

Butane 및 propane의 비정상 난류 제트 특성에 관한 연구

이범호* · 송학현* · 조승환* · 홍성태* · 이대엽† · 이태우**

A study on Behavior of Turbulent Transient Jets with Butane and Propane

Beomho Lee, Hakhyun Song, Seunghwan Cho, Sungtae Hong, Daeyup Lee and Taewoo Lee

Key Words: Gaseous jet(기체 제트), Transient jet(비정상 제트), Penetration length(선단 도달 거리), Air entrainment(공기 유입현상), Virtual origin(가상 원점)

Abstract

In order to understand the behavior of transient gaseous injection used in an LPG (Liquefied Petroleum Gas) engine, turbulent incompressible transient jets with butane and propane were measured and analyzed at pressures of 1.5 bar and 2.0 bar with injector diameters of 3 mm and 5 mm. Mie-scattering method with a tracer was used, and images were processed to investigate the behavior of butane and propane jets. Distances from the nozzle to transition region were measured as $L_e/d_{inj}=4.35\sim 19.4$, where L_e and d_{inj} indicate respectively a distance from nozzle to transition point and nozzle diameter. Slits and tubes around jet at near-field were introduced to measure the effect of entrainment and the diameter of jet, which revealed that the entrainment of surrounding air is significant for developing jet diameter. When the entrainment is restricted, the behavior of jet became deviating from the baseline. It was found that the virtual origin located outside of a nozzle towards jet tip within the conditions of this work, and its location was estimated as $x_o/d_{inj}=0.56\sim 7.25$, where x_o is a distance from nozzle to virtual origin.

기호설명

p_{inj} : 분사 압력(bar)

d_{inj} : 분사 노즐의 직경(mm)

t_{inj} : 분사 신호 입력(ms)

L_{inj} : 분사 도달 거리(mm)

U_{inj} : 노즐 출구에서 속도(m/s)

ρ_{inj} : 분사 물질의 밀도(kg/m³)

ρ_a : 주위 공기의 밀도(kg/m³)

L_e : 분사 노즐에서 천이 영역까지 거리(mm)

L_s : 분사 노즐에서 슬릿까지 거리(mm)

d_s : 슬릿의 직경(mm)

L_t : 분사 노즐에서 원통 출구까지 거리(mm)

d_t : 원통의 직경(mm)

d_e : 유효 직경(effective diameter)(mm)

x_o : 노즐에서 가상원점(virtual origin)까지의 거리(mm)

1. 서 론

비정상 기체 분사(Transient gaseous injection)는 흡기 관 분사 엔진의 연료 공급 시스템에 적용되는 등 여러 가지 장치에서 사용되기 때문에, 이의 특성을 파악하고 이해하는 것이 매우 중요하다. 기체 제트의 구조 및 특성에 관한 연구는 많이 수행⁽¹⁻⁴⁾되었지만, 비정상 기체 분사, 즉 비정상 제트(Jet)에 관한 연구 사례는 많지 않

(2010년 3월 16일 접수~2010년 6월 9일 심사완료, 2010년 6월 17일 게재확정)

*인하대학교 기계공학과 공과대학원

**국립환경연구원 교통환경연구소

†책임저자, 회원, 부교수, 인하대학교 기계공학과

E-mail : dylee@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7309 FAX : (032)876-7443

다. 비정상 제트에 대해 Iyer⁽⁵⁾ 등은 비정상 분사 기체 제트에 대하여 전산 모의해석을 수행하였고, 주위 공기의 유입현상(Entrainment)은 분사 초기를 포함하여 분사 전체의 경계 주위에서 발생하고 초기 제트 주위의 높은 속도 영역에서도 활발히 발생하는 것으로 예측하였다. Cossali 등⁽⁶⁾은 노즐과 가까운 영역에서 제트의 거동을 LDV(Laser doppler velocimeter)를 이용하여 관측하였고, 노즐 전단의 제트 주위에 공기의 유입현상으로 인한 재순환 영역이 나타나며 공기의 유입현상으로 인하여 분사 개시 이후에 제트 주위의 유동이 천이 상태를 거쳐 준정상 상태로 변함을 밝혔다. 따라서 노즐 직경의 수십 배 이상으로 발달된 제트의 경우에는 기존의 Momentum jet theory에 의한 $L_{inj} \sim t_{inj}^{1/2}$ 관계를 이용하여 제트의 전체적인 거동은 잘 설명되지만, 제트의 분무 선단 도달 거리가 노즐에 가까운 초기 상태 등에서는 기존 모델⁽⁷⁾을 적용할 수 없고, 천이 영역을 포함하여 제트의 거동을 설명하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 흡기관 분사 방식의 기체 분사 LPG(Liquefied Petroleum Gas) 엔진 시스템에 적용되고 있는 비정상 분사 시스템의 이해를 높이기 위하여 butane 및 propane을 이용한 비정상 기체 제트의 특성을 측정하고 분석하는 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 장치의 구성

Figure 1에 실험 장치의 구성도를 나타내었다. 레이저 sheet 및 Mie scattering을 이용하여 기체 상태의 분사 패

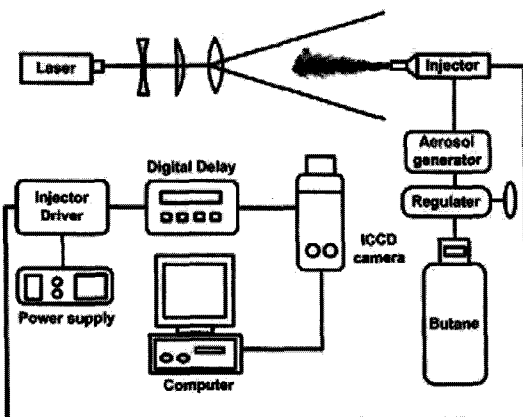
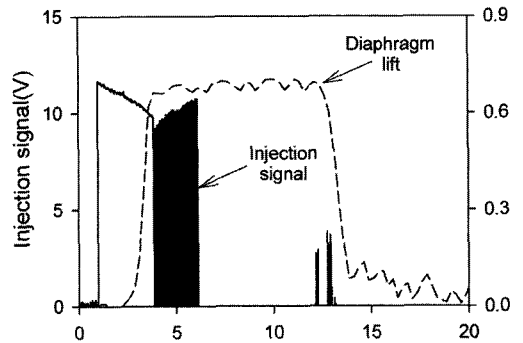
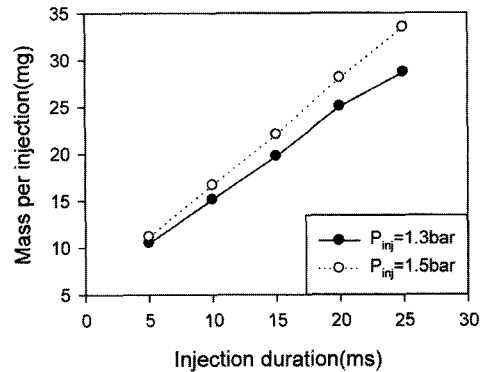


Fig. 1 A schematic diagram of measurement system



(a) Behavior of diaphragm for $t_{inj}=5ms$



(b) Injected mass depending on injection timing

Fig. 2 Characteristics of an injector

턴을 측정하기 위하여 butane 및 propane에 에어로졸 제너레이터(LAVision)로 tracer(DOP : Dioctyl Phthalate)를 주입하여 사용하였다. Mie scattering에 의한 분무 패턴은 ICCD 카메라(Princeton Instruments PI-MAX2)로 측정하였고, 컴퓨터에 저장한 후에 화상처리 및 분석을 수행하였다. 기체 분사 인젝터(Nikki)의 구동은 Digital delay(DG-535)를 이용한 지연 신호를 발생시켜 지정된 시간에 분사 패턴을 관측할 수 있도록 구성하였다. 사용된 기체 인젝터의 구동 특성을 측정된 결과는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. Peak-and-hold 방식의 구동 신호에 의하여 인젝터의 다이어프램이 상승하게 되고, 이 구간에서 압축된 기체가 분사되게 된다. 인젝터 구동 입력신호에 비하여 실제 다이어프램이 상승한 시간은 약간 지연 및 증가 되지만, 구동 입력신호와 다이어프램 상승 기간은 비례하는 특성을 갖는다. 구동 입력신호 기간에 따른 1회 평균 분사량 측정 결과는 Fig. 2(b)와 같다.

이를 구하기 위해서 테들러백에 1,000회 분사한 양을 포집한 후 질량을 측정하고, 이로부터 1회 평균 분사량(약 11.2 mg)을 구하였다. 본 실험에서는 분사 구동 입력

Table 1. Experimental conditions for jets

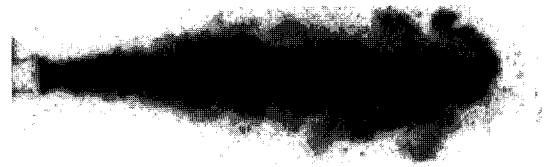
Exp. variables	Ranges
Gas component	butane, propane
Injection pressure(bar)	1.5, 2.0
Nozzle diameter(mm)	3, 5
Diameter of slit(mm)	7, 8
Moving distance of slit(mm)	5~40 per 5
Diameter of tube(mm)	8
Length of tube(mm)	20, 25, 30

신호를 5 ms로 동일하게 모든 측정 조건에 적용하였다.

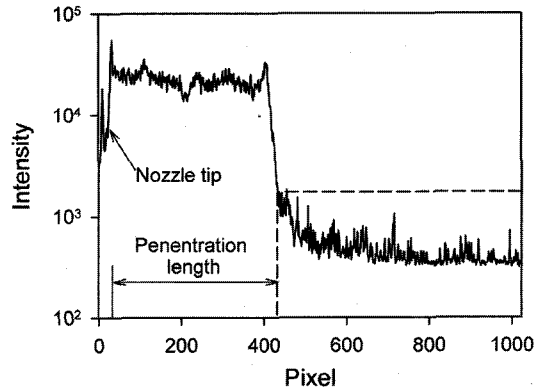
실제 분사 기간은 약 8.34 ms이고, 이 경우에 분무 선단 도달거리는 약 20×노즐직경 이상이 되어 완전히 발달된 준정상상태(Quasi-steady) 영역에 도달하게 된다. 실험 조건은 Table 1에 나타난 바와 같이, LPG의 주요 성분인 부탄 및 프로판을 각각 사용하였고, 분사 압력은 1.5 bar 및 2.0 bar, 분사 노즐의 직경은 3 mm 및 5 mm 조건을 각각 적용하였다. 노즐의 출구 주위에는 라운드 가공을 하지 않았고 절단된 단면 그대로 형상을 적용하였다.

2.2 분무 선단 도달거리 계산 방법

분사는 수평방향으로 실시하였고 ICCD 카메라를 통하여 Fig. 3(a)와 같이 화상을 측정하였다. ICCD의 각 화소에서 측정된 빛의 강도를 이용하여 분사 방향(x축)의 선단부분의 도달거리를 산출하였다. 분사가 이루어지는 특정 y좌표에 대해 x축 방향의 각 화소의 강도를 나타내면 Fig. 3(b)와 같이 분사가 도달한 구간의 화소에서 측정된 강도가 분사가 도달하지 않은 구간의 화소에서 측정된 강도보다 강함을 알 수 있다. 분사가 도달되지 않는 영역의 평균 강도와 분사가 도달한 구간의 평균 강도의 차이의 5%를 threshold로 설정하여 분사가 도달하는 x 좌표를 산출하였고, 분사가 이루어지는 y축 범위의 각 y좌표에서의 산출된 분무 선단 도달거리의 최대값을 분사거리로 판단하였다. 각 실험 조건에서 5회 반복 측정을 하였고, 이로부터 분석된 결과의 평균값을 이용하여 분사 특성을 파악하였다. 노즐 주위의 분무 거동을 보다 정밀하게 파악하기 위하여 분사 초기 1 ms 동안은 0.05 ms 간격으로 측정(0.074 mm/pixel에 해당)하였고, 이후에 1 ms~10 ms 동안은 1 ms 간격으로 분무 거동을 측정(0.262 mm/pixel에 해당)하였다. 즉 1개



(a) Processed image of butane jet



(b) Threshold for image processing

Fig. 3 Image processing from measured impulsive jets

의 분무 관측을 위하여 약 150장(30장×5회)의 화상을 관측하여 분석하였다.

2.3 슬릿 및 원통을 사용한 분사 특성의 관측

Cossali⁽⁶⁾ 등 연구에서 노즐 전단의 제트 주위에 공기의 유입현상으로 인한 재순환 영역이 Fig. 4와 같이 나타남을 보였다. 이로부터 제트의 체적은 주위 공기의 유입현상으로 인하여 분사 개시 이후에 제트 주위의 유동은 천이 상태를 거쳐 준정상 상태로 변함을 밝혔다. 본 연구에서 비정상 기체 제트의 구조를 파악하기 위하여 Fig. 5 및 Fig. 6과 같은 슬릿 및 원통을 사용하여 분사

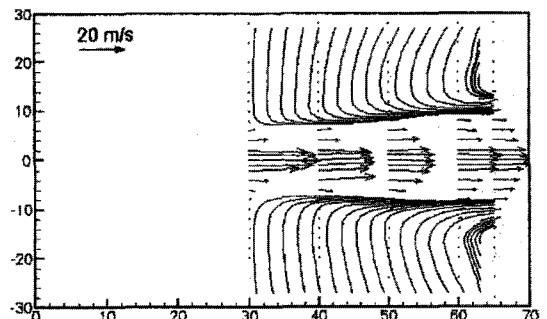


Fig. 4 Measured velocity vectors near nozzle by LDV showing significant radial entrainment and lateral flows along boundary layer⁽⁶⁾

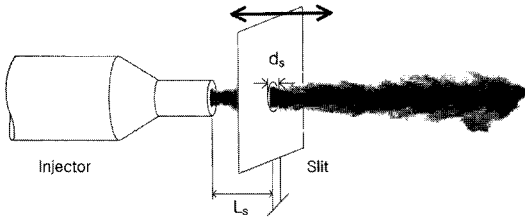


Fig. 5 A schematic of experiment with slit

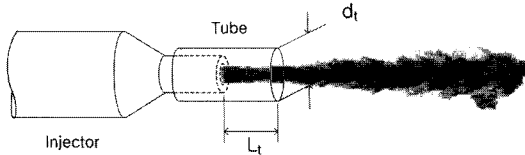


Fig. 6 A schematic of experiment with tube

초기의 분사 노즐 전단의 주변 유동을 변화시켜 분사 특성의 변화를 관측하였다. 노즐 부근에서 노즐 직경보다 약간 큰 직경의 슬릿을 사용하여 분사를 통과시키게 되면 슬릿의 직경 및 노즐로부터 이동거리에 따라 제트가 간섭을 받는 정도를 파악할 수 있다. 또한 노즐 주위 공기로부터의 유입현상의 효과를 관측하기 위하여 제트 주위에 원통을 적용하여 제트의 거동의 변화를 관찰하였다.

3. 측정 결과 및 분석

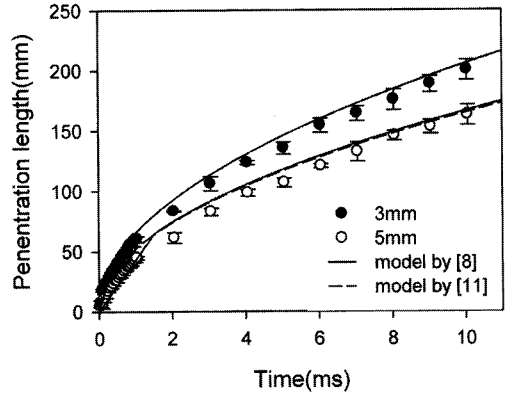
3.1 분사 직경에 따른 butane의 분사 특성

Figure 7에 기체 butane의 비정상 분사시 분사 노즐 직경에 따른 분무 선단 도달거리 측정 결과를 나타냈다. 여기서 시간(t_{inj})은 분사개시후 시간(ASI: After start of injection)에 해당된다. 분사 노즐의 직경이 3 mm인 경우에 5 mm에 비하여 분무 선단 도달거리가 길어짐을 알 수 있다. 이는 동일한 압력 차이에 대하여 노즐 직경이 작은 경우에 초기 속도가 높기 때문으로 판단된다. Abraham⁽⁸⁾은 quasi-steady momentum jet theory를 적용하여 비정상(Transient) 기체 제트의 시간에 따른 분무 선단 도달거리를 다음과 같이 예측하였다.

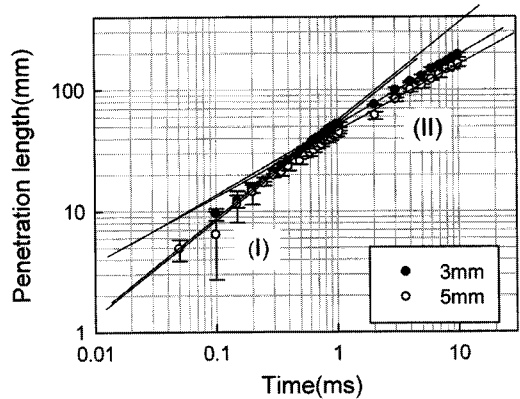
$$L_t = c \sqrt{d_e U_{inj} t_{inj}} \quad (1)$$

여기서 c 는 상수, effective diameter d_e 는

$$d_e = d_{inj} \left(\frac{\rho_{inj}}{\rho_a} \right)^{0.5}$$



(a) Nozzle diameter varied with $p_{inj}=1.5\text{bar}$ in linear scale



(b) In logarithmic

Fig. 7 Penetration length as a function of time with varying nozzle diameters for butane

Table 2. Measured initial speed of jets

Exp. variables			Speed(m/s)
Gas	p_{inj}	d_{inj}	
butane	1.5	3	175
		5	70
	2.0	3	213
		5	85

이다.

노즐 출구에서 속도는 관측된 화상을 분석하여 구하였고, 결과는 Table 2에 나타내었다. 상수 c 는 노즐의 특성 및 연료의 물성과 관련된 값이기 때문에 먼저 butane($d_{inj}=3$ 및 5 mm, $p_{inj}=1.5$ bar)의 경우에 실험결과와 비교하여 구하였다. 이로부터 다른 변수의 변화에 따

른 분무 선단 도달거리를 계산하였다.

동일한 데이터를 로그 스케일로 표시하면 Fig. 7(b)와 같다. 분사 초기에 $L_{inj} \sim t_{inj}$ 에 근사한 분무 선단 도달거리 특성을 나타내는 영역(I)과 $L_{inj} \sim t_{inj}^{1/2}$ 의 특성을 나타내는 영역(II)로 구분할 수 있음을 알 수 있다. 영역(I)은 flow establishment 또는 developing region으로 potential core가 존재하고, 많은 외부 공기의 유입현상에 따른 급격한 제트 부피 증가는 일어나지 않는 곳이다.

영역(II)는 established flow 또는 developed region으로 많은 외부 공기의 유입현상에 따라 분사각이 넓어지고, 큰 eddy로 구성된 coherent 구조가 나타나는 부분이다⁽³⁾. 두 영역의 사이에서는 천이(Transition) 영역이 존재하고, 노즐로부터 이 구간까지의 거리(L_e)는 Table 3에 나타낸 바와 같이 연구에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. L_e 는 potential core의 길이에 해당되고, 이 부분에서 불안정성(Instability)에 의한 큰 스케일의 eddy가 발생하기 시작한다. 이러한 경계층의 유동은 가

상원점(Virtual origin) 부근($x/d_{inj}=1.333$)에서 시작하는 것으로 보고된 바가 있다⁽¹⁶⁾. 본 연구에서 추정된 potential core의 길이는 Table 4와 같다.

Kuo 등⁽¹¹⁾은 비정상 난류 제트에 대하여 전산 모의해석을 수행하였고, scaling law를 통하여 계산결과와 그 동안 보고된 실험 결과간의 비교를 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 비정상 비압축성 난류 제트(Transient incompressible turbulent jet)의 분무 선단 도달거리를 제시하였다.

식(1)과 같은 형태에서

$$c=0.608Re^{0.053} \text{ for } t^* \leq 11.51$$

$$c=2.06Re^{0.027} \text{ for } t^* > 11.51 \quad (2)$$

여기서 $t^*=t_{inj}/(d_{inj}Re^{0.05}/U_{inj})$ 로 무차원화된 시간을 의미한다.

본 실험결과와 계산결과와의 비교는 Fig. 7에 나타내었다. Abraham⁽⁸⁾의 계산식은 분사 후 1 ms구간에서는 분무 선단 도달거리가 노즐 3 mm인 경우 49.0%, 5 mm인 경우 20.0% 길게 계산되었으며 1 ms 이후 구간에서는 노즐 3 mm인 경우 8.5%, 5 mm인 경우 6.4% 길게 계산되었다. Kuo⁽¹¹⁾의 계산식은 분사 후 1 ms 구간에서 노즐 3 mm인 경우 21.5% 짧게 예측 되었으며, 5 mm인 경우 5.3% 길게 계산되었다. 분사 후 1 ms 이후 구간에서는 노즐 3 mm에서는 7.5%, 5 mm인 경우 6.5% 길게 계산되어 분사 후 1 ms 이후 구간에서 근사하게 예측됨을 확인할 수 있다. Fig. 8에는 propane의 실험 및 계산 결과와의 비교를 나타내었으며 Abraham⁽⁸⁾의 계산식은 분무 선단 도달거리를 노즐 3 mm와 5 mm에 대해 분사 후 1 ms구간에서는 37.7%와 64.1%, 1 ms 이후 구간에

Table 3. Length from nozzle to transition in literatures

Literature	L_e/d_{inj}
Dent ⁽⁹⁾	4
Khan et al. ⁽¹⁰⁾	$2.13(Re)^{0.0097}$
Lee et al. ⁽⁴⁾	~5
Kuo et al. ⁽¹¹⁾	$7(Re)^{0.053}$
Andreassi et al. ^{(12)*}	$10.8(Re)^{0.053}$
Bajpai et al. ^{(13)*}	$18.5(Re)^{0.053}$
Joshi et al. ⁽¹⁵⁾	39

*Estimated from their experimental results

Table 4. Length of potential core measured in this work

Exp. variables			L_e/d_{inj}
Gas	p_{inj}	d_{inj}	
butane	1.5	3	8.77
		5	4.35
	2.0	3	15.04
		5	6.16
propane	1.5	3	7.11
		5	4.35
	2.0	3	19.40
		5	5.70

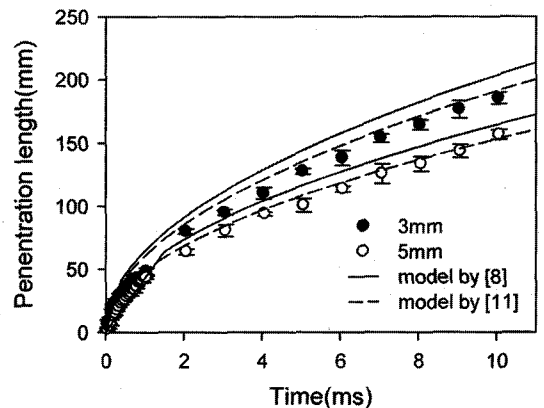
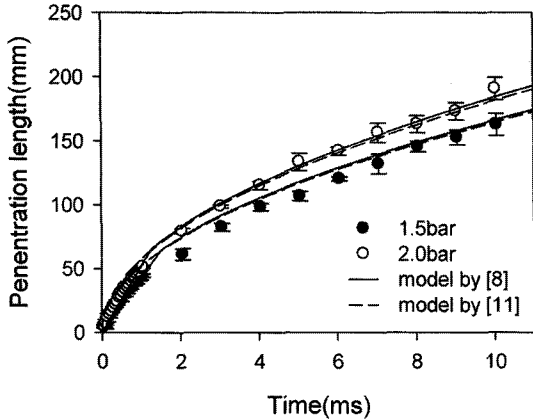
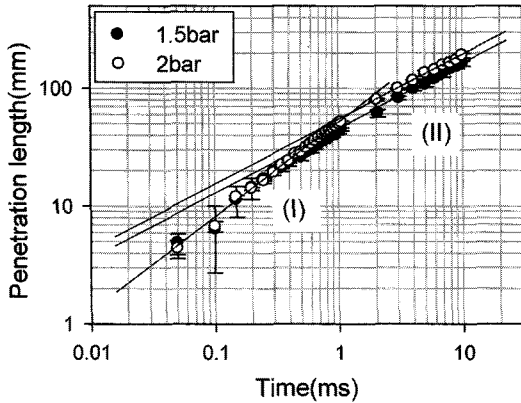


Fig. 8 Penetration length as a function of time with varying nozzle diameters for propane



(a) Injection pressure varied with $d_{inj}=5\text{mm}$ in linear scale



(b) In logarithmic scale

Fig. 9 Penetration length as a function of time with varying injection pressures for butane

서는 8.6%와 5.0% 길게 계산되었다. Kuo⁽¹¹⁾의 계산식은 분무 선단 도달거리를 노즐 3 mm와 5 mm에 대해 분사 후 1 ms구간에서는 30.0%와 -14.7%, 1 ms 이후 구간에서는 15.7%와 10.8% 길게 계산되었다.

3.2 분사 입력에 따른 분사 특성

Figure 9에 기체 butane의 비정상 분사시 분사 압력에 따른 분무 선단 도달거리 측정 결과를 나타내었다. 분사 압력이 2 bar인 경우에 1.5 bar에 비하여 분무 선단 도달거리가 길어졌고, 이는 분사 압력차의 증가에 따른 초기 분사 속도의 증가에 기인한 것이다. Butane 제트의 경우와 유사하게 영역(I) 및 (II)가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다(Fig. 9(b)). 식(1) 및 식(2)의 관계식으로부터 계산된 결과도 같이 비교한결과 Abraham⁽⁸⁾의 계산식은

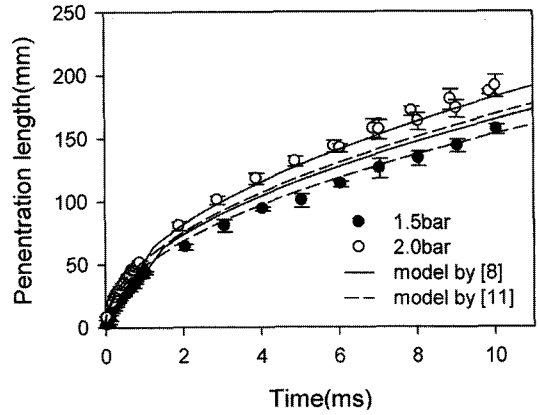


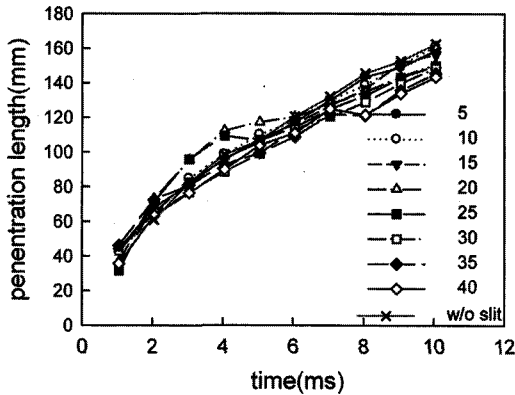
Fig. 10 Penetration length as a function of time with varying injection pressures for propane

분무 선단 도달거리를 분사압력 1.5 bar와 2.0 bar에 대해 분사 후 1 ms구간에서는 49.0%와 62.1%, 1 ms 이후 구간에서는 8.5%와 -0.9% 길게 계산되었다. Kuo⁽¹¹⁾의 계산식은 분무 선단 도달거리를 분사압력 1.5 bar와 2.0 bar에 대해 분사 후 1 ms구간에서는 -21.5%와 44.0%, 1 ms 이후 구간에서는 7.5%와 -0.3% 길게 계산되어 전체적인 경향은 잘 묘사되고 있음을 알 수 있다.

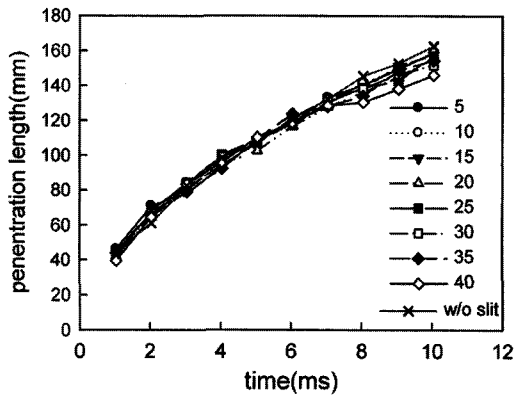
Figure 10에는 propane의 실험 및 계산 결과와의 비교를 나타내었다. Abraham⁽⁸⁾의 계산식은 분무 선단 도달거리를 분사압력 1.5 bar와 2.0 bar에 대해 분사 후 1 ms 구간에서는 37.7%와 70.0%, 1 ms 이후 구간에서는 8.6%와 -7.0% 길게 계산되었다. Kuo⁽¹¹⁾의 계산식은 분무 선단 도달거리를 분사압력 1.5 bar와 2.0 bar에 대해 분사 후 1 ms구간에서는 30.0%와 46.8%, 1 ms 이후 구간에서는 15.7%와 -0.4% 길게 계산되었다.

3.3 제트 주위 공기 유입현상 특성의 관찰

본 연구에서는 제트의 구조를 파악하기 위하여 Fig. 5에 나타난 바와 같이 슬릿을 이용하여 관측을 수행하였다. 노즐 직경 5 mm의 경우에 대하여 슬릿 직경(d_s) 7 mm 및 8 mm를 적용하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 노즐에 가까운 제트 주위에서도 공기의 유입현상은 활발히 일어나고, 제트의 직경 방향의 속도 성분이 큼을 알 수 있다. 따라서 슬릿을 적용하게 되면 제트의 직경 방향의 흐름에는 큰 방해가 되지 않지만, 제트 축방향의 공기 흐름은 차단하는 효과를 가져 오게 된다. 이를 통하여 제트 주위의 공기 유입현상을 간단히 파악할 수 있게 된다. Fig. 11(a) 및 (b)에 슬릿 직경 7 mm 및 8



(a) With slit of $d_s=7\text{mm}$



(b) With slit of $d_s=8\text{mm}$

Fig. 11 Comparison of penetration length between baseline and with slit

mm의 실험결과를 각각 나타내었다. 슬릿 직경이 7 mm 일 경우에 노즐 출구에서 시작하여 슬릿을 점차 제트 선 단 방향으로 이동하면서 제트의 거동을 관측하여 보면 약 20 mm 부근에서 제트에 거동에 변화가 발생하게 된다. 이로부터 이 지점에서 슬릿에 의하여 제트 주위의 공기 흐름 및/또는 제트 자체가 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 직경이 8 mm인 경우(Fig. 11(b))에는 제트가 방해 를 적게 받고 있음을 알 수 있고, 7 mm의 경우와 비교하여 보다 선단 방향까지 슬릿을 이동하여도 제트에 거동에 현저한 변화가 없음을 알 수 있다. 이로부터 영역(I)에서 제트의 직경이 확장되는 특성을 파악할 수 있다.

제트에서 주위 공기의 유입현상에 변화가 발생할 경우 제트의 발달에 많은 영향을 주게 될 것으로 예상 되고, 이는 Fig. 6과 같이 노즐 주위에 원통을 사용하여 제트 주위에서 공기의 유입을 차단하여 분사를 수행하 면 간단히 파악할 수 있다. 결과는 Fig. 12와 같고, 원통 을 사용한 경우 노즐로부터 원통 출구의 거리(Lt)와 무

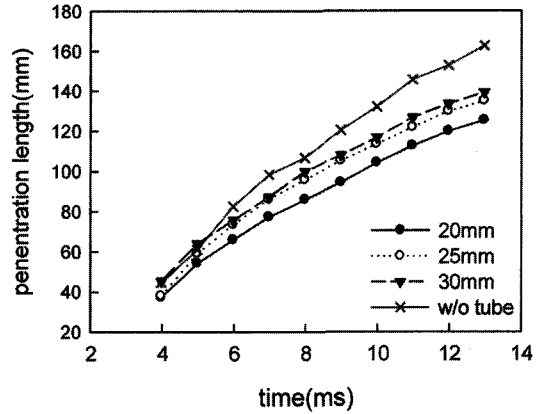


Fig. 12 Comparison of penetration length between baseline and with tube

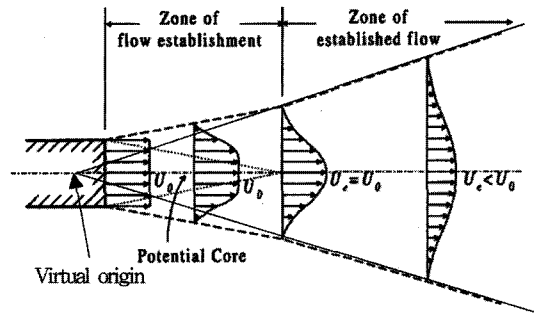


Fig. 13 A schematic diagram of transient jet showing the location of virtual origin⁽¹⁸⁾

관하게 분무 선단 도달거리가 짧아지며 이를 통해 제트 의 발달이 영향을 받음을 알 수 있다. 이는 Cossali 등⁽¹⁵⁾ 이 보고한 바와 같이 노즐 주위의 제트에서도 공기의 활 발한 유입현상이 일어나고 있음을 나타내는 것이다. 또 한 Iyogun 등⁽¹¹⁾은 제트의 노즐(직경 4.82 mm) 주위에 원 통(직경과 길이가 각각 12 mm)을 설치하였을 경우에 제 트의 분무 선단 도달거리가 짧아지는 것을 보고하였다.

3.4 비정상 난류 기체 제트의 구조

기체 제트의 형태는 Fig. 13에 나타난 바와 같이 노즐 로부터 점차적으로 직경이 커지는 구조를 갖고 있다. 천 이 영역까지 직경의 증가율은 천이 영역이후에 비하여 작고, potential core는 천이 영역에서 소멸되는 것으로 알려져 있다⁽¹⁻⁴⁾. 자기 상사성(Self-similarity)을 나타내는 제트는 가상원점에서 시작하는 cone 형태로 나타낼 수 있고, 준정상상태에 도달하기 이전의 천이 영역 전까지 의 거동에 따라 가상원점의 위치가 결정되게 된다. Iyo-

gun 등⁽¹¹⁾은 노즐 출구 속도가 30 m/s 및 65 m/s일 경우에 가상원점은 각각 $1.71d_{inj}$ 및 $4.44d_{inj}$ 로 보고하였다. 따라서 속도가 증가할수록 가상원점은 노즐로부터 멀어짐을 알 수 있다. Johari 등⁽¹⁷⁾은 가상원점이 $-1.6d_{inj} \sim 1.5d_{inj}$ 로 변화함을 나타내었다. 낮은 노즐 속도의 제트 속도 조건에서 가상원점은 nozzle 내부에 위치($x_o < 0$)할 수도 있지만, 높은 노즐 속도의 경우에는 노즐 출구측의 potential core 내부에 위치($x_o > 0$)하게 된다. 본 연구에서 developed region의 분사각도를 통해 구한 가상원점의 위치는 약 $0.56d_{inj} \sim 7.25d_{inj}$ 로서 모든 실험조건에서 가상원점의 위치는 노즐 출구 이후에 위치하게 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기체 분사 LPG 엔진 등에 적용되고 있는 비정상 기체 분사의 특성을 파악하기 위하여 비정상 난류 butane 및 propane 제트의 거동을 분사 압력 1.5 bar 및 2.0 bar, 분사 직경 3 mm 및 5 mm 범위에서 관측하고 분석하였다.

1) 분무 선단 도달거리는 기존의 천이 영역을 고려한 모델과 고려하지 않은 모델을 이용하여 전체적으로 예측이 됨을 알 수 있고, 천이 영역 거리는 $L_c/d_{inj} = 4.35 \sim 19.4$ 범위로 측정되었다.

2) 제트 주위에 슬릿과 원통을 이용한 실험을 통하여 분사 초기에 주위 공기의 유입현상 현상이 활발하게 발생함을 알 수 있고, 공기의 유입현상이 제한을 받을 경우에 제트 거동에도 많은 변화가 발생함을 알 수 있다.

3) 슬릿 실험을 통하여 천이 영역 도달 이전의 제트의 직경 등을 파악할 수 있었고, 이로부터 가상원점의 위치는 $x_o/d_{inj} = 0.56 \sim 7.25$ 로 추정되었고, 가상원점은 노즐 출구 이후에 위치함을 알 수 있다.

후 기

본 연구의 일부는 인하대학교 기계공학과 BK21사업단 지원으로 수행되었고 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

(1) G. N. Abramovich and L. Schindel, "The theory of tur-

bulent jets", The MIT Press, 1963.

- (2) I. A. Vulis, V. E. Karelin and B. P. Ustimenko, "Expansion of a turbulent gas jet in a wake", Fluid Dynamics, Vol. 1, 1966, pp. 81~88.
- (3) P. S. Landa, A. A. Zaikin, A. S. Ginevsky and YE. V. Vlasov, "Turbulence and coherent structures in subsonic submerged jets. Control of the turbulence", International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 9, 1999, 397~414.
- (4) J. Lee and V. Chu, "Turbulent jets and plumes-A lagrangian approach", Kluwer Academic Publishers, 2003.
- (5) V. Iyer and J. Abraham, "Penetration and dispersion of transient gas jets and sprays", Combustion Science and Technology, Vol. 130, 1997, pp. 315~334.
- (6) G. E. Cossali, A. Coghe and L. Araneo, "Near-field entrainment in an impulsively started turbulent gas jet", AIAA Journal, Vol. 39, 2001, pp. 1113~1122.
- (7) P. G. Hill and P. Ouellette, "Transient turbulent gaseous fuel jets for diesel engines", ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 121, 1999, pp. 93~101.
- (8) J. Abraham, "Entrainment characteristics of transient gas jets", Numerical heat transfer, Part A, Vol. 30, 1996, pp. 347~364.
- (9) J. C. Dent, "A basic for the comparison of various experimental methods for studying spray penetration", SAE paper 710571, 1971.
- (10) H. J. Khan, M. Rhee and O. Figueroa, "Characterization of gaseous helium jet dispersion to atmosphere", Cryogenics, Vol. 32, 1992, pp. 20~27.
- (11) T. W. Kuo and F. V. Bracco, "On the scaling of transient laminar, turbulent, and spray jets", SAE paper 820038, 1982.
- (12) L. Andreassi, A. L. Facci and S. Ubertini, "Numerical simulation of gaseous fuel injection : A new methodology for multi-dimensional modelling", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009.
- (13) S. Bajpai and M. S. Triumkudulu, "An experimental study of impulsively started turbulent axisymmetric jets", The European Physical Journal B, Vol. 61, 2008, pp. 293~297.
- (14) C. O. Iyogun and M. Birouk, "Effect of exit velocity on the entrainment and spreading of a turbulent free jet issuing from an axisymmetric nozzle with and without a sudden expansion", AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2008-765, January 2008, pp.

1~12.

- (15) A. Joshi and W. Schreiber, "An Experimental examination of an impulsively started incompressible turbulent jet", *Experiments in Fluids*, Vol. 40, 2006, pp. 156~160.
- (16) M. K. Ibrahim and Y. Nakamura, "Correlation between linear stability theory and transition of compressible jet shear layer", *Trans. Japan. Soc. Aero. Space Sci.*, Vol. 45, 2002, pp. 35~44.
- (17) H. Johari, Q. Zhang, M. J. Rose and S. M. Bourque, "Impulsive started turbulent jets", *AIAA Journal*, Vol. 35, 1997, pp. 657~662.
- (18) H. J. Wang, "Jet introduction in a still or co-flowing environment", Ph.D.Thesis, The Hong Kong University of Science and Technology, 2000.