

연료 고압화에 의한 LPDi 기관의 인젝터 내 기포발생 억제에 관한 기초 연구

노기철* · 이종태

성균관대학교 기계공학부

A Fundamental Study on Suppressing the Bubbling in the Injector of LPDi Engine by High Pressurization of Fuel

Kichol Noh* · Jongtai Lee

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

(Received 7 July 2006 / Accepted 15 November 2006)

Abstract : To suppress the bubble generated in the liquid LPG direct injector is the most important to develop the LPDi engine. It was found in the previous study that bubbling phenomenon in the injector of the LPDi engine is decisively influenced by pressure of fuel and temperature around the injector. Therefore, in this study, the effect on suppressing the bubbling in the LPDi injector by high pressurization of fuel is analyzed and the spray characteristics are also studied. As a result, it is found that the bubbling in the LPDi injector is radically suppressed when the pressure of fuel is over 50MPa. The bubbling is suppressed when the pressure of fuel is over 3MPa if the inserted position of the injector is considered. Also, it is confirmed that the higher the pressure of fuel is the longer spray tip penetration and is the larger spray angle. As the ambient pressure increases, spray tip penetration decreases and spray angle increases due to the increase of drag force.

Key words : LPDi(액상 LPG 직접 분사), Bubble visualization(기포 가시화), Bubbling(기포발생), Vapor lock(증기폐색), High pressurization(고압화), Ambient pressure(분위기압)

1. 서론

청정연료인 LPG 연료를 액체 상태로 실린더 내에 직접 분사하는 것은 흡입공기량 증가, 기화잠열에 의한 연소실 냉각 및 공연비의 정밀제어 등에 의해 고출력, 고효율 및 저배기 공해를 실현할 수 있다.¹⁻⁴⁾ 그러나 LPDi 기관의 경우, 인젝터를 실린더 헤드에 직접 장착하는데 따른 인젝터로의 열전달은 인젝터 내 기포발생을 야기하여 vapor lock 현상을 초래한다. 이는 연료분사의 불안정 및 유해 배기가스 증가의 원인이 될 수 있다. 따라서 LPDi 기관의

개발을 위해서는 무엇보다도 인젝터 내 기포발생 억제법이 강구되어야 한다. 이를 위해 저자들은 가시화용 상사 인젝터를 통해 인젝터 내 기포발생현상 및 원인을 해석하였고 그 결과, 인젝터 내 기포발생은 연료의 압력 및 실린더 헤드로부터의 열전달량에 좌우됨을 밝힌 바 있다.^{5,6)}

본 연구에서는 LPDi 기관의 인젝터 내 기포발생을 억제하기 위한 방안으로 분무장의 분위기압을 변화시킬 수 있는 고압 분무실을 구성하여 연료의 고압화에 의한 기포발생 억제효과를 파악하였고 동시에 연료 고압화 및 분위기압 변화에 대한 분무특성 향상효과를 해석하였다.

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

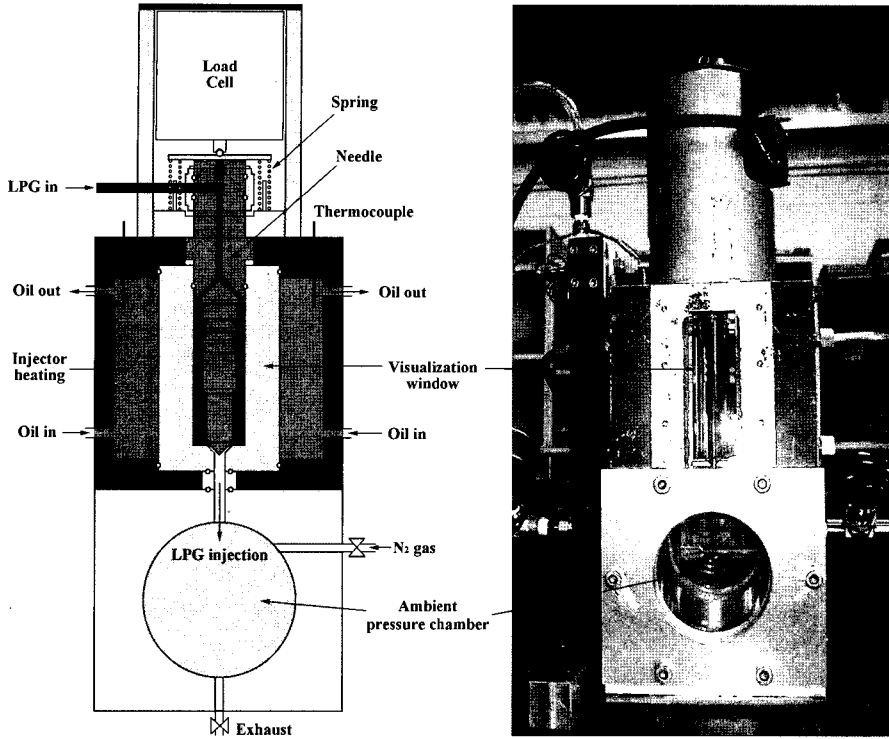


Fig. 1 Schematic diagram and photograph of analogue visualization injector and ambient pressure chamber

2. 실험장치 및 방법

2.1 가시화용 상사 인젝터 및 고압 분무실

Fig. 1은 인젝터 내에 발생하는 기포거동 및 분무 특성을 해석하기 위한 가시화용 상사 인젝터 및 고압 분무실의 개략 및 실물사진을 나타낸 것이다.

상사 인젝터는 거포거동을 가시화하기 위한 가시화창부, 니들의 개폐 및 닫힘 장력을 측정하기 위한 니들 개폐부 및 인젝터 주변의 온도변화를 위한 인젝터 가열부로 구성된다. 가시화창은 70mm×70mm×130mm(w×b×ℓ)인 quartz로 제작하였으며 가시화창의 가운데에 지름 30mm의 니들 홀과 끝단에 6mm의 분사공이 있다. 니들의 형상은 상용 GDI 인젝터의 니들을 7.5배 상사하였고⁷⁾ 재질은 단열효과를 고려하여 테프론으로 하였다. 액상 LPG의 공급은 탑피이드(top feed)방식이고 니들상단에 LPG 누설 방지용 오링을 설치하였다. 니들의 개폐는 로드셀 상단에 설치한 니들개폐장치로 이루어지며 니들의 닫힘 장력을 측정하여 하중조과에 의한 가시화창의 파손을 방지하였다. 인젝터부의 가열은 온도구배를

최소화하기 위해 오일가열방식을 채택하였다. 이를 위해 가시화창 주변은 고온의 오일이 유출입하는 사각형의 인젝터 가열부로 둘러싸여 있다. 사용된 오일은 600K 이상에서도 착화하지 않는 열매체유이며 가열부의 입구와 출구에 각각 열전대를 삽입하여 오일의 온도를 측정하였다.

가시화용 상사 인젝터 하부에는 연료의 분무양상을 가시화할 수 있는 고압 분무실이 설치되어 있다. 고압 분무실은 상사 인젝터와 직접 체결하도록 설계되었으며 액상 LPG 연료의 분사 시 분무특성을 가시화할 수 있도록 고압 분무실 양 측면에 지름 90mm, 두께 25mm의 가시화창을 부착하였다. 그리고 내압테스트를 통해 3MPa 이상에서도 안전함을 확인하였다. 분무실 내의 압력은 레귤레이터를 통하여 고압 질소를 충전하여 쉽게 변화시킬 수 있다. 분사된 LPG 연료와 질소 가스는 분무실 밑 부분에 연결된 덕트와 블로워를 통해 배출된다.

2.2 실험장치

실험장치는 전문화된 가시화용 상사 인젝터와 고압

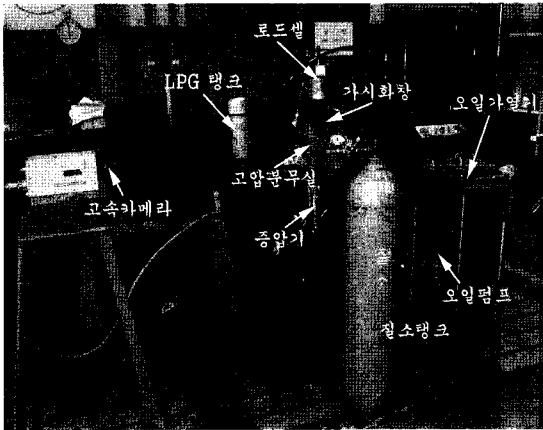


Fig. 2 Photograph of an experimental apparatus

분무실 및 액상 LPG 공급부, 가열 및 오일공급부, 가시화 장치부, 데이터 취득 및 제어부로 구성되며, 그 실험사진을 Fig. 2에 나타낸다.

액상 LPG 연료는 공압 및 유압 실린더로 구성된 증압기에 의해 증압된 후 상사 인젝터로 공급된다. 연료의 공급압력은 공압 실린더의 공압조절로 제어 가능하며 공압 실린더와 유압 실린더의 면적비가 약 7:1로서 최대 5MPa정도까지 증압할 수 있다. 연료 공급관은 관내에서의 기포발생을 최소화하고자 3중 단열관을 사용하였다. 또한, 공급관 상단에 기포 제거용 밸브를 장착하여 공급관 내에서 발생된 기포를 제거하였다.

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.

인젝터 내에 발생된 기포거동 및 분무거동의 가시화에는 고속카메라(HG2000, Kodak)를 사용하였고 광원으로는 할로겐 램프(2kW×2)를 사용하였다.

분사된 액상 LPG의 분무도달거리 및 분무입경 등의 분무특성 해석에는 PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)시스템을 적용하였으며, 그 개략은 Fig. 3에 나타낸다.

PDPA 시스템은 크게 광원, 광학부분, 신호처리부 및 데이터 처리부로 구성된다. PDPA 시스템의 광원은 아르곤-이온 레이저(5W, 514.5nm, Spectra Physics)를 사용하였다. 그리고 광학부분은 광 분리기, 송광기 및 수광기로 이루어지며 송광기와 수광

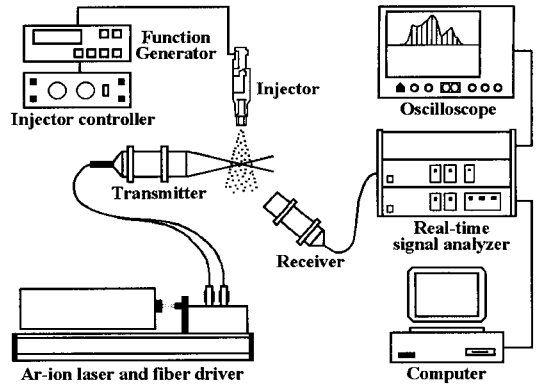


Fig. 3 The schematic diagram of PDPA system

기의 초점거리는 각각 250mm 및 500mm이다.

2.3 실험방법

실험은 LPG 연료의 분사압력 및 고압분무실의 분위기압을 변수로 하여 연료의 고압화에 따른 인젝터 내 기포발생 억제효과 및 분무특성 향상효과를 해석하는 것이다.

우선, 인젝터 주변 온도 변화에 따라 기포가 발생하는 압력을 파악하였다. 인젝터 주변 온도는 373K에서 433K까지 20K씩 단계적으로 변화시켰다. 임의 온도에서 기포가 발생하는 압력 이상으로 가압하면 기포가 모두 사라진다. 이를 기포발생 억제압력으로 정의하고 이보다 낮은 압력에서 연료압력을 0.1MPa씩 높여가며 인젝터 내 기포거동의 변화를 가시화하고 해석하였다. 그리고 기포발생 유무에 따른 분무특성 및 연료압력과 분위기압에 따른 분무특성을 PDPA 시스템으로 해석하였다.

연료의 공급압력은 기포발생 유무에 따른 분무특성의 해석 시에는 1.5MPa 및 2.5MPa이며, 연료압력에 의한 분무특성 해석 시에는 3, 4 및 5MPa이다. 그리고 분무실내 분위기압은 0.5, 1 및 2MPa로 하였다. 연료 분사 시의 니들 리프트는 0.1mm이고 상사 확대에 의한 노출색 공간의 확장을 고려하여 분사시간은 80ms로 하였다.

인젝터 내 기포거동의 촬영속도는 30frames/s이며, 분무양상의 촬영속도는 1000frames/s이다. 그리고 PDPA 기법의 촬영위치는 인젝터 끝단으로부터 10mm지점이며, 사용된 LPG 연료는 부탄 100%의 자동차용 연료이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료 고압화에 따른 기포발생 억제효과

Fig. 4는 연료의 공급압력 변화에 따른 인젝터 내 기포거동을 가시화한 일례이다.

그림에서 보는 바와 같이, 인젝터 주변 온도가 증가하여도 연료의 공급압력을 증가시키기에 따라 인젝터 내 기포발생이 현저히 감소하는 경향을 나타낸다. 일례로 상기 조건에서 인젝터 주변 온도가 373K 일 때, 연료압력을 0.8MPa에서 0.9MPa로 증가시키면 인젝터 내 기포발생은 대략 20%정도 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고 인젝터 내 기포발생이 있더라도 동일조건에서 연료의 공급압력을 1.1MPa이상으로 높이면 인젝터 내 모든 기포가 순간적으로 액상으로 전환된다. 마찬가지로 인젝터 주변 온도가 393K일 때, 연료압력을 1.5MPa이상으로 가압하면 인젝터 내 기포발생이 억제됨을 확인할 수 있다. 이런 현상은 연료의 고압화가 인젝터 내 기포발생을 억제시킬 수 있는 효과적인 방법임을 의미하는 것이다.

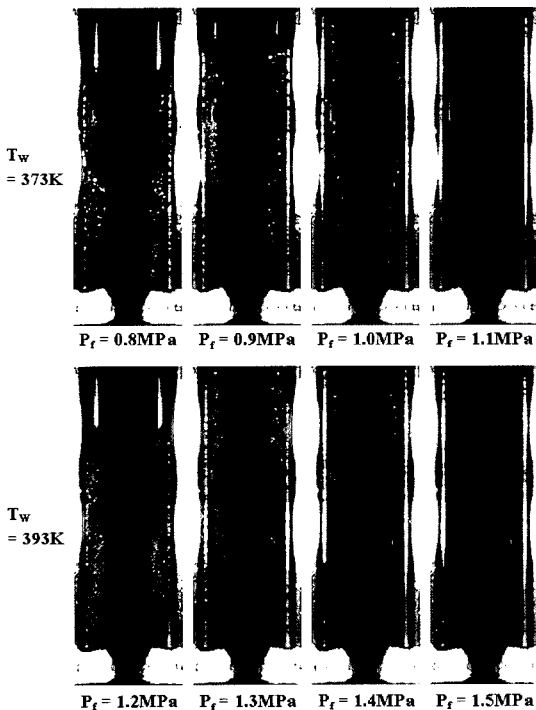


Fig. 4 Behaviors of bubbles in the injector for the change of fuel pressure

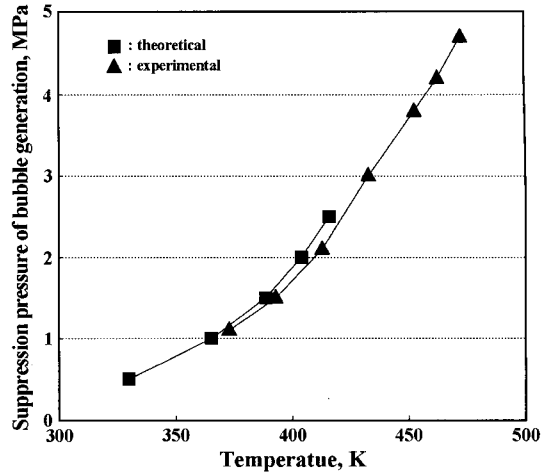


Fig. 5 Suppression pressure of bubble generation according to temperature of an injector wall

Fig. 5는 이와 같은 인젝터 주변 온도에 따른 기포 발생 억제압력의 이론치 및 실험치를 나타낸 것이다. 여기서, 인젝터 주변 온도는 373K에서 473K까지 단계적으로 증가시켰다. 그림에서 측정된 기포 발생 억제압력이 이론값과 다른 것은 실험에서의 측정온도가 연료의 온도가 아니라 인젝터 가열부의 온도인데 기인한 것이다.

그림에서 보는 바와 같이, 인젝터 주변 온도가 증가함에 따라 LPG 연료의 포화증기압의 증가로 기포발생 억제압력이 증가함을 확인할 수 있다. 그리고 그림의 선도에서 위쪽부분은 기포발생이 억제되는 영역이다. 이는 임의의 벽면 온도에서 연료의 공급압력을 그림의 선도보다 높게 가압하면 기포발생을 억제할 수 있음을 의미하는 것이다.

이러한 사실로부터 기관의 실린더 헤드부 평균 벽면 온도를 고려할 때,^{8,9)} 연료압력을 5MPa이상으로 가압하면 근본적으로 기포발생이 억제됨을 알 수 있다. 또한, 직접분사식 인젝터의 삽입위치까지 고려한다면 3MPa이상의 연료압력으로도 충분히 기포발생을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 기포발생 유무에 따른 분무특성

Fig. 6은 인젝터 내 기포발생 유무에 따른 액상 LPG 연료의 분무거동을 시간경과에 대해 나타낸 것이다. 여기서, 연료의 분사압력은 2.5MPa이고 분위 기압은 0.5MPa이다.

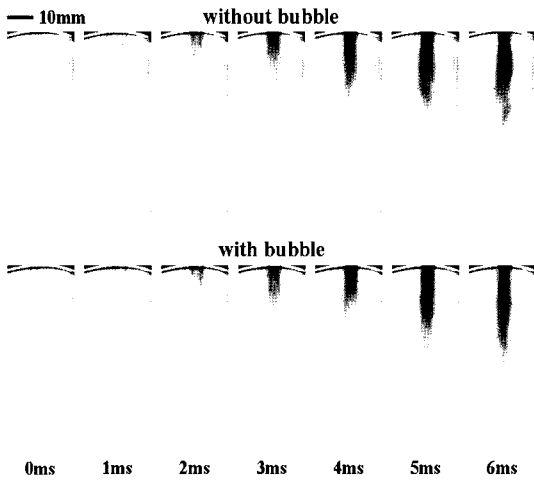


Fig. 6 Spray development with lapse of time with bubbles and without bubbles at $P_w=0.5\text{MPa}$ and $P_f=2.5\text{MPa}$

그림에서 보는 바와 같이, 인젝터 내 기포발생 유무에 따른 분무거동은 별다른 차이를 보이지 않는다. 이는 분무거동을 좌우하는 연료의 분사압 및 분무장의 분위기압이 동일하며, 발생된 기포는 부력에 의해 위로 상승하여 분사되는 것은 대부분 액상이기 때문에 판단된다. 다만 기포발생이 없는 경우의 분무퍼짐이 기포발생이 있는 경우보다 다소 큰 경향을 나타낸다. 이는 인젝터 주변 온도가 다른 데 기인하는 것으로 기포발생 유무에 의한 영향이라고 설명하기는 곤란하다.

Fig. 7은 기포발생 유무에 따라 PDPA 시스템으로 측정한 분무도달거리 및 분무입경을 나타낸 것이다. 여기서, 분무장의 분위기압은 0.5MPa 이다. 분무도달거리는 가시화 결과를 이미지 처리하여 측정된 결과로서 분사 직후 7ms 시점에 대한 것이다.

그림에서 보는 바와 같이, 기포발생이 없는 경우의 분무도달거리가 기포발생이 있는 경우보다 다소 큰 값을 나타낸다. 이는 기포발생이 있는 경우, 인젝터 주변 온도가 높아 LPG 연료가 보다 쉽게 기화되기 때문에 판단된다. 그러나 연료의 분사압이 증가할수록 그 차이는 다소 감소하는 양상이다. 연료 분사압 2.5MPa 에서 기포발생이 없는 경우, 분무도달거리는 기포발생이 있는 경우보다 대략 11.5% 정도 큰 분무도달거리 값을 보인다.

분무입경은 인젝터 내 기포발생이 있는 경우가 없는 경우보다 대략 $2.5\sim 4.3\%$ 정도 작은 값을 보인다.

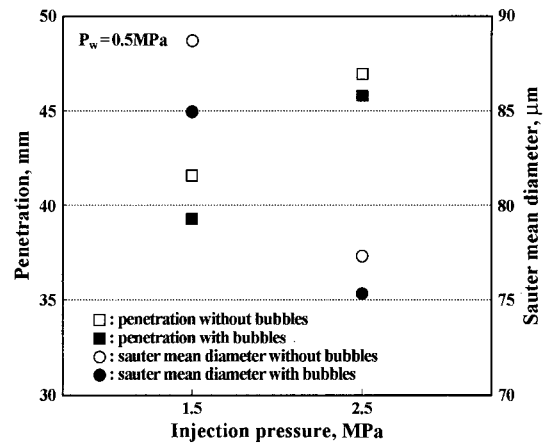


Fig. 7 Penetration and sauter mean diameter with bubbles and without bubbles at $P_w=0.5\text{MPa}$

다. 이는 전술한 바와 같이, 기포발생이 있는 경우에 연료의 기화가 쉽기 때문에 판단된다. 그리고 연료의 분사압이 증가할수록 그 차이는 감소한다.

3.3 연료의 분사압력 및 분위기압 변화에 따른 분무특성

Fig. 8은 연료의 분사압력 및 분위기압 변화에 따른 액상 LPG 연료의 분무거동을 가시화한 결과이다. 가시화 시점은 분사 후 7ms 시점이며, 인젝터 주변 온도는 373K 이다.

그림에서 보는 바와 같이, 연료압력이 증가할수록 연료의 운동에너지가 증가하여 분무거리도 증가한다. 또한, 분무속도의 증가에 의해 항력이 커져 분무퍼짐도 증가하는 것으로 확인할 수 있다.

분위기압의 증가에 대해서는 분무거리는 감소하고 분무퍼짐은 확연히 커지는 경향을 볼 수 있다. 이는 분위기압이 증가하면 밀도가 커져 분무저항으로 작용하기 때문으로 사료된다.

Fig. 9는 연료압력 및 분위기압 변화에 대한 분무도달거리를 정량적으로 구한 것이다. 여기서, 인젝터 주변 온도는 373K 이다.

그림에서 보는 바와 같이 전반적으로 연료압력이 증가할수록 분무도달거리는 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 이는 연료압력이 증가할수록 분무속도가 상승하여 분무입자의 운동에너지가 증가하는데 기인하는 것이다. 대략 연료압력이 2MPa 증가하는 경우 분무도달거리는 각각의 분위기압에 대해

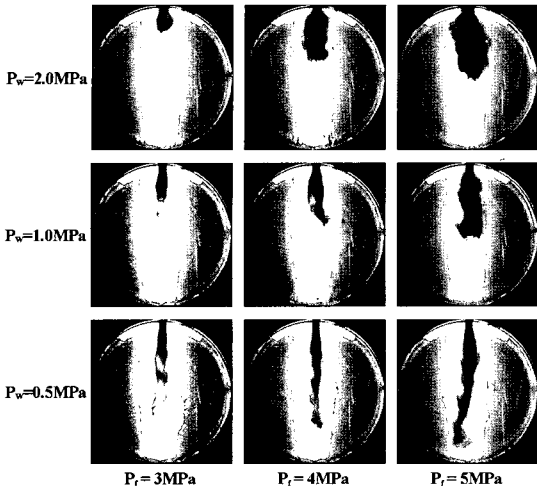


Fig. 8 Images of spray according to ambient pressure and injection pressure

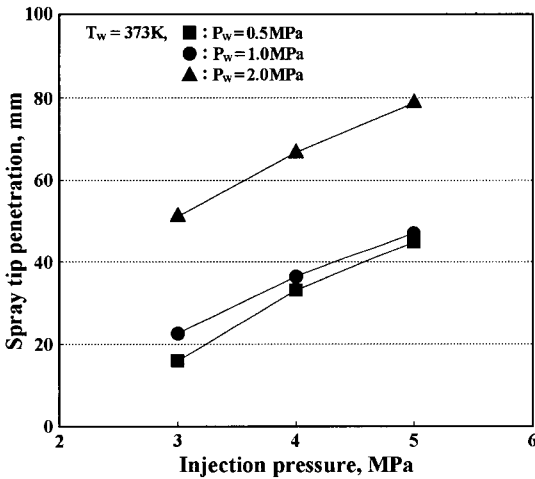


Fig. 9 Spray tip penetration according to fuel injection pressure

약 53.4%, 107.6% 및 188.5% 정도 향상되었다.

고압 분무실의 분위기압이 증가할수록 분무저항이 커져 분무도달거리는 짧아진다. 기포발생을 근본적으로 억제할 수 있는 연료압력 5MPa의 경우, 분위기압이 0.5MPa에서 2MPa로 증가하면 분무도달거리는 43.5% 정도 감소하였다.

Fig. 10은 연료압력 및 분위기압 변화에 대한 분무각을 나타낸 것이다.

분무각도 연료압력이 증가할수록 지속적으로 증가하는 경향이다. 분위기압의 증가에 대해서도 분

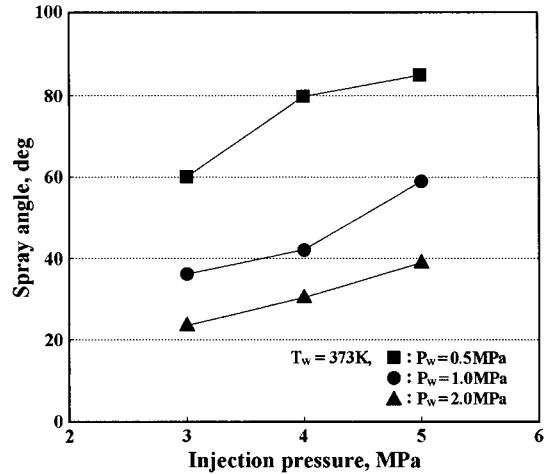


Fig. 10 Spray angle according to fuel injection pressure

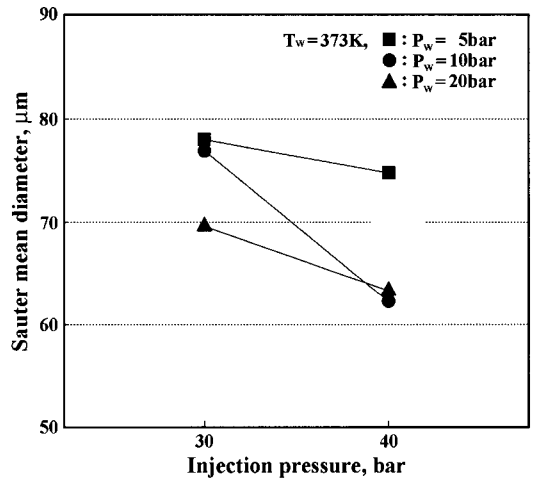


Fig. 11 Sauter mean diameter according to fuel injection pressure

무도달거리와는 반대로 분무각이 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 연료압 및 분위기압이 증가할수록 상대적인 항력이 증가하여 분무퍼짐으로 이어지기 때문으로 판단된다. 대략적으로 연료의 공급압력이 2MPa 증가함에 따라 각각의 분위기압에 대해 분무각은 62.5%, 63.9% 및 41.7% 정도 증가함을 보였다.

Fig. 11은 Fig. 9 및 10과 동일한 조건에서 PDPA 기법에 의해 측정된 분무입경을 나타낸 것이다.

전반적으로 분무입경은 분사압 및 분위기압이 증가할수록 감소하는 경향이다. 이는 분무속도의 증가 및 분무실의 밀도증가로 인해 분무액적의 분할

이 원활해지기 때문으로 판단된다. 한편, 동일한 분사압력에 대해서 상사 확대에 의한 분사공 지름의 증가로 본 실험의 분무입경은 실제보다 다소 클 것으로 생각된다.

이상과 같이, 액상 LPG 직접 분사 인젝터의 삽입 위치를 고려하면 연료압력 3MPa로도 인젝터 내 기포발생을 충분히 억제할 수 있지만 연료의 분무특성 및 연료펌프의 압축효율 등을 고려하여 적정 분사압력을 파악해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

- 1) 인젝터 주변 온도의 증가에 대하여 인젝터 내 기포발생은 현저하며, 이에 따라 인젝터 내 기포발생 억제압력이 증가한다.
- 2) 인젝터 내 기포발생이 있더라도 액상 LPG 연료의 공급압력을 기포발생 억제압력 이상으로 가압하면 기포는 모두 액상으로 상변화한다.
- 3) 기관의 실린더 벽면 온도를 고려할 때 액상 LPG 연료의 공급압력을 5MPa 이상으로 가압하면 근본적으로 기포발생을 억제할 수 있으며 인젝터의 삽입 위치를 고려하면 공급압력 3MPa 이상의 압력으로도 기포발생을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) 연료압력 3MPa에서도 인젝터 내 기포발생을 억제시킬 수 있으나 연료펌프의 압축효율 및 고압화에 따른 분무특성 향상효과 등을 고려한 적정 분사압력을 파악해야 할 것으로 판단된다.
- 5) 기포발생 유무에 따른 분무거동은 유사한 경향으로 보이나, 분무입경은 기포발생이 있는 경우 연료의 기화가 용이하여 기포발생이 없는 경우보다 대략 2.5~4.3% 정도 작은 값을 가진다.
- 6) 연료압력을 증가시킬수록 분무도달거리 및 분무각은 증가하는 경향이다. 분위기압의 증가에 대해서는 분무각은 증가하고 분무도달거리는 짧아진다. 또한 분무입경은 연료압력 및 분위기압 증가에 대하여 감소하는 경향이다. 대략 분위기압 2MPa에서 연료압력을 2MPa 증가시키면 분무도달거리와 분무각은 각각 188.5% 및 41.7% 증가한다.

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 48-02, pp.15-18, 2002.
- 2) R. Sierens, "An Experimental and Theoretical Investigation 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) 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 20035038, 2003.
- 5) K. C. Noh and J. T. Lee, "Visualization and Analysis of Bubbling Phenomenon in the Injector of LPDi Engine," KSME03-F078, pp.454-459, 2003.
- 6) K.-C. Noh and J.-T. Lee, "An Analysis of Bubbling Phenomenon in Injector for the Shape of Needle in LPDi Engine," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.137-142, 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) Y. Ryu, S. W. Wei and J. T. Lee, "Measurement and Analysis of Instantaneous Surface Temperature and Unsteady Heat Flux at Combustion Chamber of DOHC Gasoline Engine; Piston," Transactions of KSAE, Vol.7, No.2, pp.8-18, 1999.