩되어 측정이 곤란하므로, 이를 측정하기 위해서 "Image - Pro Plus" 라는 소프트웨어를 사용하였다. 이는 측정하려는 화상과 1프레임 전의 화상을 차분하여 2단째 분무가 새롭게 성장한 부분을 분리시켜 측정을 하는 방법으로 D25-75-0.5ms때의 화상처리 예를 Fig.6에 나타낸다. 1단째는 속도가 거의 감소한 상태이며, 두 화상 사이에는 큰 변화는 보이지 않으나, 2단째 분무가 아직 진행 중이어서 그 변화한 만큼 검게 보인다. 이 부분을 2단째 분무의 선단으로 하여 노즐 끝에서 분무 선단까지의 거리, 즉 분무 도달거리를 측정하였다.

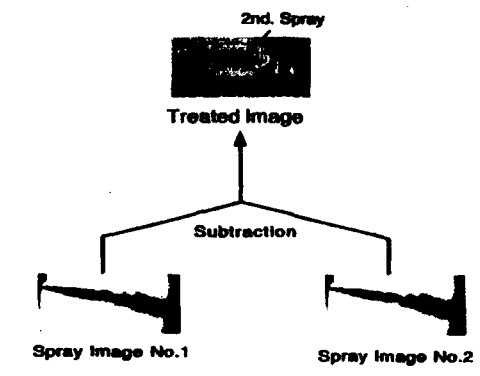


Fig. 6 Image Treatment for Spray Penetration

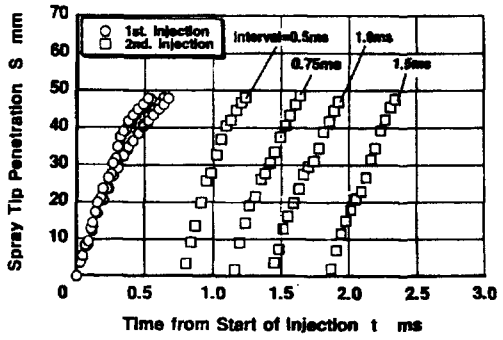


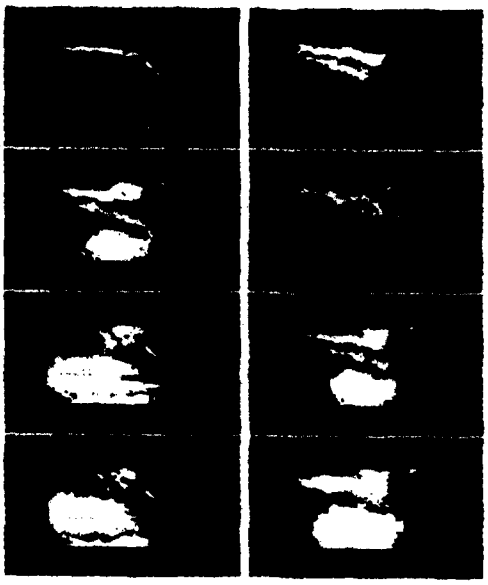
Fig. 7 Spray Penetration of 2-Stage Injection

분무와 분무사이의 간격의 시간을 변화시켜 분무 도달거리를 측정한 것을 Fig.7에 나타낸다. 1단째 분무와 2단째 분무의 도달거리에는 별다른 변화는 보이지 않고 있으며, 분무간의 시간적 간격의 변화에도 도달거리는 비슷함을 나타내고 있다.

3.3 충돌분무

1단(Single) 분사 및 D10-90-1.0ms의 2단분사 때의 슈리렌법 촬영 화상을 Fig.8에 나타낸다. 희게 보이는 부분이 연료 증기이며, 1단째(1st) 분사 개시로부터의 시간을 나타내고 있다.

D10-90-1.0ms에서의 1단째 분사 종료 직후인 t=0.35ms에서는 분사된 연료분무가 거의 순간적으로 모두 증발하고 있으나, 1단 분사에서는 아직 분사가 지속되고 있으며 중심부에 연료 액적부가 검게 보여진다. t=2.5ms에서 1단분사에서는 캐비티(Cavity) 내에 연료증기가 분산되어 있으며, 특히 캐비티 아래 부분에 농후한 증기상으로 생각되어



Single Injection Double Injection
D10-90-1.0ms

Fig. 8 Photograph of Spray (D10-90-1.0ms)

지는 흰 부분이 보인다. 여기에 대해 D10-90-1.0ms 에서는 2단째의 분무가 발달하고 있는 도중이며, 캐비티 내로의 증기의 분산은 그다지 진행되지 않고 있다. 단지 1단 분사의 종료 때와 비교하면 거의 같은 형태의 증기분산이 보여진다. 이것으로부터 10%라는 소량의 1단째 분무는 캐비티 내부로의 증기의 분산에는 그다지 기여하지 않는 것을 알 수 있다.

1단분사 및 2단 분사의 D75-25-1.0ms와 D25-75-1.0ms때의 화상을 Fig.9에 나타낸다. 분사 종료 시점인 t=2.5ms에서 1단분사와 D75-25-1.0ms의 2단분사를 비교하면, 1단 분사는 캐비티 아래 부분에서 분무의 발달이 진행되고 있으나. 2단분사에서는 아직 충분히 발달하고 있지 않으며, 이것은 2단째 분사된 분무가 아직 성장하고 있지 않기 때문이다. 분사 종료 시점에서 두 분사 형태를 비교하면 2단분사를 시킨 쪽의 증기의 분산이 캐비티 내에서 보다 넓고 균일하게 나타난다. 이것은 1단째의 분무가 2단째 분무에 의해 혼란을 받아 분위기와의 혼합이 진행되었기 때문이라 생각된다.

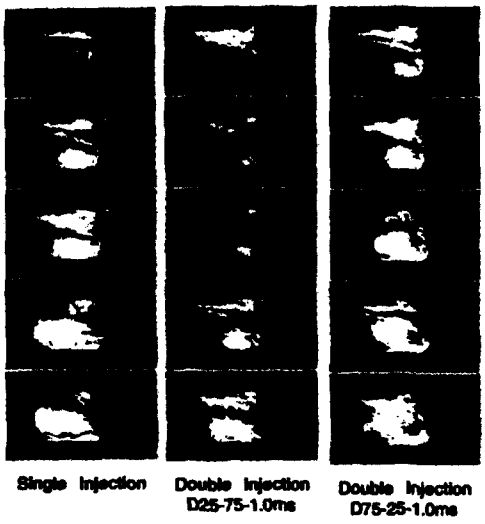


Fig. 9 Photograph of Spray
(D25-75-1.0ms, D75-25-1.0ms)

D25-75-1.0ms때의 2단 분사 패턴에서는 1단째 분무의 분산은 그다지 보이지 않으며, 2단째 분사 종료때에도 1단 분사의 종료때와 비교해서 캐비티 내로의 분무의 분산이 양호하다고는 할 수 없다. D75-25-1.0ms의 2단분사 때와 비교해도 분사간의 지연시간 및 총 분사량은 동등하며, 전후의 분사비율이 역전된 것 뿐으로 D75-25-1.0 *ms* 때의 분사가 캐비티 내로의 분무 증기의 분산이 넓고 균일하여 그 차는 확실하게 나타난다. 이것으로부터 분무의 분산이라는 점에서 2단분사에서의 전후의 분사량에는 최적의 비율이 존재하며, 1단째의 분사량을 많게 한 쪽이 캐비티 내로의 분무증기의 분산이 양호하다고 할 수 있다.

3.4 분무선단부의 발달과정

1단분사 및 각 분사 패턴에서의 분무 사이의 시간 간격을 변화시켰을 때, 캐비티 하부에서의 분무의 성장 과정을 Fig.10에 나타낸다. 곡선은 1단째 분사 개시부터 일정 시간이 경과한 후의 분무 선단을 나타내며, 선의 간격이 조밀할수록 분무의 속도가 늦음을 나타낸다. 또, 이것은 1단째 분무와 2단째 분무를 구별하지 않고 있다.

D10-90의 경우, 분무 사이의 시간간격이 0.75ms

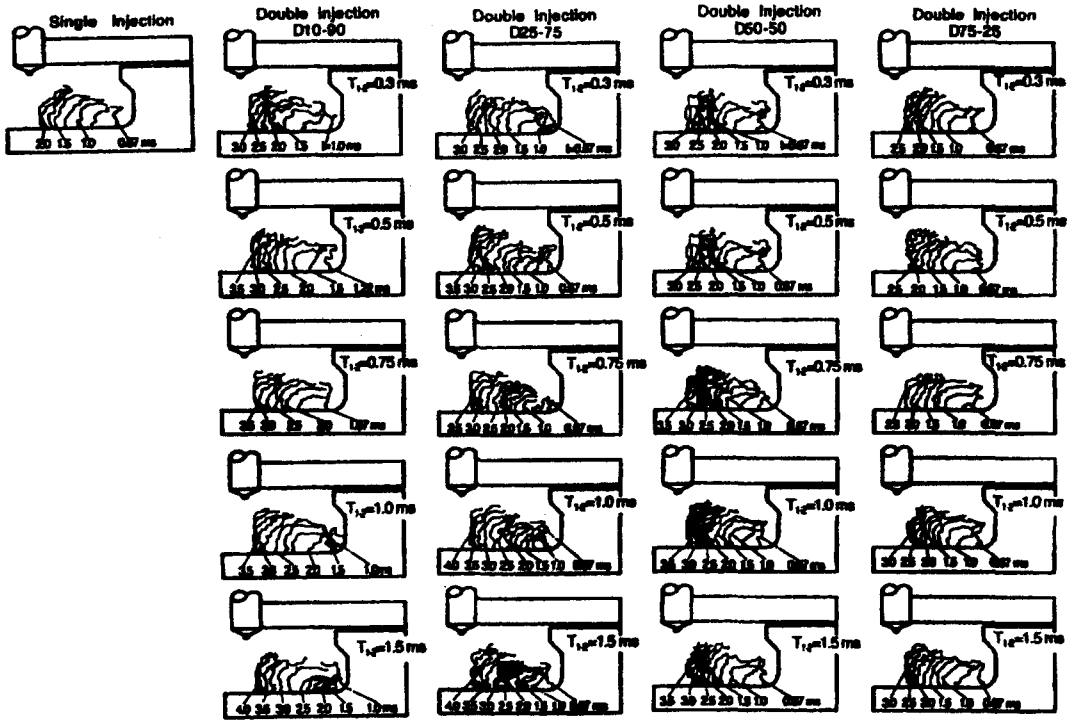


Fig. 10 Progress of Spray Tip Growth

까지는 각 선의 간격은 1단분사와 큰 차는 보이지 않고 있으나, 이것은 90%의 분사량을 가지고 있는 2단째 분무의 선단이라 생각되며, 약 10%의 파이롯트 분사 분무가 후속 분무의 거동에 주는 영향은 거의 없다. 시간 간격 1.0ms에서 분사 후 1.5ms 정도에서 분무가 일단 정체하고 있음을 알 수 있으며, 또 시간 간격 1.5ms의 분사 후 2.0ms에서도 같은 현상이 보여진다. 이것은 분사량 10%라는 적은 양으로 분무의 추진력이 작기 때문에 성장 도중에 그 속도를 잃어버린 1단째 분무의 선단이라 생각된다. 그 후, 또다시 성장이 보여지는 것은 2단째 분무가 이것을 추월하여 성장했기 때문이다. 그러나 전체적인 분무의 성장 속도는 1단분사에 비해 늦은 것을 알 수 있다. 이것은 2단분사에 의해 증발 분무 내로의 공기도입이 촉진되어 분무의 운동량을 잃어버린 것이라 생각된다

D25-75의 분사패턴에서 시간 간격이 0.75ms이상의 경우, 분사개시 후 2.0ms 정도에서 D10-90과 같이 1단째 분무의 정체가 보여지며, 그 후 2단째 분무가 이것을 추월하여 성장하고 있다. 또, 시간간격이 짧은 경우에는 1단째 분무가 정체하기 전에 2단째 분무가 이것을 추월하여 성장하기 때문에 분무 선단부의 정체는 관찰되지 않는다. 그러나 이 경우에도 1단분사와 비교하면 캐비티 아래 부분에서의 분무 선단의 성장 속도는 전체적으로 늦음을 알 수 있다.

D50-50에서는 분무가 어느 정도 성장한 후에 1단째 분무의 정체가 보여지나, 그 후 이를 추월한 2단째 분무의 성장은 D25-75에 비해 약간 늦게 진행되고 있다.

D75-25의 경우는 앞의 분사 패턴에서 나타난 일시 정체와 추월 후 재차 성장하는 모양이 보이지 않는다. 이것은 1단째 분사량이 2단째의 분사량에 비해 꽤 많아 분무의 운동량이 크기 때문이라 생각된다.

이상의 결과에서 고온 고압 분위기 중의 2단 분사는 증발된 분무 내로 공기도입이 촉진되고 있으며, 또 2단분사에서 선행하는 분무의 분사량이 적을 경우, 후속 분무가 이것을 추월하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

정용연소기 내의 고온 고압 분위기 중에 2단 분사를 하여 연료 증기의 분산과정을 사진을 통해 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 2단분사의 경우, 1단분사에 비해 증발된 분무 내로의 공기 도입이 촉진되어 분무 선단의 성장속도가 느리다. 또, 2단분사에서 선행하는 분무의 분사량이 적을 경우, 후속 하는 분무가 이를 추월한다.

2) 1단째 분사의 분무량이 10%정도의 소량일 경우, 캐비티 내부로의 증기의 확산에는 기여하지 않는다.

3) 캐비티 내로 분무의 분산이라는 점에서, 2단분사에서의 전후의 분사량에는 최적의 비율이 존재하며, 1단째의 분사량을 많게 한 쪽이 분무 증기의 분산이 양호하다.

참고문헌

1. T.C.Tow, D.A.Pierpont and R.D.Reitz, "Reducing Particulate and NOx Emissions by Using Multiple Injections in a Heavy Duty D.I. Diesel Engine", SAE Trans. Vol.103, No.940897, 1994

2. D.A.Nehmer and R.D.Reitz, "Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NOx Emissions", SAE Trans. Vol.103, No.940668, 1994

3. 天谷, 江原, 新井, "分割噴射によるディーゼル噴霧の擧動", 第12回内燃機關シンポジウム講演論文集, No.9536665, pp.25-30, 1995

4. 吉津, "ディーゼルの過渡的制御目的としたインゼクタに關する硏究", 日本機械學會論文集(B編), Vol.60, No.572, pp.1493-1499, 1994

5. 齋藤, 河村, 渡部, 高橋, 都築, "二段噴射によるディーゼル噴霧內部の流動解析", 日本機械學會論文集(B編), Vol.59, No.566, p.356, 1993