

측정방법에 따른 핀틀형 가솔린 인젝터의 분무각 비교

Comparison of Spray Angles of Pintle-Type Gasoline Injector with Different Measuring Methods

김재호*, 임정현*, 노수영**, 문병수***, 김주영****, 강경균****
K.J.Kim, J.H.Rhim, S.Y.No, B.S.Moon, J.Y.Kim, K.G.Kang

Abstract

Spray angle, a parameter which is most commonly used to evaluate spray distribution, is important because it affects the axial and radial distribution of the fuel. Spray angles were measured and compared for the pintle-type gasoline fuel injector with n-heptane as a test fuel with the three different measuring techniques, i.e. digital image processing, shadowgraphy and spray patternator, respectively. Fuel was injected with the injection pressures of 0.2-0.35MPa into the room temperature and atmospheric pressure environment.

In digital image processing method, the transmittance level greatly influences the spray angle with the axial distance from the injector. From the experimental results by the shadowgraphy technique, it is obvious that the spray angle vary during the injection period. The results of spray angle from the spray patternator show that there exist the different spray angles in the different areas. The spray angles increase with the increase in the injection pressure for the three measurement techniques considered in this study. The spray angle is widely different, especially in the near region from the injector, according to the measurement techniques used in this experimental work.

주요기술용어 : spray angle(분무각), pintle-type injector(핀틀형 인젝터), digital image processing(디지털 영상처리), shadowgraphy(그림자 사진), spray patternator(분무 패턴데이터)

1. 서론

분무구조를 나타내는 주요 매개변수는 분무각, 분열길이, 액적크기 분포, 분무선단 도달거리 등이 있다. 이 중에서 분무각은 분무의 분포를 평가하는 가장 중요한 매개변수이다. 분무각은 평면상에서 노즐팁 중심과 노즐팁으로

부터 어떤 규정된 거리에서의 수평선과 분무윤곽(경계)이 교차하는 점을 잇는 두 직선이 이루는 각으로 정의되며 분무의 축방향 또는 반경방향의 분포를 평가하는 매개변수로서 엔진의 연소효율 및 배출가스의 상태에 영향을 준다. 분무각은 노즐의 구조, 연료의 물리적 특성, 주위가스, 분사순간에 있어서 연료 및 주위가스의 유동특성의 지배를 받는다.

분무의 외부형태는 분무시 분무액체와 주위기체와의 상호 작용과 주위기체의 분무내 유입에 의하여 곡선형태의 경계를 이루며, 이는 분무각 측정을 어렵게 하는 주요 원인이 된다.

분무각 측정방법 중에서 하나의 방법은 노즐

* 정희원, 충북대학교 대학원
** 정희원, 충북대학교 농업기계공학과
*** 정희원, 충북대학교 기계공학과
**** KEFICO 기술연구소

의 중심선에서 같은 거리로 두 개의 프로브(probe)를 설치하고 프로브가 분무의 가장자리에 접촉할 때까지 이동하여 분무의 폭을 측정하여 분무각을 계산한다.⁽¹⁾

다른 방법으로는 플래쉬 램프와 빛이 흐러지는 빛 확산종이(diffusion paper)를 설치하여 후방조명방법을 사용하여 분무의 그림자를 CCD 또는 스틸(still) 카메라로 찍어 디지털 이미지를 얻고 이를 그래픽 해석 소프트웨어를 사용하여 분무각을 측정한다.^(2,3,4,5) 이러한 방법들은 분무의 이미지를 투과율기준(transmittance criteria) 80%⁽²⁾ 또는 95%⁽³⁾로 하여 얻은 분무의 경계를 이용하여 분무각을 측정한다. 최근에는 섀도우그래피(shadowgraphy)⁽⁶⁾, 실리렌(schlieren)⁽⁷⁾ 이미지 시스템 등의 광학진단장치를 이용하여 분무각을 측정하기도 하였다. 다른 분무각측정 방법으로는 패턴내이터(patternator)에 의한 상대체적 분포(relative volumetric distribution)에 의하여 체적반경(volumetric radius)을 구하여 분무각을 계산하는 방법이 있다^(8,9). 일반적으로 분무각은 노즐팁의 중심과 노즐팁으로부터 어떤 거리에 있는 원추형 분무의 외부 표면의 한 점으로 이루어진 직선을 분무의 양쪽에 그어 두 직선이 이루는 각으로 측정하였다. 분무각 측정시 노즐팁으로부터 거리를 연구자마다 임의적으로 정하여 분무각을 측정하기 때문에 동일한 분무에 대하여 연구자마다 분무각이 다른 결과를 나타내고 있다. 또한 분무와 주위기체와의 경계가

불분명하여 동일 분무에 대하여 연구자에 따라 분무의 크기(경계)가 다르고 이에 따라 측정된 분무각이 서로 다른 결과를 초래한다.

본 연구에서는 분무각 측정에 활용되고 있는 여러 가지 방법 중에서 디지털 이미지 프로세싱(digital image processing), 섀도우그래피, 패턴내이터 방법을 이용하여 가솔린 엔진에 응용되는 핀틀형 인젝터의 분무각을 3가지 방법으로 각각 측정하여 비교함으로써 가솔린 기관용 핀틀형 인젝터에 있어서 합리적인 분무각 측정방법을 제시하는 데 그 목적이 있다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig.1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도이며, 실험장치는 패턴내이터, 디지털 이미지 시스템, 섀도우그래피 시스템으로 구분된다.

2.1 디지털 이미지 시스템

디지털 이미지 시스템은 스트로브 스크로프, 디지털 비디오 카메라, 프레임 그래버 보드(frame grabber board), 이미지 처리 소프트웨어(image processing software), 컴퓨터 등으로 구성된다. 인젝터에서 연료가 분사되는 동안 분무의 뒷편에 스트로보스코프를 설치하고 720 × 480 픽셀의 3-CCD 비디오 카메라(DCR-VX1000)로 분무를 촬영하고, 프레임 그래버 보드(DVBK-W2000)로 이미지를 획득하여 획득된 이미지를 PC에 저장하였다.

투과율은 영상의 히스토그램(histogram)의 두점을 선택하여 스트레칭(stretching)한 후 문턱값(threshold value)을 이용하여 얻어진다. 이미지처리 소프트웨어(PHOTOSHOP)를 사용하여 투과율기준에 따라서 2진화 처리하였다. 투과율 기준은 75%, 80%, 85%의 3개의 수준으로 2진화 처리하였으며 2진화 처리된 이미지에 노즐 팁으로부터 10mm간격으로 직선을 긋고, 직선과 거리별 분무경계가 만나는 점과 노즐팁의 중심과의 각도를 산출하여 분무각을 구하였다.

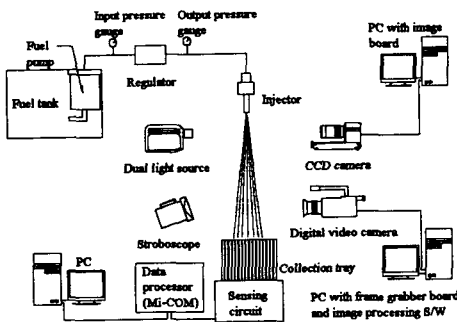


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

2.2 웨도우그래피 시스템

웨도우그래피는 PMAS 시스템(Particle Motion Analysis System, V-tek Co., Korea)의 거시적 측정방법을 이용한 것으로 광원, 필드렌즈(field lens), CCD카메라, 프레임 그래버 보드, 시간 제어 보드(time control board), 컴퓨터, PMAS 소프트웨어로 구성되어 있다. 광원은 발광시간(<50 ns)이 짧은 이중광원을 이용하여 순간적인 입자의 이동을 화상으로 저장하며, 저장된 화상은 이미지처리 프로그램을 이용하여 입자의 거동을 해석한다.⁽¹⁰⁾ 노즐에서 연료가 분사됨과 동시에 시간제어보드에 의해서 주어진 시간이 경과하면 광원에서 발광하게 되고 이 빛에 의해서 분무의 이미지가 렌즈의 다이아프램을 통하여 CCD카메라에 전기신호로 입력되고 입력된 신호는 프레임 그래버 보드에 의해서 획득되고 이 이미지가 처리되어 출력된다.

연료의 분사압력을 0.2-0.35MPa로 변화시키고, 압력에 따라 이미지 획득시간을 분사후 2-6ms, 0.5ms단위로 하였다. 시간에 따라 획득된 이미지를 처리하여 시간별, 노즐팁으로부터 거리별로 분사각을 구하였다.

2.3 패터나이터

패터나이터는 연료공급장치, 인젝터, 분무수집장치, 컴퓨터 및 데이터 처리 소프트웨어로 구성된다.

연료공급장치는 연료탱크, 연료펌프, 연료필터, 레귤레이터, 압력계등으로 구성되며 시험연료로 노말헵탄(n-heptane)을 사용하였다. Table 1은 노말헵탄의 특성치를 나타낸다. 연료펌프가 작동하면 연료탱크 내의 연료는 연료필터를 통하여 흡입되어 압력조절용 레귤레이터를 통하여 인젝터에 공급된다. 연료는 0.2-0.35MPa의 압력으로 공급되며, 핀틀형 인젝터를 통하여 상온의 대기중에 분사되며 분사주기는 10ms, 분사시간 2.5ms, 분사횟수는 1000회이며, 사용된 핀틀형인젝터의 사양은 솔레노이드에 의해서 핀틀이 작동하는 방식으로 노즐직경 0.9mm, 핀틀직경 0.8mm, 핀틀각 30°이다. 노즐의 위치는 분무수집장치의 중앙

Table 1 Properties of n-heptane at 293K

Density	684kg/m ³
Kinematic viscosity	0.61 × 10 ⁻² m ² /s
Surface tension	20.9 × 10 ⁻³ N/m
Refractive index	1.385

에 위치하며 분무수집반으로부터 높이는 조절나사에 의해서 20-170mm까지 조절된다.

분무수집장치 및 감지회로는 256개의 셀로 구성되며, 16×16의 격자형태로 배열되어 있다. 각 구멍의 직경은 5mm, 구멍과 구멍사이는 1mm이며 깊이는 105mm이다. 256개의 구멍은 하나의 몸체로 되어 있으며 각각의 구멍은 중심에 원형단면의 전극봉이 설치되어 있다. 분무수집반 상단에 위치한 노즐에서 연료가 분사되면 각 셀에 연료가 축적되고 축적된 연료의 양은 유전률의 원리에 의해서 측정된다. 각각의 셀에 연결된 감지회로에서 신호가 감지되면 컴퓨터에 입력된다. 컴퓨터 및 데이터 처리소프트웨어는 입력된 데이터를 처리하여 분석에 필요한 자료로 가공한다. 처리된 자료는 2차원 또는 3차원 형식으로 표현되며, 분무각 및 기타 형식의 자료로 출력된다. 패터나이터의 기초이론, 작동, 특징에 대한 자세한 사항은 참고문헌⁽¹¹⁾에 기록되어 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 투과율의 영향

각각의 이미지들은 배경으로부터 분무의 이미지를 선명하게 나타내기 위하여 사용자가 투과율 기준을 정할 수 있는 기능이 있는 이미지 처리 소프트웨어를 사용하였다. Fig. 2는 분사압력 0.3MPa에서 분무각에 미치는 투과율의 영향을 나타낸다. 그래프 안의 이미지는 디지털 비디오 카메라로 촬영한 원본(original)의 이미지와 서로 다른 투과율기준 75%, 80%, 85%에서 2진화 처리된 이미지를 나타낸다. 투과율 기준의 선택에 따라 인젝터로부터 각 거리에서 분무각에 영향을 주는 것이 명백하다. 투과율

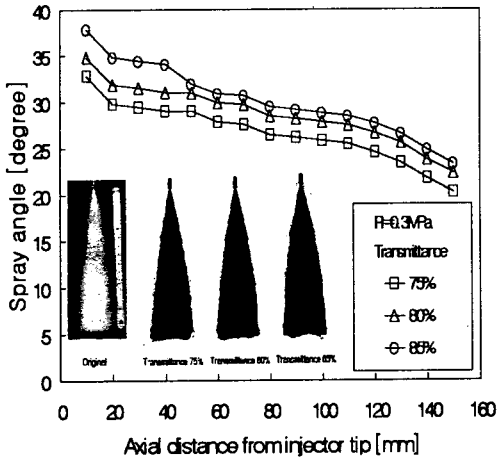


Fig. 2 Effect of transmittance level on spray angle

기준이 증가함에 따라 분무각이 커지는 경향을 나타낸다. 그리고 선택한 모든 투과율 기준에서 인젝터로부터 축방향거리가 증가함에 따라 분무각이 감소함을 알 수 있다. 투과율 기준이 5%변화함에 따라 분무각이 2-3° 변화한다. 인젝터의 가까운 부분에서 투과율기준이 감소함에 따라 분무각이 크게 감소하다가 그 이후에는 작은 폭으로 단조롭게 감소하였다. 디지털 이미지 프로세싱으로 구한 분무각과 다른 방법으로 구한 분무각을 비교하기 위하여 80%의 투과율 기준을 선택하였다.⁽²⁾

3.2 웨도우그래피에 의한 분무각

Fig.3은 분사압력 0.3MPa에서 PMAS의 거시적 분무측정기능에 의하여 얻은 웨도우그래피 이미지이다. 분무시작시각을 기준으로 하여 분사 시작 후 2ms-6.5ms동안, 0.5ms간격으로

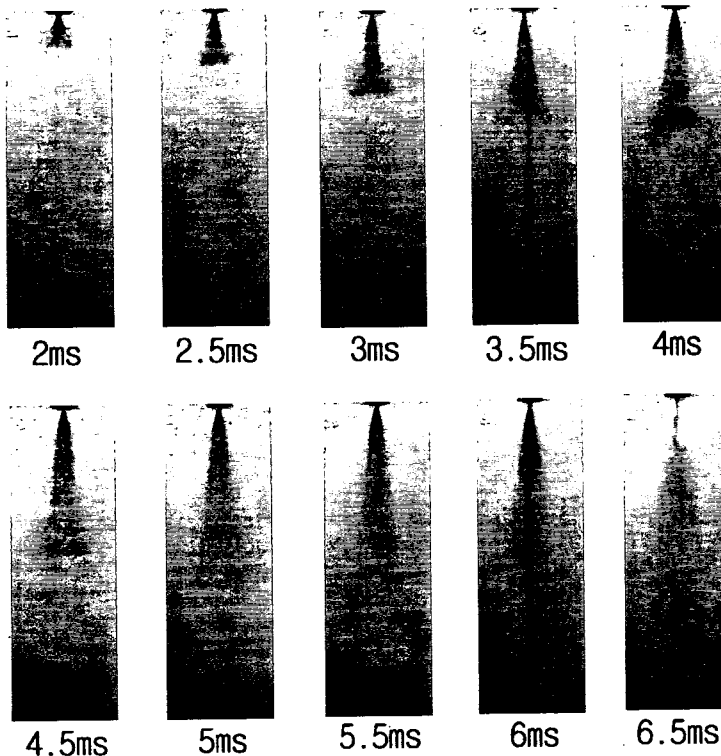


Fig. 3 Spray image by shadowgraphy(Pi=0.3MPa)

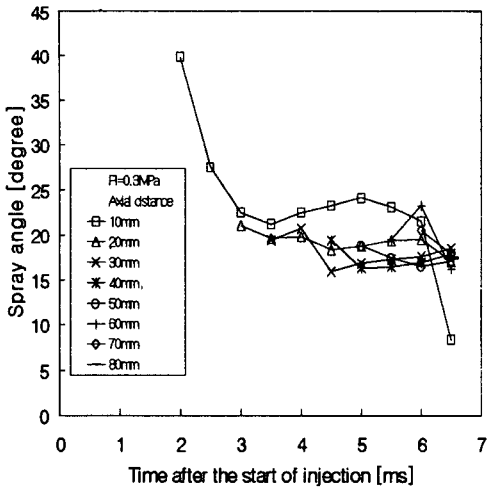


Fig. 4 Spray angle variation with time after injection

측정하였다. 노즐팁으로부터 10mm 간격으로 각 위치별 분무각을 Fig.4에 나타냈다. Fig.4는 분사시작 후 시간의 경과에 따른 위치별 분사각의 변화를 나타낸다. 10mm지점의 분무각의 경우 분무초기인 2ms ; 39.8°, 3ms ; 22.5°, 6ms ; 20.92°, 6.5ms ; 8.3°로 분무초기에는 분무각이 대단히 크나 시간이 지남에 따라 감소하고 3ms를 지나면서 거의 일정하며 6.5ms에서는 분사말기로 급격히 감소한다. 분사압력 0.2MPa, 0.35MPa의 실험결과에 의하면 0.3MPa의 경우와 마찬가지로 30-60mm지점에서 6.0ms의 분무각은 압력의 변화에도 불구하고 거의 일정하므로 6.0ms의 분무각을 선택하여 다른 측정방법에 의해서 측정한 분무각과 비교하였다. 20mm지점의 분무각은 3ms부터 측정이 가능하다. 그 이유는 3ms이전에는 20mm지점에 분무가 도달하지 못하기 때문이다. 70mm지점을 제외하고는 압력에 관계없이 6.0ms지점에서 분무각이 약간 증가하고, 6.5ms에서 분무각이 감소하는 것은 분무의 분사말기에 나타나는 현상으로 액적의 측방향에너지가 감소되어 측방향으로 더 이상 전진하지 못하고 퍼지는 현상으로 판단된다.

3.3 분무패턴에 의한 분무각

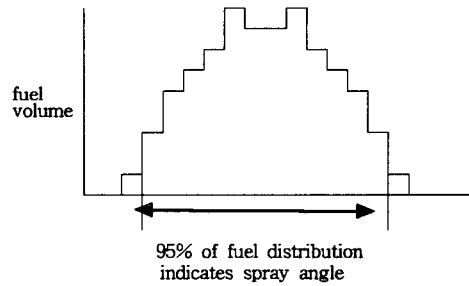


Fig.5 Typical fuel distribution of solid cone spray

분무각의 측정은 프로브를 이용하거나 사진학적 기술을 이용할 경우 측정이 용이하다. 그러나 이들 분무각 측정 방법은 분무의 특성이 시간 및 위치에 따라서 변화함을 고려 할 때 적절치 못한 방법이다. 다시 말하면 분무의 특성을 고려치 않고 분무의 한 순간만을 포착하여 분무각을 나타내므로 많은 오차를 포함한다. 이를 개선하기 위하여 패턴메타에 의한 분무각 측정, 즉 분무패턴에 의한 분무각측정이 고려되고 있다.

분무패턴에 의한 분무각 측정은 분무횟수를 수백 회 또는 수천 회 반복하여 측정한 연료의 체적에 의해서 분무각을 산출함으로써 엔진내부에서 적용되는 분무각과 근사한 분무각을 얻을 수 있다. Fig.5는 속찬 노즐의 분무(solid cone spray)의 대표적인 연료분포를 나타내며 SAE⁽¹²⁾가 추천한 분무패턴에 의한 분무각 산출방법이다.

전체 분무량의 80%, 90%, 95%, 97.5%의 체적분율에 의해서 분무패턴에 의한 분무각을 압력별로 산출하였다. 다른 방법으로 측정한 분무각과 비교하기 위하여 SAE가 추천한 95%의 체적분율(fuel distribution)을 선택하였다.

Fig.6은 인젝터에서 연료가 분사됨에 따라 분무수집반의 각 셀에서 수집된 연료의 체적이 수치화되어 직교좌표계의 배열로 입력되어 각 분무영역 별 분무강도를 나타낸 도표이다. 상대체적분포(relative volumetric distribution)는 각각의 셀에 수집된 최대 연료의 량과 다른 셀의 연료량의 비를 백분율로 나타낸 것이다.

Fig.6에 의하여 인젝터의 대표적인 성능을

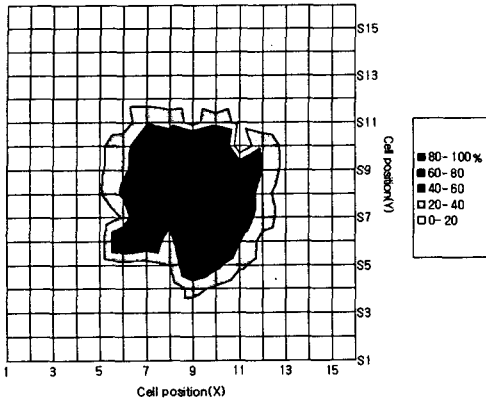


Fig. 6 Spray volume distribution in patternator

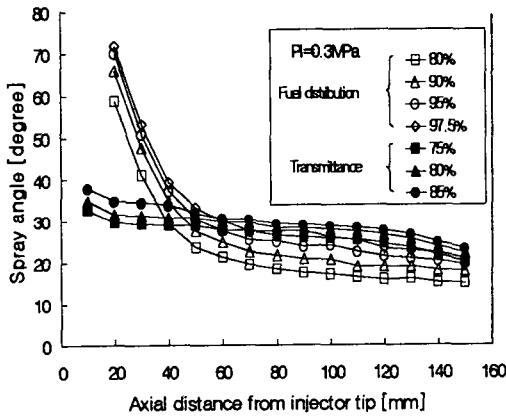


Fig. 7 Comparison of spray angles by image processing and by spray patternator

나타내는 분무의 치우침을 한 눈에 알 수 있다.

분무패턴에 의한 분무각 측정은 다음 절에서 논의하겠지만(Fig.7) 노즐 팁에서부터 분무진행 방향으로 60mm지점에서 분무각이 급격히 감소하다가 감소율이 저하되는 경향을 보인다. 이러한 경향은 체적분율이 증가할수록, 연료의 분사압력이 증가할수록 큰 경향을 보인다.

3.4 측정방법에 따른 분무각의 비교

Fig.7은 분사압력 0.3MPa에서 패터나이터에 의한 분무각과 디지털이미지프로세싱에 의한

분무각을 인젝터팁으로부터 축방향 거리에 따라 나타낸 것이다. 패터나이터에 의한 방법에서 인젝터팁으로부터 거리가 증가함에 따라 60mm까지 분무각이 급격히 감소하고, 이 때의 분무각이 다른 방법으로 측정한 분무각 보다 크게 나타났다. 인젝터에 가까운 거리에서 분무각이 크게 나타나는 것은 분무수집반에 의해서 분무의 진행에 장애를 받았기 때문이다. 즉, 인젝터와 분무수집반의 거리가 너무 가까워서 주위 공기의 유입현상이 일어나지 못하기 때문으로 생각된다. 체적분율이 커질수록 분무각의 변화율이 크고 체적분율이 작을수록 분무각의 변화율이 작아진다.

인젝터 팁으로부터의 거리 60mm에서 패터나이터방법의 체적분율95%의 분무각이 투과율 기준 75%로 디지털 이미지 처리에 의해 측정 한 분무각과 일치하였다. Fig.8은 분사압력 0.2MPa에서 3가지 방법, 즉 패터나이터에 의한 방법, 디지털 이미지 처리에 의한 방법, 웨도우그래피에 의한 방법에 대해서 분무각을 비교하였다. 패터나이터에 의한 분무각은 인젝터 팁으로부터 60mm까지는 급격히 감소하나 그 이후에는 감소율이 대단히 작다. 패터나이터에 의한 분무각의 측정은 인젝터 팁에서부터 10mm위치에서 장비구조관계로 실험이 곤란하여 20mm부터 실험을 하였다. PMAS에 의한 웨도우그래피 방법은 분무의 길이가 짧아 80mm까지만 데이터를 얻을 수 있었다. 분사압력 0.3MPa의 경우와 같이 인젝터 팁에서 아주 가까운 거리에서 패터나이터에 의한 분무각이 다른 두 방법에서 측정한 분무각보다 크게 나타난 것은 패터나이터의 분무수집반의 영향으로 분무가 자연스럽게 진행되지 못하고 퍼졌기 때문이다. 즉, 인젝터팁과 분무수집반이 너무 가까워 주변기체의 유입이 일어나지 않음을 나타낸다. 디지털이미지 프로세싱의 투과율 기준 75-85%에서 측정한 분무각은 인젝터부터의 축방향거리와 상관없이 거의 일정한 경향을 보였다.

웨도우그래피에 의한 분무각은 인젝터로부터 축방향거리가 증가함에 따라 단조롭게 감소한다. 그러므로 분무각은 동일분무에 대하여 같

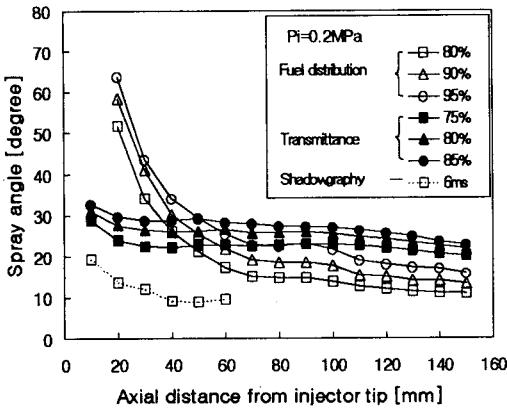


Fig. 8 Spary angle from different measuring methods

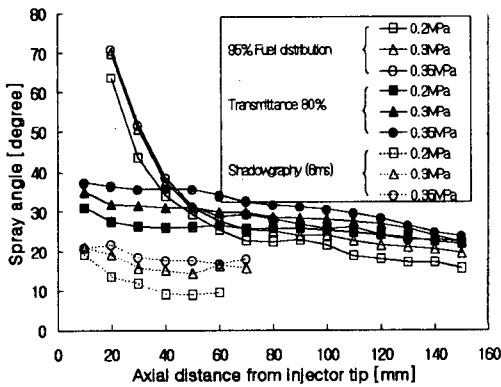


Fig. 9 Injection pressure effect

은 실험조건일지라도, 사용된 측정방법에 따라 크게 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 shadowgraphy에 의한 분무각과 디지털이미지 처리에 의한 분무각이 차이가 나는 이유는 PMAS의 순간이미지와 디지털이미지처리에 의한 긴 시간동안의 많은 수의 이미지가 큰 차이를 보이기 때문으로 판단된다. 이것은 Fig.4에서 나타나듯이 분무각이 분사가 진행되는 동안 변하기 때문이다. Dan 등⁽²⁾과 Chang and Farrell⁽³⁾이 디젤분무에서 지적했듯이 근접 분무각(near spray angle)과 먼 분무각(far spray angle) 처럼 영역이 달라지면 분무각이 변하는 사실과 일치한다. Fig.9는 3가지 측정방법에 대

하여 인젝터팁부터 노즐 축방향 거리에 따라 분무각에 대한 분사압력의 영향을 나타낸다. 측정방법에 따라 분무각의 증가율이 차이가 있을지라도, 본 연구에서 고려된 측정방법과 실험조건하에서 연료의 분사압력이 증가하면 분무각이 증가함을 알 수 있다. 이는 넓은 범위의 분사압력에 대한 Lai 등⁽¹³⁾의 연구와도 일치한다. 이상의 검토결과에서 알 수 있듯이 패턴내이터에 의한 분무각 측정에서 분무각측정의 최적의 위치는 인젝터팁으로부터 분무진행방향으로 60mm임을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 동일한 분무에 대하여 측정위치 및 방법에 따라 연구자마다 분무각이 상이하므로 가솔린엔진에 적용되는 인젝터의 분무각 측정방법을 정립하기 위하여 시험연료로 n-heptane, 분사압력이 0.2-0.35MPa, 주변압력이 대기압, 시험온도가 상온에서 핀틀형 인젝터의 분무각을 패턴내이터, 디지털 이미지 처리, 웨도우그래피 방법으로 측정·비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 디지털 이미지처리로 분무각을 측정할 경우, 투과율 기준의 선정이 대단히 중요하다.
- 2) 웨도우그래피 방법으로 분무각을 측정할 결과, 분사가 계속되는 동안 분무각이 변한다. 분사초기에는 분무각이 크나 시간이 경과함에 따라 분무각이 감소하는 경향을 보였다.
- 3) 패턴내이터로 분무각을 측정한 결과, 측정위치에 따라 분무각이 다르며, 인젝터팁과 분무수집반이 너무 가까울 경우 분무수집반의 영향으로 액적의 흐름이 왜곡되어 분무각이 실제보다 크게 나타난다.
- 4) 디지털 이미지 처리에 의한 분무각과 패턴내이터에 의한 분무각을 비교한 결과, 이 연구의 실험조건 내에서는 인젝터팁으로부터 60mm가 분무각측정에 최적위치임을 알 수 있었다.
- 5) 분무각측정시 인젝터팁으로부터 최적의 거리를 규명하기 위해서는 다른 형식의 인젝터에 대해서 체계적인 연구가 필요하다.

참고문헌

1. A.H.Lefebvre, *Atomization and Sprays*, Hemisphere Pub. Co., New York, p.275, 1989
2. T. Dan, T. Yamamoto, J. Senda and H. Fujimoto, "Effect of Nozzle Configurations for Characteristics of Non-Reacting Diesel Fuel Spray", SAE Paper 970355, 1997.
3. C.T. Chang and P.V. Farrel, "A Study on the Effects of Fuel Viscosity and Nozzle Geometry on High Injection Pressure Diesel Spray Characteristics", SAE Paper 970353, 1997.
4. D.L.S. Hung and L.E.Markle, "Macroscopic Spray Characterization of DI Gasoline Injectors Using Automatic Image Alalysis", Proc. of ILASS-Americas 99, Indianapolis, USA, pp.439-441, 1999.
5. J.Senda, M.Yamaguchi, T.Tsukamoto and H.Fujimoto, "Spray Characteristics of a Pintle-type Injector in a Low Pressure Gas Environment", *Atomizatuion and Sprays*, vol.4, pp.237-251, 1994.
6. G.Renner and R.R.Maly, "Spray Structures of Automotive Injectors", Int'l Symp. on Advanced Spray Combustion, Hiroshima, Japan, pp.45-53, July 6-8, 1994.
7. J.D.Naber and D.L.Siebers, "Effects of Gas Density and Vaporizing on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays", SAE Paper 960034, 1996.
8. M. Xu and L.E. Markle, "CFD-Aided Development of Spray for an Outwardly Opening Direct Injection Gasoline Injector", SAE Paper 980493, 1998.
9. S.Parrish and L.Evers, "Spray Characteristics of Compound Silicon Micro Machined Port Fuel Injector Orifices", SAE Paper 950510, 1995.
10. V-tek, PMAS(MX-II, ver 3.0) user's reference manual, 1994, p.3
11. J.Y.Kim, S.K.Baik, S.Y.Choi, D.R.Lee, S.H.Yoon and K.K.Kang, "Development of Spray Patternator for Gasoline Fuel Injector", ILASS-Asia '99, 4th Conference of Liquid Atomization and Spray Systems, 1-2 Oct., 1999, Kyunghee Univ., Yongin, Korea, pp.93-98.
12. SAE Highway Vehicle Recommended Practice, Gasoline Fuel Injector, SAE J1832, Nov., 1989
13. M.C.Lai, F.Q.Zhao, A.A.Amer, and T.S.Chue, "The Structure of Port Injector Spray in Gasoline Engines", Int'l Symp. on Advanced Spray Combustion, Hiroshima, Japan, pp.79-89, July 6-8, 1994.