

소형가스터빈용 인젝터의 분무 특성에 따른 반응 유동장 전산 해석

김세환* · 정인석** · 박희호*** · 나상권***

Numerical Simulation on a Reacting Flow Field with Various Injection conditions

Seihwan Kim* · In-Seuck Jeung** · Hee-Ho Park*** · Sangkwon Na****

ABSTRACT

This work shows the result of numerical simulation on a reacting flow by varying atomization properties which can be obtained from a injector for a small and low power aircraft gas turbine engine. Because the atomization properties mainly affect on the performance of the engine, a lot of efficiency tests are needed when a new injector is developed. Nowadays researches has been actively performed using computational analysis. Using commercial package CFD-ACE+, basic studies on the reacting flow field have been conducted. Those results show that the reaction rate is increased when higher pressure and wider angle spray condition are used. More smaller parcels can also enhance the fuel-air reaction.

초 록

항공용 저출력 소형 가스터빈 엔진에 적용을 위한 연료 분사기의 분무 특성에 따른 반응 유동장에 대한 수치해석을 수행하였다. 인젝터의 개발에 있어 연료의 분무 상태가 엔진 성능에 큰 영향을 미치므로 다양한 변수에 대한 고려가 요구되고 있다. 본 연구에서는 정지 상태의 유동장에 분사기를 위치시키고 액적의 평균 직경, 분사 압력, 분사각을 변경하며 그에 따른 반응 특성을 살펴보았다. 해석 결과 분사압과 분사 각도가 클수록, 액적의 직경이 작을수록 활발한 반응이 일어나지만 분사압이 큰 경우 영역내에서 기화되는 연료량이 감소함을 확인할 수 있었다.

Key Words: Small Gas Turbine Engine(소형 가스터빈 엔진), Reacting Flow Field(반응 유동장), n-Pentane(펜탄), Injector(연료 분사기), Atomization(미립화)

* 서울대학교 계산과학협동과정 대학원

** 서울대학교 기계항공공학부

*** 삼성테크윈

연락처, E-mail: seihwan1@snu.ac.kr

1. 서 론

현재 한국은 운용중인 노후 헬기의 대체 후속 기종을 자력 개발하고, 핵심 기술의 획득 및 부

품 국산화를 목표로 한국형 헬리콥터 개발 사업을 진행 중에 있다. 이에 한국항공우주연구원은 삼성테크윈 등과 함께 가스터빈 엔진을 공동 개발 중에 있다. 항공용 가스터빈 엔진 중 헬리콥터에 적용 가능하여 주동력 장치의 시동원, 비상발전시스템 등으로 활용을 위해 개발중인 저출력의 소형 가스터빈 엔진은 공간 활용성 및 진동에 따른 불안정 문제를 해결하고자 압축기와 터빈을 가까이 배치시킬 수 있는 환형-역류형 구조(reverse-annular type)를 채택하고 있다. [1]

가스터빈 연소기에 사용되는 연료 분무 장치는 일반적으로 압력형 분무장치, 회전형 분무장치와 보조 공기를 이용한 2-유체 분무 장치 등이 있다.[2] 현재 채택된 환형 연소기는 엔진의 특성상 분사기의 분무 특성이 점화 및 연소 성능에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 인젝터의 개발에 있어 분무 특성 및 연소기 내부 유동장에 대한 연구가 필수적이다.

일반적으로 연료분사기를 개발할 경우 많은 성능 시험이 요구되고 있으나 시험에 사용되는 항공 엔진용 연료의 경우 폭발의 위험성이 클 뿐 아니라 연소 시 유해 가스가 발생하는 등 어려움이 따른다. 이에 최근 향상된 컴퓨터의 연산 능력을 활용하여 보다 경제적인 연구가 가능한 전산유체 해석 방식을 이용하려는 시도가 활발하게 진행되고 있다. 본 연구에서는 가스터빈 엔진의 반응 유동 해석을 위해 널리 사용되고 있는 상용 수치해석 프로그램인 CFD-ACE+를 이용하여 연료 분사기의 분무 특성에 따른 반응 유동장 해석을 수행하였다.

2. 수치 해석 방법

연소기 내 반응 유동장 해석에 앞서 분무 특성을 파악하는 것이 필요하다. 이를 위해 인젝터가 적용될 환형 연소기의 연소부 크기가 약 150x100x100 mm³ 임을 고려하여 Fig. 1과 같이 200x200x200 mm³ 크기의 정방형 영역에서 약 110만개의 격자를 생성하였다. 또 환형 연소기 해석의 경우 연소기의 일부 영역을 해석할 예정

이므로 본 계산을 위한 경계에서 좌우측 면의 경우 순환경계조건을 사용하였다.

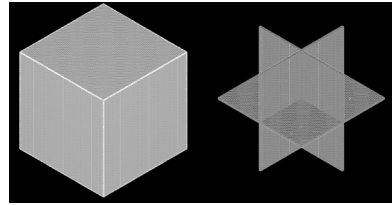


Fig. 1 Grid (Left-Surface, Right-Volume)

2.1 분무 특성

일반적으로 인젝터를 이용한 분무 유동 특성에 영향을 주는 변수를 Table 1에 나타내었다. 이 중 주위 기체는 공기로 물성치가 결정되어 있다. 연료의 경우 삼성 테크윈에서 fluent를 이용해 해석한 결과와 비교 및 검증을 위하여 n-pentane (C₅H₁₂)을 선정하였다.

CFD-ACE+에서는 분무 모델링을 위하여 point, annular, pressure atomizer, plane jet injector 모델을 제공하고 있으며, 본 연구에서는 환형 분사기 모델을 이용하여 분사기 노즐의 크기, 액적의 평균 직경, 속도 분포 등을 변경하며 그 영향을 살펴보았다.

Table 1. Parameters on Spray Characteristics

Spray Characteristics	Principal Variables
Droplet distribution	Injector's structure
Breakup length	Surrounding gas properties
Spray angles	Fuel properties
Penetrations	Injection pressure & alignment of nozzle

2.2 반응 모델

연료-공기의 반응 유동 해석을 위해서는 화학 반응에 따른 개별 화학종의 생성-소멸률을 결정해야 한다. Multi-step kinetic reaction을 이용할 경우 NOx의 발생량이나 점화 지연 현상을 좀더 정확하게 예측할 수 있는 장점이 있으나 다수 화학종을 고려한다. 본 연구의 목표는 분무

특성에 따른 반응 유동장 해석에 있으므로 single-step reaction을 이용하여 해석을 진행하였다. n-Pentane과 관련한 반응식 및 Arrhenius 형태의 반응률 계산을 위한 변수는 Table 2에 나타내었다.[3] 이와 함께 eddy- breakup 모델을 적용함으로써 화학 반응률에 대한 난류 유동의 영향을 고려하였다.

Table 2. Single step reaction and reaction constant

Reaction	$C_5H_{12} + 8O_2 \rightarrow 6CO_2 + 5H_2O$
Pre-exponential factor*	6.4E+11
Temperature exponent*	0
Pressure Exponent*	0
Activation Temperature*	15078
Concentration Exponents*	0.25(C ₅ H ₁₂), 1.5(O ₂)

* $k=AT^nP^m \exp(-E/RT)$, CGS units

2.3 해석 조건

본 연구에서는 분무 액적 평균 직경, 분사 압력, 분사각 변화에 따른 반응 특성을 비교하기 위하여 Table 3 같은 분무 조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

Table 3. Computational Condition at Injector

Case #	Velocity (m/s)	Angle (°)	Pressure (N/m ²)	Mean Size (micron)
1	15	60	500000	50
2	15	60	500000	80
3	22	60	800000	40
4	15	110	500000	50

3. 수치 해석 결과

Figure 2와 Fig. 3에 분무 액적의 크기만 변화시킨 Case 1과 Case 2의 계산 결과를 나타내었

다. 온도를 나타낸 Fig. 2에서 분사 액적의 크기가 작은 경우에 더 넓은 영역에서 반응이 일어나고 그에 따른 온도 상승이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 즉 이는 산화제의 공급이 충분할 때, 액적의 평균 직경이 작은 경우 Fig. 3에 나타난 것과 같이 더 많은 연료가 보다 빠르게 기화하여 반응하였음을 의미한다. 그러나 두 경우 모두 큰 형태의 연료 분사로 인해 발생한 증상의 재순환 영역에서는 반응이 일어나지 않았다. 이는 상단에서 발생한 반응의 영향으로 재순환 영역에 산소가 매우 적게 분포하게 되어 연료가 과농한 상태가 되기 때문인 것으로 판단된다.

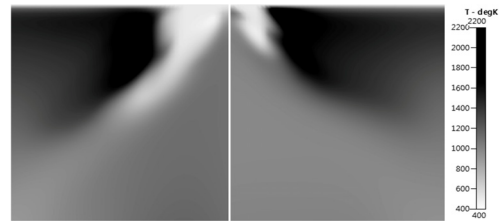


Fig. 2 Temperature (Left-case1, Right-case2)

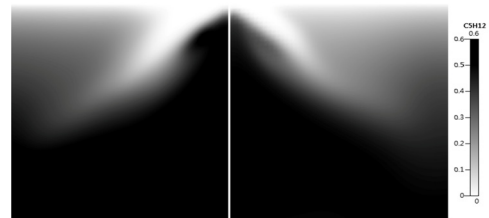


Fig. 3 C₅H₁₂ Fraction(Left-case1, Right-case2)

Figure 4는 분사 압력을 증가에 따른 반응 특성 차이를 보여주고 있다. 분사 압력을 증가시키면 액적의 속도는 증가하고 크기는 감소한다.[4] Case 3의 경우 액적의 모멘텀 증가로 인해 연료 분사기에서 비교적 멀리 떨어진 영역에서도 반응이 일어나며 빠른 증발에 따라 높은 반응 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 5에서와 같이 분무된 연료의 분포 특성은 크게 변화하지 않았다.

Table 4에 각 계산 조건에 따른 연료의 기화량을 나타내었으며 액적의 크기가 증가함에 따라 증발량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

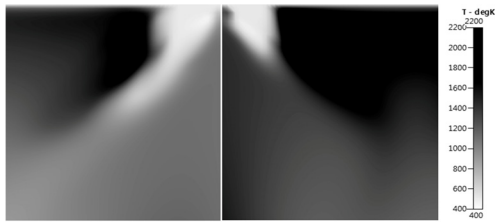


Fig. 4 Temperature (Left-case1, Right-case3)

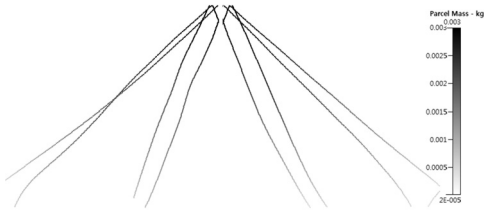


Fig. 5 Spray Parcel Distribution(Left-case1, Right-case3)

Table 4. Spray evaporation (evaporated/injected)

Case 1	Case 2	Case 3
92.12	74.93	95.37

Figure 6과 Fig. 7은 분사각을 60°에서 110°로 증가시킨 경우 온도분포와 반응율을 나타내고 있다. 분사 압력을 증가시킨 경우와 같이 분사각을 증가시킨 경우 역시 넓은 영역에서 온도가 상승하였다. 그러나 실제 연료의 증발량은 약

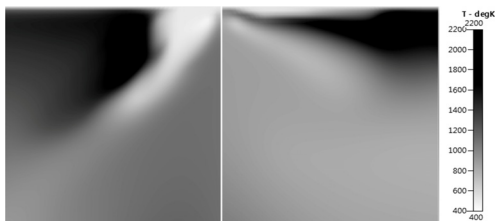


Fig. 6 Temperature (Left-case1, Right-case4)



Fig. 7 Reaction Rate (Left-case1, Right-case4)

85%로 Case 1 보다 적었으며 Fig. 7에 나타난 것과 같이 국소 영역에서만 높은 반응률을 보이며 반응 영역은 전체적으로 더 작게 나타나고 있다. 따라서 분사각 증가에 따른 온도 상승은 액적 분무의 영향으로 유도된 유동에 의한 혼합에 의한 것으로 판단된다.

4. 결 론

항공용 소형 가스터빈에 적용하기 위한 인젝터 개발을 위해 연료 분무 조건에 따른 액적 분포 특성에 따른 반응 유동장 해석을 수행하였다. n-Pentane을 연료로 선정하고 화학반응은 Single-step으로 가정하였다. 연료-공기 반응으로 인해 유동 온도는 국소 지역에서 최고 2200 K 이상까지 상승하였다. 또한 분무 액적의 크기가 작을수록 반응성이 향상되었으며 분사각을 크게 할수록 균일한 온도 분포를 갖는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 지식경제부 한국형헬기 민군겸용구성품개발사업의 위탁연구결과 중 일부로 서울대학교 항공우주신기술 연구소의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 고영성 외, "보조동력장치용 환형 역류형 연소기 (TS2) 성능 시험," 대한기계학회논문집, 제26권, 제6호, pp. 805-810, 2002.
- 이상용, 액체의 미립화, 1996.
- Charles K. Westbrook, Frederick L. Dryer, "Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion," Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 10, No. 1, 1984, pp.1-57
- 김세환 외, "소형가스터빈 연소기 적용 인젝터 분무 액적 미립화 특성에 관한 수치적 연구," 한국항공우주공학회 2009년도 추계학술 발표회 논문집, 2009, pp.541-544