

가솔린엔진의 연료 미립화 향상을 위한 공급연료 가열에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Fuel Heating for Enhancing Fuel Atomization

윤 팔 주*, 박 승 범**, 선우명호***, 천 동 필****
Paljoo Yoon, Seungbum Park, Myoungho Sunwoo, Dongpil Cheon

ABSTRACT

Poor fuel vaporization in gasoline engines causes the problem of HC emission during the cold start and warm-up period. This paper presents a strategy to improve fuel atomization during the warm-up phase. In this experiment, the heated fuel-rail system is constructed to investigate the effects of fuel heating on the average size of fuel droplets. The fuel atomization effects are examined by measuring Sauter Mean Diameter (SMD) of the fuel droplets from the three different types (two-hole, pintle, and six-hole) of injectors based upon a returnless heated fuel-rail system. The results show that the six-hole type injector is the most sensitive to fuel heating in terms of SMD among three different types of injectors.

주요기술용어 : Heated fuel-rail system(가열식 연료공급장치), Returnless type fuel-rail(비회귀형 연료공급장치), Fuel atomization(연료미립화), Sauter mean diameter (평균분무지름)

Nomenclature

A_i : internal area of fuel-rail at i -th node
 A_o : external area of fuel-rail at i -th node
 $C_{FUEL,i}$: heat capacity of fuel at i -th node
 C_{TANK} : heat capacity of fuel tank
 $C_{WALL,i}$: heat capacity of fuel-rail at i -th

node
 d_i : diameter of droplet in section i
 h_{AIR} : free convection heat transfer coefficient of air
 h_{FUEL} : convection heat transfer coefficient of fuel
 K_{WALL} : conductivity of fuel-rail
 $L_{RAIL,i}$: length of fuel-rail at i -th node
 \dot{m}_i : mass flow rate at i -th node
 \dot{m}_{INJECT} : injection flow rate at i -th node
 n_i : number of droplet in section i

* 회원, (주)만도 기술연구소

** 회원, 한양대학교 대학원

*** 회원, 한양대학교 자동차공학과

**** 회원, 현대 오토넷

- $Q_{COND,i}$: heat transfer from heater to fuel-rail at i-th node
- $Q_{CONV,i}$: heat transfer from fuel-rail to fuel at i-th node
- $Q_{FLOW,IN}$: heat transfer from (i-1) th node
- $Q_{FLOW,OUT}$: heat transfer to (i+1) th node
- Q_{IN} : heat transfer from fuel-rail to fuel tank
- $Q_{INJECT,i}$: fuel injection heat loss
- Q_{LOSS} : overall heat loss of fuel tank and fuel line
- Q_{OUT} : heat transfer from fuel tank
- Q_{PUMP} : volume flow rate of fuel pump
- r_{RAIL} : radius of fuel-rail
- t_{RAIL} : thickness of fuel-rail
- $T_{FUEL,i}$: temperature of fuel at i-th node
- T_{TANK} : temperature of fuel tank
- $T_{WALL,i}$: temperature of fuel-rail at i-th node
- ρ_{FUEL} : density of fuel

1. 서론

자동차에서 배출되는 유해가스 중 미연 가스(Unburned hydro-carbon)는 차량의 전체 운행 기간중 시동시, 특히 냉시동시에 가장 많이 배출된다. 따라서 효과적인 HC(hydro-carbon)저감 기술 개발을 위해서는 냉시동시에 HC를 저감시키는 기술 개발이 필수적으로 요구된다. 냉시동시에는 연료 기화가 잘 이루어지지 않고 벽류가 많이 형성되어 실린더 안으로 기화된 연료의 유입이 충분히 이루어지지 않는다.¹⁾ 따라서, 현재 일반적인 엔진은 시동시 충분히 많은 연료를 공급함으로써 이 문제를 해결하고 있으나, 초기에 형성된 벽류가 천천히 실린더로 유입되면서 정확한 공연비 제어가 어려워지고 이로 인하여 많은 양의 HC가 배출된다.^{2,3)} 가솔린기관에서는 혼합기가 농후하거나 희박하게 되면 HC나 다른 종류의 유해 배기물질을 배출하게 된다.^{4,5)} 이 문제

점을 극복하기 위해서는 냉시동시에도 연료의 기화가 잘 이루어지게 할 수 있는 연료 공급 시스템의 개발이 요구되고 있다. 또한 미립화된 분사 연료는 흡입공기에 실려 곧바로 실린더에 유입될 수 있으므로 연료막 형성 비율을 감소시키고 엔진의 과도(transient)운전 상태에서 공연비 제어 성능을 향상시킬 수 있다.

엔진 시동초기의 HC를 저감시키기 위한 방법으로는 공기 보조식 인젝터를 사용하는 방법, 흡기포트나 엔진블럭을 가열하는 방법이 제시되었으나 엔진구조를 복잡하게 하는 문제가 있다. 또한 가열된 충돌판(impingement plate)에 연료를 분사하는 방법도 연구되었으나 흡기유동을 방해하고, 분사연료의 정밀한 조준(targeting)이 어려워지며 충돌판에 퇴적물이 부착되는 등의 문제가 있어 적용되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 분사되는 연료를 직접 가열하는 방식이 효과적일 것으로 예상된다. 이 논문에서는 연료의 기화를 촉진하여 연료 입경을 감소시키기 위한 방법으로 연료공급관(fuel-rail) 내부의 연료를 가열하는 방법에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험은 회귀형(return type)의 연료공급 시스템과 비회귀형(returnless type)의 연료공급 시스템에 적용한 경우에 대하여 연료 가열실험과 연료 입경 측정실험으로 나누어 수행되었다.

2. 회귀형 연료공급시스템

2.1 회귀형 연료공급 시스템

Fig. 1은 회귀형 연료공급 시스템에 대하여 연료 가열실험을 하기 위한 실험장치의 개략도이다. 이 연구에서는 직렬 4기통 1.8L엔진의

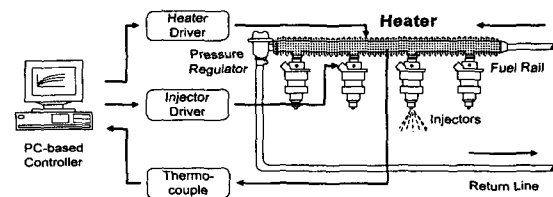


Fig. 1 A return type heated fuel-rail system

연료 공급시스템을 사용하였으며, 연료공급장치, 연료가열장치, 온도측정장치 및 연료온도제어기로 구성된다.

연료공급장치는 연료탱크, 연료펌프, 연료공급관과 인젝터로 구성되며, 연료가열장치는 히터와 히터 구동장치로 구성된다. 온도측정장치는 열전대(thermocouple)와 열전대 신호 증폭기로 구성되며 연료온도 제어기로는 개인용 컴퓨터를 이용하였다. 이 실험에서는 목표 연료온도를 40℃로 설정하였다. 히터는 발열선(Ni-Cr)을 연료공급관 외부에 장착하였으며, 발열량을 충분히 하기 위하여 교류전원을 이용하는 히터를 사용하였으며, 이 히터의 최대 소비전력은 900W이다.

2.2 회귀형 연료가열 시스템에 대한 열적 모델링 및 분석

실험에 앞서 회귀형의 연료공급 시스템의 열적 모델을 구성하고 시뮬레이션을 수행하였다. 회귀형 연료가열 시스템의 열적 모델은 Fig. 2와 같이 전기적 시스템으로 유사 시킬 수 있다. 이것을 이용하여 히터에서 발생된 열이 연료공급관을 통하여 내부의 연료를 가열하는 것을 모델링하였으며, 외부에 감은 히터로부터 대기 중으로의 열 손실도 고려하였다. 히터 온도 자체의 시정수는 연료온도에 비해 매우 작기 때문에 히터 내부의 온도변화는 무시하였으며 히터는 일정한 열을 발생하는 것으로 가정하였다. 연료공급관을 길이방향 4부분으로 나누어, 각 부분을

집중변수(lumped parameter) 시스템으로 가정하였으며, 연료공급관 내부의 압력 변동에 따른 유량변화는 없다고 가정하였다.

회귀형 연료공급 시스템의 열적 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다. 여기서 i 는 네 부분으로 나누어진 연료공급관의 각 부분을 나타내는 인덱스이다. 열전달은 온도차이와 열저항으로부터 구할 수 있으며 각각의 열저항은 식(1), (2), (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{COND,i} = \frac{\ln[(r_{RAIL} + t_{RAIL})/r_{RAIL}]}{2\pi K_{WALL} L_{RAIL,i}} \quad (1)$$

$$R_{CONV,i} = \frac{1}{h_{FUEL} A_i} \quad (2)$$

$$R_{AMB,i} = \frac{1}{h_{AIR} A_o} \quad (3)$$

2.2.1 각 부분의 연속방정식

네 부분으로 나누어진 연료공급관에서의 연료 질량유량은 식(4)를 이용하여 구할 수 있으며, 첫 번째 부분의 연료 질량유량은 식(5)와 같이 연료 펌프의 유량으로부터 결정된다.

$$\dot{m}_i = \dot{m}_{i-1} - \dot{m}_{INJECT} \quad (4)$$

$$\dot{m}_1 = \rho_{FUEL} Q_{PUMP} \quad (5)$$

2.2.2 연료공급관의 에너지 평형 방정식

외부에 감은 히터로부터 연료공급관으로의 전도 열전달과 연료공급관으로부터 연료로의 대류 열전달을 고려하여 연료공급관의 에너지 평형방정식을 구할 수 있으며, 이 때 에너지 평형방정식은 식(6)과 같이 표현된다. 열전달은 온도차이와 열저항으로부터 구할 수 있으며, 여기서 전도열전달은 히터의 발열량과 대기로의 열손실을 고려하여 계산되어 진다.

$$C_{WALL,i} \frac{dT_{WALL,i}}{dt} = Q_{COND,i} - Q_{CONV,i} \quad (6)$$

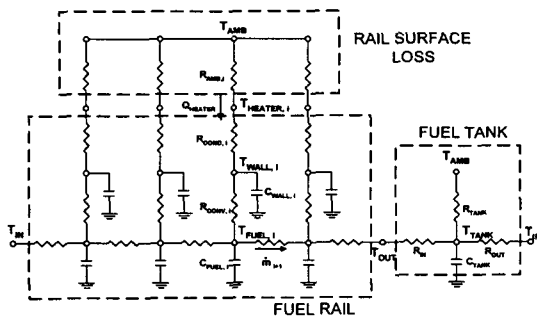


Fig. 2 Electrical analogy of heated fuel-rail system

2.2.3 연료의 에너지 평형 방정식

각 부분의 연료공급관내의 연료에 대하여 에너지 평형방정식을 구하면 식(7)과 같다. 연료공급관으로부터 대류열전달, 연료 질량유량에 의한 열전달, 그리고 연료분사에 의한 열손실이 고려되었다.

$$C_{FUEL,i} \frac{dT_{FUEL,i}}{dt} = Q_{CONV,i} + Q_{FLOW,IN} - Q_{FLOW,OUT} - Q_{INJECT,i} \quad (7)$$

2.2.4 연료탱크의 에너지 평형 방정식

연료 탱크의 에너지 평형방정식을 구하면 식(8)과 같다. 연료 질량유량에 의한 열전달, 그리고 대기중으로의 열손실이 고려되었다.

$$C_{TANK} \frac{dT_{TANK}}{dt} = Q_{IN} - Q_{OUT} - Q_{LOSS} \quad (8)$$

Fig. 2의 모델에 대하여 공급열량을 히터의 최대 발열량으로 상정한 경우의 시뮬레이션 결과, Fig. 3에서와 같이 목표치로 설정한 40℃ 까지 연료를 가열하는데 350초 정도의 시간이 소요된다. 일반적인 열적 시스템은 시간지연을 갖는 1차 계이므로 어느 정도의 시간지연 이후에는 일정 온도를 유지하는 지수 함수적 특성을 보인다. 그러나, Fig. 3의 연료온도는 10분이 지나도 일정한 온도를 유지하지 못하는데, 이는 가열된 연료가 연료탱크로 다시 유입되어 연료탱크 전체의 연료가 시간이 지남에 따라 가열되면서 전체 시스템의 시정수가 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

2.3 회귀형 시스템 연료가열실험

히터의 발열량을 조절하기 위하여 펄스폭 변조(PWM)방식의 신호를 이용하였다. 히터에 가해지는 전류조절 신호의 duty가 90%일 경우 대기

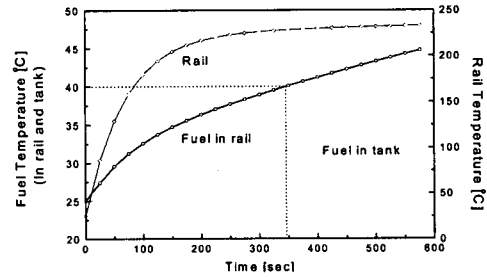


Fig. 3 Rail and fuel temperature simulation results for kerosine

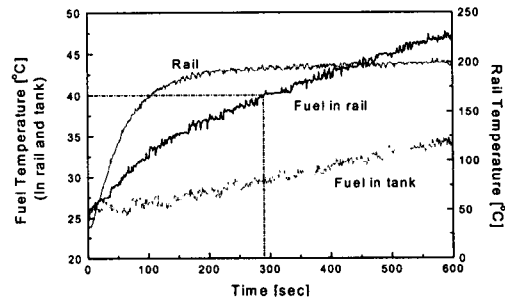


Fig. 4 Rail and fuel temperature experimental results for kerosine

중에서 히터 표면의 온도가 약 400℃ 이상으로 상승하였다. 이때 휘발성이 큰 가솔린을 사용할 경우 유출에 의한 화재의 위험을 방지하기 위하여 열적 물성치는 가솔린과 유사하나 휘발성이 낮은 등유를 사용하여 기초 가열실험을 하였다.

Fig. 4는 회귀형 연료공급 시스템으로 실제 실험을 한 결과를 나타내고 있으며 앞에서 제시한 시뮬레이션의 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 외기온 25℃, 엔진회전수 1000rpm, 연료분사시간 5ms, 히터 전류조절신호 duty 90%(약 800W)인 경우, 목표온도인 40℃에 도달하는데 약 5분이 소요되었다. 이러한 성능으로는 초기 시동시에 연료의 미립화를 기대할 수 없으므로 현재 대부분의 가솔린 엔진에 적용되고 있는 회귀형 연료공급 시스템으로는 효과적인 연료가열이 어려움을 알 수 있다.

3. 비회귀형 연료공급시스템

회귀형 연료공급 시스템은 대부분의 승용차에 사용되며, 새로운 방식인 비회귀형 연료공급 시스템은 여러 자동차 회사들에 의해 연구가 진행되고 있고, 일부 적용되고 있다. 비회귀형 방식 연료공급시스템에 연료 가열장치를 부착할 경우 가열된 연료의 연료탱크로의 손실이 없으므로 연료 가열에 더욱 효과적이다. 또한 비회귀형 연료공급시스템은 구조상 연료공급관 내부에 히터를 장착할 수 있으므로 대기 중으로의 열손실도 최소화 할 수 있을 것이다. 따라서 비회귀형 연료공급시스템에 대하여 가열 장치를 구성하고 실험을 통하여 회귀형 방식의 연료공급시스템과 비교하였다. 가열된 연료의 미립화특성을 파악하기 위하여 분사연료의 입경측정 실험을 하였으며 세개의 다른 종류의 인젝터에 대하여도 상대 비교 실험하였다.

3.1 비회귀형 연료공급시스템

Fig. 5는 이 실험을 위하여 제작한 비회귀형 연료공급 시스템의 개략도이다. 양산 차량에 쓰이는 압력 레귤레이터를 사용하고 연료의 유로를 변경함으로써 비회귀형 연료공급시스템을 구현하였다. 이는 실제차량에 적용되는 비회귀형 연료공급시스템과 구조적으로 차이가 있을 수 있으나, 가열된 연료가 탱크로 돌아가지 않으므로 비회귀형 연료공급시스템의 연료가열 효과를 확인하는 데는 충분할 것이다. 효율적인 열전달을 위해서 연료와 직접 접촉하도록 히터를 설계 제작하여 연료공급관 내부에 설치하였으며 히터의 최대 소비전력은 720W이다. Fig. 6은 연료공급관 내부에 장착된 히터의 사진이다.

Fig. 7은 개인용 컴퓨터를 이용한 연료온도 제어시스템의 실행화면이다. 그림에서 화면의 왼쪽 창은 인젝터의 연료분사 제어를 위한 것이고 오른쪽 창은 A/D 컨버터를 이용하여 열전대로 측정된 온도를 실시간으로 보여주는 화면이다.

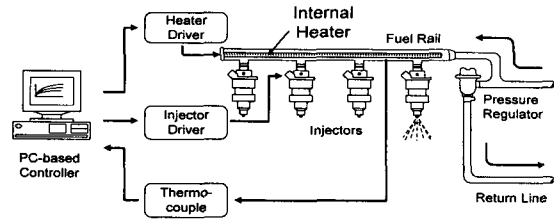


Fig. 5 A returnless type heated fuel-rail system

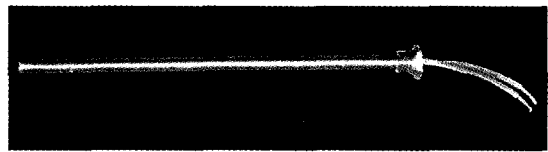


Fig. 6 Heater installed in fuel-rail

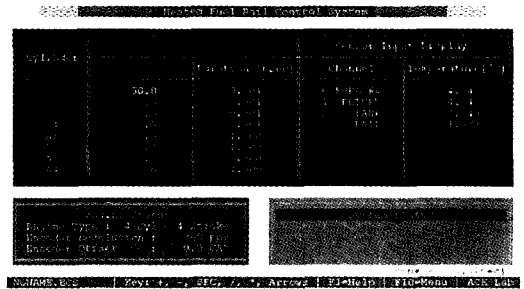


Fig. 7 Fuel temperature controller for heated fuel-rail system

이 연료 온도 제어 시스템은 연료 분사 신호와 히터 제어신호를 발생시켜 연료온도를 제어하게 된다.

3.2 비회귀형 연료공급 시스템의

연료온도제어

비회귀형 연료공급시스템의 연료온도를 제어하기 위하여 비례-적분 제어기(PI controller)와 규칙기반(rule-based) 제어를 설계하였으며, 두 가지 제어기의 제어성능을 비교, 평가하였다. Fig. 8은 비례-적분 제어기를 이용하여 연료온도 제어를 수행한 결과이며, 연료온도와 히터 구동 신호의 듀티 비(duty ratio)를 나타내고 있다.

연료온도가 38초 지난 후에 40℃에 도달하며, 약 5분이 경과한 후 40℃로 안정적으로 제어되고 있다. 그러나, 최대 오버슈트(overshoot)가 30℃로 매우 크게 나타나고 있다. 이러한 오버슈트는 전체 시스템의 비선형성을 고려하지 않는 선형제어기를 사용했기 때문이다. 이처럼 비례-적분 제어기로는 만족할 만한 성능을 얻을 수 없음을 알 수 있다.

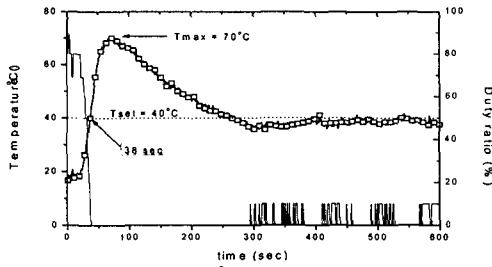


Fig. 8 Step response of PI controller

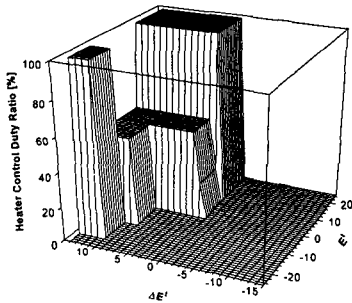


Fig. 9 Fuel temperature control map

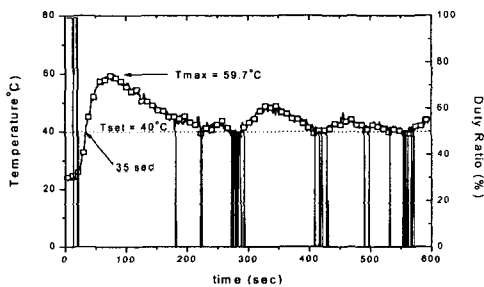


Fig. 10 Step response of rule-based controller

연료온도 제어성능을 향상시키기 위하여 규칙 기반 제어를 설계하여 적용하였으며 이 제어기는 연료온도 제어오차와 오차변화량을 기준으로 히터의 발열량을 Fig. 9와 같이 조절하게 된다. 규칙기반 제어기의 경우 실험결과는 Fig. 10과 같으며, 비례-적분 제어기에 비하여 오버슈트는 약 10℃ 감소하였고, 안정화 시간(settling time)도 약 150초 감소하였으나, 100, 50, 및 20%의 듀티 비만을 사용하였으므로 정상상태에서 전형적인 온-오프 제어기의 형태로 동작함을 알 수 있다. 그러나 이러한 정상상태에서의 연료온도 변동은 퍼지 제어기와 같이 정밀한 규칙조절 기법을 적용하면 충분히 감소시킬 수 있을 것이다.

기존의 인젝터의 팁 부분을 가열하는 방식의 경우 약 33℃까지 가열하는 데 150초가 소요되었으나⁽⁶⁾, 비회귀형 연료공급시스템과 내부히터를 이용함으로써 연료온도의 응답성을 향상시킬 수 있었으며, 이는 시동초기의 HC 저감을 기대할 수 있는 수준의 응답성이며 향후 실차 실험을 통해 그 효과를 검증할 수 있을 것이다.

4. 가열된 연료의 입경측정실험

4.1 연료입경 측정 장치

연료의 가열이 연료미립화에 미치는 영향을 알아보기 위해서 연료의 입경측정 실험을 수행하였으며 연료의 미립화 정도를 판단하는 지수로서 Sauter mean diameter(SMD)를 채택하였다. SMD는 식(9)와 같이 액적군의 총 표면적에 대한 총 체적의 비로 표시되며, 분사된 액체가 주위 기체와 접촉하여 얼마나 잘 미립화 되었는가를 보여주는 척도로, 증발이나 연소현상에서 매우 중요한 의미를 갖는다.

$$SMD = \frac{\sum_i n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^2} \quad (9)$$

SMD를 계측하기 위해서 CCD 카메라를 이용하여 새도그래프법을 이용한 SMD 계측 시스템

을 구성하였다.⁷⁾ 이 시스템은 개인용 컴퓨터, 광원, CCD 카메라, 모니터, 그리고 인젝터 구동장치로 구성되며 그 개략도는 Fig. 11과 같다.

연료의 온도 상승이 실제 분사되는 연료 미립화에 어느 정도 영향을 미치는가와 인젝터의 종류에 따른 그 효과의 차이를 알아보기 위해서 2공형(two-hole type), 핀틀형(pintle type), 6공형(six-hole type)의 3종류 인젝터에 대하여 입경 측정·비교 실험을 수행하였다. 입경 측정의 위치는 인젝터의 종류에 따라 Fig. 12과 같이 설정하였다.

4.2 연료입경 측정 실험결과

가열에 따른 연료미립화 효과는 연료 분사패턴과 밀접한 관련이 있으므로 분사패턴이 다른 세가지 종류의 인젝터에 대하여 입경 측정실험을

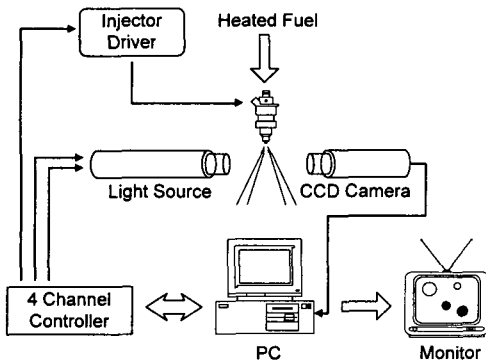


Fig. 11 SMD measurement setup

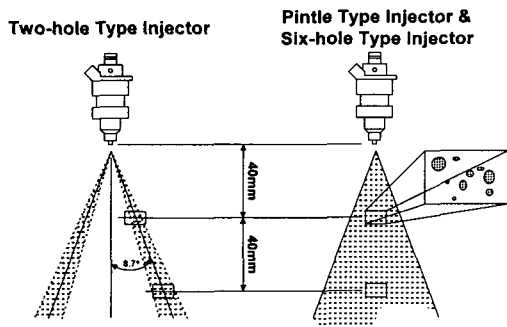


Fig. 12 Measuring points of various injectors

수행하였다. 온도 조건으로는 각각 상온(20°C)과 40°C, 70°C이며, 엔진 운전 조건은 공회전 상태 약 1000rpm, 각 실린더 당 인젝터 구동시간은 5ms로 설정하였다. 각 위치에서 액적 분무군의 중심부가 측정위치를 지나는 순간의 화상을 취득하였다. 화상 취득은 동일 조건에서 50회 실시하였으며, 화상처리 기법을 이용하여 SMD를 계산하였다. Fig. 13은 화상처리 과정의 한 예를 나타낸 그림이다.

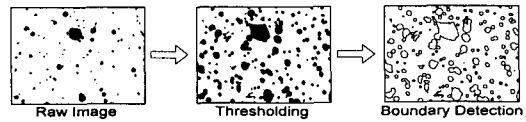


Fig. 13 Example of image processing for droplet size determination

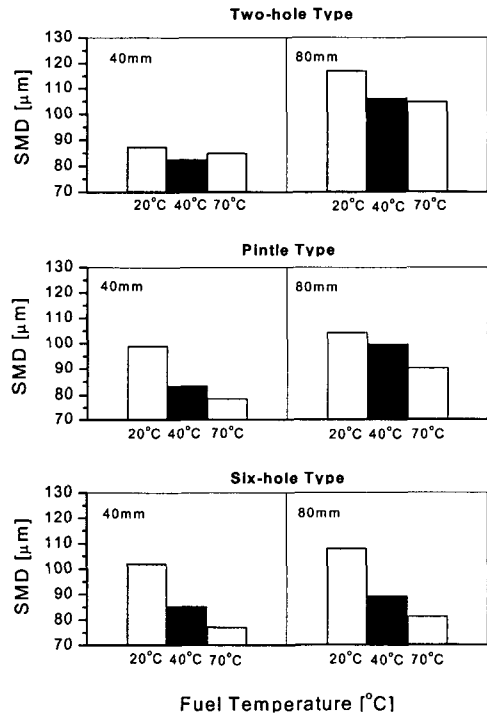


Fig. 14 Measured SMD for various type injectors

Table 1 SMD reduction effect of various conditions

Conditions Injectors	40℃		70℃	
	40mm	80mm	40mm	80mm
Two-hole type	5.7%	9.3%	2.8%	10.5%
Pintle type	15.7%	4.5%	20.6%	13.5%
Six-hole type	16.4%	17.5%	24.3%	24.9%

Fig. 14는 각각 세 종류의 인젝터에 대하여 세 온도조건과 두 측정지점에 대한 액적의 크기별 분포를 나타낸 결과이다. 연료가열에 의한 연료 미립화 효과는 2공형 인젝터의 경우에 가장 작았고 6공형인 경우 가장 크게 나타났다. 6공형 인젝터의 경우 연료 가열에 따른 미립화의 효과가 다른 인젝터에 비하여 클 뿐만 아니라 그 효과가 분무의 아랫부분인 80mm 위치에서도 지속되고 있음을 알 수 있다.

Table 1은 각 측정 위치에서 연료 온도 상승에 대한 미립화 향상의 정도를 초기온도 20℃일 때를 기준으로 하여 백분율로 나타낸 것이다. 인젝터의 종류에 따른 미립화의 성능은 6공형, 핀틀형, 2공형 인젝터의 순서로 우수한 것으로 관찰되었다. 따라서, 연료의 미립화 향상을 위해서는 연료온도 뿐만 아니라 인젝터의 종류에 따른 분사패턴의 영향도 고려되어야 함을 알 수 있다.

5. 결론

이 논문에서는 연료 미립화 향상을 위한 연료 가열실험 및 분사패턴에 따라 연료가열이 미립화에 미치는 효과에 대한 연구를 수행하였으며, 이 연구에서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 회귀형 연료공급시스템의 열적 모델을 구현하였으며, 이를 이용한 시뮬레이션은 실제 실험 결과와 매우 유사한 경향을 나타내고 있다.
- 2) 회귀형 연료공급관을 가열하는 방법은 목표 온도인 40℃까지 가열하는데 300초 정도의 시간이 소요되어 비효율적임을 알 수 있다. 따라서

연료공급과 가열을 위해서는 비회귀형 연료공급 시스템 적용이 필수적이며, 이 경우에는 35초 정도의 시간이 소요되었다.

3) 비선형성이 강한 가열식 연료공급 시스템의 온도제어에는 일반적으로 쓰이는 PI 제어기 대신 규칙기반 제어기를 사용함으로써 오버슈트가 34% 감소하였다.

4) 연료 온도가 상승할수록 연료 입경이 최소 3%에서 최대 25%까지 감소하였으며 그 효과는 6공형 인젝터의 경우에 가장 크게 나타났으며, 미립화 효과도 오랫동안 지속되었다.

5) 연료가열방식의 적용을 위해서는 연료분사 패턴과 연료가열에 따른 미립화 향상효과의 상호 관계에 대한 연구도 병행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- 1) M. J. Sampson & J. B. Heywood, "Analysis of Fuel Behavior in the SI Engine Start-Up Process," SAE 950678, 1995.
- 2) J. W. Fox, K. D. Min, W. K. Cheng, J. B. Heywood, "Mixture Preparation in a SI Engine with Port Fuel Injection During Starting and Warm-Up," SAE 922170, 1992.
- 3) J. Yang, E. W. Kaiser, W. O. Siegl, "Effects of Port-Injection Timing and Fuel Droplet Size on Total and Speciated Exhaust HC Emissions," SAE 930711, 1993.
- 4) K. Takeda, T. Yaegashi, K. Sekiguchi, K. Saito, N. Imatake, "Mixture Preparation and HC Emissions of a 4-Valve Engine with Port Fuel Injection During Cold Starting and Warm-up," SAE 955074, 1995.
- 5) R. J. Boyle and D. J. Boam, I. C. Finlay, "Cold Start Performance of an Automotive

- Engine Using Prevaporized Gasoline," SAE 930710, 1993.
- 6) J. L. Chen and Grant Chen, "Slow Heating Process of a Heated Pintle-Type Gasoline Fuel Injector," SAE 950068, "Gasoline Fuel Injector," SAE 950068, 1995.
- 7) W. - J. Yang, Handbook of Flow Visualization, Hemisphere publishing Co., New York, pp.189-193, 1989.