

## 가시화와 분사율 측정을 통한 비정상 디젤분무의 분석

강진석<sup>1)</sup> · 최욱<sup>2)</sup> · 배충식<sup>\*2)</sup>

현대자동차<sup>1)</sup> · 한국과학기술원 기계공학과<sup>2)</sup>

### Analysis of Transient Diesel Spray with Visualization and Injection Rate Measurement

Jinsuk Kang<sup>1)</sup> · Wook Choi<sup>2)</sup> · Choongsik Bae<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

<sup>2)</sup>Powertrain Research Center, Hyundai-Motor Company, 772-1 Changduk-dong, Whasung-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 4 May 2004 / Accepted 20 July 2004)

**Abstract** : Transient natures of diesel sprays are often characterized with spray visualization, since it is a non-intrusive and straightforward technique to be applied. However, as injection pressure is increased higher than a thousand bar in a modern direct injection diesel engine, very fine temporal and spatial resolutions in the spray visualization are required while sprays become optically denser. Discussed in this paper are macroscopic and microscopic spray visualization techniques and an example of image processing process for efficient and consistent measurement of spray parameters. The injection rate measurement method based on hydraulic pulse principle was suggested as a way of estimating injection velocity for transient diesel sprays. The spray visualization and injection rate measurement techniques were applied to analyze transient diesel sprays from a common-rail injection system and found to be practically effective.

**Key words** : Transient diesel spray(비정상 디젤분무), Injection rate(분사율), Spray visualization(분무가시화), Exposure time(노출시간), Image processing(영상처리)

### 1. 서론

가시화기법은 분무장에 영향을 미치지 않을 뿐 아니라 장치의 구성이 비교적 간단하기 때문에 디젤분무의 연구에서 널리 이용되고 있다. 그러나 분사시스템이 발전하면서 최고 분사압력은 증가하는 한편, 분공의 직경은 감소하기 때문에 비정상 디젤분무의 거동과 구조를 파악하기 위해서는 분무가시화에 있어서 높은 시간적, 공간적 분해능이 요구되고 있다. 일반적으로 가시화된 분무의 영상으로부터 분무도달거리, 분무각 등 분무인자들을 정량

적으로 얻기 위해 컴퓨터를 이용한 영상처리 방법이 주로 사용되고 있다. 그러나 영상처리 과정에서 분무인자들의 정의가 연구자들에 따라서 달라질 수 있으며, 현실적으로 영상처리의 알고리즘에서 주관성을 완벽히 제거하기는 어려운 일이다. 아울러 비정상 디젤분무의 경우 분공 전, 후의 압력강하를 측정하기가 어렵기 때문에 그 중요성에도 불구하고 분사기간 중 분사속도의 변화를 정확히 파악하기가 어렵다. 본 논문에서는 커먼레일 분사시스템에서 다공 노즐을 통하여 분사되는 디젤분무의 거동과 구조를 분석하기 위해 적용한 분무가시화 방법과 영상처리 방법을 논의하고자 한다. 또한 분사율의 측정방법과 이를 이용한 분사속도의 계산과정을 소

\*To whom correspondence should be addressed.  
csbae@kaist.ac.kr

개하고자 한다.

## 2. 디젤분무의 가시화

넓은 의미에서 Mie산란을 이용한 직접사진 기법, 밀도가 다른 경계면에서 빛이 굴절하는 현상을 이용한 새도우기법(shadowgraphy), 레이저에 의해 여기된 분자가 안정화 되면서 방출하는 형광신호를 기록하는 LIF기법, 단파장의 평행광이 분무를 통과한 정도를 측정하여 분무의 구조를 재구성하는 방법 등이 디젤분무의 가시화기법에 속한다고 볼 수 있다. 그러나 비증발조건에서의 실험에서는 직접사진 기법이 가장 널리 적용되고 있다. 본 논문에서는 직접사진 기법을 조명방식에 따라서 측면조명기법, 후면조명기법 그리고 레이저 평면광 기법으로 구분하였으며 가시화 영역의 크기에 따라서 거시적 가시화와 미시적 가시화로 구분하였다.

### 2.1 공간 분해능과 노출시간의 결정

필름을 이용하여 분무영상을 기록할 경우 이론적으로는 확대인화를 통하여 수  $\mu\text{m}$ 의 해상도를 얻을 수 있다. 그러나 필름은 현상과 인화 과정이 복잡하고 반복되는 실험에서 일관성을 유지하기가 어려우며 보관과 영상처리가 어렵기 때문에 최근에는 CCD카메라를 주로 사용하고 있다. CCD소자의 픽셀들은 한 변의 길이가 대략 수  $\mu\text{m}$ 로서 이 길이를 배율로 나눈 값이 분무영상에서 구분할 수 있는 최소거리가 된다. 단일렌즈를 사용할 경우, 배율은 렌즈로부터 분무까지의 거리로 정의되는 작용거리로 렌즈로부터 CCD소자까지의 거리로 정의되는 영상거리를 나눈 값이다. 결국 높은 공간 분해능을 얻기 위해서는 작용거리를 줄이거나 영상거리를 늘려야 하는데 렌즈를 분무로 가까이 접근시키는 것은 액적에 의한 렌즈의 오염문제와 실험장치의 기하학적 제약들 때문에 쉽지 않다. 영상거리를 늘리기 위해서는 렌즈와 카메라 사이에 주름관이나 경통을 장착하는 방법이 있으며 1~2  $\mu\text{m}$ 의 공간분해능을 얻기 위해서는 렌즈나 반사경의 조합을 이용하여 작용거리를 증가시킨 원거리 현미경을 사용하기도 한다. 완벽한 렌즈를 가정했을 때 회절에 의해서 제한되는 구분 가능한 최소거리  $d_b$ 는 식 (1)과 같다.<sup>1)</sup> 여기

서  $f$ 는 렌즈의 초점거리,  $\lambda$ 는 빛의 파장 그리고  $D$ 는 렌즈의 직경이다. 즉, 단파장의 광원을 사용하고 F수 ( $f/D$ )가 작은 렌즈를 사용 할수록 높은 공간 분해능을 얻을 수 있다. 예를 들어 510.6 nm의 파장을 가지는 레이저광이 분무에 의하여 산란되어 F수가 4.5인 렌즈로 들어올 때 구분 가능한 최소거리는 대략 2.8  $\mu\text{m}$ 가 된다. CCD소자 픽셀들의 한 변의 길이가 6.7  $\mu\text{m}$ 인 경우, 구분 가능한 최소거리를 CCD상에서 두 픽셀로 나타내려면 적어도 약 4.8배 이상의 배율이 필요하다. 영상의 심도는 구분 가능한 최소거리의 제곱에 비례하고 빛의 파장에 반비례한다.

$$d_b = 1.22\lambda / D \quad (1)$$

원하는 공간분해능에 따라서 배율이 결정되면 가시화 영역의 한 변의 길이는 CCD소자의 한 변의 길이를 배율로 나눈 값이 되어 공간분해능과 가시화 영역의 크기는 반비례하게 된다. 가시화 영역의 크기가 결정되면 분무 영상에서 끌림이 나타나지 않도록 노출시간을 결정해야 하는데 엄격히 말해서 노출시간동안 분무의 이동거리가 CCD에서 구분할 수 있는 최소거리보다 작아야 한다. 각 변의 길이가 6.7  $\mu\text{m}$ 인 픽셀들이 1280 × 1024개로 배열된 CCD소자를 이용하는 경우, 배율이 0.1일 때 공간분해능은 67  $\mu\text{m}$ 이고 가시화 영역은 85.8 mm × 68.6 mm이 된다. 분무 선단의 이동속도를 약 100 m/s로 가정하면 67  $\mu\text{m} / 100 \text{ m/s} = 0.67 \mu\text{s}$ 이하의 노출시간이 필요하다. 같은 조건에서 배율이 6으로 높아지면 배율로 계산한 공간 분해능은 1.1  $\mu\text{m}$ 로 증가하지만 실제로는 회절의 영향 때문에 공간 분해능이 계산만큼 증가하지 않는다. 한편 가시화 영역은 1.43 mm × 1.14 mm가 되고 1.1  $\mu\text{m} / 100 \text{ m/s} = 11 \text{ ns}$ 이하의 노출시간이 확보되어야 끌림 현상이 발생하지 않는다.

### 2.2 분무 가시화를 위한 실험 장치의 구성

아래에 제시한 Fig. 1은 고압분사실로 분사되는 디젤분무를 직접사진 기법과 이중광로 새도우기법으로 가시화하기 위한 실험 장치와 전형적인 가시화 결과들을 보여주고 있다. (a)는 좌측 창에서 유효한 광지속시간이 약 2  $\mu\text{s}$ 인 스트로보 광을 조사하고 분무에 의해 산란된 빛을 전면 창을 통해서 CCD카메라로 획득한 결과이다. 우측 창에는 거울을 부착하

여 반사된 빛이 다시 분무를 조명하도록 하였다. 영상처리를 통해 분무각과 분무도달거리를 획득함에 있어서 입사광의 강도보다는 분무의 균일한 조광이 훨씬 중요한 요소이다. (b)는 분무가 주변의 공기를 유입하면서 기화되어가는 과정을 관찰하기 위하여 적용한 이중광로 새도우기법의 전형적인 결과이다. 고압분사실의 분사기 장착 어댑터에 그림에서 밝게 보이는 직경 50 mm의 원형거울을 장착하여 전면 창을 통해 입사된 평행광이 분무를 한번 거치고 거울에 반사된 뒤 다시 분무를 거쳐서 ICCD카메라에 입사되도록 하였다. 연속광원을 사용했기 때문에 광증폭기의 노출시간을 70 ns로 설정하였다. 측면조명법의 경우 분무외각의 액적과 액사들의 크기가 미세하고 수밀도가 높지 않은 경우 분무의 경계를 정의하기가 쉽지 않은 반면, 새도우기법은 밀도가 다른 경계면을 보여주기 때문에 분무경계의 정의가 비교적 용이하다. 그러나 이 기법도 입사광의 품질과 분무를 거치고 나온 평행광이 다시 집광 될 때까지 진행한 거리에 따라서 분무경계의 선명도가 달라지는 한계를 가지고 있다. 비증발 조건에서 측면조명법과 이중광로 새도우기법으로 얻은 분무영상들을 영상처리 한 결과, 거시적 관점에서 분무도달거리와 분무각은 매우 유사하게 나타났다. (c)는 레이저 평면광을 전면 창을 통하여 분무의 중심단면으로 입사하고 산란된 빛을 우측 창에 장착된 원거리 현미경을 통하여 ICCD로 획득한 사진이다. 이 기법은 분무의 내부구조를 유추하는 데 도움이 되지만, 평면광이 액사를 지나갈 때 가시화 되는 것은 액사의 단면이므로 액사와 액적을 구분하기 어렵고 분무경계의 3차원적 구조를 파악하기에 적합하지 않다. (d)는 후면조명기법으로 획득한 미시적 가시화 결과이며 분무가 광로중간에 위치하도록 유효광 지속시간이 10 ns 정도인 섬광원을 좌측 창에, 원거리 현미경을 장착한 고해상도 CCD카메라를 우측 창에 장착하였다. 후면조명기법은 카메라의 광학계가 광원을 보고 있다는 점에서 새도우기법과 유사하지만 평행광 대신 확산광을 사용한다는 차이점이 있다. 광원의 세기가 약한 경우에도 비교적 선명한 영상을 얻을 수 있는 장점이 있지만 이중노출이 일어나지 않도록 노출시간에 주의를 기울여야 한다.

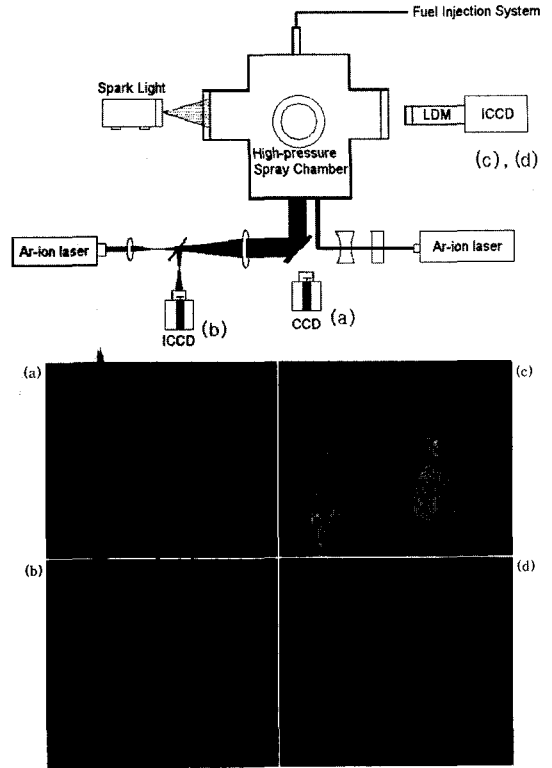


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for spray visualization and typical results

후면조명기법은 사진에서 보이는 바와 같이 미세한 액사나 액적들을 가시화하는데 특히 장점을 지닌다.

(c)와 (d)의 경우처럼 다공노즐에서 방사상으로 분사되는 분무들 중 특정한 분무에 대하여 관찰하고자 할 때 인접한 분공에서 분사되는 분무들은 광학적 기법의 적용을 어렵게 한다. Heimgärtner와 Leiperz<sup>2)</sup>는 커먼레일 분사시스템에 장착한 VCO노즐의 경우 단공과 2공 노즐은 서로 다른 분무특성을 나타내는 것으로 발표하였다. 이러한 결과를 감안하면 단순히 인접한 분공을 막을 경우 노즐 내부의 유동장이 변화하여 분무의 특성이 달라질 가능성이 높기 때문에 모든 분무가 인위적인 저항을 받지 않도록 주의하여 Fig. 2와 같은 노즐캡을 제작하였다. 노즐캡을 제작할 때 노즐의 외형대로 전극을 제작하여 방전가공을 하는 방법과 노즐의 외형대로 바이트를 제작하여 절삭가공을 하는 방법 모두 만족할만한 결과를 얻었다. 저자들은 이러한 분무 가시

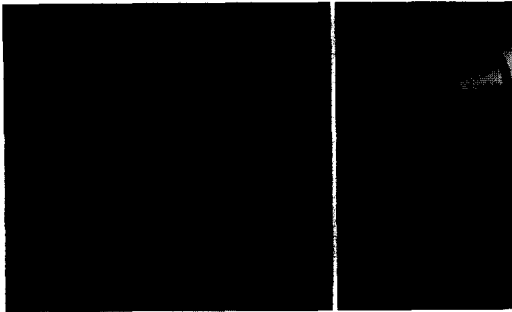


Fig. 2 Nozzle cap designed for VCO nozzle (left: bottom view, right: side view)

화 방법들을 기계식 펌프를 이용한 분사시스템과 커먼레일 분사시스템에 적용하여 분무의 거시적인 거동과 미시적인 구조를 보고한 바 있다.<sup>3,4)</sup>

### 3. 분무영상의 처리

거시적 분무영상으로부터 분무도달거리 분무각 등 주요한 인자들을 효율적이고 일관성 있게 획득하기 위하여 분무영상 분석프로그램을 작성하였다.

Fig. 3은 직접사진 기법으로 얻은 전형적인 분무영상의 분석 예를 나타낸다. 분무영상 (a)에서 배경영상 (b)를 제거한 다음, 각 화소의 명도를 조사하여 Fig. 4와 같은 히스토그램을 만든다.

히스토그램의 가로축은 0부터 255까지의 명도이고, 세로축은 각 명도에 해당하는 픽셀들의 개수이다. 일반적으로 히스토그램 상에 2개의 봉우리가 나타나게 되는데 좌측의 첫 번째 봉우리는 화면의 대부분을 차지하는 어두운 부분에 해당하는 것이고, 우측의 두 번째 봉우리는 상대적으로 밝은 분무에 해당한다. 분무의 영상을 획득할 때 조광이 균일하게 될 수록 두 번째 봉우리가 명확해진다. 분무와 배경을 구분하기 위해서 히스토그램의 첫 번째 봉우리에서 두 번째 봉우리 방향으로 이동하면서 그래프 기울기의 절대값을 구하여 그 값이 0이 되는 지점을 임계명도로 선택하였다. Fig. 4의 히스토그램은 Fig. 3의 분무영상에 해당하는데 두 봉우리 사이의 평평한 영역이 대략 명도 70에서 90사이에 나타난다. 히스토그램의 기울기로부터 프로그램이 제시하는 임계명도는 75이지만 임계명도를 70에서 90사이에서 변화시킨다 하더라도 결과로 나타난 분무도달거리의 변화는 단지 1.5%에 불과했다. 히스토그램 상에 분무와 배경에 대응하는 명확한 봉우리가 나타나도록 균일한 조광을 할 경우 임계명도의 선택에서 주관성을 상당히 배제할 수 있음을 확인하였다. 임계명도를 결정한 후 배경이 제거된 분무영상에서 각 픽셀의 명도와 임계명도를 비교하여 임

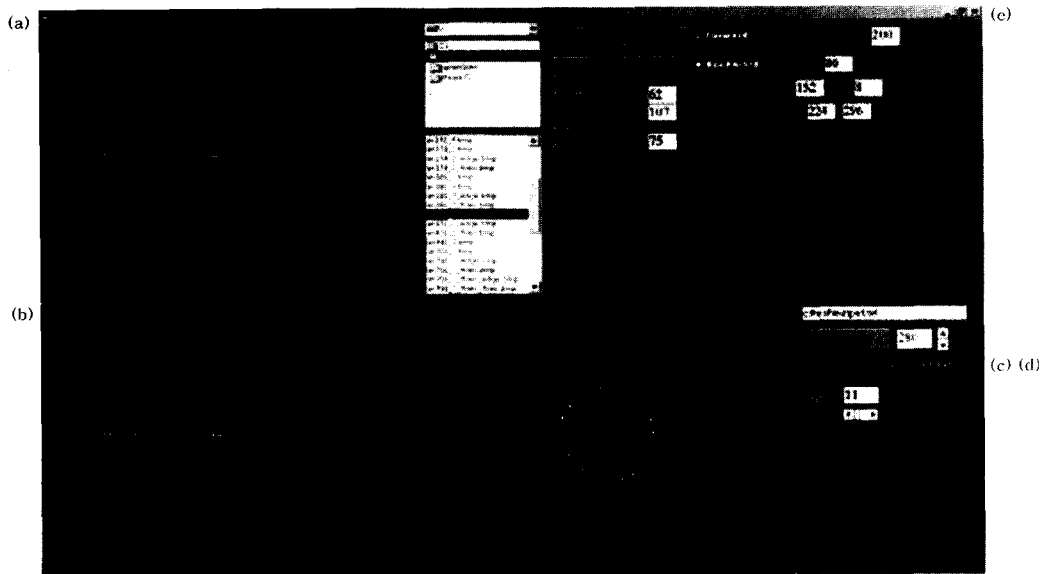


Fig. 3 An illustration of image processing using a newly-developed software (a: raw spray image, b: background image, c: spray periphery, d: output control, e: input control)

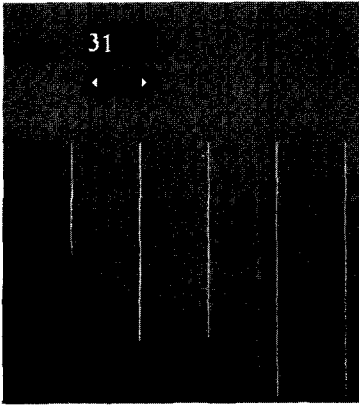


Fig. 4 A typical histogram of spray image after a background-removing

계명도 미만의 픽셀들은 명도를 0으로, 임계명도 이상의 픽셀들은 명도를 255로 치환하여 흑백영상을 생성하였다. 흑백영상에서 명도가 255이면서 명도가 0인 픽셀들과 인접한 픽셀들을 분무의 경계가 될 수 있는 후보로 선택한 다음 이들을 추적하여 폐곡선을 이루면 분무의 경계로 인정하는 방식을 택하여 분무경계의 좌표를 획득하였다. 분무경계의 좌표가 획득되면 다양한 분무인자들을 간단히 계산할 수 있다.

Fig. 5는 주요 분무인자들의 기하학적 정의를 나타내며, 이로부터 Fig. 3의 과정 (c)~(e)에 상당하는 분석이 진행된다. 분무경계의 좌표로부터 기하학적인 분무중심을 구하여 분무의 진행방향을 정의하였으며 분무도달거리 (S)는 노즐 끝에서 분무경계까지의 거리 중 최대값으로 정의하였다. 분무의 면적 ( $A_s$ )은 분무경계로 둘러싸인 정사영의 면적으로 정의하였다. 비정상상태의 디젤분무는 분무 폭이 분무도달거리와 시간의 경과에 따라서 변화하기 때문에 다음과 같은 두 가지 분무각을 정의하였다. 기하학적 분무각 ( $\theta_{geo}$ )은 노즐 끝으로부터의 거리가 분무도달거리의 절반인 분무경계상의 두 지점과 노즐 끝을 연결하는 두 직선을 가정했을 때 그 사이의 각도로 정의되고 평균적인 분무각 ( $\theta_{cone}$ )은 정사영 면적이 분무의 면적과 같고 분무도달거리가 높이가 되는 원뿔을 가정했을 때 그 꼭지각으로서 식 (2)와 같이 정의 된다. 기하학적 분무각이 평균적인 분무각보다 크다는 것은 분무선단이 뾰족한 모양임을

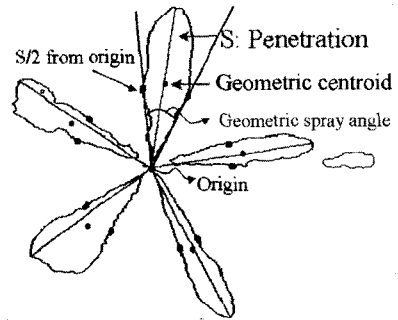


Fig. 5 Detected spray boundaries with geometric definitions

의미하며 평균적인 분무각이 기하학적 분무각보다 크다는 것은 분무선단이 뾰족한 모양임을 의미한다. 분무체적( $V_s$ )은 평균적인 분무각을 정의할 때 사용된 가상의 분무원뿔의 체적이며 식 (3)과 같이 정의 된다.

$$\theta_{cone} = 2 \tan^{-1}(A_s/S^2) \quad (2)$$

$$V_s = \frac{\pi}{3} \tan\left(\frac{\theta_{cone}}{2}\right) S A_s \quad (3)$$

노즐근처의 광학적으로 농후한 영역에서 획득한 미시적 영상들은 분무의 구조를 유추하기위한 정성적인 근거로 사용되었다. 획득된 영상에서 각 픽셀의 명도를 상대적인 비율에 따라 0에서 255까지 다시 설정하는 방법으로 영상의 대조를 증가시켰다. 분무의 하류와 외각에서 획득한 미시적 영상들에 포함된 액적들은 초점면에 위치하는지 여부를 판단하여 액적들의 직경분포, 평균직경 등을 정량적으로 계산하였다. 거시적 분무영상의 처리와 유사한 과정으로 액적의 경계를 찾아내고 경계부근의 명도 변화로부터 선명도(value of contrast)를 구하였다. 미시적 영상을 획득하는데 사용한 광학계를 이용하여 크기를 알고 있는 모형액적들을 촬영함으로써 각각의 크기에 대응하는 최대 선명도와 영상의 심도를 알 수 있다. 영상 심도는 액적 직경의 수십 배정도가므로 액적의 초점면 존재여부는 캘리브레이션 결과의 선명도와 비교하여 결정하였다.<sup>5,6)</sup>

#### 4. 분사율의 측정

커먼레일 분사시스템에서 분사되는 비정상 디젤 분무는 수 ms의 분사기간 동안 분사속도가 수백 m/s

로 증가했다가 다시 감소하게 된다. 분무의 거동에 관한 중요한 연구결과들이<sup>7-9)</sup> 준 정상상태의 디젤분무에 대하여 발표되었지만 현실적으로 커먼레일 분사시스템에서 준 정상상태가 유지되는 기간은 나타나지 않는다. 따라서 분사율의 측정은 분무의 연구에 있어서 필수적이며 다양한 방법들이 제시되고 있다.<sup>10)</sup> 본 연구에서는 흔히 BOSCH 튜브법<sup>11)</sup>이라 불리는 방법을 사용하여 분사율계를 제작하였다. 이 방법은 디젤 연료로 가득 채워진 내경이 일정한 관의 내부로 연료가 분사될 때 관 내부의 압력변화를 측정하여 분사율을 계산하는 방법으로 그 기본 원리는 다음과 같다. Fig. 6과 같이 디젤 연료가 단면적이 A로 일정한 관의 내부를 속도 u로 왼쪽에서 오른쪽으로 흐를 때 음파와 함께 속도 c로 움직이는 제어체적을 선택하면 질량보존과 운동량 보존은 각각 식 (4), (5)와 같이 된다.

$$\rho(c-u) - (\rho + d\rho)(c-u-du) = 0 \quad (4)$$

$$(c-u)^2 \rho - (c-u-du)^2 (\rho + d\rho) = dp \quad (5)$$

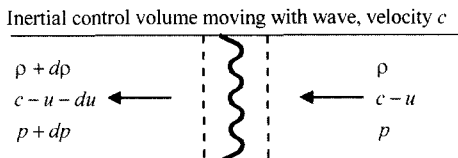


Fig. 6 Control volume defined for analysis

식 (4)를 식 (5)에 대입하고  $(c-u) \approx c$  임을 이용하면 식 (6)을 얻게 된다.

$$dp = \rho c du \quad (6)$$

즉, 디젤연료의 음속과 밀도를 알고 관 내부의 압력변화를 측정하면 관내 유속의 변화를 알 수 있고 관 내부의 유량과 분사기에서 분사되는 유량이 동일하므로 결국 분사율을 측정할 수 있다. 또한 노즐의 면적계수(area contraction coefficient)를 알면 분사율을 통해 분사속도를 계산할 수 있다. 분사율계는 Fig. 7과 같이 내경이 0.18인치이고 길이가 약 10 m인 관과 분사기와 압력센서가 장착되는 어댑터, 반사파의 강도를 조절하는 니들밸브 그리고 잔여 맥동을 감쇄하기 위한 실린더와 배압을 유지하고 조절하기 위한 압력조절기로 구성하였다. 어댑터에

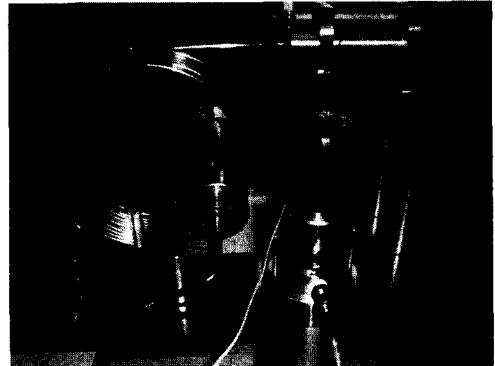
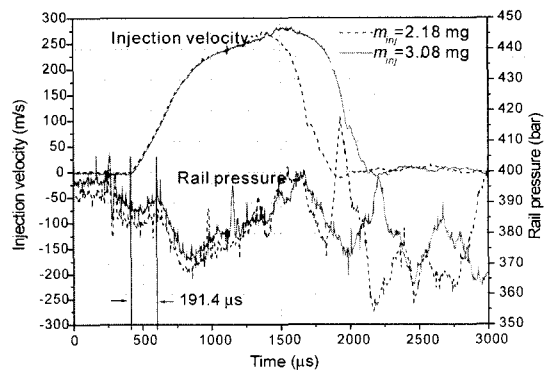
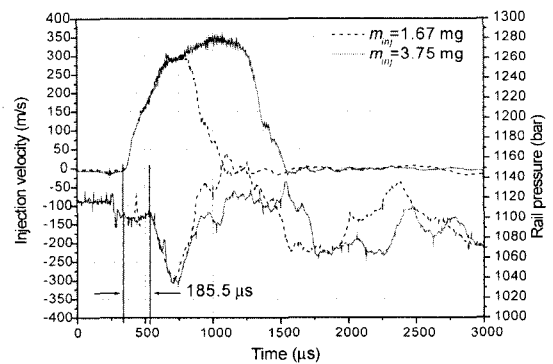


Fig. 7 Fabricated injection rate meter



(a)



(b)

Fig. 8 Injection velocity change and according pressure history in common-rail for VCO nozzle ( $D_n = 0.144\text{mm}$ , back pressure=3 MPa)

장착된 압력센서에서 나오는 전압신호는 분사율과 비례하는 값이므로 전압신호의 파형을 시간에 따라 적분한 값은 분사량과 비례한다. 따라서 수천 회 분사하여 측정된 평균 분사량을 압력센서 신호를 적분한 값으로 나눈 뒤, 이 상수를 전압신호에 곱하면

간단히 분사울 곡선을 얻을 수 있다.

Fig. 8은 면적계수를 1이라고 가정하고 분사울로부터 계산한 분사속도와 이에 상응하는 커먼레일의 압력 변화를 나타낸다. (a)는 분사시작 전의 커먼레일 압력이 약 39.5 MPa인 경우이고, (b)는 112 MPa인 경우이다. 분사속도 상승지점과 레일압력 하강지점 사이에 나타나는 190  $\mu$ s정도의 시간차이는 분공으로부터 분사울계의 압력센서까지 거리와 고압연료관의 압력센서까지의 거리가 다르기 때문에 발생한다. 분사속도 증가의 기울기는 분사기에 공급되는 연료 압력에 따라 증가하며, 분사속도 증가구간과 감소구간에서 기울기의 절댓값은 유사하다. 또한 각 분공에서 분사되는 분사량( $m_{inj}$ )이 변화해도 분사속도 곡선의 기울기는 변화하지 않음을 알 수 있다. (a)와 (b)를 비교해보면 분사기간의 제한 때문에 최고 분사속도의 차이는 연료공급압력의 차이에 비하여 매우 적지만, 분사속도가 상승하는 기울기는 큰 차이를 보이고 있다. 결과적으로 관내의 압력파의 변화를 통해 분사속도를 효과적으로 추정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 커먼레일 분사시스템에서 분사되는 비정상 디젤분무를 분석하는 과정에서 사용한 가시화 기법 및 영상처리 방법을 간략히 소개하였다. 아울러 분사속도를 계산하기 위한 분사울의 측정원리 및 방법을 제시하였다. 이를 통해 얻어진 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 1) 고해상도 분무영상 해석기준 및 영상처리기법을 응용한 분석 프로그램을 통해, 객관적이고 일관된 거시적 분무 거동 분석이 가능하였다.
- 2) 음속을 고려한 분사울계를 사용하여 비정상 분사과정의 분사거동을 파악할 수 있었다.

## References

- 1) G. A. Ruff, G. M. Faeth, "Non-intrusive Mea-

surement of the Structure of Dense Spray," Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 166, 1996.

- 2) C. Heimgärtner, A. Leiperz, "Investigation of Primary Diesel Breakup Close to the Nozzle of a Common Rail High Pressure Injection System," Proc. 8th ICLASS, 2000.
- 3) J. Kang, C. Bae, "Diesel Spray Development from VCO Nozzles for High Pressure Direct-Injection," Transactions of KSAE, Vol. 8, No.3, pp.28-36, 2000.
- 4) C. Bae, J. Kang, H. Lee, "Diesel Spray Development from VCO Nozzle with Common-Rail," Proc. Fall Technical Conference of ICE Division of ASME, Vol.37-1, pp.43-49, 2001.
- 5) K. S. Kim, S. S. Kim, "Drop Sizing and Depth-of-Field Correlation in TV Imaging," Atomization and Sprays, Vol.4, No.1, pp.65-78, 1994.
- 6) K. U. Koh, J. Y. Kim, S. Y. Lee, "Determination of In-Focus Criteria and Depth of Fields in Image Processing of Spray Particle," Atomization and Sprays, Vol.11, No.4, pp.317-333, 2001.
- 7) J. C. Dent, "Basis for the Comparison of Various Experimental Method for Studying Spray Penetration," SAE 710571, 1971.
- 8) H. Hiroyasu, M. Arai, "Structure of Fuel Sprays in Diesel Engines," SAE 900475, 1990.
- 9) J. D. Naber, D. L. Siebers, "Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays," SAE 960034, 1996.
- 10) L. Bayvel, Orzechowski, Liquid Atomization, Taylor & Francis, pp.387-394, 1993.
- 11) W. Bosch, "The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument For Display of the Characteristics of Individual Injection," SAE 660749, 1966.