

불화중수소 화학레이저 공동 내에서의 분포역전에 대한 기저부의 영향

박준성 · 백승욱*

Effects of Base on Population Inversion in the DF Chemical Laser Cavity

Jun Sung Park · Seung Wook Baek*

ABSTRACT

The chemical laser system makes use of a diffusion type chemical reaction, so a fuel is separated from an oxidant by some gap, which is base in this system. In this study, the effects of base on the population inversion that is one of the most important things in the chemical laser system are numerically investigated. The results are discussed by comparison with three cases of base sizes; 0.4mm, 0.8mm and 1.6mm. Major results reveal that the range of population inversion also increases almost linearly in the transitions; $DF^{(2)}-DF^{(1)}$ and $DF^{(3)}-DF^{(2)}$ as the length of base becomes longer.

초 록

화학레이저는 혼합현상을 이용하는 확산형태의 화학반응을 이용하게 된다. 따라서, 화학레이저 공동 내에서 산화제(F)와 연료(D₂)가 기저부에 의해서 분리되어 유입된다. 초음속 연소현상에서 혼합 및 연소특성에 큰 영향을 주는 기저부의 화학레이저 시스템에서의 분포역전현상에 초점을 맞추어 기저부의 크기를 0.4mm, 0.8mm, 1.6mm로 변화시켜가면서 수치해석을 수행하였다. 결과로서 분포역전현상이 두드러지게 기저부의 크기가 커짐에 따라서 넓은 영역에서 발생하게 된다.

1. 서 론

화학레이저는 다른 레이저와 비교했을 때 메가와트 급의 고출력 레이저빔을 생성할 수 있기 때문에, 산업가공현장에서 또는 군사목적의 타격무기체제로 활용될 수 있는 장치이다. 화학레

이저는 여기분자를 생성하기 위하여 다이오드 또는 램프 등의 광원을 사용하지 않고 화학반응만으로 고온의 여기분자를 생성한다. 화학레이저는 높은 변환효율을 갖는 반면에 불안정한 여기분자를 상당시간 여기상태로 유지시키기 위해서 특징적으로 초음속노즐을 이용한 팽창과정을

* 한국과학기술원, 기계공학과 항공우주공학전공 (KAIST, Dept. Mechanical Eng. Div. Aerospace Eng.)

겪게 되는데, 이때 충격파를 포함한 복잡한 형태의 초음속 유동장을 만나게 된다. 또한, 화학 반응이 적절하게 일어나기 위해서는 초음속 유동장 내에서 분자사이에 혼합현상이 원활하게 이루어져야 하는데, 고출력 레이저빔 생성과정에서 가장 중요한 성능결정요소가 된다.

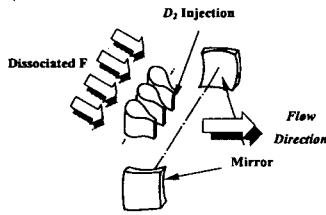


Fig. 1 Supersonic diffusion DF chemical laser cavity

본 연구에서는 기존에 수행한 연구¹⁾²⁾를 기초로 하여 고출력 레이저빔 생성의 핵심이 되는 공동 내에서의 분포역전현상에 대한 연구를 진행하고자 한다. 본 연구는 Fig.1에 나타나는 것과 같이 화학레이저의 공동을 구성하고있는 초음속노즐과 D₂ 분사구 사이에 위치한 기저부의 크기를 조절함으로써 나타나는 연소실과 노즐을 통해서 유입되는 단원자 F와 분사구를 통해 유입되는 D₂ 분자의 혼합현상과 화학반응의 변화경향, 분포역전현상에 대하여 살펴볼 것이다.

2 지배방정식

화학레이저 공동 내의 초음속유동과 화학반응장을 해석하기 위하여 이 현상을 지배하는 기본 방정식인 Navier-Stokes 방정식과 열적·물리적 성질에 큰 영향을 미치는 화학종 방정식을 다루게 되는데, Roe 기법과 Implicit 2nd order TVD 기법, LU방법을 사용하여 해석하였다.

본 연구에서 다루고자 하는 모델은 Fig.2에서 나타나는 것과 같이 위 부분에서는 초음속 노즐을 통해서 일정비로 혼합되어있는 F, F₂, HF, He가 M=5.0, P=2.40torr, T=169.37K의 상태로 유입되며, 아래 부분에서는 음속으로 D₂ 분자가

P=192.0 torr, T=239.61K의 상태로 공동으로 유입되고있다. 본 연구에서는 초음속 노즐과 D₂ 유입구 사이에 위치한 기저부의 크기를 0.4, 0.8, 1.6mm로 변화시키면서 혼합특성과 연소특성, 분포역전현상에 대하여 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 연구할 것이다.

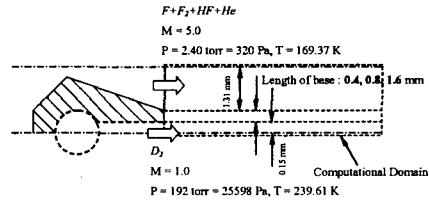


Fig. 2 A schematic of the DF chemical laser cavity

본 연구에서는 11개의 화학종(D, F, DF, DF⁽¹⁾, DF⁽²⁾, DF⁽³⁾, DF⁽⁴⁾, D₂, F₂, HF, He)과 32 단계의 화학반응을 갖는 모델링을 통해서 전체 화학 반응장이 계산되었다.

Table 1. DF chemical laser inlet conditions

	Upper Nozzle		D ₂ Nozzle	
Mach Number	5.0		1.0	
Temperature (K)	169.37		239.61	
Pressure (torr)	2.40		192	
Species Mass Fraction	F	0.3071	D ₂	1.0
	F ₂	0.0340		
	HF	0.3191		
	He	0.3398		

4. 결과 및 고찰

화학레이저는 다른 레이저 시스템과 비교하여 쉽게 메가와트 급의 레이저빔을 생성할 수 있다는 장점을 갖는다. 레이저빔은 Stimulated Emission에 의하여 발생하게 되는데, 이를 강하게 만들수록 분포역전현상이 더욱 크게 일어나게 되어 강한 레이저빔을 생성할 수 있게된다.

화학레이저의 공동(Cavity)은 산화제를 공급

해주는 초음속 노즐과 연료를 음속으로 공급해주는 분사기(Injector), 기저부(Base) 등으로 구성되어 있다. 이 공동 내에서 혼합과 화학반응을 통해서 분포역전현상을 일으키게 되는데, 이때 다른 레이저와는 다르게 화학레이저는 혼합과 화학반응의 정도에 따라서 레이저빔의 강도가 결정되는 특징을 갖는다. 초음속 연소현상에서와 같이 혼합 및 화학반응 현상은 공동의 형상에 의해 많은 영향을 받는데 기저부의 크기에 따라서 일반적으로 혼합길이 및 화학반응의 정도가 달라진다고 알려져 있다. 본 연구에서는 차세대 전술타격무기 체계로 사용될 수 있는 DF 화학레이저를 중심으로 분포역전크기를 결정해 줄 수 있는 기저부의 크기변화에 따른 여기된 DF 분자 및 D_2 , F의 분포를 살펴봄으로서 분포역전현상과 더불어 전체적인 유동현상의 변화 또한 아래에서 알아볼 것이다.

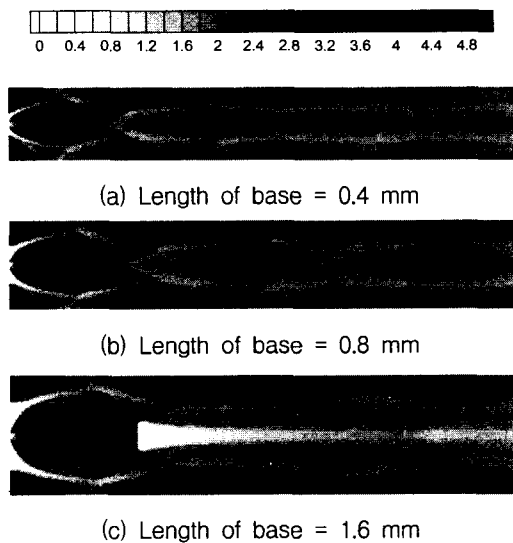


Fig. 3 Effects of the length of base on the Mach contours

Fig.3에서는 DF 화학레이저 공동 내에서의 기저부 길이변화에 따른 마하수 분포변화를 보여주고 있다. D_2 분사구로부터 팽창영역이 기저부의 크기가 커짐에 따라서 더욱 넓어짐을 확인할 수 있다. 특히 1.6mm의 기저부를 갖는 경우에는 마하판(Mach Disc)을 살펴볼 수 있는데 이

경우에 수직충격파에 의한 강한 유동현상변화를 가져올 것을 예상할 수 있다. 또한, 기저부 근처에서는 재순환 영역(Recirculation Zone)이 나타나게 되는데 기저부 크기가 커질수록 이 영역이 넓어지게 된다. 넓은 재순환 영역은 연료(D_2)와 산화제(F)의 혼합과 화학 반응을 입구단 부근에서 떨어뜨린다. 그리고 기저부의 크기가 커짐에 따라서 충격파의 반사 및 서로간의 상호작용이 약해진다. 전체적인 마하 분포의 형태는 위에서 지적한 부분을 제외하고는 크게 다르지 않지만, 1.6mm의 기저부를 갖는 경우에는 충격파의 반사 각도가 다른 경우와 비교하여 낮다는 것을 확인할 수 있다.

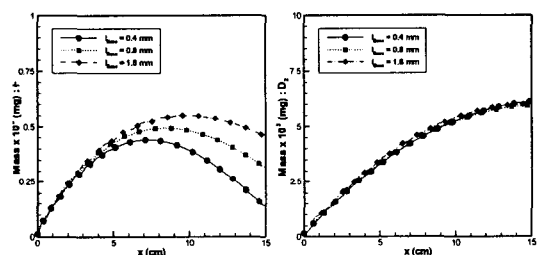


Fig. 4 Comparison of F atom and D_2 molecule mass distributions

Fig.4는 노즐 출구단으로부터 산화제인 F 원자와 연료인 D_2 분자의 질량분포를 보여주고 있는데, 기저부 길이가 짧아짐에 따라서 F의 소비가 증가함을 알 수 있다. 이는 기저부가 짧아짐에 따라서 충격파의 상호작용이 강하게 일어나게 되어 온도가 상승하여 화학반응이 더욱 원활하게 이루어지기 때문이다. 하지만, 연료인 D_2 의 소비는 거의 차이가 없는데 F 원자와 비교하여 아주 많은 양의 D_2 가 공급되었기 때문이다. 여기상태에 있는 DF 분자($DF^{(0)} \sim DF^{(4)}$)의 유동방향으로의 분포는 Fig.5에 나타난다. 기저부의 크기가 커짐에 따라서 분포역전 현상이 일어나는 영역이 커짐을 알 수 있으며, 각각의 진동에너지준위에 위치하고 있는 여기분자의 차이($DF^{(0)} \sim DF^{(1)}$)가 증가함을 확인할 수 있다.

마지막으로 Fig.6에서는 기저부 크기에 따른 분포역전 현상이 일어나는 범위를 나타내주고

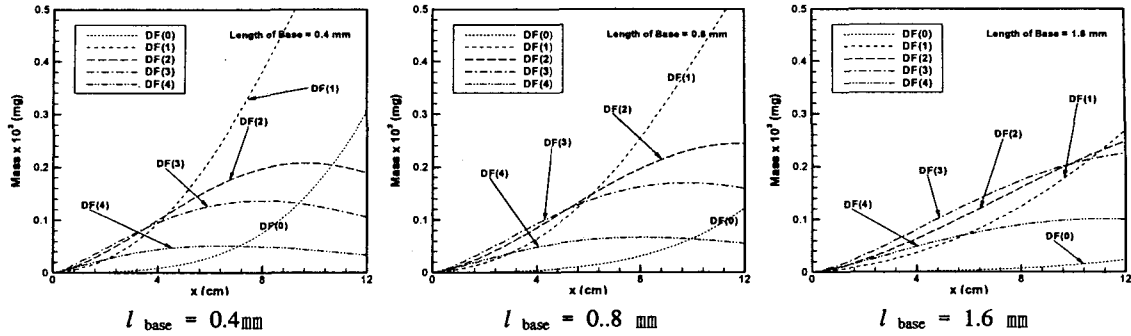


Fig. 5 Effects of the length of base on the distributions of the excited DF molecules with respect to longitudinal distance x from the nozzle exit plane

있는데, 기저부의 크기가 커짐에 따라서 분포역 전현상이 발생하는 범위가 거의 선형적으로 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

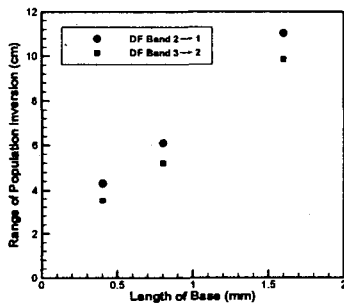


Fig. 6 Range of population inversion with variations of lengths of base

위와 같은 결과로부터 화학레이저 공동을 설계할 때 기저부의 크기의 조절을 통하여 분포역 전현상 및 나아가서는 레이저의 출력을 결정할 수 있다고 결론지을 수 있다.

5. 결 론

수치해석방법을 통해서 DF 화학레이저의 공동 내에서의 분포역전현상에 대한 기저부 크기의 영향을 연구하였다. 일반적으로 기저부의 존재는 초음속 흐름에서 재순환 영역을 생성하여 산화제와 연료의 혼합률 및 화학반응률에 큰 영

향을 주게된다. 따라서, 본 연구에서는 기저부의 길이변화에 따른 산화제인 F와 연료인 D_2 의 소비와 더불어 여기분자 DF의 분포를 수치해석기법을 통하여 파악하여 DF 화학레이저의 분포역 전현상에 대하여 알아보았다.

기저부의 크기가 작아짐에 따라서, 강한 충격파의 상호작용으로 인한 온도상승으로 산화제인 F 원자의 소비가 증가하였다. 하지만, 기저부의 크기가 커짐에 따라서, 분포역전 현상이 일어나는 영역이 더 넓어지게 되었다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 전자광학특화연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. King, W. S. and Mirels, H., "Numerical Study of a Diffusion-Type Chemical Laser," AIAA Journal, Vol.10, No.12, 1972, pp.1647-1654.
2. Hua, W., Jiang, Z. and Zhao, Y., "Nozzle Design in CW Hydrogen Fluoride Chemical Laser," SPIE, Vol.2889, 1996, pp.135-140.