

LPDi기관의 인젝터내 기포발생현상의 가시화 및 해석

노기철[†], 이종태

Visualization and Analysis of Bubbling Phenomenon in the Injector of LPDi Engine

Ki-Chol Noh, Jong-Tai Lee

Key Words: LPDi(액상 LPG 직접분사), Bubble Visualization, Analogy Visualization Injector(가시화용 상사인젝터), Vapor Lock

Abstract

The one of the most important subject to develop a LPDi engine is to suppress the generation of bubble inside LPG direct injector. For the purpose of this, in this study, the analogy visualization injector to visualize the generation and behavior of bubble, is manufactured and the bubbling phenomenon and behaviors are visualized and studied.

The bubble inside the injector is generated at injection hole and after rising by buoyancy, it disappear around the top of a nozzle. The number of bubble generated is little changed regardless of the lapse of time but it is increased remarkably as the temperature around the injector is increased. With injection, the temperature around the injector at which the bubble is generated in_cylinder is much lower than that without injection because the transient pressure drop of fuel by injection.

1. 서론

액상의 LPG를 실린더내에 직접 분사하는 경우 흡입공기량 및 공연비의 정밀제어효과와 연료의 기화잠열에 의한 연소실의 냉각효과 등으로 출력 및 연비의 향상과 유해배출가스의 저감을 도모할 수 있다^(1~2). 이와 같이, 액상 LPG 직접분사식(LPDi)은 흡기관 공급방식에 비해 성능 향상효과가 기대되지만 이를 실현하기 위해서 해결할 문제점이 많다. 특히, LPG 직접분사식 인젝터가 고온의 실린더헤드에 장착되는데 따른 인젝터내 기포발생이다. 인젝터내 기포발생은 vapor lock 현상을 유발하여 연료분사의 불안정을 야기하고 연

료 혼합률의 변동, 연소불안 및 시동불량 등의 원인이 되어 효율저하 및 유해배출가스를 증가시킨다. 따라서 LPDi 기관의 개발을 위해서는 무엇보다도 기포발생 메커니즘 및 원인을 규명하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 LPDi 기관의 인젝터내 기포발생 현상 및 원인을 규명하기 위한 기초연구로서 가시화용 상사인젝터를 제작하여 인젝터내 기포발생현상 및 거동을 가시화하고 해석하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 가시화용 상사인젝터

Fig. 1은 인젝터내에서 발생하는 기포의 거동을 가시화하는 가시화용 상사인젝터의 개략을 나타낸다. 상사인젝터는 크게 기포발생의 가시화를 위한 가시화창부, 니들의 개폐 및 단힘장력을 측정하기 위한 니들개폐부 및 인젝터 주변 온도변화를 위한 인젝터 가열부로 구성된다.

[†] 책임저자의 소속: 성균관대 내연기관연구실

E-mail : pivboy@dreamwiz.com

TEL : (031)290-7472 FAX : (031)290-5848

* 저자 2의 소속 : 성균관대 기계공학부

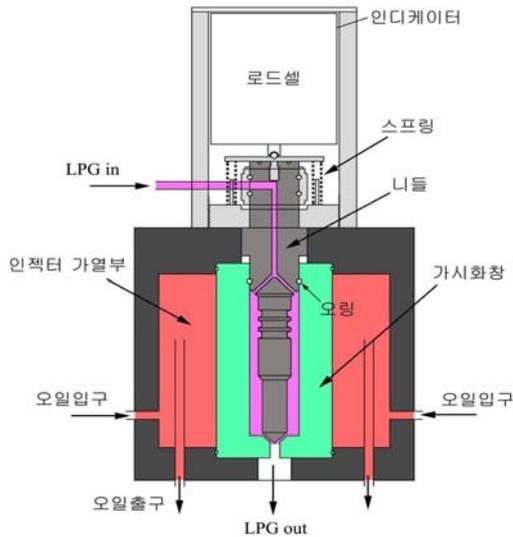


Fig. 1 The schematic diagram of similar visualization injector.

가시화창은 $70 \times 70 \times 130$ (w×b×ℓ)인 quartz로 제작하였고 가시화창의 가운데 지름 30mm의 니들 홀과 끝단에 6mm의 분사공이 있다. 니들의 형상은 상용 GDI인젝터의 니들을 7.5배 상사하였고⁽³⁾ 기포발생을 가시화할 수 있도록 노즐씩 공간을 확보하였다. 니들의 재질은 단열효과를 고려하여 테프론을 사용하였다. 액상 LPG의 공급은 탑피이드(top feed)방식이고 니들상단에 LPG 누설방지용 오링을 설치하였다.

니들의 개폐는 로드셀 상단에 설치한 개폐장치로 이루어진다. 로드셀은 니들의 단합장력을 측정하여 하중초과에 의한 가시화창 파손을 방지하기 위하여 설치하였다.

가시화 인젝터의 가열은 온도구배를 최소화하기 위해 오일가열방식을 채택하였다. 이를 위해 인젝터 가시화창 주변은 고온의 오일이 유출입하는 사각형의 인젝터 가열부로 둘러싸여 있다. 오일의 온도는 가열부의 입구와 출구에 열전대를 삽입하여 측정하였다. 또한 출구의 높이를 조절하여 인젝터로의 열전달면적을 변화시킬 수 있다. 사용된 오일은 600K 이상에서도 착화 되지 않는 열매체유이다.

2.2 실험장치

실험장치는 전술한 가시화용 상사인젝터, 액상 LPG 공급부, 가열 및 오일공급부, 가시화 장치부 데이터 취득 및 제어부로 구성된다. Fig. 2는 실험장치의 실물사진을 나타낸 것이다.

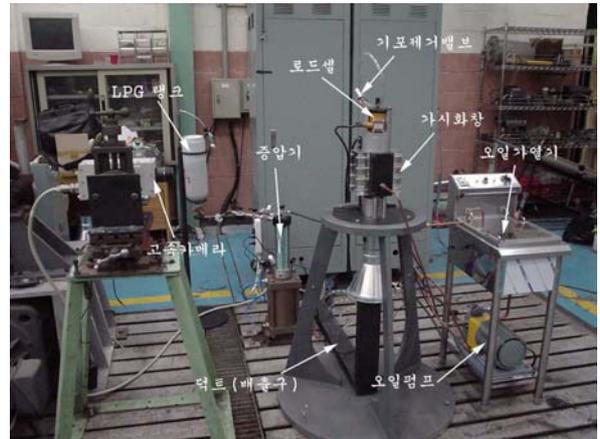


Fig. 2 Photograph of experimental apparatus.

액상 LPG는 공유증압기로 공급압력을 증압시켜 상사인젝터로 공급하였다. 공급압력은 공유증압기의 공압을 조절하여 변화시킬 수 있다.

유증압기의 증압비는 약 7:1로 연료의 공급압력을 최대 50bar정도까지 증압할 수 있다. 연료 공급관은 공급관내의 기포발생을 최소화하고자 3중 단열관을 사용하였다. 공급관 상단에 공급관내의 발생된 기포를 제거하기 위하여 기포제거용 밸브를 장착하였다. 상사인젝터로부터 분사된 연료는 덕트와 브로우어에 의하여 방출된다.

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

인젝터내에 발생된 기포의 가시화에는 고속카메라(HG2000, Kodak)를 사용하였고 광원은 할로겐램프(2kW×2)를 사용하였다.

2.3 실험방법

실험은 인젝터 주변온도, 인젝터로의 가열면적 및 연료의 분사 유무를 변수로 하여 인젝터내의 기포발생을 가시화하고 해석하는 것이다.

인젝터 주변온도는 상온에서 468K까지 단계적으로 변화시켰으며, 이 경우 공급연료의 압력은 5bar, 10bar 및 15bar로 하였다. 인젝터로의 열전달면적은 인젝터 가열부의 오일출구의 높이조절로 변화시켰다. 이 경우 출구높이는 각각 노즐씩 길이의 1/4, 2/4, 3/4 및 4/4이며, 이를 가열면의 길이비로 정의하였다. 인젝터 주변온도는 각각의 압력에 대하여 기포가 발생할 때까지 충분히 증

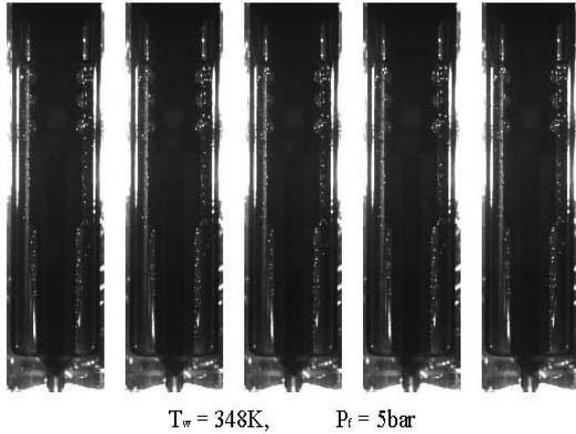


Fig. 3 Behaviors of bubbles with the lapse of time at $T_w=348K$, $P_f=5bar$.

가시켰다⁽⁴⁾. 임의의 압력과 온도에서 연료분사 유무시 기포발생을 가시화하였다⁽⁵⁻⁶⁾.

연료분사시의 니들리프트는 0.3mm이고 상사확대에 의한 노즐씩 공간의 확장을 고려하여 분사기간은 360ms로 하였다. LPG 연료는 부탄 100%의 자동차용 LPG 연료를 사용하였다. 인젝터내 기포의 촬영속도는 30ms/frame이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인젝터 주변온도변화에 따른 기포거동

Fig 3은 인젝터내에 기포발생 후, 기포의 거동을 시간경과에 따라 나타낸 일례다. 여기서, 인젝터 주변 온도는 348K, 연료의 공급압력은 5bar이고 가시화 시간간격은 30ms이다. 열전달면적은 인젝터 가열부 전체이며, 연료가 분사되지 않은 경우이다.

그림에서 보는 바와 같이, 인젝터내 기포는 노즐끝단 분사공에서 발생하여 부력에 의해 니들의 측면을 따라 위로 상승하여 노즐 상단에서 소멸하는 것을 보이고 있다. 시간이 경과해도 기포의 거동에 큰 차이가 없는 것은 분사공에서 발생하는 기포수와 노즐상단에서 소멸하는 기포수가 거의 비슷하다는 것으로 볼 수 있다. 이는 연료의 비등현상이 기본적으로 연료의 온도와 압력에 좌우되며, 현재의 실험조건이 포화상태로 평형을 이루고 있기 때문으로 판단된다. 그러나 상당기간 가열이 지속되는 경우 연료의 온도상승으로 인젝터내의 상부에는 기포가 약간 축만되는 것이 보였다.

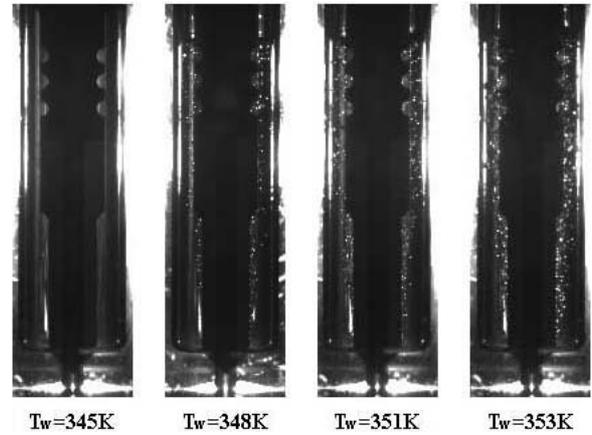


Fig. 4 Behaviors of bubbles according to temperature around injector wall at $P_f=5bar$.

Fig. 4는 인젝터 주변온도 변화에 따른 인젝터내 기포의 발생양상을 가시화한 것이다. 여기서, 연료의 공급압력은 5bar이고 무분사인 경우다.

기포는 주변온도가 348K부근부터 발생하고 온도가 증가하여도 모두 니들끝단 분사공 근방에서 발생하는 것을 보이고 있다. 발생된 기포는 전술한 바와 같이 인젝터 위로 상승하여 다시 소멸한다. 인젝터내에 발생하는 기포수는 인젝터의 주변온도가 증가함에 따라 증가하며, 이 경향은 식(1)의 Van't Hoff 평형식으로 나타낼 수 있다⁽⁷⁾.

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

여기서, n : 기포형성에 필요한 최소에너지가 주어졌을 때 단위체적당 기포수

N : 단위체적당 액체의 분자수

k_b : Boltzmann 상수

기포수는 온도증가에 따라 증가되지만 소멸되는 기포수도 증가하여 시간이 경과하는데 따른 기포발생양상은 거의 차이가 없음을 보인다.

기포상승류의 폭은 인젝터 주변온도가 증가할수록 커지는 것을 나타낸다. 또한 발생하는 기포의 반경은 인젝터 주변온도의 증가에 별 차이를 보이지 않지만 기포상승류의 속도는 더욱 빨라진다.

오일 가열부에서 인젝터로의 열전달량은 $Q=kA(T_{oil}-T_{LPG})$ 와 같은 간단한 열전도식으로 표시할 수 있다. 여기서, k는 가시화창의 열전도율,

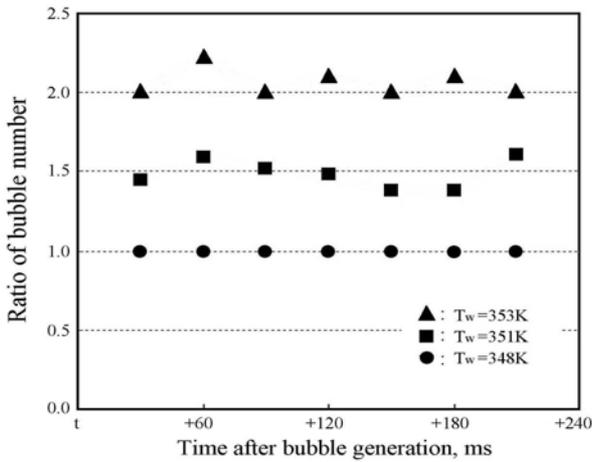


Fig. 5 Bubble number with the lapse of time after bubble generation at P=5bar.

A는 열전달면적이다. 또한 연료로의 공급열량은 $Q=mC\Delta T$ 와 같고 열전달량과 동일한 값이다. 여기서, m과 C는 각각 연료의 질량과 비열이다.

상기 관계에서 보듯이, 확대된 상사인젝터는 연료로의 열전달 면적의 증가 및 노즐씩 체적의 증가로 인한 연료량의 증가로 이어지므로 가시화용 상사인젝터에서 연료의 단위질량당 열전달량은 실제 인젝터에서보다 작을 것으로 판단된다. 이로 인해, 본 실험에서의 초기 기포발생온도는 실제기관의 인젝터내 기포발생 온도보다 다소 높을 것으로 판단된다.

Fig. 5는 인젝터 주변온도 증가에 따른 기포 발생수를 시간경과에 따라 비교한 것이다. 여기서 기포발생시점의 온도는 348K이며, 연료의 공급압력은 5bar이다.

기포수는 기포가 형성되는 분사공부근으로 노즐씩의 바닥에서 40mm지점까지의 영역에 대하여 측정하였다. 기포수는 촬영한 영상의 이미지처리를 통하여 측정하였다. 기포수가 증가함에 따른 기포의 중첩이 기포수의 정량치에 영향을 미치지만 정성적인 경향은 큰 변화가 없을 것으로 판단된다.

그림에서 보는 바와 같이 임의의 온도에서 발생된 기포수는 시간이 경과하여도 거의 변하지 않음을 볼 수 있다. 그리고 인젝터 주변온도가 증가함에 따라 기포발생비율은 현저히 증가하여 인젝터 주변온도가 인젝터내 기포발생의 주된 인자임을 확인할 수 있다. 인젝터 주변온도가 기포발생시점의 온도보다 약 5K정도 높을 때, 기포발생은 약 2.1배정도 증가함이 보였다.

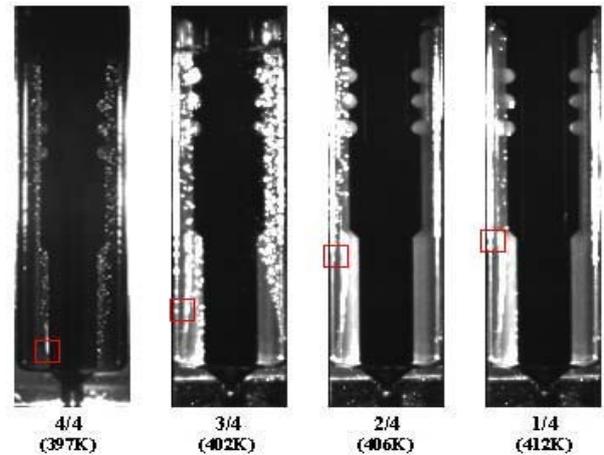


Fig. 6 Behaviors of bubbles according to the change of heta transfer area at Pf=10bar.

3.2 열전달면적 변화의 영향

Fig. 6은 인젝터 가열부 출구의 높이변화로 인젝터로의 열전달면적을 변화시킨 경우 인젝터내에 발생하는 기포현상을 가시화한 결과이다. 여기서 연료압력은 10bar이다.

가시화결과에 나타난 바와 같이 가열부 전체를 가열하는 경우는 비교적 낮은 온도에서 기포가 발생하고 국부적으로 열전달이 이루어지는 경우는 보다 높은 온도에서 기포발생이 일어나는 것을 알 수 있다. 이것은 전술한 열전도식에서 보듯이, 기포의 발생온도가 인젝터로의 열전달량에 의해 결정되므로 열전달면적이 넓은 경우에 비교적 낮은 오일온도에서 기포가 발생하지만, 면적이 좁은 경우에 높은 온도에서 발생하는 것이다.

가열면의 길이비가 4/4인 경우의 기포발생은 분사공 끝단에서 발생하여 니들측면을 따라 위로 올라가 소멸한다. 가열면의 길이비가 3/4인 경우는 열전달면적의 감소에 따라 길이가 4/4인 경우보다 기포발생온도가 약간 증가하며 발생위치도 노즐씩 바닥보다 약간 높은 외벽에서 발생한다. 이는 국부적 가열에 의한 LPG연료의 온도구배에 의한 것으로 판단된다. 길이비가 2/4인 경우 기포발생위치는 노즐씩의 중간 외벽에서 처음 발생한다. 이는 기포가 발생하는 시점의 인젝터 가열부 온도와 LPG 연료의 온도차에 의해 노즐씩의 폭이 좁은 중간부분에서 기포가 발생한 것으로 판단된다. 길이비가 1/4인 경우도 기포발생위치는 대략 노즐씩의 중간 외벽에서 발생한다.

인젝터내 기포발생은 적절한 열전달면적과 온도편차로 열전달량이 가장 많은 가열면의 길이비

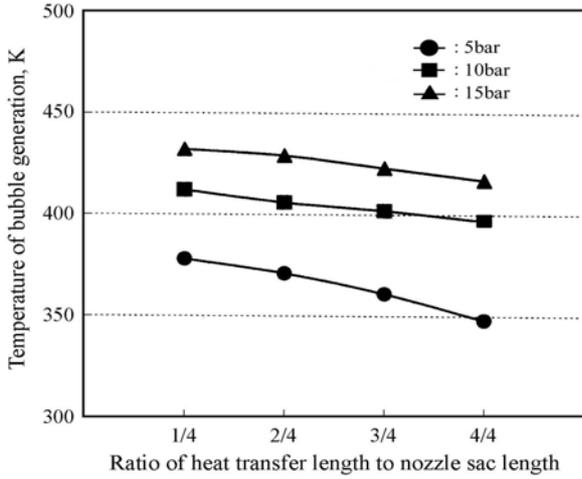


Fig. 7 Temperature of bubbling according to the change of heat transfer area.

가 3/4인 경우에 가장 활발히 일어나며, 다음으로 길이비가 각각 2/4, 4/4, 1/4의 순이다. 그러나 기포발생온도가 높아짐에 따라 기포상승류의 속도는 빨라지고 상승류의 폭은 좁아진다. 그리고 전술한 바와 같이, 발생하는 기포수 및 소멸하는 기포수는 시간의 경과에 관계없이 비슷하다.

Fig. 7은 인젝터 가열부 출구 높이를 조절하여 열전달면적을 달리 한 경우, 인젝터내 기포발생시점을 나타낸 것이다. 연료의 공급압력은 5, 10, 15bar이다.

전술한 바와 같이, 기포발생시점의 인젝터 가열부 온도는 열전달면적이 감소할수록 높아진다. 또한 연료의 압력이 증가할수록 기포발생온도가 높아짐을 알 수 있다. 열전달식에서 알 수 있듯이 적은 열전달면적으로 연료의 온도를 비등점까지 상승시키기 위해서 큰 온도편차가 나와 하기 때문이다. 모든 조건에서 기포발생 시점의 온도가 가솔린기관의 평균 실린더헤드부 온도인 468K보다 낮음 알 수 있다⁵⁾. 이는 LPDi 기관에서 기포발생이 문제가 될 수 있다는 것을 의미하는 것이다.

한편, 연료압력이 10bar에서 열전달면적을 25%로 감소시켰을 때, 약 12.1% 정도의 기포발생을 억제시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

이상과 같이, 액상 LPG연료를 실린더내 안정적으로 분사하기 위해서는 실린더헤드부에서 인젝터로의 열전달면적을 적절히 조절할 뿐만 아니라 실린더헤드부의 온도도 적절히 냉각시켜야 한다는 것을 알 수 있었다.

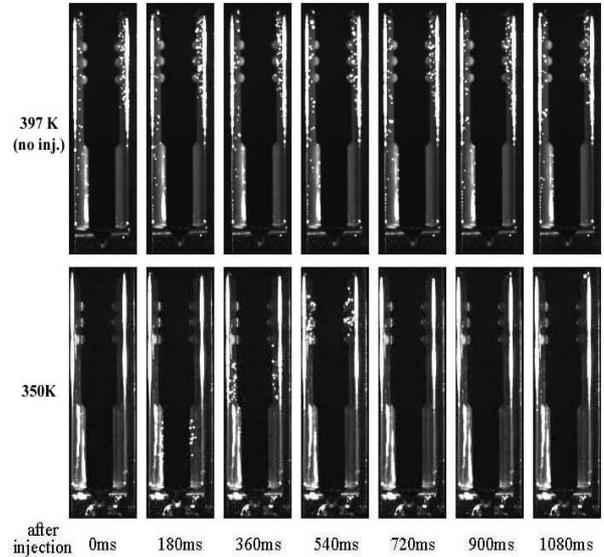


Fig. 8 Development process of bubble after injection at $P_f=10bar$.

3.3 연료분사에 따른 기포발생 및 거동

Fig. 8은 연료를 분사하는 경우와 하지 않은 경우의 시간경과에 따른 인젝터내 기포의 거동을 나타낸 것이다. 연료의 압력은 10bar이고 니들리프트는 약 0.3mm이고 분사시간은 360ms 정도이다.

그림에서 보듯이 연료를 분사하는 경우, 기포는 분사 직후, 니들 끝단 분사공부근에서 발생하여 위로 상승하고 니들이 닫히면서 사라진다. 이는 연료를 분사할 때 순간적인 압력저하에 의한 공동현상으로 기포가 발생하고 니들이 닫히면서 다시 압력회복에 의해 기포가 응축된데 따른 것으로 볼 수 있다. 연료를 분사하지 않은 경우는 비등에 의한 기포발생으로 연료의 압력이 일정하게 유지되므로 전술한 바와 같이 기포거동이 그리 변화가 없는 것을 나타낸다.

연료공급압력이 10bar인 경우에는 분사를 하는 경우가 연료분사가 없는 경우보다 약 47K정도 낮은 인젝터 주변온도에서도 기포발생이 보임을 알 수 있다. 이는 액상 LPG를 실린더내에 직접 분사하는데 따른 연소실 냉각효과를 도모할 수 있으나 순간적인 압력저하에 의한 기포발생의 가능성이 동시에 상존할 수 있음을 설명한다.

Fig. 9는 연료를 분사한 경우와 하지 않은 경우의 기포발생시점의 온도를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 연료를 분사하는 경우, 전반적으로 연료분사시 순간적인 압력저하로 인해 기포발생 시점의 온도가 연료를 분사하지 않은

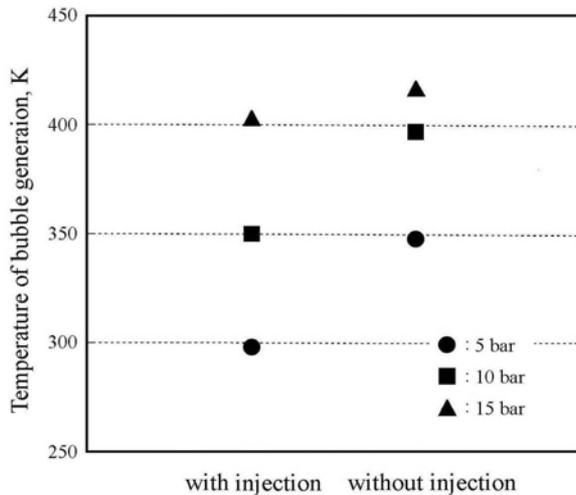


Fig. 9 Temperature of bubbling with and without injection.

경우 낮다.

연료압력이 높을수록 연료분사 유무에 따른 기포발생 시점의 온도차이가 적다. 이는 연료압력이 높은 경우, 기포형성은 연료분사로 인한 압력저하보다 열전달에 의한 온도상승에 더 영향을 받음을 의미한다. 그리고 연료의 압력이 낮을수록 연료분사 유무에 따른 기포발생 시점의 온도편차는 현저한데 이는 상온에서도 쉽게 상변화를 쉽게 하는 LPG의 특성에 기인하는 것이다.

연료압력 15bar에서 연료를 분사하는 경우, 분사를 하지 않은 경우보다 약 10%정도 낮은 온도에서도 기포가 발생하는 것이 보였다.

4. 결론

(1) 본 연구에서 제작한 가시화용 상사인젝터는 다양한 변수에 대하여 기포발생현상 및 거동을 효과적으로 가시화할 수 있었다.

(2) 인젝터내 기포는 노즐 끝단 분사공에서 발생하여 위로 상승 후 소멸된다. 기포의 거동은 시간경과에 관계없이 변화가 없으며, 발생하는 기포수와 소멸하는 기포수는 거의 비슷함을 알 수 있었다.

(3) 인젝터 주변온도가 증가할수록 기포의 발생수가 증가하고 상승류의 속도 및 폭도 커진다.

(4) 열전달면적이 감소할수록 기포발생시점의 온도는 높아지고 기포의 발생위치는 노즐씩의 폭이 좁은 위쪽으로 이동하는 것이 보였다. 또한 기포의 상승속도가 증가하고 그 상승폭이 감소하

는 것이 나타났다.

(5) 연료를 분사하는 경우, 순간적인 압력저하로 기포가 발생하고 이들이 닫히면서 압력회복으로 기포는 응축되어 소멸하는 것을 알 수 있었다. 본 실험조건에서 연료분사를 하는 경우에 기포는 무분사의 경우보다 약 47K정도 낮은 온도에서도 발생하는 것이 보였다

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행한 미래형 자동차 기술 개발 과제의 연구비 지원에 의해 수행된 결과의 일부입니다.

참고문헌

- [1] Hiromasa Ono and Satoru Tsusaka 2002, "Research and Development of LPG Liquid Fuel Injection System-Overview of Liquid Fuel Injection System and Engine Performance", JSAE No.48-02, pp.15~18.
- [2] R. Sierens, "An Experimental and Theoretical Study of Liquid LPG Injection", SAE Paper 922363, pp. 79~88.
- [3] Keiyah Nishida, Takuo Yoshizaki and Hiroyuki 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 paper 972942. pp. 11~23.
- [4] J. W. Cho, Y. Ryu and J. T. Lee, 1999, "Measurement and Analysis of Instantaneous Surface Temperature and Unsteady Heat Flux at Combustion Chamber of DOHC Gasoline Engine : Cylinder Head", Trans. of KSAE. Vol.7, No.1, pp. 10~19.
- [5] R.Payri, X.Margot and F.J. Salvador, "A Numerical Study of the Influence of Diesel Nozzle Geometry on the Inner Cavitating Flow", SAE Paper 2002010215, pp. 71~78.
- [6] S.D. Sovani, P.E. Sojka and A.H. Lefebvre, 2001, "Effervescent atomization", Progress in Energy and Combustion Science 27, pp. 483~521.
- [7] 곽호영, BUBBLE DYNAMICS, 드림미디어, 2002, pp. 1~45, 93 ~ 125.