

<논 문>

충돌제트의 유량분포 및 혼합특성에 관한 실험적 연구

이충훈* · 정영호** · 정석호***

(1996년 6월 3일 접수)

An Experimental Study on Flow Distribution and Mixing in Impinging Jets

C.H. Lee, Y.H. Jung and S.H. Chung

Key Words : Impinging Jets(충돌제트), Liquid Sheet(액막), Droplet(액적), Acid-Base Titration(산-염기 적정)

Abstract

Mixing process of impinging jets of liquid oxidizer and liquid fuel is simulated by using water and sodium carbonate (Na_2CO_3) solution. The shapes of liquid sheets are visualized and flowrate distributions are measured by collecting droplets using measuring cells. Mixing characteristics are studied by using acid-base titration. Stable liquid sheets are formed and two liquid jets are well mixed for symmetric impinging jets. Similarity in flowrate distribution for various measuring heights is observed. For asymmetric impinging jets, liquid sheets become unstable as the difference in the velocities of jets increases. In some extreme cases, liquid sheets are not formed and the jets are separated. Dimensionless variables are adopted demonstrating similarity in flowrate distribution. Mixing characteristics vary significantly with experiment conditions.

기 호 설 명

C : 용액의 농도 (M)
 D : 제트분사노즐의 직경 (mm)
 H : 제트충돌점과 측정격자셀의 높이 차 (mm)
 m : 질량 (kg)
 Q : 체적 유량 (ml/min)
 Q^* : 무차원 유량
 $Q_{F,t}$: 분사된 연료(탄산나트륨)용액의 전체유량 (ml/min)
 $Q_{O,t}$: 분사된 산화제(물) 용액의 전체유량 (ml/min)
 Re : Reynolds수
 Δt : 이중노출시간 간격 (sec)

U : 제트유속 (m/sec)
 V : 부피 (ml)
 X : 부피분율
 x : 액막면에 평행한 좌표
 x^* : 무차원 x 좌표
 Y : 질량분율
 y : 액막면에 수직인 좌표
 y^* : 무차원 y 좌표

하첨자

F : 액체연료, 탄산나트륨용액
 L : 액체
 M : 혼합용액
 N : 탄산나트륨용액
 O : 액체산화제, 물
 $O+F$: 액체연료와 액체산화제의 혼합용액

*회원, 서울대학교 터보·동력기계연구센터

**회원, 서울대 대학원(현소속: 현대자동차(주))

***회원, 서울대학교 기계공학과

0.95 : 전체유량의 95%가 도달하는 위치

그리스문자

θ' : 제트충돌각 (degree)
 θ_1 : 액막에 대한 물 제트의 분사각 (degree)
 θ_2 : 액막에 대한 탄산나트륨용액 제트의 분사각 (degree)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)

1. 서 론

액체로켓의 연소실내에서는 액체연료와 액체산화제가 다양한 방법으로 연소실내로 공급되는데, 이때 분사기(injector)는 추진제들이 균일하게 혼합되고, 생성된 액적들의 직경이 작아야 하는 두 가지 조건을 충족시켜야 한다. 대표적인 분사기로는 샤워헤드형 분사기(shower head injector)와 유동충돌형 분사기(impinging-streams injector)가 있다.^(1~3)

샤워헤드형 분사기는 액체연료와 액체산화제를 각각 다른 노즐을 통해 빠른 속도로 분사하는 형태의 분사기로서, 각각의 유체가 미립화(atomization)된 후 섞이게 된다. 따라서 제트유속이 작거나, 두 제트 사이의 거리가 너무 멀면 충분히 섞이지 않게 되어 불안정한 연소현상을 유발할 수도 있다. 샤워헤드형 분사기는 높은 추진력을 필요로 하는 로켓엔진에 적합하며, 추진제 분사유량이 비교적 적은 경우에는 적절하지 않다.

유동충돌형 분사기는 충돌제트(impinging jets)를 이용하는데, 두 개의 노즐로부터 분사되는 액체 제트를 충돌시켜 액막(liquid sheet)을 형성하고 이로부터 액적을 생성시킨다. 형성된 액막은 가장자리로 갈수록 두께가 얇아지며 교란의 진폭이 증가하여 표면장력과 관성력의 균형이 깨질 때 액막이 부서지며 액주(ligaments)를 형성한다. 이 액주가 다시 끊어져 액적을 형성하게 된다.⁽⁴⁾

로켓의 유동충돌형 분사기의 모사실험은 Rupe^(5,6)에 의해 수행되었는데, 물과 사염화탄소(CCl_4)를 각각 액체연료와 액체산화제로 대표시켜, 생성되는 액적을 샘플셀로 포집하였으며, 연료/산화제 각각의 양을 측정하여 혼합특성을 구하였다. 이 실험조건에서는 제트의 속도가 약 30 m/s로 액막이 거의 형성되지 않는 경우이며 연료/산화제를 모사하는

액체가 서로 섞이지 않아 혼합특성의 규명에는 문제점이 있었다.

한편, Ranz,⁽⁷⁾ Taylor,⁽⁸⁾ Hasson과 Peck⁽⁹⁾ 및 Miller⁽¹⁰⁾ 등은 제트의 속도가 비교적 작은 범위에서 충돌시켜 액막이 안정되게 형성되는 경우에, 액막의 모양, 액막 두께 등의 특성을 연구하였다. Couto와 Basto-Netto⁽¹¹⁾와 Ibrahim과 Przekwas⁽¹²⁾ 그리고 박⁽¹³⁾ 등은 충돌제트의 미립화 특성에 관한 연구를 수행하였으며, Dombrowski 등^(14,15)은 고온 유동장에서 충돌제트의 형성과 연소특성에 대해 연구하였다. 이러한 연구들은 대부분 대칭형 충돌제트에 관한 연구로서, 두 노즐의 직경과 길이, 제트 분사각 및 두 유체가 동일한 경우로서 주로 액막의 모양, 액막의 두께, 액적의 직경 등에 관해 연구하였다.

실용연소기에서는 연료와 산화제가 이론 당량비로 공급되어 서로 다른 유체가 충돌하여 혼합액막을 형성하는 조건으로써, 이에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 충돌제트에 의해 생성된 액적은 직경이 작아야 할뿐만 아니라 연료와 산화제의 혼합농도가 각지역에 균일하게 분포되어 있어야 안정적인 연소가 이루어질 수 있으므로, 서로 다른 유체가 충돌할 때 나타나는 혼합농도장에 대한 연구는 매우 중요하다.

본 연구에서는 연료/산화제를 모사하는 액체로 각각 탄산나트륨용액과 물을 사용하였으며 측정 격자셀(measuring cells)을 이용하여 혼합용액의 유량분포를 측정하였고 산·염기 적정법(acid base titration)으로 혼합특성을 규명하였다. 탄산나트륨용액과 물은 잘 섞이므로 실제연료/산화제 혼합특성을 잘 모사할 수 있다. 충돌 제트는 여러 가지 인자(parameter)들에 의해 그 특성이 변화되는데, 본 연구에서는 제트충돌각, 두 제트의 질량유량비 및 속도비 등이 액적의 분포 및 혼합에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 실 험

2.1 실험장치 및 실험조건

본 실험에서 연료/산화제를 모사하기 위해 탄산나트륨용액/물을 사용하였는데, 상온 상태에서 서로 크기가 다른 충돌제트의 혼합특성을 파악하기 위함이다. 점성계수비 및 밀도비는 각각 1.5, 1.1의 값을 가지며 실제 액체로켓에서의 밀도비 및 점

성제수비와는 차이가 있다. 실험에서 탄산나트륨용액/물을 각각 액체연료/산화제로 모사하였는데, 산화제의 유량이 연료유량보다 크므로 탄산나트륨용액과 비교해 상대적으로 제조하기 쉬운 물(증류수)을 산화제로 정하였다.

실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 압축기로부터, 압력조절기를 통해 2 기압(개이지 압력)의 공기가 물과 탄산나트륨(sodium carbonate; Na_2CO_3)용액의 저장용기로 공급되며, 가압된 용액은 로터미터(rotameter)에 의해 유량이 조절된 후 노즐을 통해 분사되어 충돌한다. 각 노즐을 고정시키고 있는 지지대는 3차원 이동이 가능하며 충돌각과 위치, 측정 높이 등을 조절할 수 있도록 하였다. 노즐은 필요에 따라 교환이 가능하다.

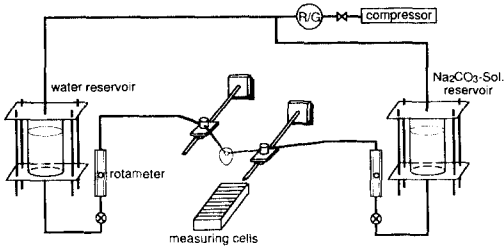


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup.

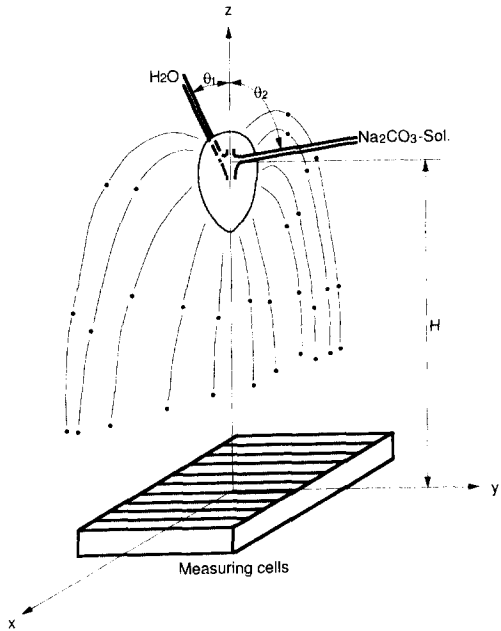


Fig. 2 Schematic diagram of impinging jets and measuring cells.

노즐로부터 분사된 유체는 액막을 형성한 후, 떨어져 나가면서 액적을 생성한다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 산화제/연료노즐은 $y-z$ 평면에 위치하고, 액막은 $x-z$ 평면에 형성된다. 또한 액막에서 떨어져 나온 액적은 중력장의 영향을 받으며 하방으로 떨어져 측정 격자셀(measuring cells)에서 채워진다. 각 셀 중에서 혼합용액으로 다 채워지는 셀이 나타나면 포집을 중단하였으며 포집 시작으로부터 중단한 시점까지 걸리는 시간을 포집 시간으로 정하였다. 각 격자에서 포집된 혼합용액의 양을 포집 시간으로 나누어 주어진 위치에서의 유량을 계산하였다. 그림에 표시된 θ_1 과 θ_2 는 각각 물과 탄산나트륨용액의 액막에 대한 제트분사각(injection angle)을 나타내며, $\theta' = \theta_1 + \theta_2$ 는 충돌각(impinging angle)으로 정의한다.

편의상 물을 액체산화제, 탄산나트륨용액을 액체연료라고 생각하며, 각각 O, F의 하첨자로 표시하고, 혼합비율은 탄산나트륨용액의 체적분율(volume fraction) X_F , 또는 질량분율(mass fraction) Y_F 로 나타내기로 하며, 이들은 다음과 같이 정의된다.

$$X_F = \frac{Q_F}{Q_O + Q_F} \quad (1)$$

$$Y_F = \frac{\dot{m}_F}{\dot{m}_O + \dot{m}_F} \quad (2)$$

여기서, Q 와 \dot{m} 은 각각 체적유량과 질량유량을 나타낸다. Fig. 2의 H 는 충돌점과 측정 격자사이의 높이 차를 뜻하며, x 와 y 는 충돌점을 기준으로 각각 액막에 평행한 좌표축과 수직인 좌표축을 뜻한다. 60개의 격자로 이루어진 측정 격자셀은 격자의 폭이 3 mm, 길이가 100 mm, 깊이가 55 mm이고, 각 격자는 두께 0.5 mm의 판으로 분리되어 있다.

실험조건으로는 유량에 따라 액막이 $x-z$ 평면에 위치하도록 θ_1 과 θ_2 의 값을 결정한다. 유량에 따라 두 유체의 운동량이 상이하므로, 액막이 $x-z$ 평면에 위치하려면 각 유체의 y -방향 운동량이 동일하도록 θ_1 과 θ_2 가 결정되어야 한다. 본 실험에서는 주어진 제트충돌각에서 다음과 같은 운동량보존식으로부터 θ_1 과 θ_2 를 결정하였다.

$$\frac{4\rho_O}{\pi D_O^2} Q_O^2 \sin\theta_1 = \frac{4\rho_F}{\pi D_F^2} Q_F^2 \sin\theta_2 \quad (3)$$

여기서 ρ 는 밀도, D 는 분사노즐의 직경을 뜻한다.

본 연구에서는 크게 세 가지 인자에 의한 충돌제트의 유량분포와 혼합특성의 변화에 대하여 실험하였다. 첫번째 인자로 물과 탄산나트륨용액의 질량유량비를 1:1, 1.4:1, 2:1 및 4:1의 네 가지로 변화시켰는데, 이론 당량비를 만족시키는 액체산소/액체수소 질량비는 8:1이며 특히 실제 로켓엔진에서는 과농한 조건인 4:1 혹은 6:1로 제어하는 것으로 알려져 있다. 두번째 인자인 제트충돌각은 90°, 120° 두 가지로 하였다. 충돌각이 120°인 경우, 물의 질량유량이 탄산나트륨용액의 질량유량의 1.4 배보다 크면 식 (3)을 만족시키는 θ_2 가 존재하지 않는다. 즉, 액막이 $x-z$ 평면에 형성될 수 없다. 이 때문에 제트충돌각이 120°인 경우는 질량유량비 1:1, 1.4:1 두 가지 조건에 대해서만 실험하였다.

세번째 인자는 두 제트의 속도비이다. 비대칭형

충돌제트의 경우 물 제트의 유량을 탄산나트륨용액 제트의 유량보다 크게 하였는데, 물 제트의 평균유속 U_o 를 탄산나트륨용액 제트의 평균유속 U_F 보다 크게 하거나, 물 분사노즐 직경 D_o 를 탄산나트륨용액 분사노즐 직경 D_F 보다 크게 해야 한다. 본 연구에서는 두 가지 방법으로 물 제트의 유량을 증가시켰다. 첫째 방법으로 두 노즐의 직경은 같고 U_o 를 증가시키는 방법을 사용하였는데, 이때 두 제트의 속도비는 제트의 유량비와 일치하게 된다. 이 실험조건을 $D_o=D_F$ 로 나타내었다. 둘째 방법으로 두 제트의 평균유속을 같게 하고 D_o 를 D_F 보다 크게 하여 질량유량비가 1:1, 1.4:1, 2:1, 4:1인 조건의 실험을 수행하였으며 $U_o=U_F$ 로 나타내었다.

이들 세 가지의 인자 외에도 측정 높이에 따른 특성변화, 제트유속 증가에 따른 특성변화를 생각

Table 1 Experimental conditions and summary of results

$m_o : m_F$	θ' [°]	Constraint	Q_o, Q_F [ml/min]	θ_1, θ_2 [°]	D_o, D_F [mm]	Re_o, Re_F	H [mm]	$X_{0.95}$ [cm]	Liquid sheet			
1 : 1	90	$D_o=D_F$	91, 83	42, 48	0.67, 0.67	2870, 1690	110	3.4	Stable (laminar)			
				52, 68			50	3.2				
	120	$D_o=D_F$		80			110	5.0	Stable (laminar)			
				5.5								
1.4 : 1	90	$D_o=D_F$	127.83	25, 65	0.67, 0.67	4010, 1690	110	5.8	Stable (laminar)			
		$U_o=U_F$		24, 66				0.81, 0.67		3310, 1690	6.6	
	120	$D_o=D_F$		31, 89				0.67, 0.67		4010, 1690	8.5	
		$U_o=U_F$		31, 89							0.81, 0.67	3310, 1690
2 : 1	90	$D_o=D_F$	155, 70	13, 77	0.67, 0.67	4880, 1420	110	4.9	Stable (turbulent) Concentrated near center (laminar)			
		$U_o=U_F$		20, 70				1.02, 0.67		3220, 1420	3.0	
4 : 1	90	$D_o=D_F$	155, 35	3, 87	0.67, 0.67	4880, 720	110	0.5	Jet separation (turbulent)			
								2.3				
								7.2				
								9.7				
		$U_o=U_F$		11, 79				1.39, 0.67	2350, 720	0.5	Stable (laminar) concentrated near center	
										3310, 950		0.5
										3900, 1190		1.9
										4650, 1420		4.7

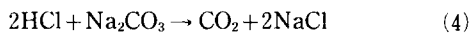
할 수 있다. 측정 높이에 따른 변화는 $\dot{m}_0 : \dot{m}_F = 1 : 1$, $D_0 = D_F$, $\theta' = 120^\circ$ 일 때, 측정 높이 H를 50 mm, 80 mm 및 110 mm의 세 가지로 변화시켜 x 방향의 변화특성을 살펴보았다. 또한, 질량 유량비는 유지하면서 양 쪽 제트의 유량을 변화시켜 제트유속 증가에 의한 특성변화를 살펴보았는데, $\dot{m}_0 : \dot{m}_F = 4 : 1$, $\theta' = 90^\circ$ 인 경우에 네 가지 유량조건에서 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행된 실험조건을 Table I에 정리하였다.

2.2 산-염기 적정

연료와 산화제의 혼합비율을 측정하는 방법으로 산-염기 적정법(acid-base titration)을 사용하였다. 이는 염기성용액에, 중화점(equivalence point)에 이를 때까지 산성 용액의 양을 증가시키면서 반응시켜 염기성용액의 농도를 측정하는 방법이다. 이때 지시약(indicator)을 사용하여 중화점에 도달한 순간을 판단하는데, 본 연구에서는 브로모크레졸 그린 지시약(bromocresol green indicator)을 사용하였다. 이 지시약은 염기성용액에서는 청색을 띠고 있으나, 중화점에 도달하는 순간 녹색으로 바뀌며, 산성용액에서는 황색을 띤다.

산-염기 적정은 염기성용액에 산성용액을 투입하면서 산성도를 변화시키는 방법이기 때문에, 용액이 용기내에서 균일한 농도로 유지되어야 하는데 이를 위해 자기 교반기(magnetic stirring motor)를 사용하였다. 자기 교반기는 내부의 자석이 회전하여 용기내에 삽입된 자기 교반 막대(magnetic stirring bar)를 회전시켜 용기내부의 용액이 균일하게 섞이도록 하는 장치이다.

본 연구에서는 산성용액과 염기성용액으로 0.4M 염산(HCl)용액과 1M 탄산나트륨(Na_2CO_3)용액을 사용하였다. 용액(solution)의 농도단위인 몰농도(M)는 용액 1리터에 용질(solute) 1몰(mol)이 용해되었을 때 1M로 정의된다. 염산용액과 탄산나트륨용액은 다음과 같이 반응한다.



따라서, 1M 탄산나트륨용액 1ml가 중화되려면 0.4M 염산용액 5ml가 필요하다.

2.3 가시화 방법

충돌제트 가시화를 위한 광원으로는 스트로보스코프(stroboscope)를 사용하였다. 광원의 지속시간

은 1.5~3 μs 이며 B 셔터 조건으로 촬영할 경우 충돌제트의 정지화상을 얻을 수 있다. 피사체의 크기를 확대하기 위해서 벨로우즈와 200 mm 망원렌즈를 사용하였으며, 35 mm 카메라(Nikon FM2)를 사용하여 촬영하였다. 또한 액적의 속도와 진행 방향을 구하기 위해서 광원의 더블플래시(double flash)에 의한 이중노출을 이용하였다. 즉, 스트로보스코프를 사용하여 1 ms 간격으로 일정하게 섬광을 발생시키고, 필름을 2 ms 동안 노출시켜 1 ms 시간 간격 동안 액적의 궤적을 촬영하였다.

스트로보스코프를 탄산나트륨용액 분사노즐 아래쪽에 위치시켜 액막과 액적을 정면으로 조명하였는데, 탄산나트륨용액 분사노즐의 분사각이 큰 경우 충분한 광량을 전달할 수 없다. 즉, 노즐 지지대의 간섭으로 액막상부를 조명할 수 없게 되어 어렵게 촬영되는 문제점이 있다.

3. 결과 및 검토

3.1 충돌제트의 액적 형성과정

Fig. 3은 제트유량을 변화시키며 $\theta' = 120^\circ$ 의 비대칭형 충돌제트 ($\dot{m}_0 : \dot{m}_F = 1.4 : 1$, $\theta_1 = 31^\circ$, $\theta_2 = 89^\circ$, $D_0 = D_F$)를 가시화한 사진이다. 여기서, Re_0 와 Re_F 는 각각 물 제트와 탄산나트륨용액 제트의 Reynolds수이다. 유량이 증가할수록 액막이 넓어지고 생성된 액적의 평균직경이 작아짐을 관찰할 수 있다(a-d). 이 액막들에는 주름(ridges)이 많이 형성되어 있음을 볼 수 있는데, 이는 두 노즐로부터 분사된 유체가 충돌하여 혼합되는 전단층(shear layer)에서 파(wave)가 발생되어 진동하기 때문에 생기는 것이다. 액막을 형성했던 유체는 점점 액막 가장자리로 움직이면서 표면장력이 관성력을 견디지 못해 액막에서 떨어져, 가늘고 긴 액주를 형성하는데 이것은 (b)에 잘 나타나 있다. 이렇게 형성된 액주는 하류로 내려가며 끊어져 액적으로 분해된다. (c)와 (d)를 살펴보면 (d)의 경우가 (c)에 비해 오히려 액막 크기가 줄어들어 있으며, 충돌점 상방에도 다수의 액적이 존재함을 알 수 있다. 이것은 산화제/연료의 제트유량이 일정하게 유지되어도, 액막의 형상이 시간 변화에 따라 계속 변화하고 있음을 보이는 것이다. 이보다 유량이 더 커지면 (e), (f)에서 보는 바와 같이 액막면이 상당히 불안정해지며, 액막 곳곳에 구멍이 생기는 현상이 나타났다. 또한 이때 액적의 직경도 작은 유

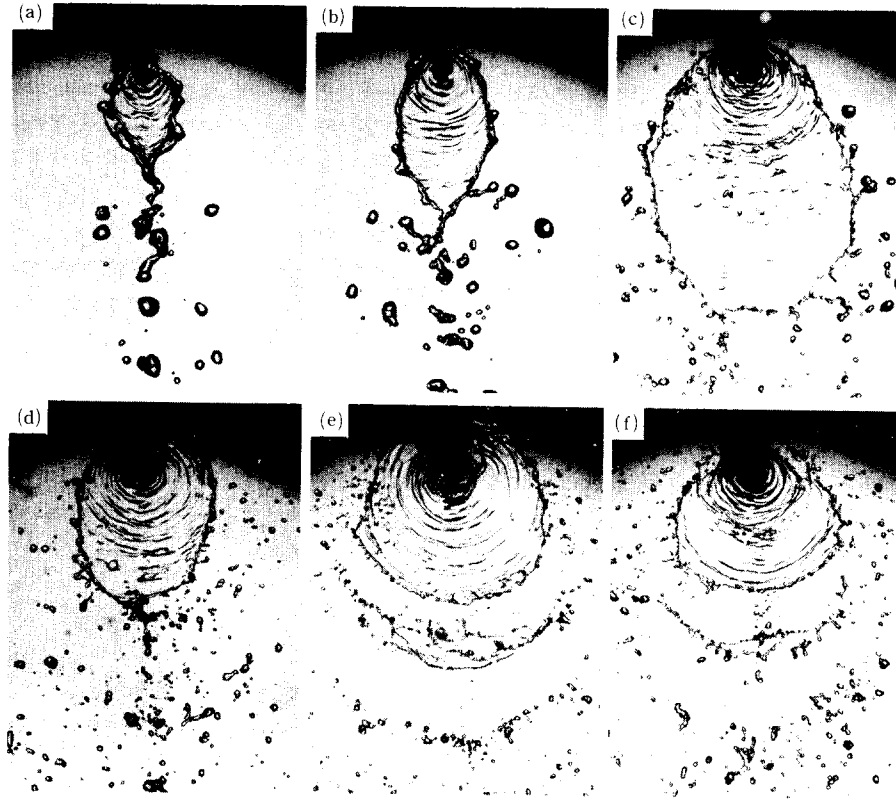


Fig. 3 Photographs of liquid sheets and droplets for various flow rates ($\dot{m}_o : \dot{m}_F = 1.4 : 1$, $D_o = D_F$ and $\theta' = 120^\circ$); (a) $Q_o = 71$ ml/min ($Re_o = 2240$, $Re_F = 940$), (b) 90 (2840, 1190), (c) 128 (4040, 1700), (d) 147 (4640, 1950), (e) 166 (5240, 2200), (f) 204 (6440, 2710)

량의 충돌제트에 의해 생성되는 액적 직경에 비해 매우 작아진 것을 살펴볼 수 있다. 두 제트가 충돌 후 제트의 유속 및 실험조건에 따라서 종류 및 난류액막으로 관측되었는데 대체로 한 쪽 제트유량이 128ml/min보다 크면서 동시에 $D_F = D_o$ 의 실험조건에서 난류액막으로 천이하는 현상이 관측되었다. 이와 같이 충돌제트에 의해 형성되는 액막과 액적은 동일한 질량유량비, 충돌각에 대해서도 유량의 증감에 따라 상당히 다른 경향을 보인다.

3.2 대칭형 충돌 제트

3.2.1. 가시화 결과 고찰

Fig. 4는 $\dot{m}_o : \dot{m}_F = 1 : 1$, $D_o = D_F$ 인 대칭형 충돌제트에 의해 생성된 액막과 액적을 촬영한 사진이다. (a)와 (b)는 각각 제트충돌각이 90° , 120° 일 때 액막과 액적의 상태를 촬영한 것으로, (b)가 (a)보다 액막이 크고, 안정된 형태를 가지고

있으며, 액적이 분포하는 범위가 더 넓음을 알 수 있다. (c)와 (d)는 액적의 진행 방향과 속도를 파악하기 위해 1ms 간격으로 이중 노출시킨 사진이다. 전체적으로 액적의 진행방향은 충돌점으로부터 반경방향으로 향하고 있다. 충돌 후 액적의 속도는 충돌에 의한 마찰 손실이 없다고 가정하는 경우 포텐셜유동이 되어, 충돌 직전의 제트 속도를 유지할 수 있으나, 실제로는 충돌시의 마찰 및 낙하시의 항력의 영향을 받아 제트 충돌 후 포텐셜유동에 의한 예측 결과에 비해서 작은 수평방향 속도성분을 가지면서 운동한다. 그리고, 사진 촬영의 결과는 2차원적인 영상을 제공하나, 실제의 액적은 3차원 속도성분을 가지고 있으므로, 이로 인한 차이가 발생할 수 있다.

3.2.2. 실험 결과 고찰

Fig. 5는 $\dot{m}_o : \dot{m}_F = 1 : 1$, $D_o = D_F$, $\theta' = 120^\circ$ 일 때 세 가지 측정 높이에서 측정된 x -방향 유량

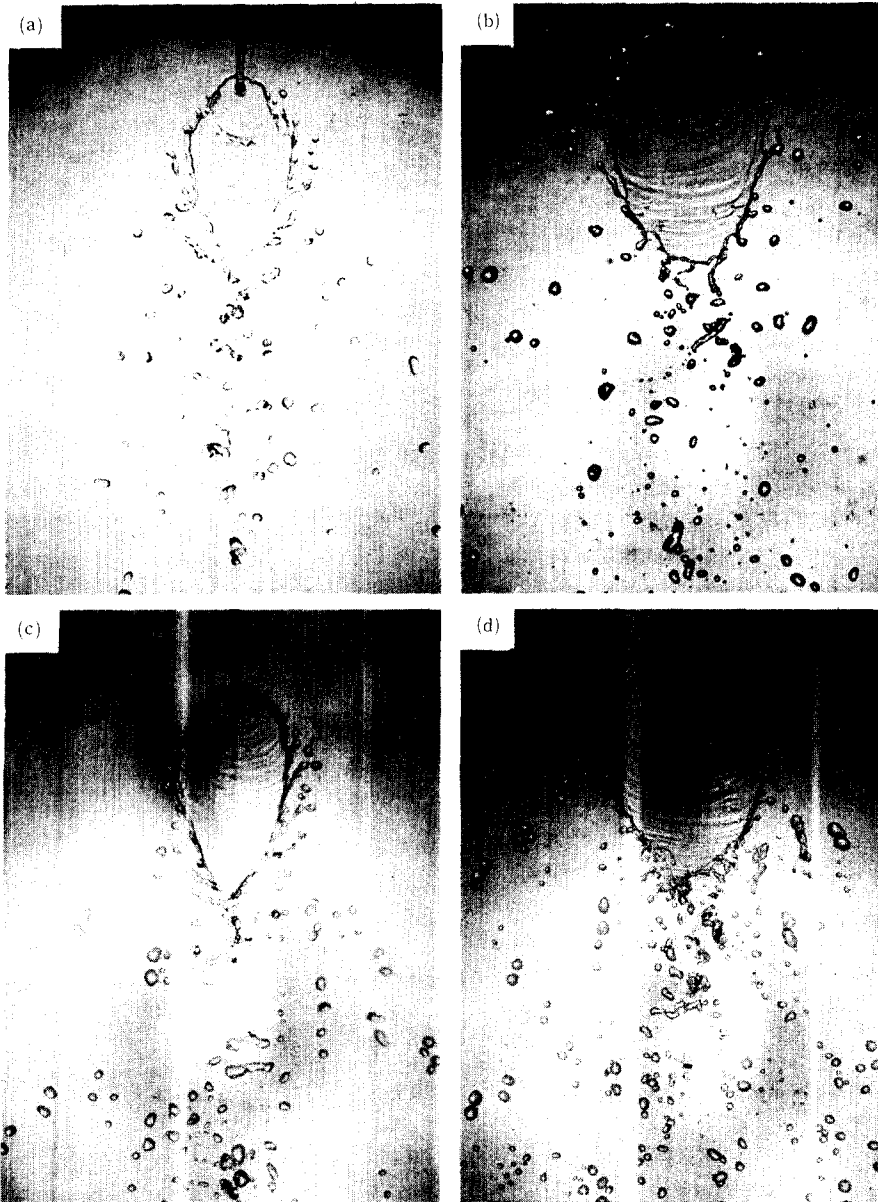


Fig. 4 Photographs of symmetric impinging jets ($\dot{m}_O : \dot{m}_F = 1 : 1$ and $D_O = D_F$); (a) $\theta = 90^\circ$ and (b) 120° , (c) double exposure showing droplet velocity ($\Delta t = 1\text{ms}$) for 90° and (d) 120° .

분포와 연료의 질량분율이다. 그림에서 쓰인 Q_{O+F} 는 하나의 격자에 포집되는 혼합용액의 유량을 뜻한다. (a), (b)를 보면 H 가 커질수록 액적이 분포하는 지역이 넓어지고, 중심부 유량은 줄어들며, 가장자리 유량이 상대적으로 늘어남을 볼 수 있다. 이에 비해 탄산나트륨용액의 질량분율 Y_F 는 탄산

나트륨용액의 전체 평균 질량분율인 0.5(그림(c), (d)에서 가는 실선으로 표시)에서 크게 벗어나지 않고 x 가 증가함에 따라서 약간 증가하는 경향이 있으나 대체로 균일한 혼합이 이루어졌다. 이와 같이 균일한 혼합이 이루어진 것은 연료/산화제제트의 분사각 차이가 작으며 질량비가 대칭이기 때문

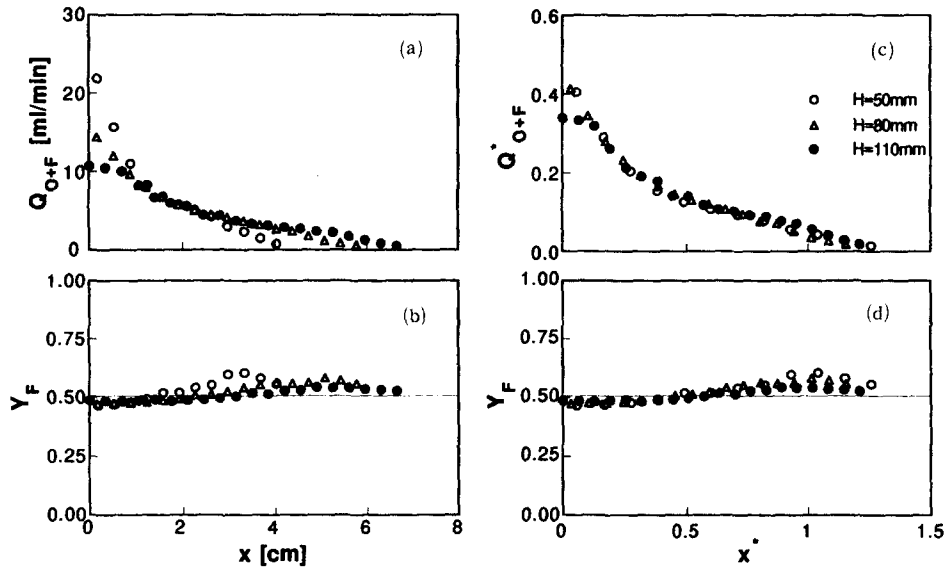


Fig. 5 Experimental data of symmetric impinging jets at various measuring heights ($m_o : m_F = 1 : 1$, $D_o = D_F$ and $\theta' = 120^\circ$); (a) flow rate and (b) concentration distribution in x , (c) flow rate and (d) concentration distribution in normalized x

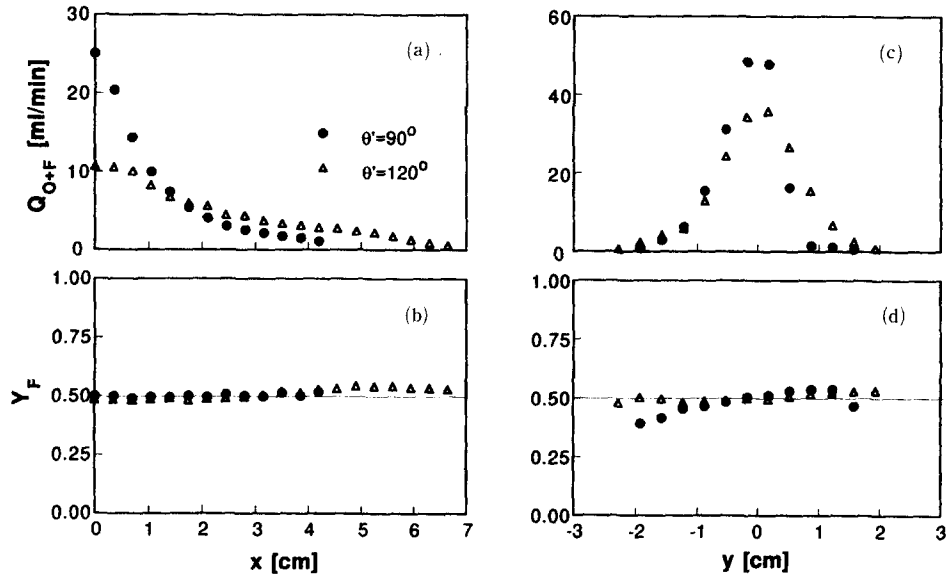


Fig. 6 Experimental data for symmetric impinging jets ($m_o : m_F = 1 : 1$ and $D_o = D_F$); (a) flow rate and (b) concentration distribution in x , (c) flow rate and (d) concentration distribution in y .

이다.

액적의 포집위치 H 에 따른 x 방향 분포의 상사성을 검토하기 위하여 x 방향 위치 및 유량의 무차원 변수를 다음과 같이 도입하였다.

$$x^* = \frac{x}{x_{0.95}} \tag{5}$$

$$Q_{O+F}^* = \frac{Q_{O+F}}{Q_{O,t} + Q_{F,t}} \times \frac{x_{0.95}}{\text{cm}} \tag{6}$$

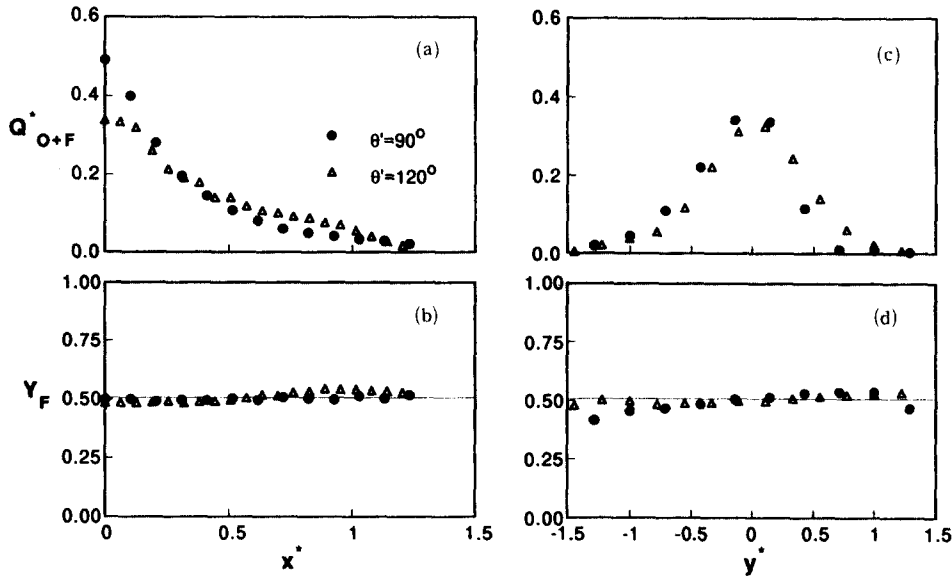


Fig. 7 Experimental data for symmetric impinging jets in normalized coordinates ($\dot{m}_O : \dot{m}_F = 1 : 1$ and $D_O = D_F$): (a) flow rate and (b) concentration distribution in normalized x , (c) flow rate and (d) concentration distribution in normalized y

여기서 $x_{0.95}$ 는 $x=0$ 에서부터 시작하여 x 를 증가시키면서 각 셀에 포집된 혼합 용액을 더하여 나갈 경우 전체 유량의 95%에 도달하는 x 위치를 뜻하며, $Q_{O,t}$, $Q_{F,t}$ 는 노즐로부터 분사된 물과 탄산나트륨용액의 전체유량을 나타낸다. 액막에 수직인 방향의 무차원 좌표축 y^* 도 같은 방법으로 다음과 같이 정의하였다.

$$y^* = \frac{y}{y_{0.95}} \quad (7)$$

이와 같이 정규화된 변수들을 이용해 세 가지 측정 높이에서 측정된 실험결과들을 나타낸 것이 (c), (d)인데, $x^* \approx 0$ 인 지역을 제외하고는 대체로 한 곡선에 일치된다.

Fig. 6에서는 $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 1 : 1$, $D_O = D_F$ 인 대칭형 충돌제트에 대해 제트충돌각의 영향을 비교하였다. 제트충돌각이 90° 일 때에 비해, 120° 인 경우에 액적이 더 넓게 분포함을 알 수 있는데, 이는 앞의 Fig. 4의 액막 모양과 액적분포형태에서도 확인할 수 있다. 이처럼 액적분포범위가 다르므로, 두 실험조건에 대한 비교를 위해 무차원변수를 사용하여 나타낸 결과가 Fig. 7이다. 그림에서 유량분포와 혼합특성은 제트충돌각에 대해 대체로 상사성을 가지고 있음을 알 수 있다.

3.3 비대칭형 충돌제트

3.3.1. 가시화 결과 고찰

Fig. 8은 $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 1.4 : 1$ 일 때의 액막과 액적의 직접 사진이다. (a)는 $\theta = 90^\circ$, $D_O = D_F$, (b)는 $\theta = 90^\circ$, $U_O = U_F$, (c)는 $\theta = 120^\circ$, $D_O = D_F$, (d)는 $\theta = 120^\circ$, $U_O = U_F$ 인 경우의 액막과 액적에 대한 정지화상이며 (a), (b)에 비해 (c), (d)가 액막의 크기가 크고, (a), (c)에 비해 (b), (d)가 액막내부의 주름이 작으며, 안정된 액막을 가짐을 알 수 있다. 또한 충돌각이 120° 일 때, 90° 보다 넓은 범위로 퍼져나감을 알 수 있다.

질량비를 $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 2 : 1$, $4 : 1$ 로 증가시키면서 가시화를 하였으며, 비대칭형 충돌제트에 대해 사진으로 나타난 각 실험인자들의 영향은 다음과 같이 정리된다. 첫째, $D_O = D_F$ 인 경우와 $U_O = U_F$ 인 경우를 비교하면, $D_O = D_F$ 인 경우가 액막내부의 교란이 더 강하게 존재하며, 액막이 불안정하게 형성되어 있음을 알 수 있다. 이는 두 제트의 평균유속이 다르기 때문에 나타나는 현상이다. 둘째로 제트 충돌각의 영향을 살펴보면, 충돌각이 120° 일 때가 90° 일 때보다 액막이 옆으로 더 넓게 성장해

있음을 알 수 있다. 이것은 대칭형 충돌제트에서도 나타났던 현상이다. 셋째로 물과 탄산나트륨용액의 질량유량비 \dot{m}_o/\dot{m}_F 가 달라질 때의 변화를 살펴보자. 우선 $D_o=D_F$ 인 경우는 \dot{m}_o/\dot{m}_F 가 커질수록 액막교란의 진폭이 커졌으며 $\dot{m}_o/\dot{m}_F=4:1$ 에서는 두 제트가 거의 혼합되지 못하고 분리되었다. 이것은

제트평균유속의 비율 U_o/U_F 가 커져 두 제트 사이의 속도차에 의한 불안정성이 커지기 때문으로 볼 수 있다. $U_o=U_F$ 인 경우는 액막이 안정되게 형성되었으며, \dot{m}_o/\dot{m}_F 의 증가에 따라 액막 모양을 살펴보면 길이에 비해 폭이 좁아졌다. 각 실험 조건에서의 가지화 결과를 Table 1에 정리하였다.

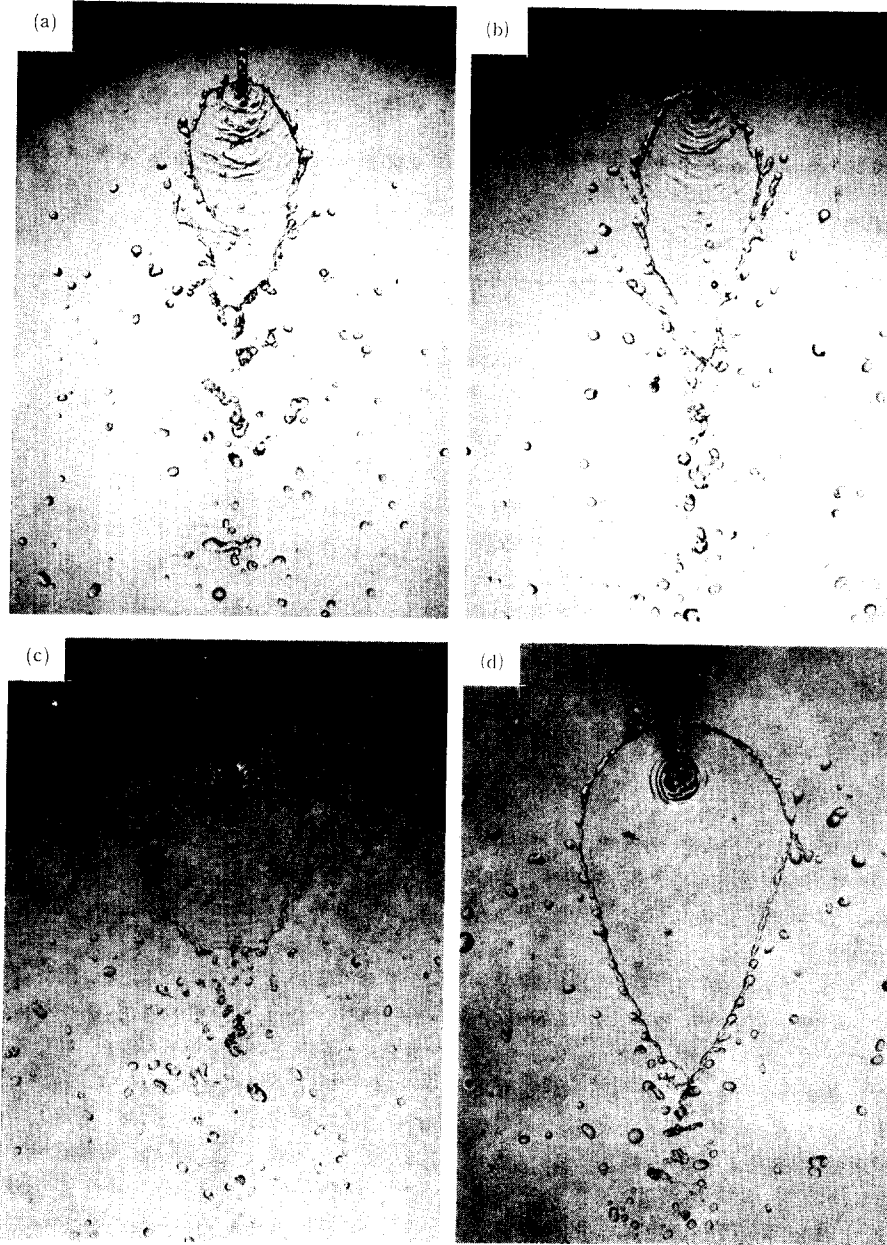


Fig. 8 Photographs of asymmetric impinging jets ($\dot{m}_o : \dot{m}_F = 1.4 : 1$); (a) $\theta' = 90^\circ$, $D_o = D_F$, (b) 90° , $U_o = U_F$, (c) 120° , $D_o = D_F$ and (d) 120° , $U_o = U_F$.

3.3.2. 유량분포와 혼합특성

비대칭형 충돌제트의 경우 주어진 질량비 및 충돌각에서, 산화제/연료, 제트가 각각의 분사각으로 충돌할 때의 액막 및 액적의 분산특성으로부터 유량 및 혼합 분포의 실험결과를 해석할 수 있다. 즉, 산화제/연료 제트가 충돌하게 되면 일부는 액막을 형성하여 수직하방으로 떨어지며, 일부는 바로 액적으로 분열되어 관성력으로 운동하는데 이때 제트의 분사각이 액적의 분산형태 및 낙하하는 위치에 크게 영향을 미친다.

질량비가 $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 1.4 : 1$ 일 때, 충돌각 $\theta' = 90^\circ$ 인 경우 산화제/연료제트 각각의 분사각은 $\theta_1 = 25^\circ$, $\theta_2 = 65^\circ$ 이며 $\theta' = 120^\circ$ 인 경우 $\theta_1 = 31^\circ$, $\theta_2 = 89^\circ$ 이다. 질량비를 $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 4 : 1$ 까지 증가시키면 충돌각이 $\theta' = 90^\circ$, $D_O = D_F$ 인 경우 $\theta_1 = 3^\circ$, $\theta_2 = 87^\circ$ 로

연료/산화제의 분사각의 차이가 커진다. 가시화 결과로부터 알 수 있듯이 충돌각이 큰 경우 액막의 크기가 커지고 넓게 분산되는 경향이 있다. 특히 질량비가 커지면 연료/산화제 각각의 분사각 차이는 커지며 충돌시 연료와 산화제가 분산되는 경향이 크게 달라지게 된다.

Fig. 9에는 액막방향(x^* -방향) 연료질량분율 변화를 유량증가방법에 따른 차이 즉, $D_O = D_F$ 인 경우와 $U_O = U_F$ 인 경우를 비교하여 나타내었다. 여기서 액막모양이 액막중심선($x^* = 0$)에 대해 대칭이므로 액막의 반쪽면에 대해서 실험하였다. $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 1.4 : 1$ 일 때는 충돌각 및 유량 증가 방법에 관계 없이 비교적 균일한 혼합비를 나타내었다. 이는 $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 1.4 : 1$ 인 경우 연료/산화제 분사각 차이가 비교적 작아서 충돌시 액막 모양이 유사한 형태를 가지기 때문인 것으로 생각된다. 즉 산화제/연료의 충돌분산경향의 차이가 작기 때문이다. $\dot{m}_O : \dot{m}_F$ 가 2 : 1, 4 : 1 일 때는 $U_O = U_F$ 인 경우가 더 균일한 혼합비를 가짐을 볼 수 있다. 이는 $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 2 : 1$ 일 때 $U_O = U_F$ 조건에서의 산화제/연료 각각의 분사각이 $\theta_1 = 20^\circ$, $\theta_2 = 70^\circ$ 로 $D_O = D_F$ 조건에서의 $\theta_1 = 13^\circ$, $\theta_2 = 77^\circ$ 와 비교하여 산화제/연료 분사각 차이가 작고 두 제트의 속도가 같아서 액막 형성이 안정되게 형성되어서 균일하게 혼합된 것으로 생각된다. $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 4 : 1$ 인 경우에도 연료 질량 혼합분율의 결과는 $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 2 : 1$ 의 경우와 같은 방법으로 설명할 수 있다.

전체적으로 x^* 가 증가할수록 연료의 질량혼합분율이 점점 증가하는 경향을 나타내었는데 이는 연료의 분사각 θ_2 가 산화제 분사각 θ_1 에 비해서 크기 때문으로 분사각이 커지면 액막이 커지고 이에 따라 연료액적이, 액막이 작은 산화제 액적에 비해, x^* -방향으로 더 넓게 분포하려는 경향을 갖기 때문이다. 즉, 산화제액적은 액막의 중심부($x^* = 0$)에, 연료액적은 상대적으로 액막의 바깥쪽에 낙하하여 액막 중심부에서 가장 낮은 연료 질량 혼합분율을 나타내고 중심부에서 멀어지면 높아진다. $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 4 : 1$, $D_O = D_F$ 와 같은 조건에서는 산화제/연료의 분사각 차이가 매우 크고 속도차도 커서 액막이 분리되어 혼합되지 못하였으며, $0.4 \geq x^* \geq 0.8$ 범위에서는 연료 액적이 거의 존재하지 않는 것으로 나타났다.

액막 수직 방향(y^* -방향)의 측정 결과를 Fig. 10에 나타내었는데 충돌면($y^* = 0$)을 기준으로 비해

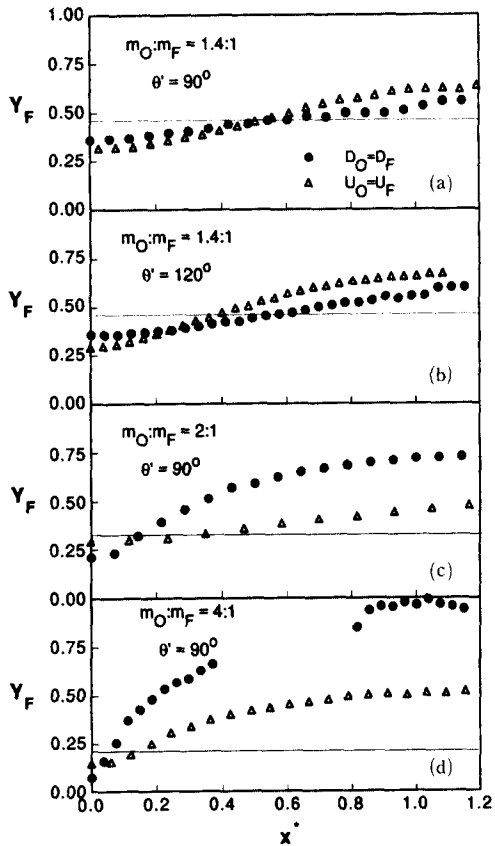


Fig. 9 Effect of velocity ratio on concentration distribution in x ; (a) ($\dot{m}_O : \dot{m}_F, \theta' = (1 : 1, 90^\circ)$), (b) ($1.4 : 1, 120^\circ$), (c) ($2 : 1, 90^\circ$) and (d) ($4 : 1, 90^\circ$).

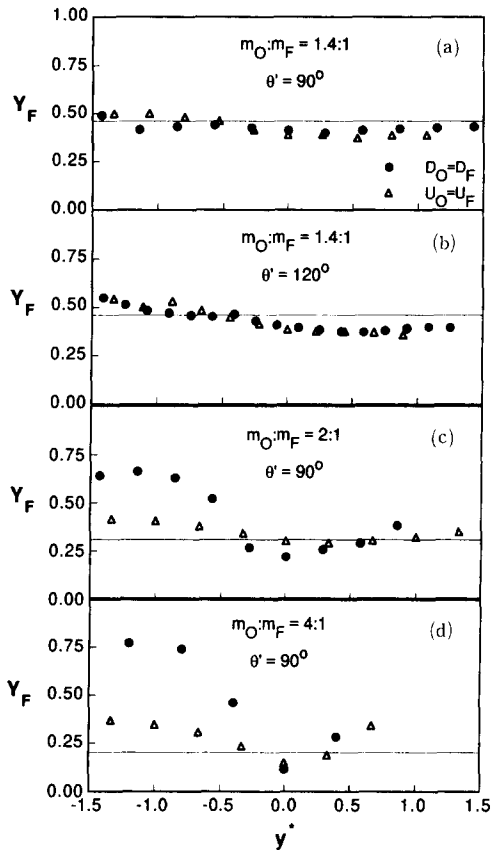


Fig. 10 Effect of velocity ratio on concentration distribution in y : (a) $(\dot{m}_O : \dot{m}_F, \theta') = (1 : 1, 90^\circ)$, (b) $(1.4 : 1, 120^\circ)$, (c) $(2 : 1, 90^\circ)$ and (d) $(4 : 1, 90^\circ)$.

칭 혼합특성을 보이고 있다. $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 1.4 : 1$ 에서는 비교적 균일한 혼합비를 나타내었는데, 이는 연료/산화제 분사각 차이가 작아서 액막이 안정되게 형성되었기 때문인 것으로 생각된다. 산화제 노즐 쪽($-y^*$ 방향)에 연료질량분율이 가장 큰 값을 나타내고 충돌면($y^* = 0$)에 접근할수록 점점 감소하는 경향을 나타내고 있다. 충돌면을 지나 연료노즐 쪽($+y^*$ 방향)에 가까워지면 거의 일정한 값을 나타내고 있다. $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 2 : 1$ 에서는, $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 1.4 : 1$ 경우와 대체로 유사한 경향을 나타내었으나 다른 점은 충돌면을 지나 연료노즐 쪽에 가까워짐에 따라 연료질량분율이 조금 증가하는 경향을 나타내고 있다.

$\dot{m}_O : \dot{m}_F = 4 : 1$ 에서는 산화제노즐 쪽에서 충돌면까지는 같은 경향을 나타내었고 단지 연료질량 혼

합분율의 불균일성이 더욱 증대되었다. 충돌면을 지나 연료 노즐 쪽에 가까워지면서 연료질량 혼합분율의 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났는데 이는 질량비가 작을 때와는 다른 경향이다.

이와 같이 액막수직방향의 연료질량 혼합분율의 경향이 산화제/연료질량비에 따라 약간씩 다르게 나타난 것은 산화제/연료분사각 차이와 크게 관련이 있다. 산화제/연료질량비가 증가함에 따라 연료제트 분사각은 점점 증가하고 산화제분사각은 점점 감소하게 된다. 따라서 산화제/연료질량비가 증가함에 따라 연료액적의 산화제노즐 쪽으로의 관성이 증대되며 상대적으로 많은 연료액적이 산화제노즐 쪽으로 낙하하여 산화제노즐 쪽에 가까운 지역에서 연료질량 혼합분율이 가장 높게 나타나고 충돌면 근처에서는 상대적으로 낮게 나타나게 되어, 산화제노즐 쪽과 충돌면 사이의 연료질량분율의 불균일성이 증대된다. 한편 산화제분사각은 산화제/연료의 질량비가 증가함에 따라 점점 감소하여 $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 4 : 1$ 에 이르면 산화제가 거의 수직하방으로 떨어짐으로 인해서 충돌면에 거의 모이게 되며, 연료제트가 산화제제트와의 충돌시 상당량의 연료액적은 관성으로 인해 산화제노즐 쪽으로 떨어지나 적지 않은 연료액적이 수직하방으로 떨어지는 산화제제트와 충돌하면서 연료측으로 튕겨져 나가 떨어지게 된다. 이로 인해서 충돌면을 지나 연료노즐 쪽으로 가까워짐에 따라서 연료 질량혼합분율이 증가하게 된다. 한편, $U_O = U_F$ 인 경우가 $D_O = D_F$ 에 비해서 상대적으로 균일한 혼합비를 나타내었는데 이는 $U_O = U_F$ 조건에서 액막이 보다 안정된 액막을 형성하기 때문인 것으로 생각된다.

충돌각의 변화에 따른 혼합특성변화는 Fig. 11에 나타내었는데, 질량비 $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 1.4 : 1$ 일 때 충돌각 $\theta' = 90^\circ, 120^\circ$ 인 두 가지 경우에 비교하였다. 충돌각이 커짐에 따라 액적분포범위가 넓어지는 차이는 있으나, 정규화하여 분석해 보면 그림과 같이 하나의 곡선이 되어 상사성을 가지고 있음을 알 수 있다.

대체적으로 y^* 가 증가하면 연료질량분율이 증가하고, y^* 가 증가하면 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 산화제/연료분사각 차이 때문이다.

액막과 평행한 방향에서의 $D_O = D_F$ 인 경우와 $U_O = U_F$ 에 대해서 혼합 특성을 비교하면, $D_O = D_F$ 조건에서 상대적으로 균일한 혼합특성을 나타내었는데, 이는 Table 1에 나타낸 바와 같이 두 경우 모

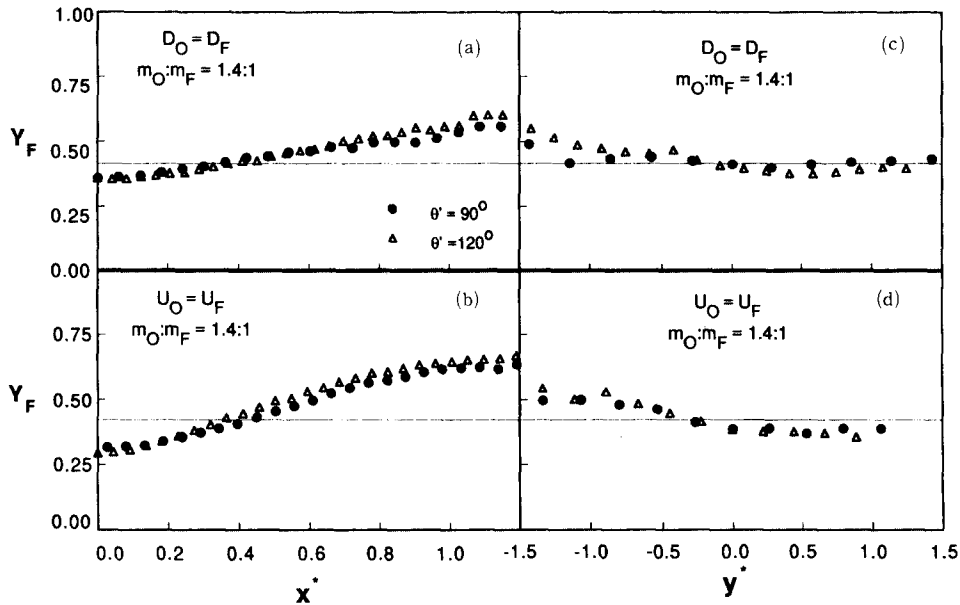


Fig. 11 Effect of impinging angle on concentration distribution in x, y : (a) $\dot{m}_O : \dot{m}_F = 1.4 : 1, D_O = D_F, x$ -dir. (b) $1.4 : 1, U_O = U_F, x$ -dir. (c) $1.4 : 1, D_O = D_F, y$ -dir. (d) $1.4 : 1, U_O = U_F, y$ -dir.

두 연료/산화제 각각의 분사각은 $\theta_1 = 25^\circ, \theta_2 = 65^\circ$ 로 동일하므로 충돌시의 액막형태는 동일할 것으로 생각되나, $U_O = U_F$ 인 경우 산화제 노즐직경 ($D_O = 0.81, D_F = 0.67\text{mm}$)이 크기 때문에 산화제가 상대적으로 더 멀리 분산되어 불균일성이 증대되었다고 생각된다.

액막에 수직한 방향의 경향을 살펴 보면, $D_O = D_F$ 와 $U_O = U_F$ 의 조건에서 연료 질량 분율의 불균일성 경향이 액막과 평행한 방향만큼 큰 차이를 나타내지 않았으며 대체로 균일한 혼합분포를 나타내었는데 이는 액막과 수직으로 평행한 방향으로의 액적분산경향이 노즐직경에 크게 영향을 받지 않기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결론

충돌제트의 유량분포와 혼합특성을 실험적 방법으로 연구하였다. 가시화를 통해 유속 증가에 따른 액막의 변화 과정, 액적의 생성 메커니즘 및 상이한 제트유속을 가진 충돌제트에 의해 형성된 액막의 불안정성을 살펴볼 수 있었으며, 지금까지 연구되었던 대칭 충돌제트와 달리 제트분사조건을 서로 다르게 하여 각 실험 인자가 혼합 특성에 미치는

영향을 연구하였다.

대칭형 충돌제트는 안정적인 액막이 형성되어 연료/산화제가 균일하게 혼합되었으며, 측정 높이와 제트충돌각의 변화에 대해 상사성을 나타내었다.

비대칭형 충돌제트의 경우, 유량분포는 여러 실험조건에 대해 상사성을 나타내었으나, 혼합특성과 액막형상은 실험조건에 대해 다른 특성을 보였다. 액막 방향의 연료혼합분율은 액막 중심점에서 멀어질수록 연료질량분율이 증가하는 경향을 보였다. 액막에 수직한 방향으로, 산화제/연료 질량비가 작을 때는, 산화제 노즐이 위치하고 있는 방향의 연료 질량분율이 가장 큰 값을 나타내고 충돌면에 접근할수록 점점 감소하는 경향을 나타내었으며 충돌면을 지나 연료측으로 가까워 지면 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 또한 산화제/연료 질량비가 클 때는 액막의 충돌면에서 멀어질수록 연료질량분율이 증가하는 경향을 나타내었다.

산화제/연료 질량 유량비가 증가할수록 연료/산화제의 불균일한 혼합 분포를 나타내었고, 제트의 속도차가 클 때 액막이 불안정하였으며, 속도차가 심한 경우 유체가 혼합되지 못하고 서로 분리되어 액막이 형성되지 않았다.

후 기

본 연구는 서울대학교 터보·동력기계연구센터의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Sutton, G. P., 1992, "Rocket Propulsion Elements," 6th Ed., John Wiley and Sons, pp. 382~384.
- (2) Lefebvre Arthur H., 1989, "Atomization and Sprays," Hemisphere Pub. Co., pp. 105~153.
- (3) Faeth, G. M., 1977, "Current Status of Droplet and Liquid Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 3, pp. 191~224.
- (4) Dombrowski, N. and Hooper, P. C., 1963 "A Study of the Spray Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 18, pp. 393~400.
- (5) Rupe, J. H., 1953, "The Liquid Phase Mixing of a Pair of Impinging Streams," *JPL Progress Report*, No. 20-195.
- (6) Rupe, J. H., 1956, "A Correlation between the Dynamic Properties of a pair Impinging Streams and the Uniformity of Mixture-Ratio Distribution in thr Resulting Spray," *JPL Progress Report*, No. 20-195.
- (7) Ranz, W. E., 1959, "Some Experiments on the Dynamics of Liquid Films," *J. Appl. Phys.*, Vol. 30, pp. 1950~1955.
- (8) Taylor, G. I., 1960, "Formation of Thin Flat Sheets of Water," *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. 10, pp. 1~17.
- (9) Hasson, D. and Peck, R. E., 1964, "Thickness Distribution in a Sheet Formed by Impinging Jets," *AIChE J.*, Vol. 10, pp. 752~754.
- (10) Miller, K. D. Jr., 1960, "Distribution of Spray From Impinging Liquid Jets," *J. Appl. Phys.*, Vol. 31, pp. 1132~1134.
- (11) Couto, H. S. and Basto-Netto, D., 1991, "Droplet Size Distribution from Impinging Jets," *J. Propulsion and Power*, Vol. 7, pp. 654~656.
- (12) Ibrahim E. A. and Przekwas, A. J., 1991, "Impinging Jet Atomization," *Phys. Fluids A*, Vol. 3, pp. 2981~2987.
- (13) 박성영, 김선진, 박승운, 김유, 1996, "액체 로켓용 충돌형 Triplet 인젝터의 미립화 특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집(B), 제20권 제3호, pp. 1005~1014.
- (14) Clark, C. J. and Dombrowski N. D., 1974, "An Experimental of the Flow of Liquid sheets in Hot Atmospheres," *J. Fluid Mech.*, Vol. 64, pp. 167~175.
- (15) Dombrowski, N. D., Horne, W. and Williams A., 1974, "The Formation and Combustion of Iso-octane Sprays in Hot Gases," *Combust. Sci. Tech.*, Vol. 9, pp. 247~254.