

1. 연구배경 및 목적

횡방향으로 흐르는 공기유동에 대하여 연료를 수직으로 분사하는 액체제트의 분무방법은 공기를 산화제로 사용하는 추진 시스템 기관에 널리 활용되는 분사방식이다. 특히 빠른 속도의 공기가 횡방향에서 유입되는 램제트, 스크램제트, 가스터빈 엔진 등의 연소기에 많이 사용되고 있다. 이와 같은 공기 흡입 엔진에서의 연소 효율은 액체제트의 미립화 특성에 지대한 영향을 받으므로 이에 대한 물리적인 현상과 미립화의 전반적인 과정들을 이해하는 것이 중요하며, Fig. 1에 횡단류 유동장내에 수직으로 분사되는 연료의 전반적인 분무구조를 정리하였다.

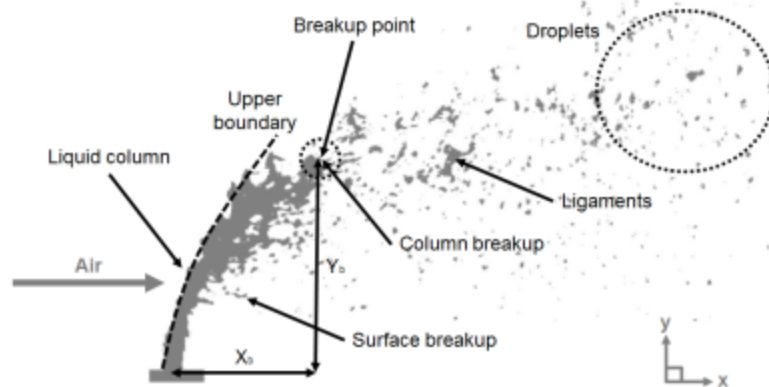


Fig. 1 Schematic of the spray structure in a crossflows

수직분사제트에서 액체분무 특성 중 가장 중요하게 여겨지는 요소로 액주의 분열이 있다. 액주의 분열의 경우, 액적이 처음으로 형성되기 시작하는 위치로써의 의미뿐만 아니라, 수치해석에 있어서 유체와 입자해석의 경계가 되기 때문에 중요한 분무특성 변수로 여겨진다. 이외에도, 액주영역에서 침투높이(penetration height), 액주궤적과 같은 액체분무 특성 또한 분무의 분포에 지대한 영향을 미치기 때문에 이에 대한 실험적 연구들이 많은 연구자들에 의하여 수행되었다. 하지만 이는 원형노즐에서의 액체 미립화 연구들에 대한 연구들이 다수이며, 미립화 성능을 극대화 하기 위하여 노즐의 형태를 변형시켜가며 수행된 연구들이 부족한 상황이다. 이에 따라 본 논문은 오리피스 형상변화에 따른 횡방향 수직분사 실험을 수행하였다. 이를 위한 첫 번째 단계로 대기조건으로 분사되는 액체제트의 오리피스 형상, 노즐 길이, 분사압력에 따른 유동특성에 대하여 살펴보았으며, 마지막 단계로 위의 기초 연구를 바탕으로 종횡비가 서로 다른 원형 및 타원형 노즐을 가지고 액체제트를 수직분사 하여 분열길이나 액주궤적과 같은 액체분무 특성에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

2. 대기조건에서 액체제트 분무특성

수직분사 연구를 진행하기 전, 대기조건에서 오리피스 길이가 다른 원형노즐과 타원형 노즐을

이용하여, 캐비테이션과 수력튀김 현상이 유동특성에 어떠한 영향을 주는지 살펴보았다. 실험에 사용된 분사기를 Table 1에 정리하였다.

Table 2.1 Dimensions of orifice design parameters

Inj No.	Orifice diameter(d), minor axis(b) [mm]	Major axis(a) [mm]	Orifice length(L) [mm]	L/d, L/b	L/a
C-1-10	0.5	0.5	5.0	10	10
C-1-05	0.5	0.5	2.5	5	5
E-2-20	0.5	1.0	10.0	20	10
E-2-10	0.5	1.0	5.0	10	5
E-2-05	0.5	1.0	2.5	5	2.5
E-3-30	0.5	1.5	15.0	30	10
E-3-10	0.5	1.5	5.0	10	3.3
E-3-05	0.5	1.5	2.5	5	1.7

L/b, L/a 모두 8 이하인 타원형 노즐의 경우 분사압력 3 bar 이상에서 수력튀김 현상이 발생하며, 종횡비가 큰 3인 경우는 수력튀김으로 생성된 액주를 날개처럼 감싸는 액막이 형성됨을 관찰할 수 있었다. L/b가 8 이상, L/a가 8 이하인 타원형 노즐의 경우 분사압력 3 bar 이상에서 액체 제트의 표면이 매우 불안정한 캐비테이션 현상이 나타났다. 장축 평면에서는 수력튀김이 발생하려 하지만, 단축 평면에서 발생하는 캐비테이션 현상으로 결국 원형 노즐의 캐비테이션과 유사한 현상을 나타냄을 확인하였다. 특히, 특정 압력 조건에서 캐비테이션과 수력튀김 현상이 불안정하게 발달하는 히스테리시스 영역이 있다고 생각된다.

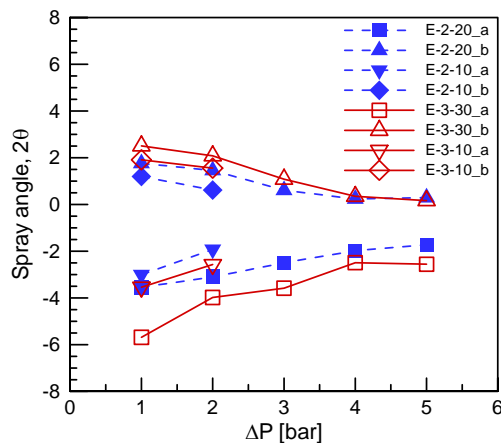


Fig. 2 Spray angle in steady flows

또한 원형노즐에서는 발견할 수 없었던 독특한 분무특성을 타원형 노즐에서 발견하였으며, Fig 2와 같이 유동이 정상상태인 경우 장축 평면에서는 분무각이 줄어들고, 단축 평면에서는 분무각이 커지는 현상이 나타났다. 동일한 분사압력에서 종횡비가 큰 경우 분무각의 감소율이나 증가율이 컸으며, 분사압력이 증가함에 따라 축교차 현상은 줄어드는 것을 확인하였다.

3. 횡방향 유동에서 액체제트 분무특성

대기조건에서 수행하였던 실험들을 토대로 횡단류 유동장 내에서 원형 및 타원형 노즐의 수직 분사 연구를 실험적으로 수행하였으며, 실험에 사용된 분사기를 Table 2에 정리하였다. 2장에서의 실험과는 다르게, 종횡비가 서로 다른 E-2-10, E-3-10의 타원형 노즐은 수직분사 실험에서 제외하였다. 이는 1~2 bar를 제외한 모든 분무차압 조건에서 캐비테이션 유동만 강하게 일어나기 때문이었다. 액체제트의 분열길이의 경우, Fig. 1에서 도시화 하였듯이 액주가 끊어지는 breakup point를 기준으로 x와 y방향에서의 분열길이를 정의하였으며, 액주궤적의 경우 또한 breakup point까지 upper line을 in-house code를 이용하여 분석하였다.

Table 2 Orifice design parameters and experimental conditions

Injector No.	C-1-05, C-1-10	E-2-05, E-2-20	E-3-05, E-3-30
Orifice shape	Circle	Ellipse	
Diameter(d), Minor axis(b)	0.5mm		
Major axis(a)	0.5 mm	1.0 mm	1.5 mm
Aspect ratio	1	0.5, 2	0.333, 3
L/d(circle) or L/b(ellipse)	5, 10	5, 20	5, 30
Experiments	Injection pressure differentials [bar]		
ΔP	1, 2, 3, 4, 5, 6		

Fig. 3에 원형노즐과 타원형 노즐의 분열길이 결과를 서로 비교하였으며, 전반적으로 분열길이가 감소된 것을 알 수 있다. 여기서, 원형노즐과 달리 타원형 노즐은 장축과 단축이 서로 다른 길이를 갖기 때문에 유효직경의 개념($d_{eq} = \sqrt{ab}$)을 도입하게 된다. 유효직경은 원형 노즐에서의 넓이와 타원형 노즐의 넓이를 서로 같다고 두어 도출한 값이며 모든 타원형 노즐에서의 분열길이 결과들을 유효직경 값으로 정규화 시켰다. 미립화 관점에서 보았을 때 분열길이의 감소는 액주의 형태로 존재하던 액체제트가 빠르게 액사로 분열이 일어남을 의미한다. 액체제트의 분열이 빠를수록 평균입경이 작아진다. 이 때문에 체적당 열 방출량이 증가되어 결과적으로 점화가 용이해지며, 넓은 연소범위를 갖게 되므로 미립화 측면에서 분열길이가 감소할수록 좋다. 일반적으로 미립화에 영향을 미치는 인자로서 가장 중요한 요소가 오리피스의 형상과 이에 알맞은 직경의 크기이다. 램제트 엔진이나 스크램제트 엔진, 가스터빈 엔진 등에서의 연소실 설계 시, 연료의 비표면적을 증가시켜 혼합과 증발률을 높이는 것이 가장 주된 설계목적이며, 따라서 원형 노즐에 비해 분열길이가 더 작은 타원형 노즐로 설계하는 것이 미립화 측면에서 좋음을 알 수 있다.

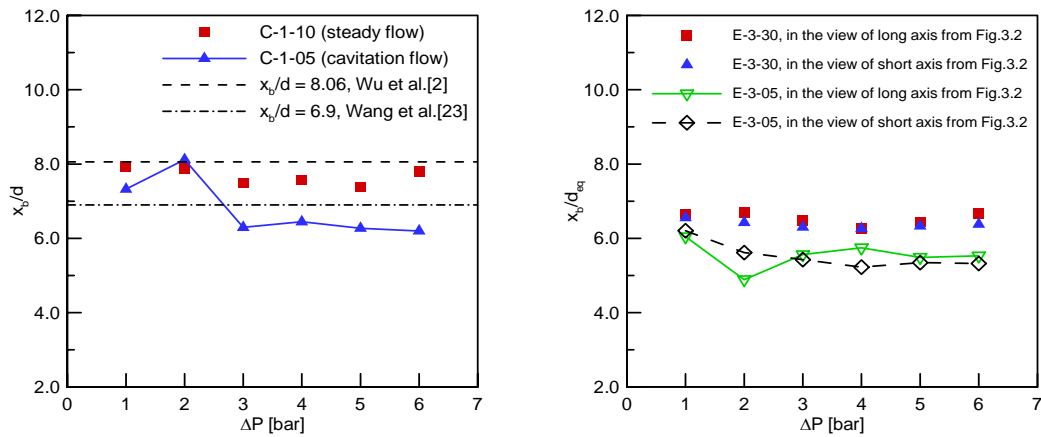


Fig. 3 Liquid column breakup length(from left to right : circular nozzles, elliptical nozzles)

액체제트의 액주궤적의 경우, 분열 이후 액적의 형성 위치를 결정하는데 지대한 영향을 미치기 때문에 액체 연료가 공기와 얼마나 잘 혼합되었는가를 나타내는 중요한 파라미터가 되므로 본 논문에서는 액주궤적에 대해 이론적 접근과 실험적 접근으로 연구를 진행하였다. 본 연구에서는 이론적으로 타원형 노즐의 액주궤적을 예측하고자 공기방향에 대한 공력학적 항력에 의하여 액주궤적이 휘어진다는 가정을 토대로 실험 전 액주궤적 연구를 진행하여 궤적식을 도출하였으며, 식은 아래와 같이 나타난다.

$$\frac{y}{d_{eq}q} = \left(\frac{b}{a}\right)^{0.25} \left(\frac{\pi}{C_D}\right)^{0.5} \left(\frac{x}{d_{eq}q}\right)^{0.5}$$

원형 노즐을 바탕으로 연구되어진 선행연구 결과와 비교하였을 때 액체/기체 모멘텀 플럭스 비인 q 와 평균 항력계수 이외에 면적 비(b/a)가 관계식에 추가되며, 타원형 노즐에서는 축의 변화(즉, 종횡비의 변화) 또한 액주궤적에 영향을 미치는 중요한 변수라는 점을 이론적으로 확인 할 수 있었다. 이처럼 이론적으로 액주 궤적을 설계변수와 관련되어 유도하게 된다면, 시스템을 설계하기 전 설계조건들을 바탕으로 액주의 궤적을 이론적으로 계산 할 수 있다. 따라서 이를 바탕으로 분무의 전반적인 분포 특성들을 예측할 수 있어, 시스템을 설계하는데 많은 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다. 위의 식은 실제 실험과 비교하였을 때 완전히 궤적이 일치하지는 않지만 비슷한 경향성을 보임을 모든 조건에서 실험적으로 입증하였으며, Fig. 4에 이론식으로부터 도출한 액주 궤적과 실험으로부터 얻은 실제 궤적분포를 서로 나타내었다. 종횡비가 1보다 작은 타원형 노즐에서는 하류로 가면서 침투높이가 약간의 차이를 보였으며, 반대로 종횡비가 1보다 큰 경우에는 거의 비슷한 궤적곡선을 보였다. 이와 같이 두 궤적형태의 차이는 항력계수가 서로 조금씩 다르게 나타나기 때문에 발생한 것으로 예측하였다. 캐비테이션과 수력튀김 현상과 같은 분사기(E-2-05, E-3-05)의 경우, 액주궤적을 추적하는데 현재의 in-house code로는 어려움이 있어 추후 code를 수정하여 다시 살펴볼 예정에 있다.

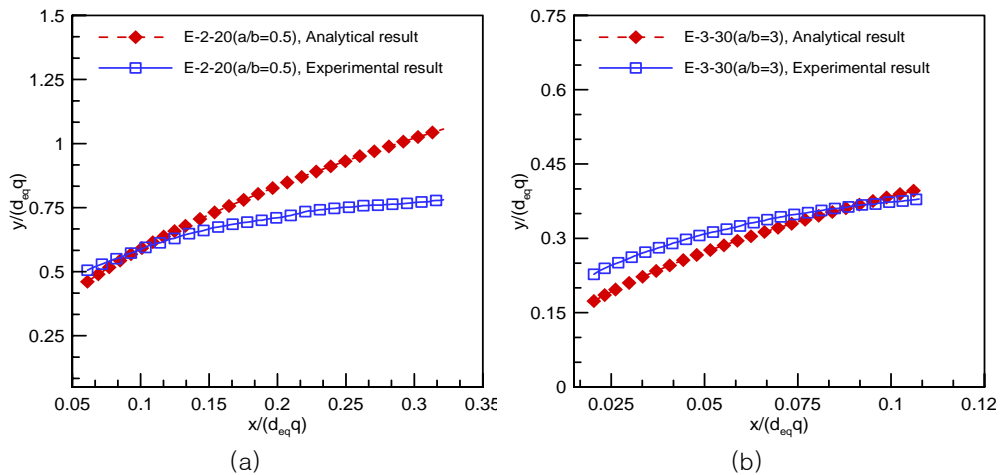


Fig. 4 Liquid column trajectory for the elliptical nozzle between analytical and experimental results(from left to right : E-2-20($\Delta P = 1$ bar), E-3-30($\Delta P = 3$ bar))

4. 결론

본 연구에서는 횡단류 유동에서 오리피스 형상에 따른 단공노즐 액체제트의 분무특성에 대하여 실험적으로 연구하였다. 수직분사 실험을 수행하기 전, 대기조건에서의 액체제트의 분무특성에 대하여 연구하였다. 타원형 노즐의 경우, 특정 압력 조건(2 bar를 기준으로)에서 캐비테이션과 수력 튀김 현상이 불안정하게 발달하는 히스테리시스 영역을 발견하였으며, 이는 수직분사 실험에 있어 분열길이가 순간적으로 줄어드는 주된 원인이 되었다. 미립화 관점에서 분열길이의 인자는 매우 중요하며, 연구결과 타원형 노즐이 원형노즐에 비해 분열길이가 감소하였다. 따라서 원형노즐 대비 타원형 노즐의 미립화 성능이 우수한 것을 실험적으로 알 수 있었다. 또한 타원형 액주체적을 이론적인 접근 방법을 통하여 도출하였으며, 실제 실험과 비교하였을 때 대체로 비슷한 경향성을 보임을 실험적으로 입증하였다. 액주체적은 분무의 전반적인 분포 특성들을 예측할 수 있기 때문에 공기흡입 추진 시스템 기관 설계 시 효율을 극대화하기 위한 단서를 제공할 것으로 생각된다.