

GDI 엔진에서 미립화 특성

노 수 영 교수 · 충북대학교 농기계공학과

세계적으로 지구온난화에 따른 CO₂배출규제는 가능한 한 내연기관에서 연료를 적게 소비해야 하고, 또 환경오염에 따른 각종 오염물질의 배출 교제는 가능한 한 내연기관에서 오염물질의 배출의 저감을 요구하고 있다.

이에 따라 오랫동안 사용되어 온 가솔린 엔진과 디젤엔진의 각각의 장점만을 채택하는 하이브리드(hybrid)엔진의 구상이 오래 전부터 시도되어온 결과 중의 하나가 연소실에 가솔린 연료를 직접 분사하고 스파크 점화에 의해 연소시키는 엔진의 출현이 가능해졌다. 이와 같은 개념에 기초한 엔진을 보통 가솔린 직접분사(GDI: gasoline direct injection)엔진이라고 부르기도 하고 직접분사 스파크 점화(DISI: direct injection spark ignition)엔진이라고 부르기도

한다. 아무래도 후자가 더 실질적인 내용을 쉽게 전달하는 명칭으로 느껴지지만 여기서는 편의상 GDI 엔진이라고 부르기로 한다.

GDI 엔진에 대해 1999년까지 세계적인 발전 현황 및 추세에 대한 자세하고 방대하며 유익한 총설이 Zhao등[1]에 의해 발표되었다. 또 GDI 엔진에서 분무와 연소모델링에 대한 총설이 최근에 Fan과 Reitz[2]에 의해 발표되었다. 사실상 이 두 총설을 참고하면 GDI 엔진에 대해 관심이 있는 학계의 연구자나 산업계의 기술자 모두 나름대로의 연구 또는 개발방향을 설정할 수 있을 것으로 생각된다.

여기서는 GDI 엔진에서의 미립화 및 분무 특성에 국한하여 검토할 것을 목적으로 하기 때문에 검토대상의 연구 논문을 위에 언급

한 두개의 총설 논문과 달리하기 위하여 ICLASS 2000 (International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems), ILASS-Asia 98, ILASS-Asia 99, ILASS-Americas 98, ILASS-Americas 99, ILASS-Europe 99, ILASS-Europe 2000에 발표된 최근의 논문들을 선택하여 검토하기로 한다.

근래 생산되는 GDI 엔진에서는 대부분이 압력-선회 분사기를 이용하며 두가지 연료 조성방식을 사용한다.

즉, 냉시동의 경우나 고부하 운전의 경우에는 연료를 흡입과정 중에 일찍 분사하여 균일혼합기를 만들어 연소시키고 저부하 운전의 경우에는 압축과정 중에 늦게 분사하여 층상화된 혼합기를 조성하여 희박연소를 하고 있다. 스파크 플러그 주위에 점화

가능한 혼합기를 존재하도록 하고 빠른 화염전파를 확보하기 위하여 적당한 연료의 증상을 조성한다.

미립화 및 분무특성을 검토하기 위해서는 분사기(injector 또는 atomizer)의 종류에 따라 분류하여 설명하는 것이 바람직하다. 현재 GDI엔진에서 사용되고 있거나 연구되고 있는 분사기로는 공기보조 분사기(air-assisted atomizer)[3,4], 압력-선회 분사기(pressure-swirl atomizer)[5-19], 단공 및 다공노즐[20-22], 정전대전 노즐[23,24] 등이 있으므로 모두 검토하는 것이 바람직하다. 그러나 여기서는 지면관계로 가장 많이 사용되고 또 연구되고 있는 것으로 압력-선회 분사기와 앞으로 배기가스 규제에 대비하여 사용 가능성이 많다고 생각되는 공기 보조 분사기만을 개괄적으로 설명하고 이론 해석 및 모델링을 따로 마지막에 언급하기로 한다.

1. 공기보조 분사기

공기보조 분사기는 이류체 분사기(dual fluid injector)라고 부르기도 한다. 공기보조 분사기를 GDI 엔진에 응용하고자 하는 연구는 다음 절에서 논의할 압력-선회 분사기에 대한 연구

에 비해 많이 발표되지 않았다 [3,4].

Wigley 등[3]은 기존의 PFI 분사기에 공기분사기를 연결한 형태의 공기보조분사기에서 연료는 0.72MPa, 공기는 0.65MPa의 공급압력으로 작동된다. 이 분사기는 호주의 Orbital 엔진회사와 영국의 Lotus Engineering 및 Loughborough대학이 공동으로 연구된 것으로 이 연구에서는 대기압 하에서 분사될 경우 노즐 근처 영역에서 생성된 액적의 미립화 과정을 단발 CCD이미지와 PDA를 이용해서 측정하였다. 포펫 어깨 위치에서 액적의 평균 속도는 150m/s이고 액적 크기는 2마이크론 정도로 오리피스에서부터 포펫 어깨까지의 허리 영역에서는 재순환영역이 생긴다고 보고하였다. 그리고 노즐을 떠난 액적은 높은 수밀도, 높은 속도, 작은 액적으로 미립화는 효과적이지만 포펫 어깨 부분에 다시 액적이 부착하는 현상이 일어났다. 액적 크기 분포는 0-12 μm 사이의 작은 액적 크기 등급과 12-30 μm 사이의 큰 액적 크기 등급으로 확연히 차이가 있었다. 한편 Murdoch[4]등은 Wigley 등[3]의 경우와 같은 분사기와 운전조건에서 STAR-CD(version 3100A)를 이용하여 모델링을 하였다. 포펫 밸브

는 연료 분사 시작전에 열리고 연료 분사 후 오랫동안 열려 있는 것으로 가정하여 모델링하였다. 연료는 이소옥탄을 사용하고 노즐내부 유동 및 액적 크기 분포등을 계산하였다.

압력-선회 분사기의 경우 미립화를 위해 5-12MPa의 높은 가솔린 분사압력에 의존하지만 공기보조분사기의 경우 1MPa이하의 압력의 연료를 공기의 도움을 받아 전단하는 메커니즘으로 미립화를 촉진시키기 때문에 공기 보조 분사기를 이용할 경우 아주 최소한의 압력차로 아주 작은 입자크기(SMD < 20 μm , D0.9 < 40 μm)를 유지할 수 있는 가능성이 있다. 따라서 앞으로 점점 심해지는 배기가스 규제를 대비할 수 있는 분사기로 잠재력이 있다고 인정되어 계속 연구가 되어야 할 대상에 속한다.

2. 압력-선회 분사기

앞에서 설명한 공기보조 분사기를 이류체 분사기로 부르는 반면 압력-선회 분사기는 단일유체 분사기(single fluid injector)라고 부르기도 한다. GDI 엔진의 경우 이론적으로는 20~25%의 연료소비의 감소를 가져오지만 실제 유럽의 도로 시험 결과 10~12%의 감소가 입증되었다. 다공노즐을 GDI에

사용하게 되면 하나의 고정된 스파크로 점화될 때 불안정한 화염 핵(kernel)이 생성된다. 농후한 혼합기 영역이 희박혼합기 영역에 가까이 있기 때문에 화염면이 균일하게 연소실내에 전파되지 못한다. 따라서 가장 많이 연구되고 있고 세계적인 메이커들이 실제 상용으로 제작하고 있는 것이 압력-선회 분사기이다.

분무각 60°의 속빈 원추 노즐(hollow cone nozzle)에서 주변온도를 473 - 773K, 주변압력을 0.1MPa, 분사압력을 0.2-0.8MPa의 조건에서 증발하는 연료 분무의 액적과 증기분포를 광학적 흡수 및 산란의 원리에 기초한 이미지 기술에 의해 각각을 구분하여 측정 가능하였다[5]. 또 exiplex형광법으로 증기를 구분하여 측정한 연구도 있다[6].

3-7MPa의 분사압력에서 shadowgraphy에 의해 관통거리와 분무폭을 측정하고 PDPA로 액적 크기와 속도를 동시에 측정한 연구도 있다[7,8]. 분사압력이 증가하면 연료분사량이 증가하고 관통거리가 증가하며 주변압력이 증가하면 관통거리와 분무폭이 감소하는 경향을 보였다. 또 분사압력이 증가하면 ring vortex가 생겨 연료분무와 주위 공기의 혼합이 촉진된다.

SMD는 분사압력이 증가하면

감소하는 경향을 보였다.

디젤분무에서도 마찬가지로지만 조밀분무(dense spray)의 경우 기존의 광학적 방법으로는 분무의 특성을 측정하는 것이 어렵다. PDPA와 PIV의 경우 다중 광산란과 레이저 빔의 감쇄(attenuation) 및 조종(steering) 문제로 곤란을 받는다. 그런데 조밀 분무를 측정할 수 있는 새로운 측정방법의 하나로 레이저 유동표식(LFT: laser flow tagging) 방법이 제안되었다[9]. 이 방법은 연료내에 용해되어 있는 발광추적자(phosphorescent tracer)를 write laser beam으로 여기시켜 레이저에 의해 여기된 발광물질의 분자의 공간적 위치를 이미지로 카메라에 기록하는 방식이다. 단일 펄스레이저와 gated camera만 필요하므로 간단한 장치로 가능해진다. LFT의 경우 표식선(tagging line)의 길이와 폭이 충분히 길고 넓을 때 다중 광산란 문제는 거의 영향을 받지 않는다. 레이저 빔 감쇄는 표식선이 인식 되는 한 LFT의 측정에 영향을 주지 않는다. 레이저 빔 조종은 write laser beam의 공간적 위치가 이중 프레임 카메라에 의해 기록되기 때문에 중요한 인자가 되지 않는다.

또, 한편으로는 광산란에 기초

한 측정 방법은 분무의 공간밀도가 높은 조밀 분무에 적합하지 않기 때문에 개발된 방법으로 line-of-sight forward diffraction technique이 있다[10].

GDI 시스템의 문제점으로 높은 HC 배출, 분사기 막힘, 매연 발생 등이 거론되는데 이 문제를 해결하기 위하여 미립화에 미치는 노즐내부유동과 난류의 영향을 파악하기 위하여 실제 크기의 투명노즐을 만들어 캐비테이션의 발생 등을 해석한 연구도 있다[11].

9MPa의 분사압력으로 핀틀형의 압력선회 분사기에서 80μs 간격으로 사진을 촬영한 결과 0.3ms가량 분사지연이 존재하고 tip-part, rotating vortex, lenticular effect 등이 파악되었으며 관통거리는 1.8ms에서 60mm정도이었다. KIVA코드를 수정하여 모델링한 결과 관통거리와 분무패턴을 실험치와 거의 유사하게 모사할 수 있었다[12].

GDI 엔진에서 연료가 연소실 벽면에 충돌하는 것은 HC 배출의 증가와 가속 기간동안 연소상태에 영향을 주기 때문에 바람직하지 않다. 그러나 벽의 유도에 의한 층상급기 모드에서는 피스톤 벽에 가솔린 분무의 충돌은 성공적인 점화를 위해 스파크 플러그쪽으로 농후한 혼합기를 유

도해 주기 위하여 시도되고 있다. 따라서 기열된 판에 충돌되는 가솔린 분무의 특성을 연구하고[13] 더 나아가 motoring 엔진에서 분무구조의 가시화를 연구한 경우가 있다[14].

2D Mie 산란 방법을 이용하여 노즐 가까이의 조밀분무에서 GDI 분무의 1차 분열을 측정하는 연구가 있다[15]. 노즐 출구로부터 1mm에서 분무각을 시간에 따라(0-3ms) 측정한 결과 0.5ms이하에서 갑자기 증가하다가 그 이후에는 일정한 분무각을 나타내었다. 레일압력의 변화(2-10MPa)에 따라 액적의 농도가 분무의 중앙에서 증가되며 액막은 감지되지 않았다.

분사기 개발을 위한 연구에서는 선회포트의 개수는 미립화와 관통거리에 영향을 미치지 않는다고 알려져 있다. 보통 선회포트는 2-4개가 대부분이지만 균일한 분무 유동장을 얻을 목적으로 6개로 달리한 연구가 있다[16]. 결과적으로 20-25 μ m의 평균입경, 64-66°의 분무각을 얻을 수 있는 분사기를 개발하였다.

Abo-Serie 등[17]은 분무지연기간 이후에 분무의 발달과정을 4단계로 제안하였다. 1단계는 초기단계로 비대칭으로 거의 미립화가 안된 분류로 분사압력에 비례하는 분무선단 속도로 노

즐구멍의 중앙부를 관통하는 분무단계이다. 2단계는 비대칭 속찬(non-hollow)분무, 3단계는 여러층 구조로 되어 있는 선회가 발달되는 속빈 원추분무(hollow-cone spray), 그리고 4단계는 분사압력과 무관하게 거의 일정한 분무각을 갖는 완전히 발달된 속빈 원추 분무이다. 분사지연기간은 305-355 μ s이고 10 μ s 간격으로 0.2, 0.5, 0.7MPa에서 사진을 촬영한 결과 1단계에서 3단계까지는 기존의 방법으로 분무선단 관통거리를 측정하고 4단계에서는 최대 분무폭이 나타나는 거리로부터 노즐출구까지를 분무관통거리로 하였다.

그 이유는 관통거리는 일반적으로 노즐출구로부터 분무선단까지의 거리로 정의되며 이 정의는 대칭구조인 디젤분무에 적당하지만 분무구조가 시간에 따라 현저하게 변화하는 압력-선회분사기를 사용하는 가솔린 분무에는 적당하지 않기 때문이다. 또 액적형성모드는 두가지 즉 분사방향에서 액사에 의한 모드와 반경방향으로 wave crest stripping모드인 것으로 제안되었다.

한편 Nouri 등[18]은 2개의 선회포트에서 3-10 MPa로 분사될 경우 분사지연기간이 0.35ms로 분사기 설계와 분사

기 drive에 의해 코일에 공급되는 전압에 의존한다. 지연기간은 층상급기 운전을 위해 고속에서 정확한 분사시기에 중요하다. 위에서 언급한 Abo-Serie 등[17]의 경우와 달리 3단계 분무발달과정을 제안하였다. 즉, 초기분무는 연료액사와 액적이 중심에 긴 기둥으로 나오는 초기분무와 분사 후 0.5-0.6ms 사이에 노즐로부터 조밀한 분무인 주분무와 말기분무로 나누었다. 여기서 2개의 선회포트으로는 충분한 각속도를 만들어 내지 못한 결과로 강한 각운동량이 부족해서 완전한 속빈 원추 분무 구조를 보여주지 못하였으며 PDA측정에서 레이저 빔의 감쇄현상으로 측정에는 한계가 있다고 지적하였다. 주변 압력의 영향(0-1.29 MPa)을 파악하기 위하여 2D Mie 산란방법과 1D 선형 Raman 분광방법을 이용하여 실험한 결과 주변압력을 증가시키면 주 분무패턴이 속빈 원추분무에서 속찬 원추분무(solid cone spray) 형태로 되어 pre jet과 main jet의 구분이 없어진다[19]. 공기보조기와 압력-선회분사기의 분무특성을 비교한 연구도 발표되었다[25,26].

분무 모델링에서 사용된 코드를 분류하면 Ricardo 소프트웨어에서 개발된 VECTIS[27], FLUENT[28], FIRE[29],

KIVA-3V[12,30], CFD-ACE[31], STAR-CD[4] 그리고 Robert Bosch에서 자체개발한 코드[32] 등을 들 수 있다.

그러나 대부분의 모델링에서 액적분열길이, 액막두께 등에 관한 경험식을 이용하고 있지만 각각의 상수들이 아직 정립되어 있지 않은 상태이다. 따라서 4개의 선회 포트를 가지는 압력-선회 분사기에서 물을 0-7MPa의 압력으로 분사하여 액체의 전기전도도를 이용하는 방법으로 액막의 두께와 액적의 분열길이를 측정 한 후 기존의 저압에서의 경험식과 비교하여 새로운 식을 제안한 최근의 연구가 있다[33].

유량계수와 분무각은 분사압력이 증가함에 따라 변화하지 않지만 액막두께는 완만하게 감소하며, 액적 분열길이는 1 MPa까지 급격히 감소한 후 그 이후 완만하게 감소한다. 기존의 경험식과 비교한 결과 실험치와 전혀 맞지 않는다는 사실을 보고하고 있다.

또 Cousin과 Nuglisch[34]는 GDI 엔진용 압력-선회 분사기에서 분사된 분무의 평균입경을 예측할 수 있는 방법을 이론적인 분석을 통해 제시하였다. 간략화한 노즐 내부유동모델을 유도하고 액막 분열에 대해 선형적 이론을 도입한 후, 액적 크기를 예측할 수 있는 식을 제안하

였다. PDPA로 노즐출구에서 15 mm아래 쪽에서 측정 한 SMD와 이론적으로 계산한 SMD를 비교한 결과 최대 17% 정도 오차를 가지는 바람직한 데이터를 보고하고 있다.

3. 결론

GDI 엔진에서 가장 많이 연구되고 있는 공기보조 분무기와 압력-선회 분무기에 대해 분무특성을 검토하였다.

공기 보조 분사기의 경우는 공기 압력을 0.6-1MPa로, 연료 압력은 공기압력보다 대부분 0.1MPa정도 높은 압력으로 분사하고 분사지속기간은 4-7ms를 채택하고 있다. 한편 압력-선회 분사기의 경우는 연료 분사 압력을 5-12MPa의 고압으로 분사하고 분사지속기간은 0.5-4.5ms정도를 사용하고 있다. 두 분사기의 경우 모두 노즐 출구에서 가까운 조밀분무의 경우 분무 특성을 파악하는 것이 제한되어 있으며 기초적인 분무특성 즉 분열길이, 액막두께 등의 관한 실험적 및 이론적 연구가 필요한 실정이다.

공기보조 분사기의 경우 점점 심해지는 배출가스 규제에 따라 액적 직경을 현재 수준보다 더 작은 액적이 요구될 경우를 대비 할 수 있는 분사기로 잠재력이

있다고 인정되어 계속 연구가 되어야 할 대상에 속한다.

〈참고문헌〉

1. Zhao, F., Lai, M.C. and Harrington, D.L., Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engine, Prog. Energy Combust. Sci., Vol.25, 1999, pp.437-562.
2. Fan, L. and Reitz, R.D., Spray and Combustion Modeling in Gasoline Direct-Injection Engines, Atomization and Sprays, Vol.10, 2000, pp.219-249.
3. Wigley, G., Heath, J. and Pitcher, G., Droplet Velocity and Size Fields in the Near Nozzle Region of a Dual Fluid Gasoline Direct Injector, Eighth Int' l Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Pasadena, USA, July 2000, pp.480-486
4. Murdoch, P., Wigley, G., Heath, J., and Pitcher, G., A Combined CFD and Experimental Analysis of the Spray Produced by an Air-Assisted GDI Injector, ILASS-Europe 2000, Darmstadt 11-13 Sept. 2000, pp. I.1.1-I.1.6
5. Zhang, Y.Y., Nomura, S., Yoshizaki, T. and Nishida, K.,

- Preliminary Experiment for Imaging Droplets and Vapor Distribution in an Evaporating Fuel Spray, ILASS-Asia 99, Yongin, Korea, 1-2 Oct. 1999, pp.117-122.
6. Choi, D.S., Hwang, S.C. and Kim, D.J., Effects of Ambient Temperature and Pressure on Vaporizing Sprays from a High-Pressure Swirl Injector, ILASS-Asia 99, Yongin, Korea, 1-2 Oct. 1999, pp.131-136
 7. Lee, C.S., Lee, K. H., Chon, M.S. Kim, Y.H. and Park, J.S., A Study on the Spray Structure of High Pressure Gasoline Injection, ILASS-Asia 98, Gunma, Japan, Dec. 1998, pp.37-42.
 8. Lee, C.S., Chon, M.S., Kim, M.K. and Choi, S.C., Effect of Injection Pressure on Spray Characteristics of High-Pressure Gasoline Injector, ILASS-Asia 99, Yongin, Korea, 1-2 Oct. 1999, pp.149-154
 9. Krugger, S. and Grunefeld, G., Flow Tagging Measurements in Dense Gasoline Direct Injection Sprays, ILASS-Europe 2000, Darmstadt, 11-13 Sept. 2000, pp.V.7.1-V.7.6
 10. Boyaval, S. and Dumouchel, C., Experimental Investigation on the Drop Size Distribution of Sprays Produced by GDI Injectors, ILASS-Europe 2000, Darmstadt, 11-13 Sept. 2000, pp.V.9.1-V.9.6
 11. Allen, J. and Hargrave, G., Fundamental Study of In- Nozzle Fluid Flow and Its Effect on Liquid Jet Break-up in Gasoline Direct Injectors, ILASS-Europe 2000, Darmstadt, 11-13 Sept. 2000, pp. I.4.1-I.4.5.
 12. Alfuso, S., Allocca, L, Bella, G. and Rotondi, R., Experimental and Numerical Study of a GDI Swirl Injector, ILASS-Europe 2000, Darmstadt, 11-13 Sept. 2000, pp.I.2.1-I.2.6
 13. Lai, M.C., Park, J., Xie, X, Im K.S., and Kim, H., Characteristics of Direct Injection Gasoline Spray Wall Impingement at Elevated Temperature Conditions, ILASS-Americas 99, Indianapolis, USA, May 1999, pp.195-199.
 14. Yoo, J.H., Kim, S.K. and Lai, M.C., Visualization of Direct- Injection Gasoline Spray Structure inside a Motoring Engine, ILASS-Americas 98, Sacramento, USA, May 1998, pp. 101-105
 15. Schmitz, I., Ipp, W. and Leipertz, A., Microscopic Investigations of Primary Gasoline Spray Breakup of a High-Pressure Swirl Injector, Eighth Int'l Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Pasadena, USA., July 2000, pp.1215-1220
 16. Park, Y.K., Moon, S.Y. and Lee, C.W., Spray Characteristics of a Gasoline Direct Swirl Injector, Eighth Int'l Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Pasadena USA, July 2000, pp. 1221-1226
 17. Abo-Serie, E., Arcoumanis, C. Gavaises, M., Argueyrolles, B. and Galzin, F., Structure of Sprays Generated by Pressure Swirl Injectors for Direct-Injection Gasoline Engines, ILASS-Europe 99, Toulouse 5-7, July 1999.
 18. Nouri, J.M., Brehm, C. and Whitelaw, J.H., The Spray from a Gasoline Direct Injector, ILASS-Europe 99, Toulouse 5-7 July, 1999.
 19. Egermann, J. Ipp, W., Rabenstein, F., Wensing, M. and Leipertz, A., Spray Formation and Evaporation of

- High Pressure Swirl Atomizers for Gasoline Direct Injection, ILASS-Europe 99, Toulouse 5-7 July, 1999.
20. Arndt, S., Gartung, K., Pauer, T., Staudt, M. and Renz, U., Analysis of High Pressure Sprays for Diesel and SI Engines with Direct Fuel Injection: Evaluation of Evaporation and Spray Induced Turbulence Part I: Influence of Spray Induced Air Flow on Spray Structure and Mixture Preparation, ILASS-Europe 2000, Darmstadt, 11-13 Sept. 2000, pp. I.3a.1-I.3a.7
21. Arndt, S., Gartung, K., Pauer, T., Zeh, D. and Druggemann, D., Analysis of High Pressure Sprays for Diesel and SI Engines with Direct Fuel Injection: Evaluation of Evaporation and Spray Induced Turbulence Part II: Spray Evaporation and Quantification of the Local Fuel Air Ratio Inside the Spray, ILASS-Europe 2000, Darmstadt, 11-13 Sept. 2000, pp.I.3b.1-I.3b.7
22. Park, J.B., Hyun,G.S., Lee, D.Y. and Goto, S., Simultaneous Observation of Liquid and Evaporated State of Butane Spray at Direct Injection SI Engine Conditions, ILASS-Asia 99, Yongin, Korea, 1-2 Oct. 1999, pp.137-142.
23. Nhumaio,G.C.S., Watkins,A.P. and Shrimpton, J.S., Application of Electrostatically Charged Sprays in Gasoline Direct Injection Engines Using Plain Orifice Atomizers, Eighth Int' l Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Pasadena, USA, July 2000, pp.728-735.
24. Nhumaio, G.C.S. and Watkins, A.P., Effects of In-Cylinder Wall Material in a Gasoline Direct Injection Engine Using a Plain Orifice Electrostatic Atomizer, ILASS-Europe 2000, Darmstadt, 11-13 Sept. 2000, pp.I.6.1-I.6.6.
25. Wigley, G., Hargrave, G.K. Allen, J. and Heath, J., Initial Comparison of Single and Dual Fluid Injectors for Gasoline Direct Injection Engines, ILASS-Europe 99, Toulouse 5-7 July, 1999
26. Jang, C. and Choi, S., Comparison of the Overall Performance Between an Air-Assisted Fuel Injector and a High-Pressure Swirl Injector, Eighth Int' l Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Pasadena USA, July 2000, pp.1227-1233
27. Comer, M.A., Bowen, P.J., Bates, C.J. and Sapsford, S.M., CFD Modelling of Direct Injection Gasoline Engine, ILASS-Europe 99, Toulouse 5-7 July, 1999.
28. Hu, X., and Moriyoshi, Y., Numerical Analysis of Fuel Spray Formation Process in a Swirl-type Injector, ILASS-Asia 98, Gunma, Japan, Dec. 1998, pp. 31-36
29. Ren, W.M. and Nally, S., Computation of the Hollow Cone Spray from Pressure-Swirl Injector, ILASS-Americas 98, Sacramento, USA, May 1998, pp.115-119
30. Beale, J.C., Kong, S.C. and Reitz, R.D., Modeling Fuel Spray Process Using the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor Hybrid Atomization Model, ILASS-Americas 99, Indianapolis, USA, May 1999, pp.183-187
31. Jang, C. and Choi, S., CFD Evaluation of the Effect of Internal Flow on Spray

- Characteristics of High Pressure Swirl Injectors, Eighth Int'l Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems, Pasadena USA, July 2000, pp.1192-1197.
32. Arndt, S., Gartung, K., Hubel, M. and Redlich, A., Computational Analysis of Spray Propagation and Evaporation Applied to Gasoline-Direct Injection Including a Continuous Multicomponent Model for Gasoline Fuel, ILASS-Europe 99, Toulouse 5-7 July 1999
33. Cousin, J., Vich, G., Nally, J.F., Formation and Primary Breakup of Conical Liquid Sheets Discharged by Pressure Swirl Injectors. Experimental and Theoretical Investigation, Eighth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Pasadena, CA, USA, July 2000, pp. 284-291.
34. Cousin, J. and Nuglich, H.J., Prediction of Characteristics of Sprays Produced by High Pressure Swirl Injectors, ILASS-Europe 99, Toulouse 5-7, July 1999
- 〈노수영편집이사 : sooyoung@cbucc.chungbuk.ac.kr〉