

Multi-port 하이브리드 로켓의 포트간의 거리에 따른 고체 연료의 열민감도에 관한 연구

도규성* · 윤창진** · 문희장*** · 김진곤***

A Study on the Thermal Sensitivity of the Solid Fuel Grain with respect to the Port Distance in Hybrid Rocket Motor

Gyusung Do* · Changjin Yoon** · Heejang Moon*** · Jinkon Kim***

ABSTRACT

In this paper, thermal sensitivity of the solid fuel grain in the hybrid rocket motor was investigated. When the heat from the non-reacting hot flow passing the grain ports is transferred to the solid fuel grain, the temperature fields in the solid fuel was numerically analyzed. These numerical analyzes were performed under the different nine port radii, and the critical distance between the ports in which the temperature in the solid fuel is sensibly responding was determined. Thus, the critical distance between the ports would be the important consideration for the design of the fuel grain because the high temperature in the fuel can bring the structural problems.

초 록

멀티포트 하이브리드 로켓 고체연료 그레인의 열민감도에 관한 연구를 수행하였다. 고온의 비반응 유동이 포트를 통과하며 연료 그레인으로 열전달 시, 연료 그레인 내부의 온도 분포 변화를 비정상 열 해석을 통해 계산하였다. 계산은 총 9개의 포트 반경에서 수행되었으며, 연료 내부 온도가 민감하게 거동하는 임계 포트 반경을 결정하였다. 열에 민감하게 반응하는 임계 포트반경 이후는 고체 폴리머 연료의 구조상의 취약점이 발생할 것으로 판단되므로, 임계 포트반경은 설계 시 중요한 고려대상으로 사용될 것으로 예상된다.

Key Words: Hybrid Rocket(하이브리드 로켓), Thermal Sensitivity(열민감성), Multi-port(멀티포트), Solid Fuel(고체연료), Port Radius(포트반경)

1. 서 론

로켓 추진 시스템은 연료의 상(相)에 따라 크게 3가지로 나뉘게 된다. 액체로켓은 저온액체상태의 산화제 탱크와 연료 탱크로 구성되어있고 복잡한 배관과 엔진구조를 가지고 있다. 고체로켓은 산화제와 연료로 구성된 고체 그레인 형태

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
 ** 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학부
 *** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
 연락처, E-mail: hjmoon@kau.ac.kr

이고, 만일 고체 그레인에서 균일이 발생되면 연소시 폭발의 위험성을 가지고 있다. 반면 하이브리드 로켓은 산화제 탱크와 고체연료를 가지는 단순한 구조를 가지고 있고 산화제 조절을 통한 추력조절이 가능한 장점을 가지고 있다. 하지만 하이브리드 로켓은 고체연료 로켓에 비해 낮은 추력을 가지는 특성이 있다[1].

본 연구에서는 포트의 개수를 증가시켜 연소면적을 넓혀 후퇴율을 향상 시킬 때 발생하는 문제점에 대해 고찰해보았다. 멀티포트에서 연소가 진행될수록 포트반경은 커지면서 연소면적이 넓어진다. 또한 포트간 간격은 좁혀지면서 포트간 열전달 증가하게 될 것이고, 이때 연소시 발생하는 고열에 의해 고체연료는 구조적으로 약화될 것이며 포트 내부의 유동흐름에 의한 전단력을 받게 될 것이다. 만약 유동에 의한 전단력이 고체연료의 구조적 한계를 넘어서게 되면 고체연료의 일부가 분리될 것이다. 이 경우 실제 크기의 멀티포트 로켓의 성능과 안정성에 영향을 끼치게 될 것이다.

열분해이론(Thermal Pyrolysis)에 의한 PE의 분해온도의 범위는 700~800K 구간으로 알려져 있다[3]. 고체연료의 포트간 중심온도가 고체의 성질이 붕괴되는 800K을 넘어서게 되면 고체연료 표면에서 입자덩어리가 분리될 가능성이 커지며 고체연료의 포트가 서로 병합되어 로켓의 성능과 안전성에 문제가 발생할 확률이 커진다. 본 연구에서는 고체연료의 성질이 붕괴되는 임계온도 T_c 를 800K으로 임의로 설정하여 연소시간과 포트반경에 따른 임계값을 구하여 고체연료의 구조적 한계점을 고찰하고자 한다.

2. 해석기법

2.1 해석모델

본 연구에서 고체연료는 Polyethylene (PE), 산화제는 기체산소를 사용하였다. 고체연료 그레인의 형상은 Fig. 1과 같이 그레인 반경 0.048m, 고체연료 반지름방향 포트중심간 거리(A-A')

0.030m, 포트반경(R) 0.005~0.013m, 축방향 길이 0.10m인 원통형 형상을 사용하였다. Table 1에서는 해석에 사용된 고체연료의 물성치[3]를 나열하였고 Fig. 2는 계산에 사용된 비정렬 격자의 구성을 보여주고 있다.

Table 1. Properties of Polyethylene

ρ (kg/m ³)	950
Cp (J/kg*K)	2300
k (W/m*K)	0.502

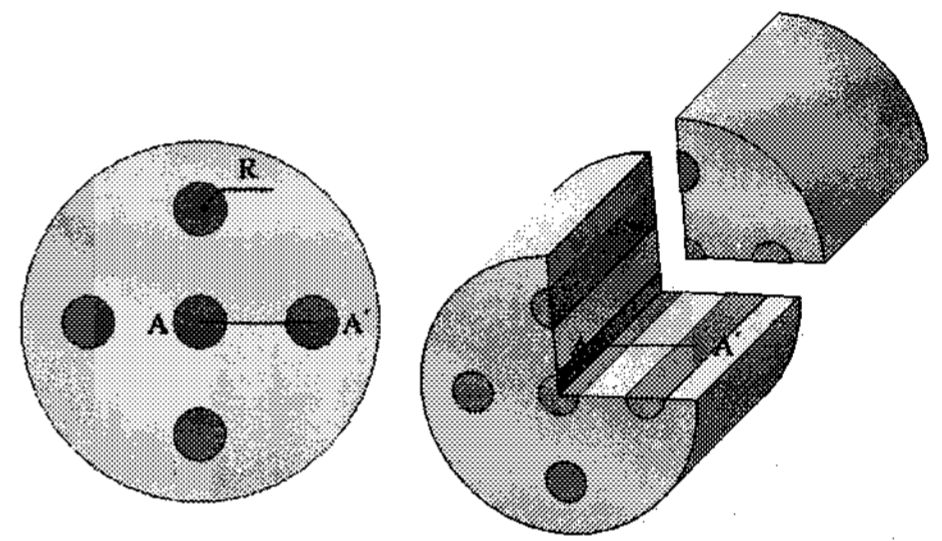


Fig. 1 Geometry of Multi-port grain

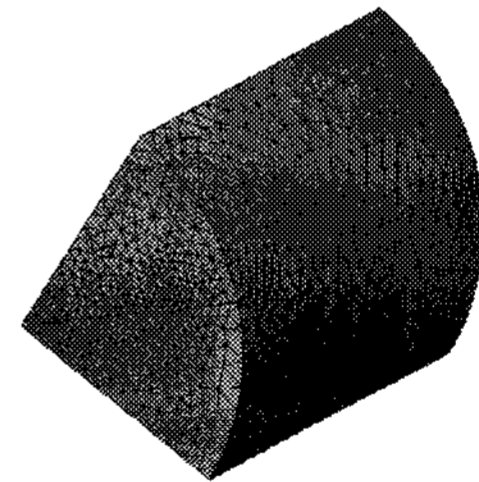


Fig. 2 Unstructured grid for simulation

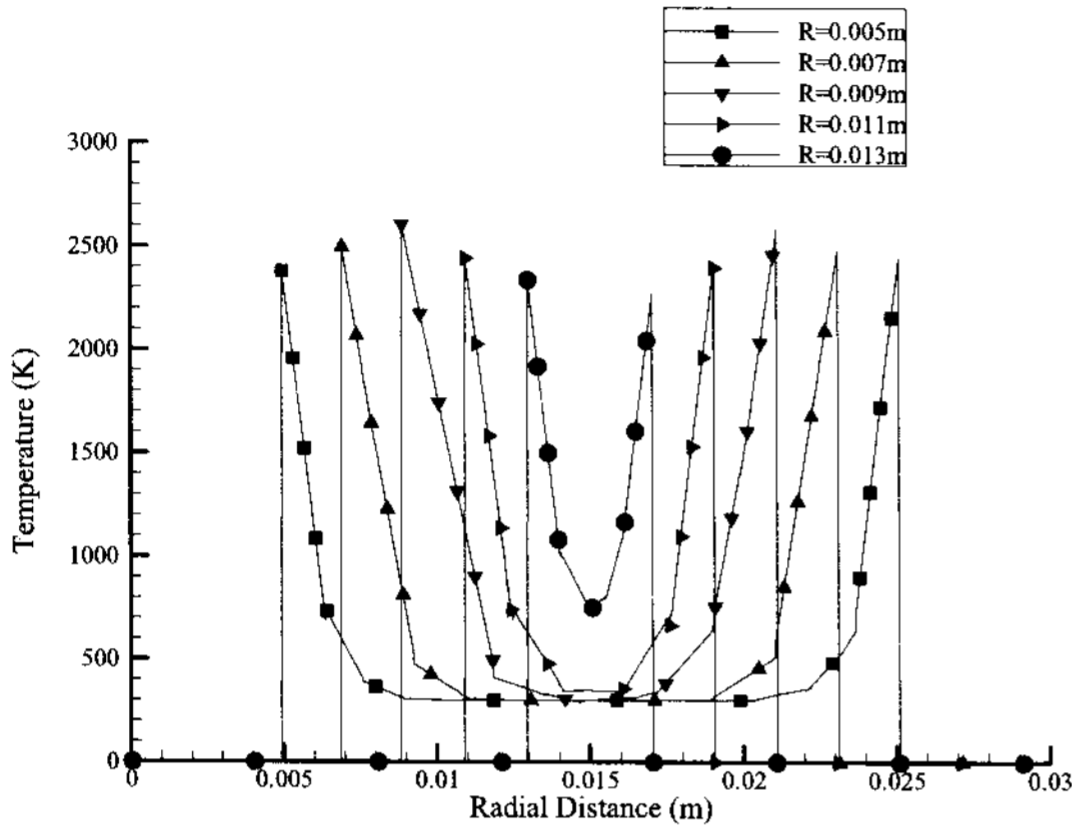
2.2 해석방법

각 포트에 동일한 산화제 유량 $G_0 = 90 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 을 위해 산화제 공급 압력을 1.25MPa로 주었다[4]. 내부유동에 대하여 Standard k- ϵ Model을 이용한 RANS 계산을 하고 고체연료에 대하여 Fourier 법칙을 이용한 에너지 방정식을 CFD-ACE를 사용하여 계산하였다. 고체연료의 내부유동은 비반응 난류유동으로 가정하여 3000K의 기체산소를 20sec동안 포트내로 흐르게 하였다. 고체연

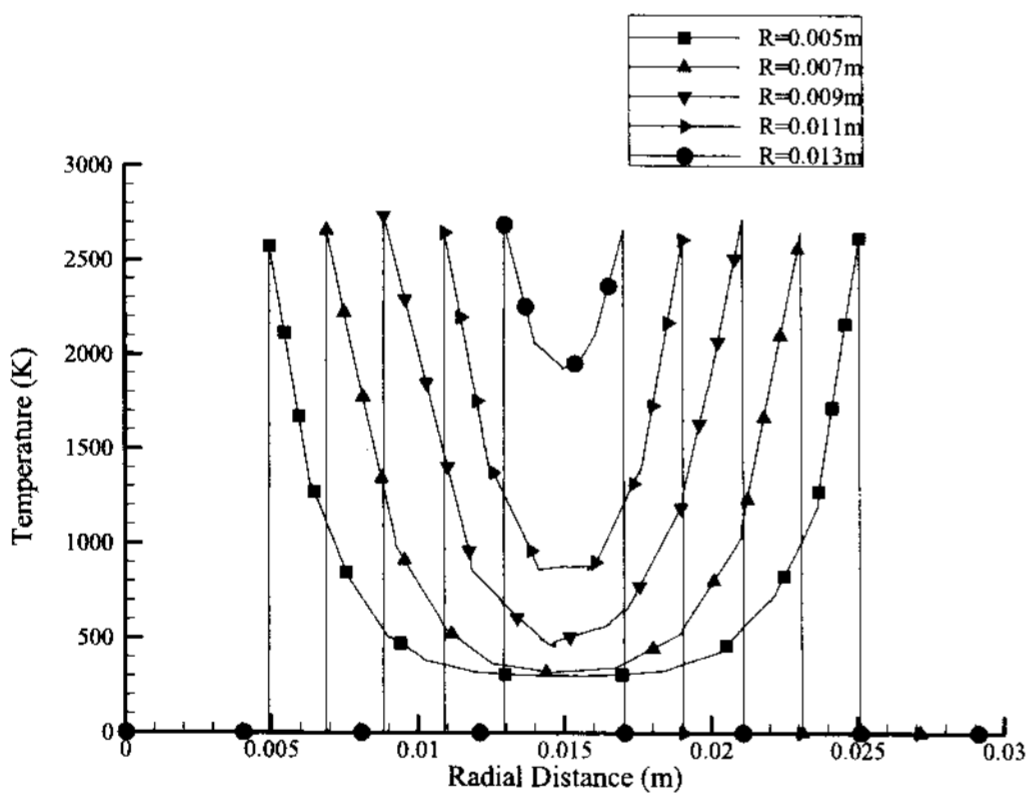
료의 임계 포트반경을 결정하기 위하여 포트반경을 증가시키면서 비정상 상태로 계산하였다.

3. 결과 해석

3.1 고체연료 반지름방향(A-A')에서의 온도분포



(a) 5 sec after ignition



(b) 20 sec after ignition

Fig. 3 Temperature Distribution for Different Fuel Port Radius along A-A' section

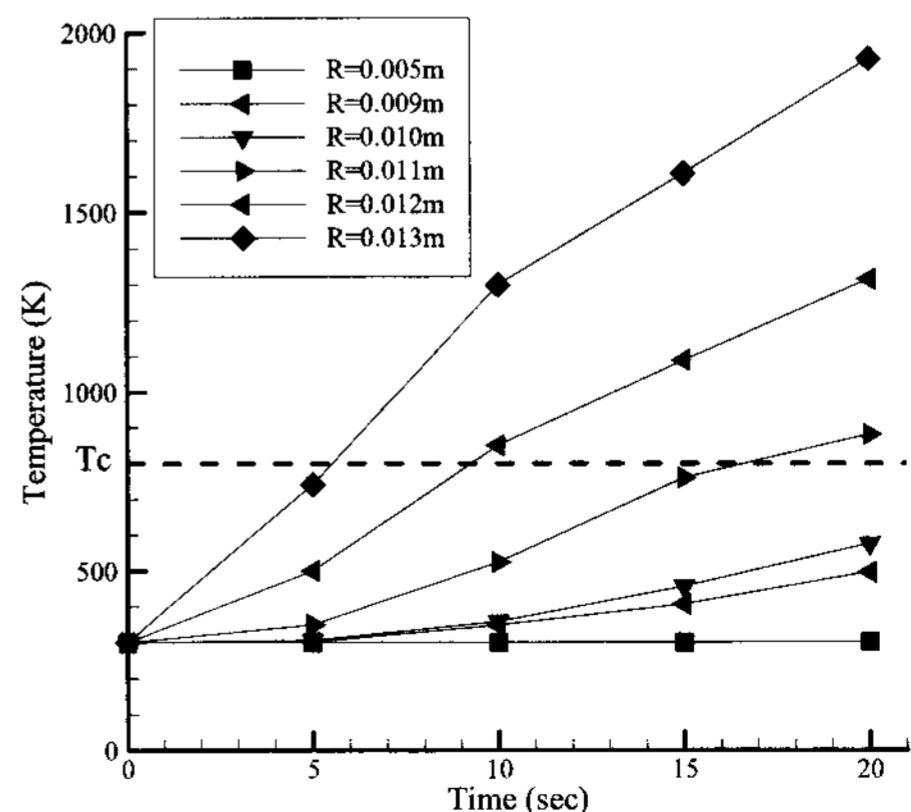
5sec일 때 고체연료 반지름방향(A-A')에서의 온도분포를 나타낸 Fig. 3(a)의 경우, 포트반경이 0.005~0.011m에서 포트간 중심부근은 300K을 유지하였고, 반지름방향거리가 0.015m인 포트간 중심에서 포트간의 상호 열교환이 없음을 알 수 있다. 하지만 포트반경이 0.011m이상일 때, 포트간 중심에서의 온도상승을 볼 수 있었다. 5 sec

의 경우에서의 온도상승은 포트반경이 커짐에 따라 포트간 거리가 줄어들면서 나타나는 포트간 상호 열교환임을 알 수 있다. 반면 20 sec일 때 고체연료 반지름방향에서의 온도분포를 나타낸 Fig. 3(b)의 경우, 5sec의 경우와 비교할 때 포트반경인 더 작은 0.009m이상일 때부터 포트간 중심에서의 온도가 급격히 상승함을 볼 수 있다. 20 sec의 경우에서의 온도상승은 포트내부 고온의 기체산소유동에 의한 열이 고체연료로 충분한 시간을 갖고 열이 전달되는 것임을 알 수 있다.

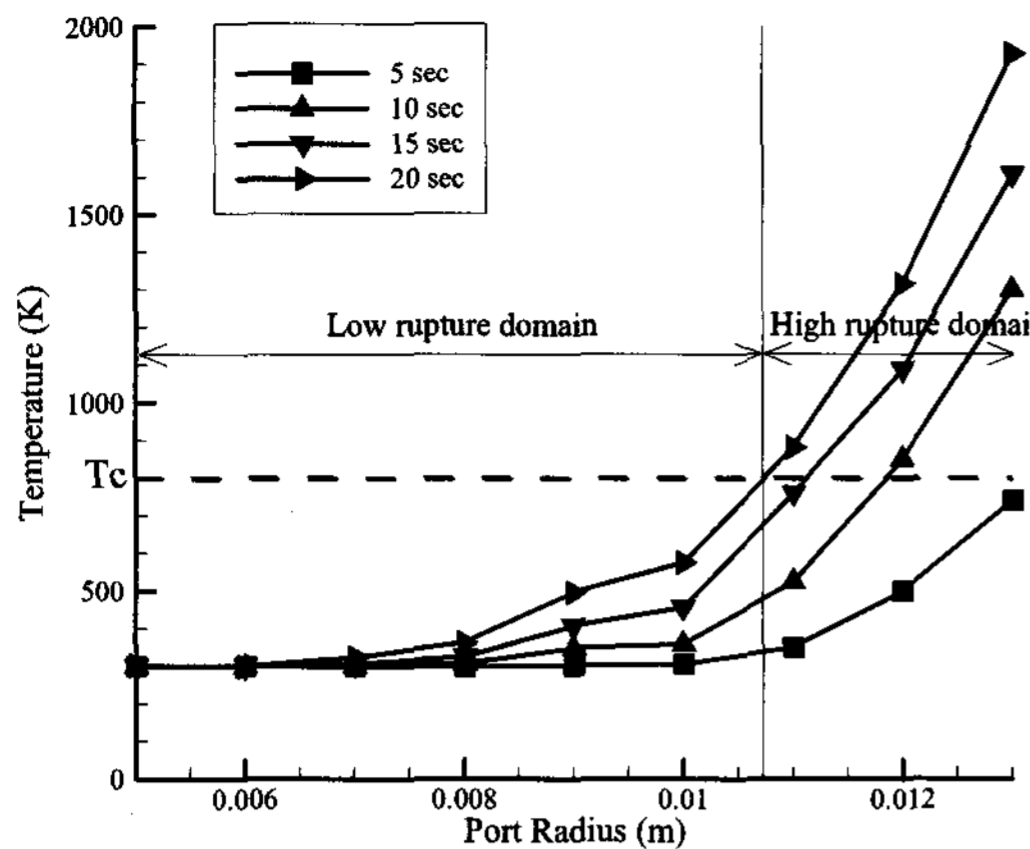
5sec의 경우에서 포트반경이 커짐에 따른 열전달과 20sec의 경우에서 연소시간에 따른 열전달은 포트주변에서의 고체연료를 구조적으로 약화시킬 것이다. 동시에 포트 내부의 유동흐름에 의한 전단력은 고체연료의 연소표면에 작용할 것이다. 만약 유동에 의한 전단력이 구조적으로 약화된 고체연료의 한계를 넘어서게 되면, 고체연료 연소표면에서 입자덩어리가 분리될 것이다.

고체연료 표면에서 분리된 입자덩어리가 빠른 속도로 후방포트벽면과 충돌하여 더 큰 입자덩어리를 생성할 것이다. 또한 후방포트부분으로 갈수록 고체연료 표면에서 떨어져 나온 입자덩어리의 수밀도가 높아질 것이며 입자덩어리의 일부는 노즐부분의 삭마, 심지어 노즐목을 막을 수 있을 것이다.

3.2 포트간 중심에서의 온도분포



(a) Time Evolution of Mid Point Temperature for Different Fuel Port Radius



b) Fuel Port Radius Evolution of Mid Point Temperature for Different Combustion Time

Fig. 4 Mid Point Temperature

Figure 3(a)와 (b)에서 반지름방향거리 0.015m인 포트간 중심에서의 온도만을 추출하면, 포트간 중심에서의 온도는 연소시간과 포트반경으로 표현할 수 있다. 이를 포트간 중심에서의 온도와 연소시간과의 관계인 Fig. 4(a)와 포트간 중심에서의 온도와 포트반경과의 관계인 Fig. 4(b)로 나타내었다. Fig. 4(a)에서 연소시간과 포트간 중심에서의 온도가 선형적인 관계를 이루고 있고, Fig. 4(b)에서 포트반경과 포트간 중심에서의 온도는 기하급수적인 비선형적인 관계임을 알 수 있다. Fig. 4(a)에서 20sec의 연소시간을 기준을 했을 때, 포트반경의 임계값은 $R=0.010m$ 로 나타났다. Fig. 4(b)에서도 마찬가지로 $R=0.010m$ 이하에 포트범위가 구조적 붕괴가능성이 낮은 구간(Low rupture domain)임을 알 수 있다.

4. 결 론

멀티포트 하이브리드 로켓의 경우, 연소열에 의하여 고체연료가 구조적으로 약화되면, 고체연료 입자덩어리가 유동에 의한 전단력에 의해 고체연료 표면에서 떨어져 나갈 수 있다. 고체연료 표면에서 분리된 고체연료 입자덩어리는 로켓의 성능과 안전성의 문제가 될 수 있다. 이러한 문제점을 살펴보기 위하여 포트 반경변화에 따른

고체연료 내부의 열해석을 상용프로그램인 CFD-ACE를 이용하여 수행하였다. 포트내부유동의 해석을 위해 Standard k-ε Model을 이용한 RANS계산을 수행하였고 고체연료의 열전달은 Fourier 법칙을 이용한 에너지 방정식을 통해 수행하였다. 고체연료의 임계 포트반경을 결정하기 위하여 포트반경을 증가시키면서 비정상 상태로 계산하였다. 계산결과에 의하면, 포트간 중심에서 온도가 임계온도 T_c 를 넘어서지 않기 위한 임계조건은 다음과 같다. 20sec 연소시 포트반경의 임계값은 $R=0.010m$ 이고, 포트반경이 $R=0.013m$ 일 경우 연소시간의 임계값은 5sec임을 알 수 있었다. 실제 멀티포트 하이브리드 로켓 연소시 보다 정확한 정량적인 관계를 고려하려면, 열에 의한 고체연료의 구조적 한계를 나타낼 수 있는 항복점과 고체연료의 물성치와 후퇴율, 연소시간, 초기포트반경, 산화제의 유량과 압력, 열전달에 관여하는 난류유동에너지 등에 대한 서로간의 상호관계에 대한 상세한 연구가 필요하며 이에 따른 후속연구가 진행될 예정이다.

후 기

"이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구실사업으로 수행된 연구임(No. R0A-2007-000-10034-0(2007))."

참 고 문 헌

1. Sutton, G. P., Rocket Propulsion Elements, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992
2. "CFD-ACE+ V2004 User Manual," ESI US R&D, Inc., 2004
3. G. Lengellé, B. Fourest, J.C. Godon and C. Guin "Condensed Phase Behavior and Ablation Rate of Fuels for Hybrid Propulsion." AIAA 93-2413, 1993, pp.4-5
4. 민문기 "하이브리드 연소기의 산화제 주입기 형상변화에 따른 연소 유동장 수치해석 및 연료 그레이인 포트 수 변화에 따른 후퇴율에 관한 실험적 연구." 항공대, 2007 pp.48-85