

〈논 문〉 SAE NO. 96370065

Piston Cavity 형상에 따른 충돌분류의 분무거동

The Behavior of Impinging Spray by Piston Cavity Geometry

이 상 석*, 김 근 민**, 김 봉 곤***, 정 성 식****, 하 종 물****
S. S. Lee, K. M. Kim, B. G. Kim, S. S. Jung, J. Y. Ha

ABSTRACT

In a small high-speed D. I. diesel engine, the injected fuel spray into the atmosphere of the high temperature and pressure is burnt by go through the process of break up, atomization, evaporation and process of ignition. These process are important to decide the emission control and the rate of fuel consumption and out put of power. Especially, in the case of injected fuel spray impinging on the wall of piston cavity, the geometry of piston cavity gives great influence the ignitability of injected fuel and the flame structure. Ordinary, the combustion chamber of driving engine have unsteady turbulent flow be attendant on such as the change of temperature, velocity and pressure. So the analysis of spray behavior is difficult.

In this study, the spray was impinged on the wall of 3 types of piston cavity such as Dish, Toroidal, Re-entrant type, in order to analyze the combustion process of impinging spray precisely and systematically. And hot wire probe was used for analyze non-steady flow characteristics of impinging spray, and to investigate the behavior of spray, the aspects of concentration $c(t)$, standard deviation $\sigma(t)$ and variation factor(vf) was measured with the lapse of time.

주요기술용어 : non-steady flow(비정상유동), hot wire anemometer(열선유속계), impinging spray (충돌분무), variation factor(변동계수),- concentration(농도), piston cavity(피스톤 캐비티)

1. 서 론

자동차로부터 배출되는 공해물질은 심각한 환경문제를 일으키고 있으며, 그 규제도 엄격해지고 있다. 이러한 배출가스는 기관의 운전조건에

* 정회원, 부산전문대

** 동아대원

*** 정회원, 동의공전

**** 정회원, 동아대학교

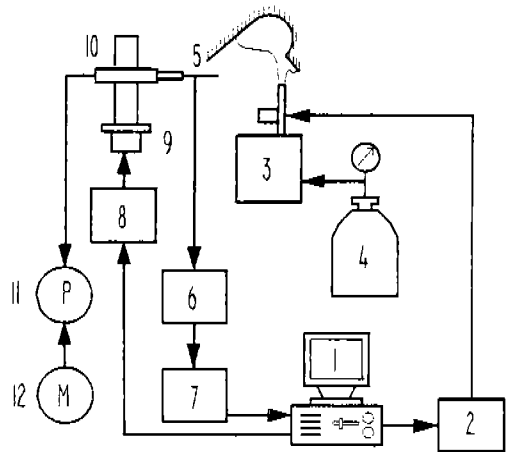
따라서 달라지나 특히, 분무의 형태, 연소실의 형상 또는 연소실에서의 공기유동, 즉 Swirl류, Spuish류 또는 Tumble류, 그리고 연소실 내에 직접 연료를 분사할 경우 벽면 충돌 등으로 미립화 및 연료·공기 혼합 상태에 따라 영향을 받는다. 특히 연소실 형상과 관련하여 분사된 연료의 벽면 충돌은 전체 분무의 구조 및 화염의 구조에도 영향을 미칠 것이며, 충돌형태에 따라 분열, 미립화, 증발의 과정이 서로 다를 것으로 판단된다. 또, 벽면 근방에서의 분무의 분산 형태는 공기의 혼합과정이 큰 영향을 미칠 것이며, 따라서 이들 분무의 거동은 출력성능, 연비, 배출가스 성분등을 좌우하는 중요한 요인이 될 것이다. 실기관 연소실 내의 혼합기 유동은 실린더내의 압력, 분위기 온도, 벽면온도, 유동속도등이 복잡하게 관여하는 비정상 난류 유동이므로 분류의 거동을 해석하는 것은 어렵다.

이에 저자들은 cavity형상에 따른 연료·공기 혼합 특성과 그 결과가 연소에 미치는 영향을 밝히기 위하여 직분식 디젤기관에서 cavity형상을 변화시켰을 때의 기관 출력과 미립자등 배출가스 특성을 밝힌바 있다¹⁾. 그 결과 Re-entrant type cavity의 피스톤을 사용한 경우가 동일 운전조건에서 출력이 높고 soot의 배출량이 적은 것을 확인하였다. 그 이유를 밝히기 위한 수단으로 분류의 농도 측정이 가능한 시스템²⁾을 사용하여 cavity의 단순형상 모델에 헬륨을 분사하였을 때의 헬륨·주위기체와의 혼합과정을 계측하여 정상기간과 비정상기간에 있어서의 분류의 거동 특성에 대하여 보고하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치는 가스공급부, 프로브(probe)위치이동부, 분사제어부, 농도측정부로 구성되어 있으며 Fig.1에 자동계측을 위한 개략도를 보인다. 헬륨가스의 공급은 (4)의 gas bomb로 부터 0.19MPa의 압력으로 조절되어 (3)의 압력용기에 저장된다. 이 압력용기는 1회의 분사량에 대하여 압력의 변동이 없도록 충분히 큰 용량($0.48 \times 10^{-2} m^3$)으로 제작되었으며, 컴퓨터의 신호로 부터

분사밸브를 열어 설정기간동안(20ms) 분사하게 된다. 분사밸브의 개폐는 컴퓨터(1)에서 Interface(2)로 신호를 보내고 이 신호로 분사밸브를 ON/OFF 시켜 단발분사하게 된다. 이때 분사된 가스는 진공 펌프(12)에서 일정하게 진공을 유지하는 탱크(11)로 열선 프로브(5)를 통하여 흡인하게 된다. 이때 열선 프로브는 선단에 $\phi 160\mu m$ 의 노즐을 가지므로 열선주위의 흐름은 임계조건이 되고, 헬륨과 공기의 혼합된 가스를 흡인하면 채취기체는 프로브 노즐 후단에서 음속이 되어 choke상태로 열선에 도달한다. 이때 발생된 열선의 출력값은 채취공간의 온도, 압력이 일정한 경우 채취기체의 물성치인 밀도(ρ), 정압비열(c_p), 열전달율(λ)의 함수로 되고, 단열흐름에 의해 ρ, λ 의 함수로 된다. 또한 2 성분계에서 임의 농도에서의 λ 는 온도와 농도의 함수인 $\lambda = f(c, T)$ 로 표현되고 온도를 일정하게 하면 $\lambda = f(c)$ 는 $c_p = f(c)$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 열선의 출력값은 농도 c 의 함수로 표현된다.^{3),4)} 이



- 1. Micro computer
- 2. DIO interface
- 3. Pressure chamber
- 4. Helium gas bomb
- 5. Hot wire probe
- 6. Hot wire anemometer
- 7. A/D converter
- 8. Step motor controller
- 9. Step motor
- 10. Carrier
- 11. Vacuum pump
- 12. Motor

Fig.1 Schematic diagram of experimental set up

신호는 A/D converter(7)을 거쳐 컴퓨터에 입력되고, 이때 A/D converter는 분해능이 12bit이며 시간 간격에 대한 혼합기농도의 변화값을 나타내기 위해 채취속도 12.5KHz로 4000개의 데이터를 처리하도록 되어 있다.

컴퓨터는 필요한 갯수의 데이터를 저장하고, 한편으로는 RS232C를 통하여 스텝 모터 controller(8)에 측정위치로 이동명령을 하고, 스텝 모터(9)는 이송장치에 의하여 농도프로브를 다음의 측정위치로 이동시키고, 부 반복명령에 의해 측정을 다시 시작하게 된다. 이 과정은 위치 설정 명령에 의해 측정위치에서 측정이 끝날 때까지 계속된다.

Fig.2는 농도측정을 위한 flow chart이다. 열선 프로브를 측정위치로 이동시키고 데이터 저장을 위한 메모리 번지수의 지정과 측정위치의 설정 및 측정데이터의 수를 설정하고 data I/O로 분사신호를 보낸다. Data sampling이 진행되어 지정된 번지수에 데이터를 저장하고 원하는 데이터수가 저장되었는지를 확인한다. 원하는 데이터수가 저장되면 위치이동 명령을 주어 설정된 위치까지 측정을 계속하게 된다.

직분식 디젤엔진에 있어서 분무의 구조를 해석하여 cavity형상을 최적화하기 위하여 Fig.3에 벽면층돌분류의 3가지 모델(Dish, Toroidal, Re-entrant type 이후 D-type, T-type, R-type으로 표현)을 보인다.⁴⁾ 직분식 디젤엔진에서 분사된 연료는 벽면 층돌을 피할 수 없고, 가스의 온

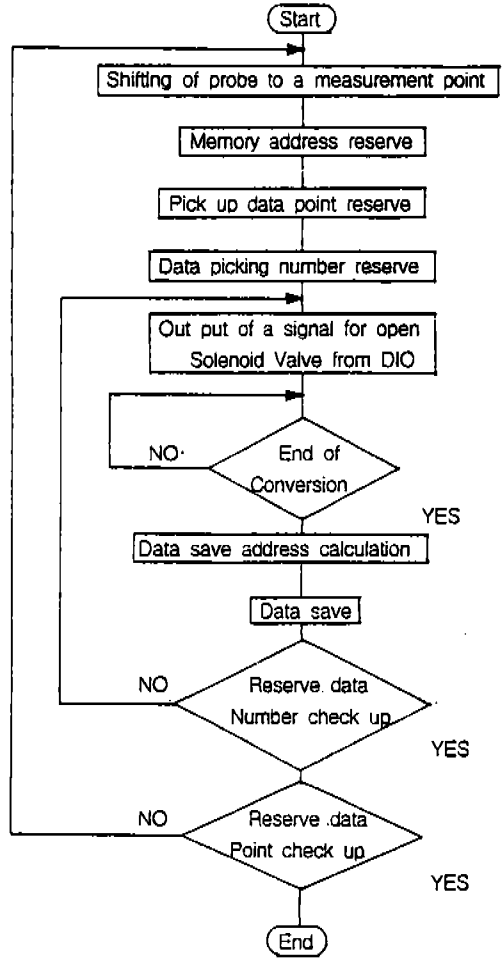


Fig.2 Flow chart of sampling data

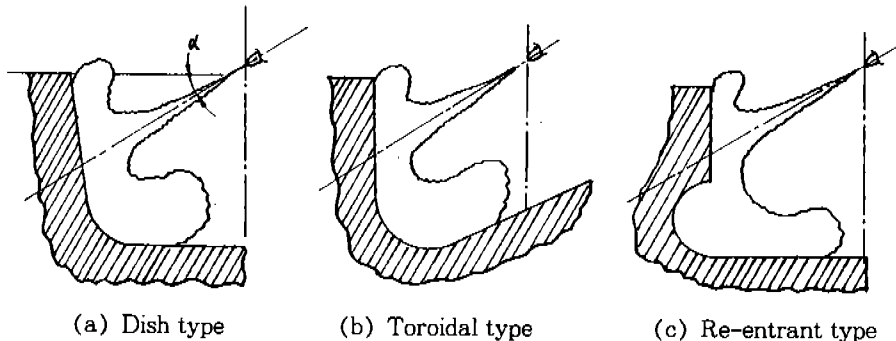


Fig.3 Impinging spray model for cavity type

도 압력은 난류와 함께 매순간 변화한다. 본 실험에서는 현상을 단순화하기 위하여 상온, 상압의 정지분위기 중에 He을 벽면에 단발분사하고 분무의 거동을 해석하였다. 본 실험의 실험조건을 Table 1에 나타낸다.

3. 실험결과

Fig.4는 Dish-type의 경우, 임의의 위치에서 농도의 시간경과를 나타낸다. τ_d 의 구간은 분사 시작 지연기간으로 컴퓨터로부터의 분사신호 입력후 노즐 출구에서 헬륨이 분출될 때 까지의 지연기간을 나타내며, 이 때의 τ_d 는 6.5ms이다. 이

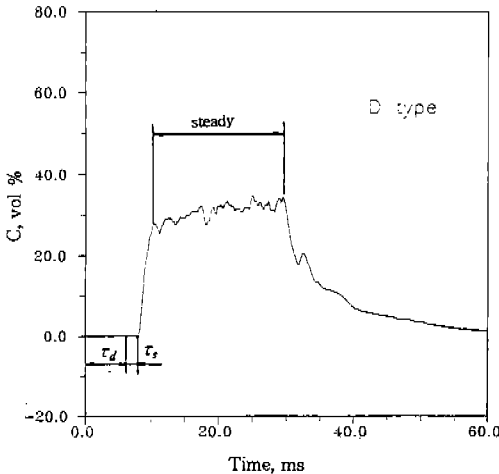


Fig.4 Steady area and non-steady area with the lapse of time

위치를 분사의 시작점으로 $t=0$ 으로 설정하였다. 이후 분류가 열선 프로브 선단에 도달하여 농도가 급상승하는점 까지를 τ_s 로 표현하고, 분사후 분무가 프로브에 도달하는 시간으로 하였다. 이후 농도는 급상승하고 약간의 상승을 보이다 일정한 값을 유지한다. 농도가 급상승하여 일정한 값을 나타낼때 까지를 비정상기간, 일정한 값을 유지하는 기간을 정상기간으로 표현하였다.

Fig.5에 cavity형상을 대표하는 좌표계를 나타내었다. 분류가 벽면에 충돌하기전 까지의 자유분류영역에서는 분류의 주류방향을 z 로 그 반경방향을 r 로 표현하였으며, 분류가 벽면에 충돌하는 중심축을 o 로 하였고, 중심축을 기점으로

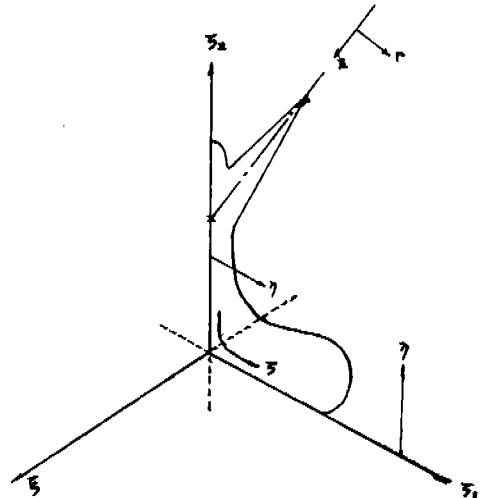


Fig.5 Represent of coordinate system.

Table 1 Experimental conditions

| | | | | |
|--------------------|-------------------|--|------------|-------------|
| Injection gas | | Helium | | |
| Ambient conditions | | Room temperature & pressure | | |
| Injection nozzle | Diameter | 1.6mm | | |
| | Length | 32mm | | |
| Pressure chamber | Pressure | 0.199MPa(2.03kgf/cm ²) | | |
| | Volume of chamber | 0.48 * 10 ⁻² m ³ | | |
| Injection periode | | 20ms | | |
| Cavity type | | Dish | Toroidal | Re-entrant |
| Dimension(w*l*h) | | 200*200*78 | 200*200*83 | 200*200*100 |

상류방향을 $-\zeta$ 로 주류가 성장하는 하류방향을 $+\zeta$ 로 표현하였다. 또한, 층돌후의 분류주류의 반경을 ζ 로 표현하였으며 cavity벽면으로 부터의 연직상방향을 η 로 나타내었다.

Fig.6은 Re-entrant type에 있어서 분류의 벽면 층돌후 cavity형상면을 따라 ζ 방향 및 $-\zeta$ 방향으로 성장하는 분류의 주류에서 측정한 평균농도의 시간 경과를 나타낸다. 분류의 벽면 층돌과 함께 분류 중심축에서의 농도는 급격한 상승을 보이고, 층돌 중심에서 ζ 방향으로 약 14mm, $-\zeta$ 방향으로 10mm위치의 농도값이 낮아지는 것은 벽면 층돌로 분무의 두께가 가장 얇아지는 위치를 나타낸다. 또한 그림에 보인바와 같이 시간에 따른 분류의 성장현상과 정상상태 도달부의 농도분포는 일치하고 있으며, 분류가 성장함에 따라 정상기간과 비정상기간은 5.2ms일 때 47.0mm, 6.2ms일 때 62.4mm, 12.4ms일 때 112.4mm, 43.4mm로 잘 구분 할 수 있으며, 분류가 성장함에 따라 비정상기간이 길어짐을 알 수 있다. 또한, $-\zeta$ 방향은 비교적 빠른 시간에 정상 농도 값에 도달하고 ζ 방향은 분류의 발달이 분사 종료시까지 계속되고 있음을 알 수 있다. R-type cavity 형상을 대표하는 위

치인 U부 구간을 A로 표현하였으며, 이 구간에서의 평균농도 시간경과는 U의 시작부에서 큰 값을 보인 후 급격히 낮아지는데, 이 기간에서의 분무는 공기와의 접촉면적이 커져 공기유입이 활발하여 평균농도가 감소하는 것으로 판단된다. 이후 분류가 cavity아래 면에 도달한 위치에서는 양쪽 방향으로 분무가 성장하므로 시간에 대한 성장이 둔화되고 있음을 알 수 있다. $-\zeta$ 방향으로는 층돌각도의 영향으로 운동에너지가 작아져 분류의 성장이 길지 못함을 알 수 있다.

Fig.7은 cavity형상 특성을 잘 파악할 수 있는, R-type에서 분류가 U부를 통과하는 위치 (층돌중심축으로부터 40mm 위치)를 기준으로 하여 동일 위치에서의 D, T-type에서의 분무의 반경 방향인 η 방향으로의 난류 혼합을 표준편차를 표준농도 값으로 나눈 변동계수로써 표현하였다. 분류가 열선에 도달하면 변동계수는 분류선단에서 상승하고, 정상치를 보이는 부분에서 일정한 값을 나타낸다. 각 cavity형상에서의 변동계수는 벽면으로 부터의 거리가 증가함에 따라 분류와 주위기체의 경계면에 접근할 수록 크게 변동하고, 벽으로부터 거리가 가까운 $\eta=2$ mm 위치에서의 변동계수 값은 약간의 상승을 보인후

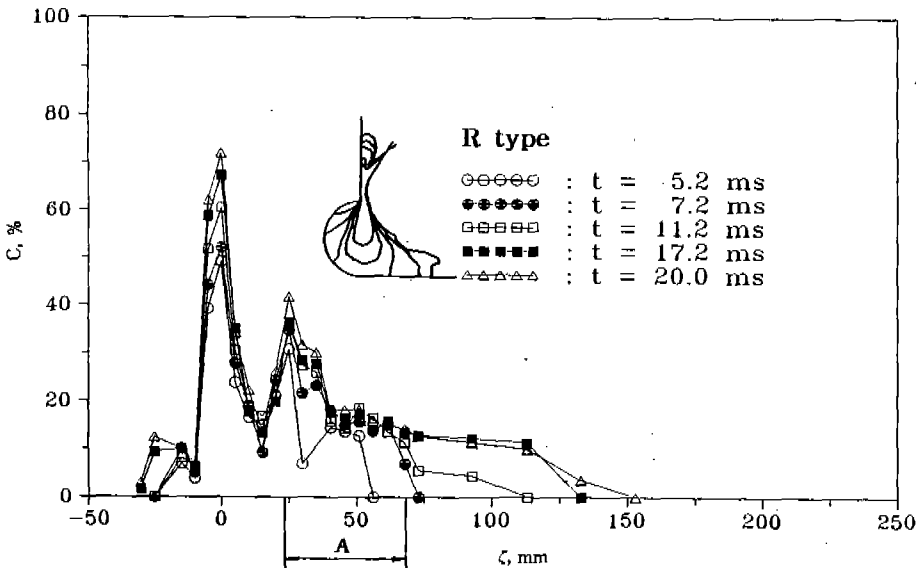


Fig.6 Growth of concentration distribution for Re-entrant cavity.

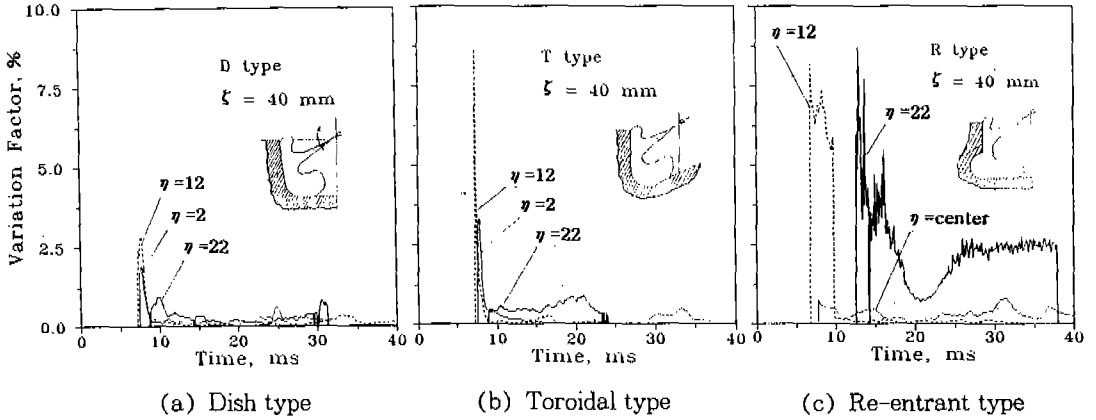


Fig.7 The variation factor with the lapse of time for each cavity type

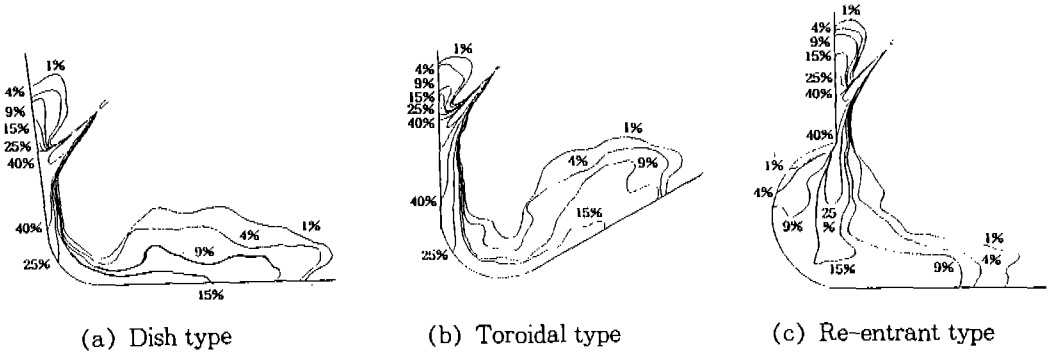


Fig.8 Isometric concentration line of a spray for each cavity model(at 20ms)

0에 가까운 값을 유지한다. 이는 분류내부 위치에서는 상류로부터의 공기유입외에는 분류주위로 부터의 공기유입현상이 거의 발생하지 않고 있음을 의미한다. 또한 변동 계수가 상승하는 것은 분류 선단에 비정상부가 존재하는 것을 나타내고, 0에 가까운 값을 유지하는 것은 시간에 따라 농도값이 변하지 않는 정상기간의 존재를 나타내고 있다. 이는 각 cavity형상에 따라 η 방향의 변동계수를 비교하면 R-type은 분류내부의 변동계수 값은 낮지만 D, T-type에 비해 많이 변동하는 것으로 보아 U부의 영향으로 주위에서 분류안으로의 공기 유입이 활발한 것으로 예측된다. 분류 중심과 분류 경계면 사이에서의 변동계수를 보면 T, R-type이 높게 나타난다. 이것은 분류 충돌각도가 작아서 분류의 운동에너지가 상

대적으로 크기 때문에 분류선단의 비정상부에서 급격히 변동하는 것으로 판단되며, T-type에 비해 R-type의 폭이 넓은 것은 U부 형상의 영향으로 분류 표면부 근처에서의 비정상기간이 오래 존재하고 공기와의 접촉면적이 넓어 주위기체 유입이 촉진되는 것으로 판단된다. 또한 분류외측의 변동계수를 살펴보면 D, T-type의 경우 유사한 경향을 보이나 R-type의 경우가 크게 변동한다. 이는 U부형상에 의한 영향으로 분류외측에서의 난류혼합이 활발하여 공기유입량이 D, T-type에 비해 많을 것으로 판단된다.

Fig.8은 분사시간 중인 20ms일 때의 각 cavity형상 특성에 따라 성장한 분류의 등농도 선도를 나타낸다. 분류 내부의 농도값 40~15%까지는 거의 일정한 형태의 안정된 등농도선을 나타

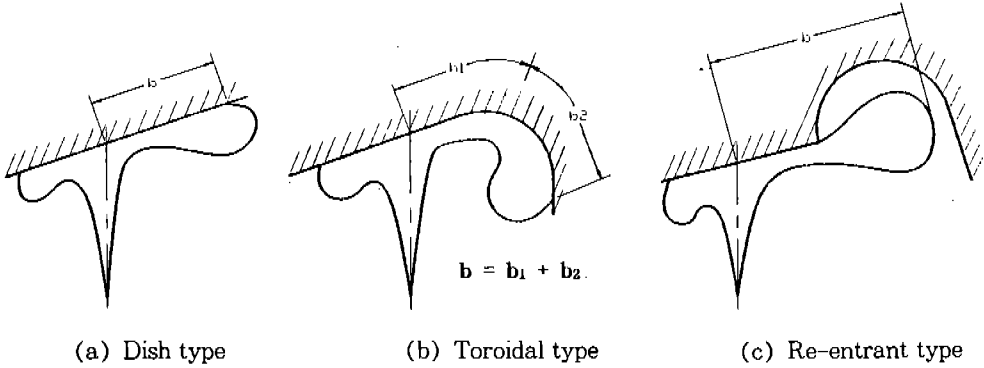


Fig.9 The modeling of spray with cavity types and the expression of b

내고 있지만, 9~1%까지는 불안정한 경계를 가진다. 즉, 하류의 분류 선단부에서는 혼합구조가 불안정하고 경계면에 가까울수록 주위기체와의 혼합이 활발해져서 농도의 구배가 작아진다는 것을 알 수 있다. 또한 D, T-type의 경우 cavity 형상을 이루는 곡면부에서 분류의 정체에 의해 등농도의 경계층이 얇아지나, R-type의 경우 U부에서의 농도구배는 동일 위치에서의 D, T-type에 비해 작다. 이것은 U부에서 분무로의 entrainment량의 증가에 의한 영향으로 판단되며, 이는 동일 조건에서 D, T-type에 비해 R-type의 cavity형상 특성이 연료·공기 혼합을 촉진시킨다는 것을 의미한다.

각 cavity형상에서 분류 충돌 중심축을 기준으로 하여 주류를 따라 ζ 및 $-\zeta$ 방향으로 성장하는 분류의 농도가 최초로 도달하는 시간거리를 분무도달길이 b 로 표현하였고 cavity형상별 도달길이 b 를 표현한 방법에 대해 Fig.9에 나타내었으며, Fig.10에 각 cavity형상에 있어서 시간에 따른 분류도달거리를 나타내었다. 상류역에서는 D-type에 비해 T, R-type의 경우가 동일 시간에서의 분류선단길이가 길다. 이것은 T, R-type의 분류 충돌각도가 상대적으로 작기 때문으로 판단되며, R-type의 경우 반경방향 분류 성장 길이가 초기에는 T-type과 동일 경향을 보이지만 8ms 이후에는 감소한다. 이는 분류가 U부를 통과할 때에는 자유분류 형태가 되어 벽면 마찰 영향을 받지않고, 선단부의 전 분류표면적이 주위기체와 접촉함으로써 분류진행방향에 대

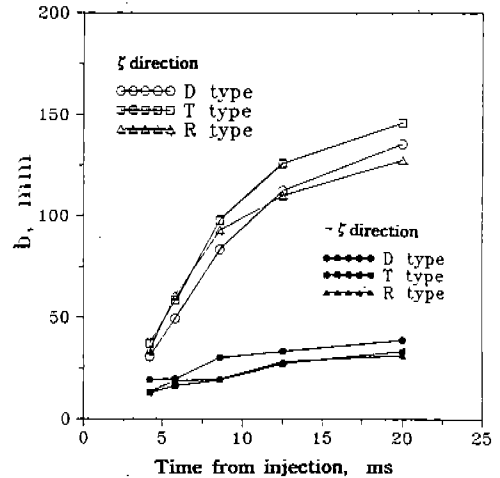


Fig.10 Spray radius(b) versus time after the impingement for each cavity model

$$b_D = 69.71 * \ln(t) - 69.10$$

$$b_T = 72.71 * \ln(t) - 64.81$$

$$b_R = 60.06 * \ln(t) - 45.43$$

하여 직각방향으로의 성장도 활발하게 된다. 분류가 성장하여 cavity 벽면에 충돌한 후에는 cavity의 U부 및 cavity 중심 방향으로 성장하기 때문에 분류 반경방향으로의 길이가 상대적으로 짧아지는 것으로 판단된다. $-\zeta$ 방향으로의 성장은 D-type의 벽면충돌각도가 T, R-type에 비해 크기 때문에 그 길이가 길게 나타난다. 다음에 각 cavity형상에서의 분류의 성장길이와 시간과의 관계식을 표현하였다.

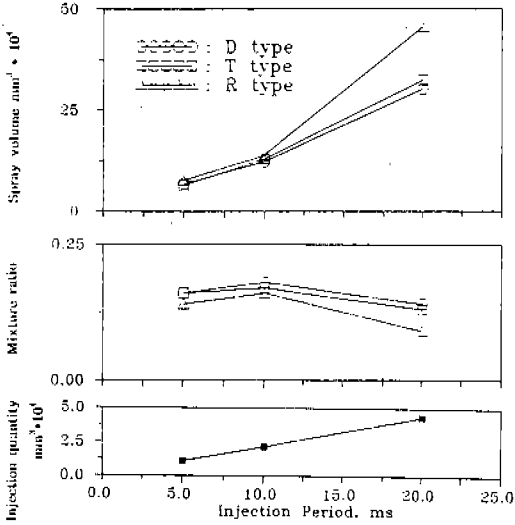


Fig.11 Injection quantity, mixture ratio and spray volume with the lapse of time in each cavity model

Fig.11은 각 cavity형상에 있어서 시간 경과에 따른 분사량과 각 cavity형상별 분류의 체적 및 헬륨과 주위기체와의 체적혼합비를 나타낸다. 시간에 따른 분사량은 $0.20 \times 10^4 \text{mm}^3/\text{ms}$ 로 5ms일 때 1.09, 10ms일 때 2.18, 20ms일 때 $4.37 \times 10^4 \text{mm}^3$ 로 시간경과에 대하여 직선적인 증가를 보이며, 분무체적은 시간 경과에 따라 지수함수적인 증가를 나타낸다. R-type의 경우 5ms일 때, D, T-type과 유사한 값을 보이나 그 값이 크게 나타나고, 20ms일 때는 그 차이가 더욱 커진다. 동일 시간에 있어서 분무체적의 크기가 R-type이 D, T-type에 비해 큰 것은 cavity형상 특성인 U부에서 자유분류의 형태로 분류선단의 표면 전체가 공기와 접촉하고 있으므로, 접촉면적이 상대적으로 증가하여 공기의 entrainment량이 증대하기 때문으로 판단된다. 또한 분무초기의 자유분류역에서 유입된 공기의 영향으로 20ms일 때 D-type이 30, 32, T-type이 32.45, R-type이 $43.54 \times 10^4 \text{mm}^3$ 로 상대적 체적차가 크게 나타난다. 또한 분사량에 대한 분무체적의 비로써 표현한 체적혼합비는 R-type의 경우가 cavity형상 특성에 의한 entrainment량의 증가

로 상대적인 체적혼합비가 작게 나타나, 공기와의 혼합이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

동일 운전조건하에서 실기의 기관에서 구한¹⁾ 연구 결과와 비교하여 보면, 분무초기에 R-type의 체적이 크고 체적혼합비가 낮으며, 반경방향으로의 난류 혼합이 많은 것은 R-type의 착화시기가 빠르고, 예혼합연소량이 작은 결과를 잘 증명해 주고 있다. 이는 초기 연소기간중 Soot, CO, HC등의 유해가스가 많이 발생하는 것을 감안하면⁵⁾ R-type이 D, T-type에 비해 예혼합연소량이 작아 유해배출가스 저감에 효과적일 것으로 생각된다. 또한 20ms일 때의 R-type의 분무체적이 상대적으로 큰 것은 R-type이 확산 연소시의 연소속도가 빨라 80% 연소도달시기가 빠르며, 출력이 증가하고 연료소비량이 작은 결과¹⁾를 잘 증명하고 있다. 또한, 전 구간에서 R-type의 체적혼합비가 분사 초기부터 종료까지 낮게 나타나는 것은 동일 운전조건에서 실기의 기관에서 실험한 SEM(Scanning Electron Microscope)사진에서 R-type의 Dry-soot가 전 조건에서 가장 작게 나타난 결과와 잘 일치하고 있다¹⁾.

4. 결 론

3가지 형상의 피스톤 cavity를 제작하여 cavity형상에 따른 충돌분류의 공간 농도분포를 해석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 벽면 충돌분류의 경우 농도의 시간경과는 자유분류인 경우의 비정상 분류와 같이 분류선단에 비정상기간이 존재하고 분류상류측에 정상기간이 존재한다. 또한 분류의 성장에 따라 비정상기간이 길어짐을 알 수 있었다.
- 2) R-type의 경우 D, T-type에 비하여 cavity형상 특성인 U부에서 분류의 반경방향 성장이 활발하고 변동계수값도 증가함을 알 수 있었다.
- 3) R-type의 경우 분류의 성장 길이가 자유분류의 형태가 되는 U부와 벽면충돌 후에는 늦어짐을 알 수 있었다. 또한 cavity형

상에 따른 분류의 성장길이 b 를 다음 실험 식으로 나타낼 수 있었다.

$$b_D = 69.71 \times \ln(t) - 69.10$$

$$b_T = 72.71 \times \ln(t) - 64.81$$

$$b_R = 60.06 \times \ln(t) - 45.43$$

- 4) 동일 분사조건에서 각 cavity에 따른 분류의 체적은 R-type이 시간이 경과 할수록 더욱 증가함을 알 수 있고, 이는 주위기체의 entrainment가 다른 cavity 조건에 비하여 더욱 활발함을 의미한다.

참 고 문 헌

1. 하종률, 이상석 외2명, "직분식 디젤기관에서의 Cavity형상이 연소 특성과 배출미립자에 미치는 영향", 한국자동차 공학회지 Vol. 12, No. 6, 1990.
2. 이상석, 김봉곤, 정성식, 하종률, "비정상 자유분류 농도특성에 관한 연구", 한국액체미립화 연구회 학술강연회논문집, pp. 134~142, 1994.
3. G. L. Brown and M. R. Rebollo, "A small fast-response probe to measure composition of a binary gas mixture", AIAA J. 1972-5, P649
4. Tanabe, Ohnishi, Fujimoto and Sato, "Experimental study of the transient hydrogen jet using a fast response probe", Int J. Hydrogen energy, Vol. 7. 1982-12
5. Yuzo Aoyagi, et al., "A Gas Sampling Study on the Formation process of Soot and No in a D. I. Diesel Engine", SAE Trans. 800254.