

## 액상 LPG 직접 분사식 기관 개발을 위한 인젝터 내 기포발생현상의 원인 규명에 관한 기초연구

노기철\* · 이종태

성균관대학교 기계공학부

### A Fundamental Study on the Investigation of Bubbling Phenomenon in the Injector for the Development the LPDi Engine

Kichol Noh\* · Jongtai Lee

Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

(Received 5 December 2005 / Accepted 9 June 2006)

**Abstract** : One of the most important subjects to develop a LPDi engine is to suppress the bubble generated inside the liquid LPG direct injector. For the purpose of this, the analogy visualization injector to visualize the generation and behaviors of bubble is manufactured, and the bubbling phenomenon and behaviors of bubble are visualized and investigated according to the change of the temperature around an injector wall, fuel pressure and a needle configuration. As results, it was found that the bubble inside the injector is generated around an injector hole and after rising by buoyancy it disappears around the top of a nozzle. The number of bubbles generated is little changed regardless of the lapse of time but it remarkably increases as the temperature around the injector increases. Also, it was known that as the sac volume in LPDi injector decreases the generation of bubble is more active and the rising velocity of bubble generated is increased.

**Key words** : LPDi(액상 LPG 직접 분사식), Direct injection(직접 분사), Bubble visualization(기포 가시화), Analogue visualization injector(가시화용 상사 인젝터), Bubbling(기포발생), Vapor lock(증기폐쇄)

#### Nomenclature

- A : area, m<sup>2</sup>
- C : specific heat, kJ/kg · K
- k : thermal conductivity, W/m · K
- k<sub>b</sub> : Boltzmann constant
- L : thickness of visualization window, m
- m : mass, kg
- N : number
- Q : quantity of heat transfer, W
- re : radius of bubble, m

$\sigma$  : surface tension, N/m

#### 1. 서론

LPG 연료는 청정한 가스연료로서 상온 및 저압에서 쉽게 액상으로 저장 가능하며 기존의 가솔린 기관의 관련 기술을 거의 그대로 적용할 수 있는 장점이 있다. 이러한 LPG를 실린더 내에 액상으로 직접 분사하는 경우 흡입 공기량 및 공연비의 정밀 제어 효과와 연료의 기화 잠열에 의한 연소실의 냉각 효과 등으로 출력 및 연비의 향상과 유해 배출 가스의 저감을 도모할 수 있다.<sup>1-3)</sup> 이와 같이, 액상

\*Corresponding author, E-mail: pivboy@dreamwiz.com

LPG 직접 분사식(LPDi)은 기화기 방식 및 흡기관 분사방식<sup>4,6)</sup>에 비해 성능 향상 효과가 기대되지만 이를 실현하기 위해서는 해결할 문제점이 많다. 특히, 인젝터 내 기포발생은 vapor lock 현상을 유발하여 연료분사의 불안정을 야기하고 연료 혼합물의 변동, 연소불안 및 시동불량 등의 원인이 되어 효율 저하 및 유해배출가스를 증가시킨다. 따라서 LPDi 기관의 개발을 위해서는 무엇보다도 인젝터 내 기포발생 원인 및 메커니즘이 우선적으로 밝혀져야 한다.

본 연구에서는 가시화용 상사 인젝터의 제작을 통해 인젝터 내 기포발생 및 거동을 가시화하고 해석하여 LPDi 기관의 인젝터 내 기포발생현상 및 그 원인을 규명하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 가시화용 상사 인젝터

Fig. 1은 인젝터 내에서 발생하는 기포거동을 가시화하는 가시화용 상사 인젝터의 개략을 나타낸 것이다.

가시화용 상사 인젝터는 상용 GDI 인젝터를 상사하였고 기포발생현상을 가시화할 수 있는 노즐색 공간의 확보를 위해 7.5배 확대하였다.<sup>7)</sup> 상사 인젝

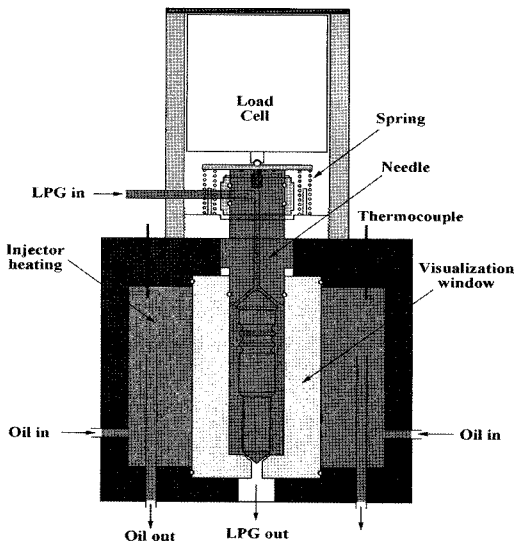


Fig. 1 The schematic diagram of analogue visualization injector

터는 크게 기포거동을 가시화하기 위한 가시화창부, 니들의 개폐 및 단힘 장력을 측정하기 위한 니들 개폐부 그리고 인젝터 주변 온도 변화를 위한 인젝터 가열부로 구성된다.

가시화창은 70×70×130(w×b×ℓ)인 quartz로 제작하였으며 가시화창의 가운데 지름 30mm의 니들 홀과 끝단에 6mm의 분사공이 있다. 인젝터 니들의 재질은 단열효과를 고려하여 테프론을 사용하였다. 액상 LPG의 공급은 탑 피이드(top feed)방식이고 니들상단에 LPG 누설 방지용 오링을 설치하였다.

니들의 개폐는 로드셀 상단에 설치한 개폐장치로 이루어진다. 로드셀은 니들의 단힘 장력을 측정하여 하중초과에 의한 가시화창의 파손을 방지하기 위하여 설치하였다.

인젝터부의 가열은 기관의 벽면 평균 온도<sup>8)</sup>를 고려하여 온도구배를 최소화할 수 있는 오일가열방식을 채택하였다. 이를 위해 가시화창 주변은 고온의 오일이 유출입하는 사각형의 인젝터 가열부로 둘러싸여 있다. 오일의 온도는 가열부의 입구와 출구에 열전대를 삽입하여 측정하였다. 또한 오일 출구의 높이를 조절하여 인젝터로의 열전달 면적을 변화시킬 수 있게 하였다. 사용된 오일은 600K 이상에서도 착화 되지 않는 열매체유이다.

### 2.2 실험장치

실험장치는 전술한 가시화용 상사 인젝터와 액상 LPG 공급부, 가열 및 오일공급부, 가시화 장치부, 데이터 취득 및 제어부로 구성되며, 그 실물사진을 Fig. 2에 나타낸다.

액상 LPG 연료는 공압 및 유압 실린더로 공급 압력을 증압시켜 상사 인젝터로 공급된다. 연료의 공급압력은 공압 실린더의 공압조절로 제어하였다. 공압 실린더와 유압 실린더의 단면적 비는 약 7:1로 연료의 공급압력을 최대 5MPa정도까지 증압할 수 있다. 연료 공급관은 관내에서의 기포발생을 최소화하고자 3중 단열관을 사용하였다. 또한 공급관 상단에 기포제거용 벨브를 장착하여 발생된 기포를 제거할 수 있게 하였다. 상사 인젝터로부터 분사된 연료는 덕트와 블로워에 의해 방출된다.

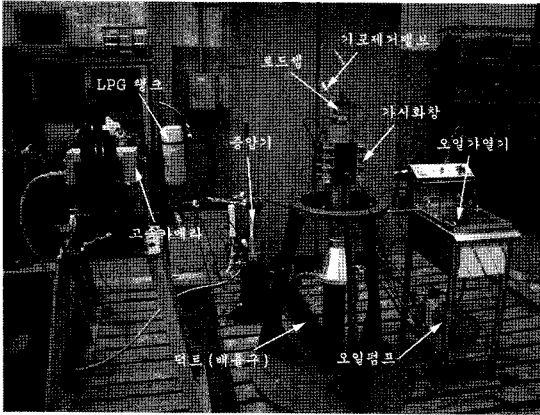


Fig. 2 Photograph of experimental apparatus

인젝터 가열부에 공급되는 오일의 가열에는 최대 573K까지 가열할 수 있는 전기히터를 사용하였다. 가열된 오일은 오일펌프를 통해 가열부로 공급되고 가열부의 출구를 거쳐 오일탱크로 순환된다.

인젝터 내에 발생된 기포의 가시화에는 고속카메라(HG2000, Kodak)를 사용하였고 광원은 할로겐 램프(2kW×2)를 사용하였다.

### 2.3 실험방법

실험은 인젝터 내 기포발생현상 및 원인을 규명하기 위하여 인젝터 내 기포거동을 가시화하고 해석하는 것이다. 인젝터 내 기포발생은 기본적으로 비등현상으로 LPG 연료의 온도 및 압력에 좌우된다. 따라서 실험은 LPG 연료의 온도 및 압력에 영향을 미칠 수 있는 인자인 인젝터 주변 온도, 인젝터 가열부의 열전달 면적 및 니들의 형상 변화 그리고 연료분사 유무 등에 대하여 수행하였다.

인젝터 주변 온도는 상온에서 기포가 발생할 때까지 단계적으로 충분히 증가시켰다.

인젝터로의 열전달 면적은 인젝터 가열부에서 오일출구의 높이조절로 변화시켰다. 이 경우 출구높이는 각각 노즐색 길이의 1/4, 2/4, 3/4 및 4/4이며, 이를 가열면의 길이 비로 정의하였다.

니들의 형상은 상용 GDI 인젝터 형상과 니들 끝단의 형상을 2cm 길게 한 것과 짧게 한 것으로 모두 3가지이며, 실물사진과 그 개략을 Fig. 3에 나타낸다. 이 경우 노즐색의 체적은 상용 GDI 인젝터의 체적에 대비하여 약 106.4% 및 93.6%이다. 그 외의 형

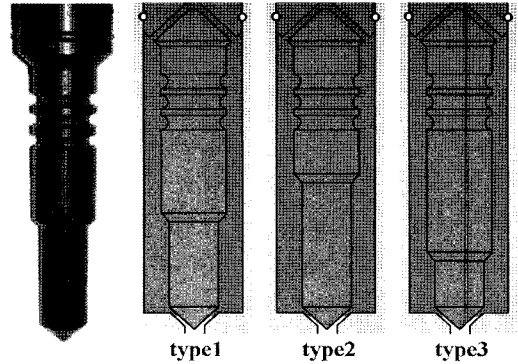


Fig. 3 The schematic diagrams of needle shapes

상은 기존과 동일하게 하였다. 상기 니들의 형상을 각각 type1, type2 및 type3이라 칭한다.

연료분사는 순간적인 압력 강하를 초래함으로 임의의 압력과 온도에서 연료분사 유무에 따른 기포발생을 해석하였다.<sup>9,10)</sup> 연료분사 시의 니들 리프트는 0.3mm이고 상사 확대에 의한 노즐색 공간의 확대를 고려하여 분사시간은 360ms로 하였다.

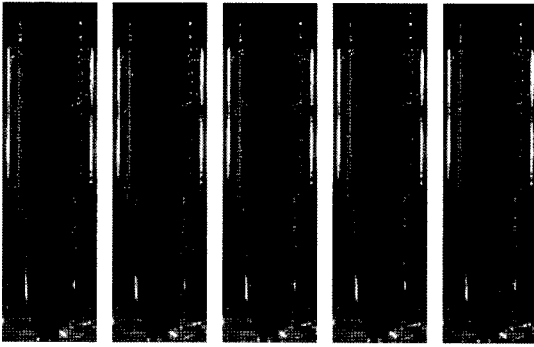
모든 실험에서 연료는 부탄 100%의 자동차용 LPG 연료를 사용하였으며 공급압력은 0.5MPa, 1MPa 및 1.5MPa이다. 인젝터 내 기포의 촬영속도는 30 frames/s이다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 인젝터 주변 온도 변화의 영향

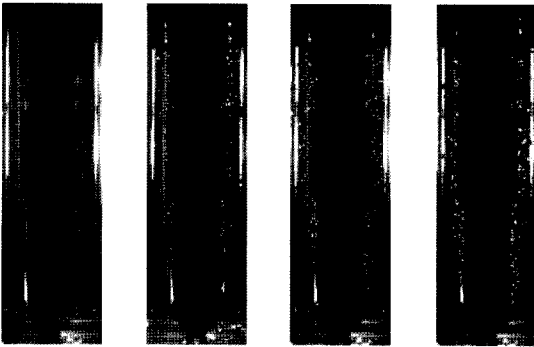
Fig. 4는 인젝터 내에 기포발생 후, 기포의 거동을 시간경과에 따라 나타낸 일례다. 여기서, 인젝터 주변 온도는 348K, 연료의 공급압력은 0.5MPa이고 가시화 시간 간격은 33ms이다. 열전달 면적은 인젝터 가열부 전체이며, 연료분사는 하지 않는 경우이다.

그림에서 보는 바와 같이, 인젝터 내 기포거동은 노즐 끝단 분사공에서 발생하여 부력에 의해 니들의 측면을 따라 위로 상승한 후 노즐 상단에서 소멸되는 경향을 보인다. 이러한 경향은 시간이 경과하여도 그다지 큰 차이를 보이지 않는다. 또한 인젝터 내 잔존하는 기포의 수는 거의 비슷하다. 이는 액상 연료의 비등현상이 기본적으로 연료의 온도와 압력에 좌우되며, 현재의 실험조건이 포화상태로 평형을 이루고 있기 때문으로 판단된다. 그러나 상당기



**Tw = 348 K, Pf = 0.5 MPa**

Fig. 4 Behaviors of bubbles with the lapse of time at Tw=348K, Pf=0.5MPa



**Tw = 345 K   Tw = 348 K   Tw = 351 K   Tw = 353 K**

Fig. 5 Behaviors of bubbles according to temperature around injector wall at Pf=0.5MPa

간 가열이 지속되면 인젝터 내 연료는 과열상태가 되고 인젝터 내의 상단에 기포가 계속 충전되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 인젝터 주변의 온도 증가에 따른 인젝터 내 기포거동을 가시화하여 나타낸 것이다. 여기서, 연료의 공급압력은 0.5MPa이고 무분사인 경우다.

가시화 결과에서 알 수 있듯이 인젝터 내 기포발생은 인젝터 주변 온도가 348K인 부근에서 일어나기 시작하여 주변 온도의 증가에 따라 현저해진다. 이 경향은 식 (1)의 Van't Hoff 평형식에서 기포발생수가 온도에 비례한다는 사실로 이해할 수 있다.

$$n = \frac{N}{\exp\left(\frac{4}{3}\pi r_e^2 \sigma / k_b T\right)} \quad (1)$$

where,  $n$  : bubble number per volume

$N$  : molecule number of liquid per volume

$\sigma$  : surface tension

$r_e$  : radius of bubble

$k_b$  : Boltzmann constant

또한 기포 상승류의 속도 및 폭이 인젝터 주변의 온도 상승에 따른 부력의 증가로 커짐을 확인할 수 있다.

한편, 오일 가열부에서 액상 LPG 연료로의 열전달량은  $Q=kA(T_{Oil}-T_{LPG})/L$ 과 같은 간단한 열전도식으로 표시할 수 있으며 그 값은  $Q=mC\Delta T$ 와 동일하다. 여기서,  $k$ 는 가시화창의 열전도율,  $A$ 는 열전달 면적이며,  $L$ 은 가시화창의 두께이다. 그리고  $m$ 과  $C$ 는 각각 LPG 연료의 질량과 비열이며  $\Delta T$ 는 LPG 연료의 온도 변화량이다. 확대된 상사 인젝터는 연료로의 열전달 면적의 증가 및 노즐색 체적의 증가로 인한 인젝터 내 연료량의 증가로 이어진다. 따라서 상기 관계에서 보듯이, 가시화용 상사 인젝터에서 연료로의 단위질량당 열전달량은 실제 인젝터에서 보다 작을 것으로 판단된다.

Fig. 6은 인젝터 주변 온도 증가에 따른 인젝터 내 발생된 기포 수를 기포발생 시작온도에서의 기포수와 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 연료의 공급압력은 0.5MPa이다.

기포발생 시작온도는 인젝터 내에서 기포가 발생될 때의 인젝터 주변 온도로 정의한다.

기포 수는 기포가 발생되는 영역인 노즐색 바닥

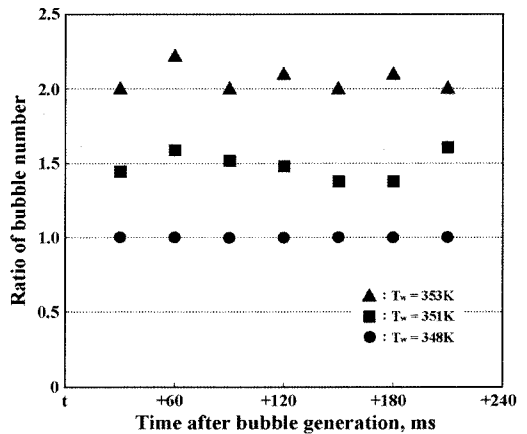


Fig. 6 Ratio of bubble number with the lapse of time after bubble generation at Pf=0.5MPa

에서 40mm 지점까지에 대하여 30회에 걸쳐 가시화한 영상을 이미지 처리하여 앙상블 산술평균으로 구하였다. 기포 수가 증가함에 따라 기포의 중첩이 기포 수의 정량치에 영향을 미치지만 정성적인 경향에는 큰 변화가 없을 것으로 판단된다.

그림에서 보듯이 인젝터 주변 온도가 증가함에 따라 기포발생은 현저히 증가하며 이로부터 인젝터 주변 온도가 인젝터 내 기포발생의 주된 인자 중의 하나임을 확인할 수 있다. 인젝터 주변의 온도가 기포발생 시작온도보다 약 5~6K 정도 증가하면 기포발생은 약 2.1배 정도 더 활발해지는 것을 보였다. 그리고 전술한 바와 같이, 임의의 온도에서 발생된 기포 수는 시간이 경과하여도 거의 일정함을 확인할 수 있다.

### 3.2 열전달 면적 변화의 영향

Fig. 7은 인젝터 가열부 출구의 높이조절로 인젝터로의 열전달 면적을 변화시킨 경우 인젝터 내에 발생되는 기포거동을 가시화한 결과이다. 여기서 연료압력은 0.5MPa이다.

그림에서 보는 바와 같이, 열전달 면적 변화에 따른 기포거동의 정성적인 경향은 전반적으로 유사한 경향이나 인젝터 가열이 국부적으로 이루어질수록 기포발생 초기온도가 다소 높아지고 기포의 발생위치도 위로 약간 올라가는 것을 확인할 수 있다. 이는 열전달 면적의 변화에 따른 국부적인 가열로 열전달량이 감소하고 LPG 연료의 온도구배에 기인하는

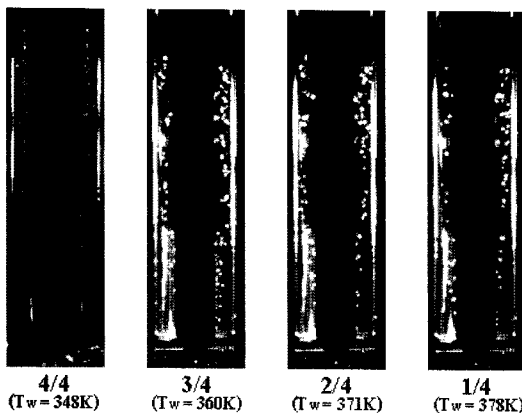


Fig. 7 Behaviors of bubbles according to the change of heat transfer area at Pf=0.5MPa

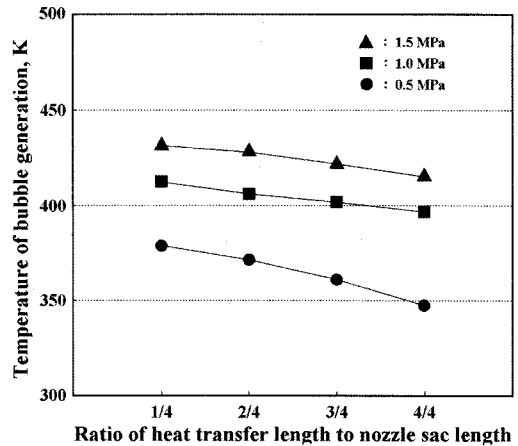


Fig. 8 Temperature of bubble generation according to the change of heat transfer area at Pf=0.5MPa

것으로 판단된다. 한편, 기포발생위치의 상승은 bottom feed 방식의 연료공급 시 증기폐색의 억제에 다소 효과가 있을 것으로 예측된다.

Fig. 8은 인젝터 가열부 출구 높이를 조절하여 열전달 면적을 달리 한 경우, 기포발생 시작온도를 나타낸 것이다.

그림에서 보듯이, 기포발생 시작온도는 열전달 면적이 감소할수록 높아진다. 이것은 전술한 열전도식에서 보듯이 적은 열전달 면적으로 연료의 온도를 비등점까지 상승시키기 위해서 큰 온도편차가 나야 하기 때문이다. 연료압력 0.5MPa에서 열전달 면적을 25%로 감소시켰을 경우 약 8.6%의 기포발생 시작온도의 상승으로 기포발생에 억제효과가 있음을 확인할 수 있다.

또한, 연료압력이 증가할수록 기포발생 시작온도가 현저히 높아져 기포생성이 어려워지며 이로부터 연료의 공급압력 역시 인젝터 내 기포발생에 주요한 원인 인자임을 예측할 수 있다.

한편, 모든 조건에서 기포발생 시작온도가 가솔린 기관의 실린더 헤드부 최고 순간온도인 464K보다 낮음 알 수 있다.<sup>8)</sup> 이는 LPDi 기관에서 기포발생이 문제가 될 수 있음을 의미하는 것이다.

### 3.3 니들의 형상 변화에 따른 영향

Fig. 9는 니들의 형상 변화에 따른 인젝터 내 기포발생현상을 가시화하여 나타낸 것이다. 여기서, 주

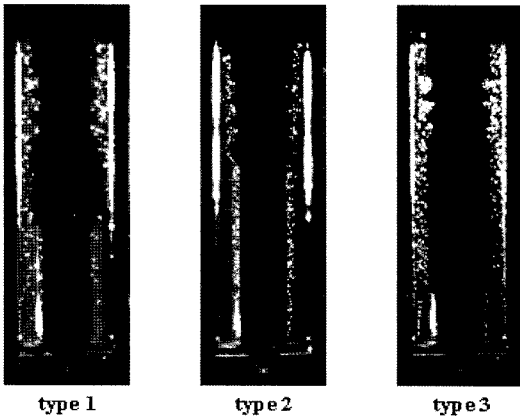


Fig. 9 Behaviors of bubbles according to the shapes of needles at  $T_w=395K$ ,  $P_f=1MPa$

변 온도는 395K이고 연료압력은 1MPa이다.

인젝터 내 기포거동은 세 경우 모두 전술한 바와 같이, 노즐 끝단의 분사공에서 발생하여 위로 상승한 후, 소멸하는 양상을 보인다. 이러한 양상은 시간이 경과하여도 큰 차이를 나타내지 않는다. 그러나 그림에 나타난 바와 같이, 이들의 노즐색 공간이 작을수록 인젝터 내 기포 발생 수가 현저히 증가하며 상승류의 폭도 증가함을 확인할 수 있다. 또한 기포가 노즐 끝단의 분사공 부근뿐만 아니라 노즐색 공간의 임의의 지점에서도 발생하는 모습을 나타낸다. 이는 동일한 열전달량에 대해서도 노즐색의 체적 감소가 상대적인 연료의 열용량 감소로 이어져 LPG 연료의 온도 상승을 초래하기 때문으로 사료된다. 따라서 노즐색 공간이 가장 적은 type3의 경우에 연료의 온도 상승이 가장 클 것으로 판단되며, 이는 기포 발생 수로부터 입증될 수 있다.

Fig. 10은 각각의 니들형상에 대해 인젝터 내에 발생하는 기포 수를 정량적으로 구하여 나타낸 것이다. 여기서, 인젝터 주변 온도는 395K이고 연료압력은 1MPa이다.

인젝터 내 기포 발생 수는 노즐색 공간이 적어질수록 증가하며 type3에서 가장 많은 기포가 생성됨을 확인할 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 기포 수가 연료의 온도에 의존하며 상대적으로 열용량이 가장 적은 type3에서 연료온도가 가장 높는데 기인하는 것이다. Type3의 경우, 기포발생은 type1 및 type2의 경우보다 약 1.7배 및 3.4배 정도 활발하다.

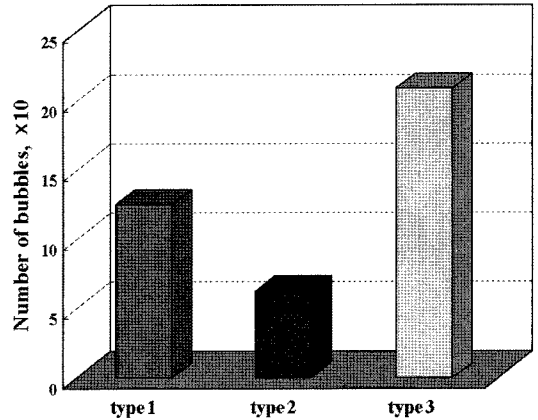


Fig. 10 Number of bubbles according to the shapes of needles at  $T_w=395K$ ,  $P_f=1MPa$

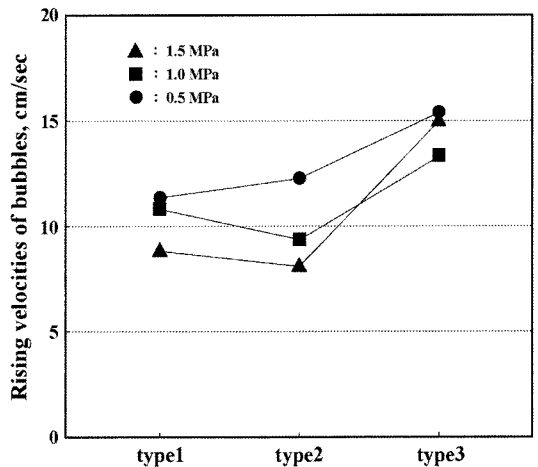


Fig. 11 Rising velocity of bubbles according to the shapes of needles

Fig. 11은 이들의 형상 변화에 따른 인젝터 내 기포의 상승속도를 평균하여 나타낸 것이다.

일반적으로 기포의 상승속도가 빠를수록 인젝터 벽면으로부터 연료로의 열전달이 촉진되고 이는 기포발생을 더욱 원활하게 한다. 그림에서 보는 바와 같이 노즐색 공간이 적을수록 각각의 연료압력에 대하여 기포의 상승속도가 증가함을 볼 수 있다. 이는 전술한 바와 같이, 상대적인 연료의 온도 상승에 따른 부력증가에 기인하는 것으로 판단된다.

연료압력 1MPa에서 type3의 상승속도는 type2 및 type1의 경우보다 각각 약 43%, 22%정도 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 type3에서 기포발생이 가장

활발할 수 있음을 의미하는 것이다.

### 3.4 연료분사 유무에 따른 영향

Fig. 12는 연료를 분사하지 않은 경우와 연료를 분사한 경우의 인젝터 내 기포거동을 나타낸 것이다. 여기서, 연료의 공급압력은 1MPa이고 니들 리프트는 약 0.3mm이며, 분사기간은 360ms이다.

그림에서 보듯이 연료를 분사하지 않은 경우, 인젝터 내 기포거동은 연료의 압력이 일정하게 유지되므로 전술한 바와 같이, 분사공 부근에서 발생하여 노즐 끝단에서 소멸되는 양상이 지속된다.

연료를 분사하는 경우의 기포는 분사 직후, 노즐 끝단 분사공 부근에서 발생하여 위로 상승한 후 니들이 닫히면서 완전히 소멸된다. 이는 연료를 분사할 때 순간적인 압력 저하에 의한 공동현상으로 기포가 발생되고 니들이 닫히면서 연료의 압력 회복에 의해 기포가 다시 응축되는 것으로 볼 수 있다. 그로인해 연료압력 1MPa에서 연료분사를 하는 경우의 기포발생은 연료분사를 하지 않은 경우보다 약 47K 정도 낮은 인젝터 주변 온도에서 확인되었다.

Fig. 13은 각 연료의 공급압력에 대한 연료분사 유무에 따른 기포발생 시작온도를 나타낸 것이다.

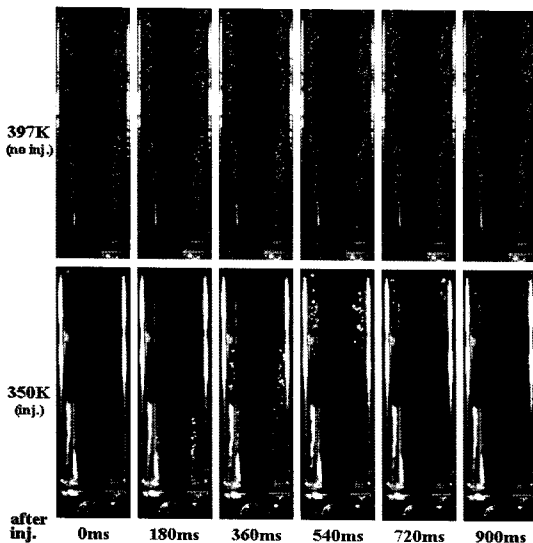


Fig. 12 Development process of bubbles after injection at  $P_f=1MPa$

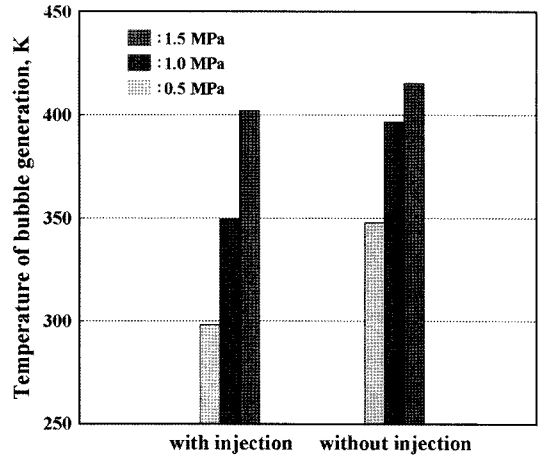


Fig. 13 Temperature of bubble generation with and without injection

그림에서 보는 바와 같이, 연료의 공급압력에 관계없이 연료를 분사하는 경우의 기포발생 시작온도가 분사 시 순간적인 압력저하로 인해 연료를 분사하지 않은 경우의 온도보다 낮음을 확인할 수 있다. 전반적으로 연료압력 1.5MPa에서 연료를 분사하는 경우, 분사를 하지 않은 경우보다 약 10% 정도 낮은 기포발생 시작온도를 나타낸다. 이는 액상 LPG 연료를 실린더 내에 직접 분사하는 것은 주지의 사실과 같이 기화잠열에 의한 연소실의 냉각효과 도모와 동시에 기포발생을 촉진할 수 있음을 설명한다.

한편, 연료압력이 높을수록 연료분사 유무에 따른 기포발생 시작온도의 차이는 적다. 이는 연료압력이 높은 경우, 기포발생은 연료분사로 인한 압력저하보다 열전달에 의한 온도 상승에 더 영향을 받음을 의미한다. 그리고 연료압력이 낮을수록 연료분사 유무에 따른 기포발생 시작온도의 편차가 현저한데 이는 상온에서도 쉽게 상변화를 하는 LPG 연료의 특성에 기인하는 것이다. 따라서 기포발생을 억제하는 데에는 연료의 공급압력을 고압화하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

## 4. 결론

- 1) 인젝터 내 기포거동은 노즐 끝단 분사공에서 발생하여 위로 상승 후 소멸되는 경향이다. 이러한 경향은 시간경과에 관계없이 거의 유사하며, 발생하는 기포 수와 소멸하는 기포 수도 거의 비슷

함을 알 수 있었다.

- 2) 인젝터의 주변 온도가 증가할수록 기포발생은 활발하며, 기포의 상승속도 및 폭도 증가한다. 연료공급압 0.5MPa에서 기포발생 시작온도가 5~6K정도 증가하면 기포 수는 약 2.1배 증가함을 알았다.
- 3) 열전달 면적이 감소할수록 기포발생 시작온도는 상승하여 열전달 면적을 25%로 감소시킬 경우 약 8.6%의 기포발생 억제효과를 얻을 수 있었다.
- 4) 노즐색 공간이 감소하는 니들형상에서 기포발생이 활발하며, 본 연구에서 제시된 type3의 경우 type1보다 기포발생이 약 1.7배 활발하였고 기포의 상승속도 역시 약 22%정도 증가함을 확인하였다.
- 5) 본 실험 조건에서 연료의 공급압이 1MPa인 경우, 연료분사를 하는 경우에 기포는 순간적인 압력 저하로 무 분사의 경우보다 약 47K정도 낮은 온도에서부터 발생되며, 연료분사 시 대략 10% 정도의 기포발생 시작온도 저하가 발생하였다.
- 6) 이상과 같은 결과로부터 인젝터 내 기포발생은 연료의 공급압력 및 인젝터 주변의 온도에 좌우되며 기포발생 억제를 위해서는 연료 공급압의 고압화가 효과적일 것으로 판단된다.

### References

- 1) H. Ono and S. Tsusaka, "Research and Development of LPG Liquid Fuel Injection System-Overview of Liquid Fuel Injection System and Engine Performance," JSAE Paper No.48-02, pp.15-18, 2002.
- 2) R. Sierens, "An Experimental and Theoretical Study of Liquid LPG Injection," SAE 922363, 1992.
- 3) A. Gerini, G. Monnier and R. Bonetto, "Ultra Low Emission Vehicle Using LPG Engine Fuel," SAE 961079, 1996.
- 4) B. R. Lutz, R. H. Stanglmaier and R. D. Matthews, "The Effects of Fuel Composition, System Design and Operating Condition on In-System Vaporization and Hot Start of a Liquid-Phase LPG Injection System," SAE 981388, 1998.
- 5) R. Sierens, "An Experimental and Theoretical Investigation of Liquid LPG Injection," SAE 922363, 1992.
- 6) S. Yamague, M. Isii and H. Yaujawa, "Research and Development of LPG Liquid Fuel Injection System-Fuel Composition and Exhaust Emission Performance of LPG Vehicle with Liquid Injection System," JSAE Paper 20035038, 2003.
- 7) J.-H. Kim, K. Nishida, T. Yoshizaki and H. Hiroyasu, "Characterization of Flows in the Sac Chamber and the Discharge Hole of a DI Diesel Injection Nozzle by Using a Transparent Model Nozzle," SAE 972942, 1997.
- 8) J. W. Cho, Y. Ryu and J. T. Lee, "Measurement and Analysis of Instantaneous Surface Temperature and Unsteady Heat Flux at Combustion Chamber of DOHC Gasoline Engine; Cylinder Head," Transactions of KSAE, Vol.7, No.1, pp.10-19, 1999.
- 9) R. Payri, X. Margot and F. J. Salvador, "A Numerical Study of the Influence of Diesel Nozzle Geometry on the Inner Cavitating Flow," SAE 2002-01-0215, pp.71-78, 2002.
- 10) S. D. Sovani, P. E. Sojka and A. H. Lefebvre, "Effervescent Atomization," Progress in Energy and Combustion Science 27, pp.483-521, 2001.