

혼합성능 개선을 위한 분리 삼중충돌 요소의 설계

조용호* · 김경호* · 윤웅섭**

Design of Unlike Split Triplet Impinging Element for Jet Mixing

Y. H. Cho* · K. H. Kim* · W. S. Yoon**

ABSTRACT

With an aim placed on its exploitation on practical injector design, liquid phase mixing due to unlike split triplet impinging element is experimentally investigated by a series of cold tests. Non-reacting kerosene/water spray simulates the kerosene/LOX propellant combination. Measurements of local mixture ratio distribution were made for different injection configurations and different momentum ratios. Mixing and mixing controlled characteristic velocity efficiencies are measured in terms of oxidizer/fuel jet momentum ratio from 0.5 to 8. Extent of mixing and its influence on hot performance are estimated in terms of mixing efficiency and mixing controlled characteristic velocity. Envelope of design locus for optimum mixing quality and corresponding maximum hot performance are proposed. Effects of momentum ratio, orifice diameter ratio and jet velocity ratios are also presented and discussed.

초 록

분리 삼중충돌 제트의 액상 혼합에 대한 실험적 연구결과를 통해 분리 삼중충돌 인젝터의 요소설계 시 고려해야 할 기하학적 파라메타와 혼합성능을 고려하는 방법을 제시하였다. 실험은 비반응성인 케로신과 물을 사용하여 수행 하였으며, 분사공의 기학적 조건과 분사조건(운동량비)에 따른 국소 혼합비 분포를 측정하여 혼합효율 및 혼합특성속도를 산출하였다. 분사공의 각종 기하학적 요소와 운동량비에 따른 혼합효율 및 혼합 특성속도를 비교/분석하고 혼합성능과 연소성능과의 상관관계를 규명하였으며, 혼합의 정도를 향상시키는 설계점과 혼합성능 측면에서의 분리 삼중충돌 인젝터의 최적 설계조건에 대하여 고찰하였다.

* 정회원, 현대모비스(HYUNDAI MOBIS)

주연락저자, E-mail : yhcho@mobis.co.kr

** 정회원, 연세대학교 기계공학과(Yonsei University, Dept. of Mechanical Engineering)

1. 서 론

액체로켓엔진의 성능에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 인젝터이며, 인젝터 성능의 저하는 특성속도의 저하와 연관되어 바로 비추력의 손실로 이어진다.[1]. 연소실내에서의 추진제 연소 과정은 분사(injection), 미립화(atomization), 혼합(mixing), 기화(vaporization), 화학반응(chemical reaction)등 매우 복잡하며, 주어진 추진제 조합에서 더 높은 내부에너지를 발생시키기 위해 액체 산화제가 연료와 완전히 반응할 수 있는 최적의 상태를 만들어 주는 것이 무엇보다 중요하며, 이 과정에서 중대한 연소성능 손실이 발생한다[2]. 따라서 연소과정중의 성능손실을 최소화하기 위해 추진제의 혼합은 미립화와 더불어 인젝터 설계시 고려해야 할 매우 중요한 인자다. 그러나 액체로켓엔진의 연소실과 같은, 고온, 고압의 환경에서 이루어지는 연소의 경우, 분사 추진제의 무화된 액적은 매우 빠르게 기화되어 하류로 진행되므로 연소성능은 미립화특성보다는 주로 분사제트의 혼합특성에 따라 영향을 받는다. 그러나 현재까지는 보다 명확한 미립화에 대한 연구들이 주류를 이루고 있으며, 혼합에 대한 구체적인 연구는 매우 제한적이다.

Rupe[3, 4]는 비반응 2액체 제트 혼합에 대한 광범위한 실험결과를 보고하였으며, 주로 혼합효율과 분사기의 수력학적 특성의 상관관계를 통하여 최적 혼합한계를 제시하였다. Heidmann[5]은 분사공의 직경, 제트속도, 충돌각, 충돌길이가 혼합에 미치는 영향 및 점성과 표면장력의 효과에 대해 연구하였으며, 이 연구로부터 충돌제트의 미립화에서 제트 속도와 충돌각이 임계 변수임을 밝혔다. Dombrowski와 Hopper[6]는 층류와 난류제트로 충돌시 형성되는 액막의 붕괴를 연구하여 액막의 붕괴는 분사공 직경, 충돌거리, 충돌각같은 형상변수 외에 충돌시 상대적 제트관성에 의한 충격파동과 제트의 속도에 지배됨을 보고하였으며, 특히 층류와 난류의 속도분포를 근거로 충돌메카니즘을 자세하게 설명하였다. NASA에서는 충돌식 분사

기의 형상변수와 작동조건에 한정하여 분사기 설계방법을 제시하였다[7]. Kazuo SATO[8] 등은 모사 추진제인 TCE (Trichloro ethylene)/H₂O에 의한 비연소 시험을 통하여 혼합효율, 혼합특성속도, 혼합특성속도 효율을 계산하여 이를 실제 연소시의 특성속도 효율과 비교함으로써 비연소 혼합실험을 통한 연소성능 예측 결과와 분사형태에 따른 혼합지배 연소효율을 비교하였다.

본 연구에서는 혼합에 대한 기초연구 결과를 인젝터 설계시 실적용하기 위해 분리 삼중충돌 제트의 액상 혼합에 대한 실험적 연구결과를 토대로 인젝터 설계점 및 최적설계 방법을 연구하였다.

2. 설계 파라메타

분리 삼중충돌 제트의 혼합의 경우 하류에서의 난류에 의한 기상혼합보다 기계적 충돌에 의한 초기 액적들의 혼합이 매우 중요하게 작용하므로, 충돌요소 설계시 분사공 직경, 충돌각, 충돌거리, 분사공 길이/직경비, 분사공 직경비와 같은 기하학적 요소가 1차적으로 고려되어야 하며, 2차적으로 혼합비 선정과 작동조건 선정과 같은 인젝터 성능에 대한 설계가 고려되어야 한다.

2.1 분사공의 형상설계

일반적으로 충돌형 제트의 분사공 형상설계에는 Fig.1과 같은 단순직각형(single sharp edged) 분사공이 사용되며, 형상설계를 위한 기하학적 파라메타는 분사공 직경 D , 길이 L , 직경비 L/D , 입구형상, 내부 표면 거칠기등이 있다.

이러한 기하학적 파라메타는 Fig.1과 같은 분사공 내부유동계의 특성과 복합적으로 고려되어 설계가 되어야 하며, 케이스별 설계점이 이미 과거 50년 동안 많은 기초실험 연구결과를 통해 실험 및 경험적으로 확립되어 있다. 분사공의 직경, 길이, 내부거칠기는 작동파라메타인 유체 유속, 밀도, 점성 및 압력강하 ΔP (메니폴드 압력 P_i 과 연소실 압력 P_a 와의 차압)와 더불어 분사

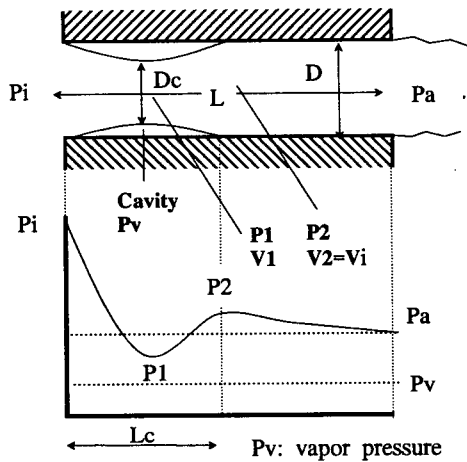


Fig. 1 Internal flow and pressure distribution in the Plain Orifice

공 수력학 저항계수 C_d (식.1)와 유동특성, 영역 및 붕괴길이(Break-up length)를 결정하는 Re 수(식2)를 정의하며, 유체의 표면장력 σ 과 더불어 미립화특성을 정의하는 We 수(식.3)를 정의한다. 또한, 기하학적 파라메타중 L/D 는 분사공 내부 유동 캐비테이션수 Kc 를 정의한다(식.4).

$$C_d = \frac{m}{A\sqrt{2\rho\Delta P}} \quad (1)$$

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} \quad (2)$$

$$We = \frac{\rho UD}{\sigma} \quad (3)$$

$$Kc = P_1 - P_v / \left(\frac{1}{2} \rho V_i^2 \right) = \left(\frac{Dc}{D} \right)^4 \left\{ \frac{P_1 - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_i^2} + \frac{f(L-Lc)}{D} + 1 \right\} - 1 \quad (4)$$

일반적으로 분사공의 수력학 저항계수(discharge coefficient)는 분사공의 입구형상 및 내부표면 거칠기(가공정도), 추진제에 종류에 따라 0.6~0.9까지의 값을 갖는다. 즉, 수력학저항계수는 분사공 내부의 가공정도 및 입구형상에 따라 좌우되므로 인젝터 제작의 신뢰성을 결정

하는 지수로도 사용된다. L/D 는 내부유동계(internal flow system)을 구성하므로, 기하학적 파라메타, 작동파라메타 및 각종 무차원수와 밀접한 상관관계를 가지고 있다. 특히, 분사공의 입구영역부터 유체가 분리(separated)되어 증공(cavity)이 형성되었다가 다시 벽면으로 붙는 베나콘트렉타(vena contracta)현상에 의한 캐비테이션 발생과 밀접한 관계가 있다. 분사공 직경에 따라 L/D 의 의한 캐비테이션 영향은 동일하지는 않으며, 일반적으로 $D=1\pm 0.5mm$ 의 분사공을 설계할 경우 $L/D=4\sim 7$ 영역에서 설계점을 찾고 캐비테이션 배제를 위한 6정도가 설계점으로 널리 사용된다[10,11]. 그러나 단일 분사공이 아닌 충돌형 분사요소의 혼합에는 캐비테이션의 영향은 미비하며[12]. 이점과 관련하여 국내에서도 본 연구 및 KSR-III인젝터 설계시에 적용되어 검증되었다.

2.2 작동조건 및 혼합비의 설계

Fig.2에 분리 삼중충돌 요소를 나타내었다. 충돌형 분사형태는 2개 혹은 그 이상의 액상의 연료 및 산화제가 임의의 각도로 고속으로 충돌되고, 그 결과 액상의 제트는 제트의 중심선에 대하여 90° 의 각도로 팬(fan)과 유사한 타원형의 액막을 형성하고, 생성된 액막은 단속적으로 액적들의 그룹으로 변환되어 충돌점으로부터 파동의 형태로 진행되며, 작은 액적으로 무화되어 혼합하게 된다. 그러므로 충돌형 인젝터의 경우, 분사 추진제의 연소과정중 미립화와 혼합은 제트충돌에 의한 운동량 교환에 의해 이루어지므로, 제트의 충돌각, 충돌거리와 같은 기하학적 요소와 공급차압, 유속, 유량, Re 수, We 수같은 작동요소와 상호관계를 가지며 혼합비 및 작동조건이 설계된다.

충돌각은 $2\theta=30^\circ\sim 90^\circ$ 의 영역에서 그 설계점을 찾으며, 일반적으로 60° 를 널리 사용한다. 또한 충돌거리는 경험적으로 $5D$ 가 되도록 설계한다[12]. 분사공 유동의 레이놀즈수는 $10^4\sim 10^6$ 층류-난류의 천이영역 또는 난류영역에서, 웨버수는 10^5 의 영역에서 설계점을 찾는 것이 바람직

하다[12]. 분사공의 압력강하는 연소실 압력의 10~15%수준[1]에서 설계점을 찾으나, 대부분 0.4MPa - 1.0MPa의 영역에서 설계가 되고 있다.

혼합비의 설계는 연소가스의 이론적 온도와 열해리가 최대가 되는 당량(stoichiometric)혼합비에서 설계점을 찾으며, 추진제의 종류에 따라

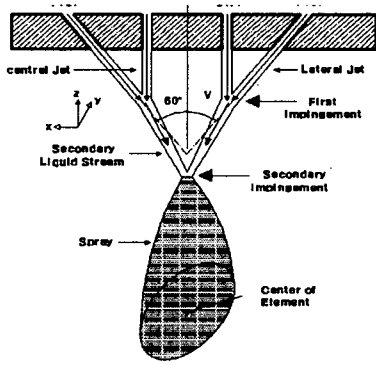


Fig. 2 Illustrations of impinging jets and spray formation of Split triplet element with included angle between the lateral jets of 60°

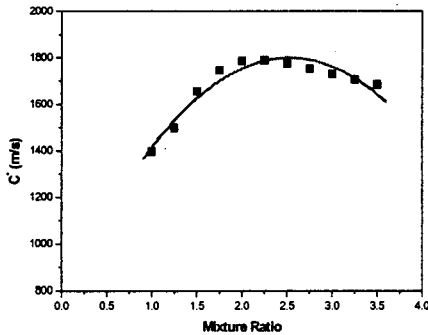


Fig. 3 Theoretical thrust chamber performance vs mixture ratio for LOX/Kerosene at 200psia shifting equilibrium and optimum sea-level expansion

그 값은 다르다. 특히 액체로켓엔진에서 최적혼합비의 설계는 Fig.3과 같이 엔진의 성능요소인 특성속도 C*와 상관관계를 가지고 특성속도가 최대가 되는 점에서 최적 설계점을 잡는다. Fig.3은 S. Gordon 등[13]의 fast chemistry 방법을 사용하여 LOX/Kerosene 추진제 조합에 대해 임

의 연소실압력(200psi)과 혼합비를 변수로 하여 계산되었다.

따라서 인젝터의 단순설계 과정은 먼저 이론적으로 사용하고자 하는 추진제 조합에 따른 최적 혼합비를 설정하고, 엔진 개념설계 제원에 따른 유량을 설정하여, 각종 기하학적 파라메타와 작동파라메타의 설계영역 범위를 설정한 후 그 설계영역 범위에서 실험적인 방법으로 조정(tuning)함으로 최적 설계점을 설정할 수 있다.

3. 혼합성능의 설계

일반적으로 충돌형 인젝터의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 기하학적 설계 파라메타는 충돌각과 분사공 직경비이며, 특히 분사공 직경비는 유량, 유속, 운동량, 혼합비등의 작동조건과 매우 밀접한 관계를 갖는 설계요소이다. 따라서 분사공에 대한 기초설계가 끝난후 추진제 분사조건 설정을 위해 충돌각 및 직경비가 다른 단위인젝터(uni-element injector)시제를 제작하여 미립화 및 혼합특성에 대한 비연소 시험을 필히 수행하고, 그 결과를 토대로 최적 설계점을 설정하여야 한다.

비 연소시험(cold test)의 혼합성능에 대한 분석 및 평가는 측정된 국소 질량을 입력자료로 산화제/연료의 질량분포, 혼합비분포, 혼합효율, 혼합특성속도 및 혼합 특성속도 효율을 산출함으로써 이루어진다. 일반적으로 충돌형 분사기의 혼합효율 η_{mix} 는 분사된 추진제의 국부혼합비가 총 혼합비로부터 이탈된 정도로 정의되며 식 (5)과 같이 표현된다[14]. η_{mix} 는 0~100%의 범위를 나타내며, $\eta_{mix}=100\%$ 는 총 혼합비와 전체의 국소 혼합비가 동일한 경우이고, $\eta_{mix}=0\%$ 는 혼합이 전혀 일어나지 않은 상태를 의미한다.

$$\eta_{mix} = 100 \left[1 - \left\{ \frac{\sum_i^n M_i \cdot (R - \gamma)}{M_t \cdot R} + \frac{\sum_i^n M_i \cdot (R - \bar{\gamma})}{M_t \cdot (R - 1)} \right\} \right] \quad (5)$$

본 실험에서는 비반응 추진제인 물과 케로신을 사용하였으며, 유동은 레이놀즈수 2,500부터 12,000 사이의 난류제트 영역에서, 연료 분사공(D_f)의 직경을 0.4mm 로 고정($m = 1.156\text{g/s}$)시키고 산화제의 분사공(D_o)의 직경변화(직경비 1, 1.25, 1.5)에 따른 혼합효율의 변화를 운동량 비에 따라 고찰하였다.

Fig.4에 이중충돌식(unlike doublet impinging) 다른 분사공 직경비를 갖는 분사요소에 대한 혼합특성을 모멘텀비에 따라 나타내었다. 과거 이론적, 실험적 연구에서 분사공의 직경이 동일하고(직경비 1)이고 제트의 모멘텀이 동일할때(모멘텀비 1)최적의 혼합이 이루어지는 것이 일반적인 특성으로 알려져 있다[2,4,8]. 이와 관련하여 앞선 연구에서 유속에 따른 침투깊이에 대한 영향을 살펴보았다[9]. 다시말해 균일한 혼합을 위해서는 충돌시 운동량 교환이 동일해야 하고, 침투깊이가 동일해야한다. 그러나 실제적으로 산화제와 연료의 분사 압력강하를 거의 동일하게 하고, 혼합비를 조절하기 위해 산화제 분사공을 확공하기 때문에 직경비 1에서 최적혼합이 이루어 진다는 것은 절대적이지는 않다. 즉, 분사공의 직경이 동일한 상태에서 혼합비를 맞추기 위해 유량을 증가시킬 경우 유속이 증가되고 이에따라 분사형태가 틀어지며, 혼합 및 미립화 또한 한쪽으로 치우치게 한다. 그러므로 이와같은 제트 모멘텀의 불균형에 의한 혼합정도의 저하는 직경비의 증가에 의해 회복될 수 있다. 이것은 직경비증가에 의해 감소된 산화제 제트 속도는 분사공 직경비에 의한 유량에반비례하는 사실에 기인한다.

직경비가 증가할수록 최대 혼합율을 나타내는 점이 모멘텀비가 증가되는 방향으로 이동되고있음을 알 수 있다. 이것은 과거 연구결과와 일치하는 결과이다[8]. 또한, 직경비가 증가되었음에도 불구하고 최대혼합효율이 거의 변화되지 않음을 파악할 수 있다. 이는 직경비가 증가되

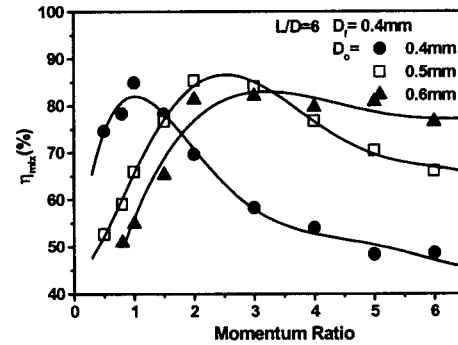


Fig.4 Effect of diameter ratio on the mixing efficiency of unlike doublet element

어 분사형태 또는 혼합에 영향을 미쳐 혼합의 질에 영향을미칠 수 있다고 추측할 수 있으나, 직경비 증대에 따른 산화제 유속의 감소에 의한 모멘텀이 평형상태에 도달될 때 최대 혼합효율을 나타내므로 실질적으로는 큰 영향을 미치지 못하고 최대 혼합효율을 나타내는 모멘텀비의 변화만 있는 것이다. 또한 종래의 직경비가 1.22 이상에서는 혼합의 정도가 유지되고[8], 분사공의 직경이 0.75mm 이하의 제트에서는 혼합효율의 개선이 미비하다는 종래의 실험결과와도 일치하는 결과이다. 본 연구에서 다른 직경비를 갖는 각 제트의 최대혼합효율이 나타나는 지점에서의 제트 속도비가 0.65-0.7의 아주 협소한 범위에 있는 매우 흥미로운 현상이 나타났다. 이 현상에 대해 추가적인 실험을 할 예정이다.

또한, 다른 직경비를 갖는 분리삼중충돌 제트의 혼합효율을 모멘텀비에 따라 Fig.5에 나타내었다 여기서 모멘텀비의 증대는 측면제트(연료)의 모멘텀은 고정시키고 중앙제트(산화제)의 모멘텀비를증가시키는 것을 의미한다. 분사공비 1일 때 최대혼합효율은 이중 충돌식 제트와 마찬가지로 모멘텀비 1에서 최대를 나타낸다. 모멘텀비 1일 때 두 제트사이의 모멘텀교환과 침투깊이의 범위는 동일하고 혼합정도는 균일하다. 최대 혼합효율은 직경비가 증가할수록 모멘텀비 증가방향에서 나타난다. 이것은 앞서 언급

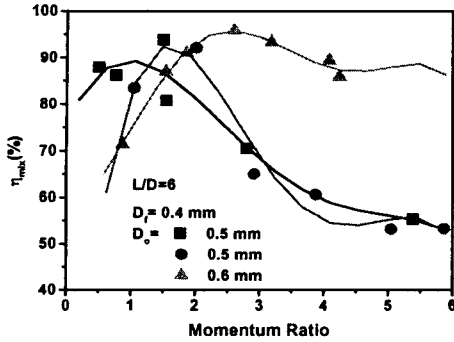


Fig.5 Effect of diameter ratio on the mixing efficiency of unlike split triplet element.

한 실험결과와 같은 경향을 나타낸 것이다. 그러나 이중충돌형 제트가 최대 혼합효율이 모든 직경비에서 거의 변화가 없는 것과는 달리 최대 혼합효율이 직경비 1과 1.25에서는 거의 변화하지 않다가 직경비 1.5에서 확연하게 증가함을 알 수 있다. 즉 분리 삼중 충돌형 제트의 경우 직경비 1.25까지는 직경비 증가에 따라 직경비 1.5의 경우보다 덜 민감한 것으로 판단된다. 또한, 흥미롭게도 분리 삼중 충돌식 제트 또한 앞선 실험결과 같이 최대 혼합효율이 나타날때의 상대제트 속도비가 0.85-0.9정도의 아주 협소한 범위에 있음을 나타내었다.

혼합효율측면에서 분사공 직경비 변화를 언급하지 않는다 하더라도, 분리 삼중 충돌식 제트는 92-96%의 혼합효율을 나타내었으며, 이중충돌식 제트의 혼합효율은 82-85%를 나타내었다. 즉 혼합효율면에서 분리삼중충돌식 제트가 더 우수함을 알 수 있다.

지금까지 분리 삼중 충돌식제트의 설계점을 찾기위해 충돌식 제트의 기본이 되는 이중충돌식 제트와 분리 삼중충돌식 제트에 대해 기하학적 파라메타인 분사공 직경비와 작동파라메타인 운동량비를 설계변수로 하여, 혼합성능에 대한 고찰을 수행하였다. 실용 인젝터 설계시 산화제와 연료의 분사 압력강하를 거의 동일하게 하고, 혼합비를 조절하기 위해 산화제 분사공을 확공하기 때문에 각종 분사공 직경비 시제를 제작하여 기초실험을 수행하고 그 결과를 토대로

최대 혼합효율을 나타내는 분사공 직경비와 운동량비의 설계점을 찾아내야 한다. 부차적으로 혼합비 빈도분포에 대한 고찰 또한 수행하여야 한다[9].

4. 연소성능 설계

액체로켓엔진의 연소성능은 이론적 특성속도와 실험적 특성속도의 비로 정의되며, 액체로켓엔진 성능의 지표인 비추력은 특성속도 C^* 의 비례함수로 특성속도에 의해 좌우된다. 또한 특성속도는 추진제의 유효에너지 레벨과 인젝터 및 연소실디자인의 질(quality)을 평가하기도 한다.

앞서 토론한 대로 최적 혼합비 설계는 특성속도와 상관관계를 가지고 설정되므로, 연소성능은 추진제의 혼합 지배적이라고 말할 수 있다 [9]. 따라서 인젝터 설계시 연소성능을 고려키 위해 비연소 혼합실험의 결과로부터 추진제의 혼합특성속도 C^*_{mix} 를 산출하고 분석하는 것이 필수적이며 혼합특성속도는 연소시의 특성속도 C^* 를 예측하는데 사용된다. 혼합특성속도는 식 (6)과 같이 정의된다[14].

$$C^*_{mix} = \sum_i^m C^*_{theo} \cdot M_i / M_t \quad (6)$$

기계적 요인을 배제한 이론 특성속도 C^*_{theo} 는 S. Gordon 등[13]의 fast chemistry 방법을 사용하여 압력과 혼합비를 변수로 하여 계산되었다. Fig.6은 이중충돌식 인젝터의 분사공 직경비에 따른 혼합지배적인 특성속도를 나타내었다. 여기서 혼합특성 속도는 연소실 압력 200psi의 환경에서 산화제 분사공 직경변화에 따른 분사연소 성능을 평형화학 반응에 의한 이론 연소 방법으로 혼합지배적임을 가정하여 계산하였다 [13]. 혼합의 질은 분사 파라메타에 따라 좌우되기 때문에 특성속도는 혼합비의 함수로 정의된다.

특성속도의 최대값은 최대 혼합효율을 나타내

는 점과 일치하지 않는 실험결과가 도출되었다. 즉 직경비 1의 경우 혼합효율은 모멘텀비 1에서 최대를 나타내는데, 특성속도는 모멘텀비 2.3정도에서 최대를 나타낸다. 다른 직경비에서도 거의 동일한 경향을 나타내었다. 또한 이상특성속도와 혼합특성속도의 절대값은 차이가 있으나, 모든 직경비에서 특성속도의 추이는 이상특성속도 곡선과 같은 경향을 나타내었다. 또한 모멘텀비 1에서 각 직경비를 가진 제트의 혼합특성속도를 보면 혼합효율에 비해 그 차가 매우 작다. 이러한 이유들로 보아 혼합효율과 혼합특성속도는 비례적이지 않음을 알 수 있다.

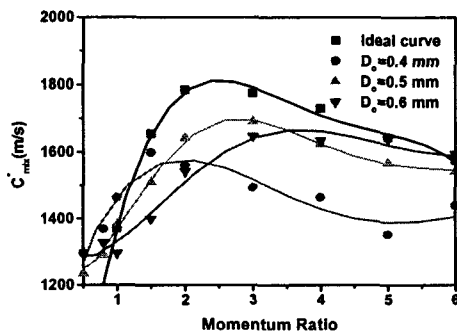


Fig.6 Effect of diameter ratio on the mixing characteristic velocity of unlike doublet element.

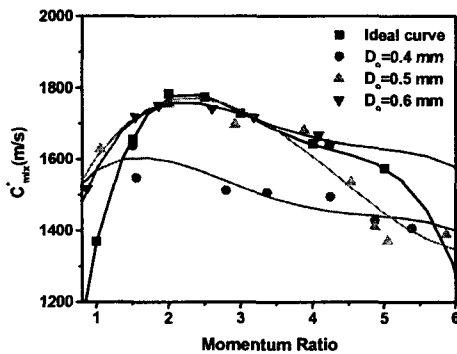


Fig. 7 Effect of diameter ratio on the mixing characteristic velocity variation of the split triplet element

Fig.7에 직경비 변화에 따른 혼합 지배적인 특성속도를 나타내었다. 직경비 1.25, 1.5에서 거의 같은 특성속도를 나타내었으며, 특히 이중충돌식 제트와 달리 직경비 1.25, 1.5에서의 특성속도는 거의 이상(ideal) 특성속도에 거의 근접해 있음을 나타내었다. 그러나 직경비 1인 경우 이중 충돌식 제트와 마찬가지로 전체적인 모멘텀비에서 혼합특성 속도는 낮게 나타났다.

이중 충돌식 제트와 분리 삼중 충돌식 제트의 혼합과 연소성능과의 상관관계를 비교분석함으로 인젝터 설계시 최대 혼합효율의 설계점에서 반드시 연소성능이 최대가 아님을 파악하였다. 따라서 인젝터 설계시 반드시 혼합성능과 연소성능을 비교함으로 최적 설계점을 찾아야 한다.

5. 결 론

이중충돌형 제트와 분리 삼중충돌형 제트의 분사공 직경비와 운동량비에 따른 혼합특성 실험연구 결과를 토대로 인젝터 단순설계 과정과 분리 삼중충돌 제트의 혼합성능 개선을 위한 설계영역 및 최적설계점을 파악하였다. 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 인젝터 설계시 이론적으로 기하학적 파라메타와 작동파라메타를 고려한 설계요소치 및 안전 설계영역을 설정하고, 설정된 설계영역에서 기초실험을 통해 최적설계점을 파악하고, 그 결과를 토대로 설계치를 조절(tuning)해야 한다.
- 2) 분리 삼중충돌식 제트에 대한 최대 혼합효율은 직경비가 증가할수록 더 높은 모멘텀비에서 나타난다. 또한 최대 혼합효율은 거의 변화하지 않지만, 직경비가 증가할수록 점진적으로 개선됨을 알 수 있다.
- 3) 최대혼합효율을 나타내는 점에서의 상대제트 속도비는 0.85-0.9로 나타났다. 작동 파라메타로서 상대속도비 또한 고려해야할 요소이다.

4) 분리 삼중충돌형 제트의 혼합에 있어 분사공 직경비 및 운동량비는 매우 큰 영향을 미치는 설계파라메타이며, 본 연구에서 분리 삼중충돌제트의 최적혼합은 직경비1.5, 운동량비 2.6~2.8영역에서의 설계점이 혼합효율 및 연소성능면에서 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. D.K Huzel and D.H Huang, "Modern Engineering for Design of Liquid Propellant Rocket Engines," Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol.147, 1992.
2. G.M. Feath "Current Status of Droplet and Liquid Combustion", Combust Sci. Vol 3. pp191-224, 1977.
3. J.H. Rupe, "A Correlation between the Dynamic Properties of a Pair of Impinging Streams and the Uniformity of Mixture Ratio Distribution in the Resulting Spray", Jet Propulsion Lab, Progress Rept. 20-209, 1956
4. J.H. Rupe, "Experimental Studies of the Hydrodynamics of Liquid Propellant Injector", Jet Propulsion Lab, C.I.T., External Publication 388, Pasadena, CA, June 1957.
5. Heidmann, M.F., Priem, R, J. and Humphrey, J. C., "A Study of Sprays formed by Two Impinging Jets.," NACA Technical Note 3855, March 1957.
6. Dombrowski. N. and Hopper. P. C., "A Study of the Sprays Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow," J. Fluid Mechanics, Vol. 18, Part 3, 1963. pp. 392-400
7. Liquid Rocket Engine Injectors, NASA SP-8089, 1986.
8. Kazuo SATO, "A Study of N₂O₄/Almine Injector Elements Part 1. Cold Flow Test", NAL Report, TR-899, pp.1-13, 1986.
9. Y.H Cho, S.W Lee, W.S Yoon and Y.S Kim, "Effect of Orifice Diameter Ratio on the Mixing Characteristics of Unlike Impinging Injectors," AIAA 2002-0343, Jan., 2002.
10. Reibling, R. W., and Powel, W. B., "The Hydraulic Characteristics of Flow through Miniature Slot Orifices," Technical Report 32-1397, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif., Sept. 15, 1969.
11. Hiro Hiroyasu, "Effect of Internal Flow Conditions Inside Injector Nozzles on Jet Breakup Processes." Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol.166, pp173-184, 1996.
12. Anderson, W. E., Ryan, H. M., Pal, S., and Santoro, R. J., "Fundamental Studies of Impinging Liquid Jets," AIAA 92-0458, January 6-9, 1992.
13. Gordon, S., and McBride, B. J., "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Composition, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks and Chapman-Jouguet Detonations," NASA SP-273, 1971.
14. F. W. Heohn, J. H. Rupe. and J. G. Sotter, "Liquid-Phase Mixing of Bipropellant Doublets, Technical Report 32-1546, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif., Apr. 20, 1972.