

연료 막냉각을 적용한 액체로켓 연소기의 연소/냉각 성능 간 trade-off 해석

조미옥*[†] · 김성구* · 최환석*

A Trade-off Analysis between Combustion and Cooling Performance of a Liquid Rocket Combustor with Fuel Film Cooling Scheme

Miok Joh*[†] · Seong-Ku Kim* · Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

Performance of a liquid rocket thrust chamber with regenerative cooling scheme has been numerically analyzed using in-house CFD code which can predict combustion/cooling performance and provide nozzle design parameters. This paper investigates trade-offs between combustion and cooling performance with varying amount of fuel directly injected into the chamber wall to form cooling films. Also is analyzed the effect of varying mixture ratios for the peripheral injectors on combustion performance enhancement. Further efforts to verify/improve the simulation methodology including comparison with the firing test results are planned to make it a reliable tool to optimize the film cooling and other major design parameters.

초 록

액체로켓 추력실의 성능 예측 및 초음속 노즐부 형상 설계에 활용 중인 in-house 해석 도구를 이용하여 재생냉각 연소기에 대한 성능/냉각 통합해석을 수행하였으며, 막냉각 유량 및 외곽 분사기열의 혼합비 변화에 따른 연소 성능과 냉각 성능 간 trade-off 경향을 고찰하였다. 향후 막냉각 및 주요 설계인자의 최적화 도구로 활용될 수 있도록 개발 연소기에 대한 시험 결과와의 비교 등을 통하여 수치해석 도구를 검증/개선해나갈 계획이다.

Key Words: Liquid Rocket Combustor (액체로켓 연소기), Regenerative Cooling (재생냉각), Fuel Film Cooling (연료 막냉각), Combustion/Cooling Performance (연소/냉각 성능)

1. 서 론

연료 막냉각은 재생냉각 채널을 통과하는 연료 중 일부를 연소실 내벽의 특정 위치에 원주 방향으로 배치한 막냉각 홀 (hole)을 통해 추력

* 한국항공우주연구원 연소기팀

[†] 교신저자, E-mail: yennjoh@kari.re.kr

실 내부로 직접 선회 분사하는 냉각 방식으로, 막냉각 분사 위치를 포함하여 하류의 경계층에 연료 과잉 혼합기에 의한 저온 영역을 형성함으로써 벽면으로의 열유속을 감소시키는 효과가 있다. 통상 재생냉각 차압은 터보펌프 토출압에 의해 제한되므로 냉각 성능 향상을 위해 냉각채널 내부의 유속을 증가시키는 데에는 한계가 있으며, 특히 고압/고팽창비의 재생냉각 추력실에 대해서는 연소실 벽면 온도가 허용 온도 이상으로 상승하지 않도록 하기 위하여 어느 정도의 성능 손실을 감수하더라도 막냉각, 열차폐 코팅(TBC) 등 추가적인 냉각의 필요성이 커지게 된다.

본 연구에서는 재생냉각 및 막냉각을 적용하는 액체로켓 추력실에 대한 연소/냉각 통합 해석이 가능하도록 개발된 in-house 해석 도구[1, 2]를 활용하여 막냉각 연료의 유량 및 외곽 분사 기열의 혼합비 변화에 따른 연소/냉각 성능 간 trade-off 경향을 고찰하였다. 향후 연소기 개발 과정에서 주요 설계인자에 대한 예비 평가 결과로 참고할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 해석 도구 및 모델

2.1 연소/냉각 통합 해석 (KPP2D)

해석에 사용된 KPP2D[1]는 2차원 축대칭 영역에 대한 압축성 난류유동/연소/열전달 통합 해석이 가능하도록 개발된 해석 도구로, 모든 마하수 영역에 대하여 확장된 PISO 알고리즘을 채택하고 있으며 대류항은 TVD 기법으로 처리하고 있다. 노즐 유동에 의한 압축성 효과를 고려할 수 있도록 수정된 저 레이놀즈수 $k-\epsilon-f_\mu$ 모델을 채택함으로써 추력실 벽면 마찰에 의한 성능 손실 및 연소실 벽면으로의 대류 열전달을 보다 정확하게 예측할 수 있다.

연소 모델로는 해석 목적에 따라 이동평형 또는 동결평형을 가정한 화학평형 모델과, 노즐 팽창 및 벽면 냉각에 의한 압력/엔탈피 변화가 큰 액체로켓 추력실 내의 연소 현상 예측에 적합하

도록 수정된 층류 화염편 모델을 사용할 수 있다. 본 해석에서는 비평형 화학 반응을 고려한 케로신/산소 혼합기의 국소 화염 구조를 모사할 수 있는 실제 유체 기반의 층류 화염편 모델[2]을 사용하였다.

추력실 벽면 및 재생냉각 채널로의 열전달은 1차원 열저항 모델로 모사되며, 유동장 난류 열경계층과의 양방향 해석을 통해 추력실과 냉각채널을 구성하는 각 경계면에서의 온도 값이 계산된다. 재생냉각 채널 상류에서의 냉각유체 온도 상승이 반영될 수 있도록 매 반복 계산은 냉각유체의 유동 방향을 따라 순차적으로 수행된다.

2.2 실제유체/연소 해석

초임계압력 조건에서 운용되는 추력실 내 액체 케로신과 액체 산소의 혼합 및 연소 현상을 해석하기 위하여, 극저온 유체와 고탄화수소 연료 모두에 대하여 향상된 상태량 예측 성능을 갖는 RK-PR 상태 방정식[3]을 적용하여 개발한 실제 유체 상태량 해석 패키지 (ChemRF)[2]가 사용되었다. ChemRF와 연동되는 별도의 층류 화염편 해석 코드를 이용하면 연소 유동장에서 발생 가능한 전 범위의 혼합분율, 스칼라 소산율, 엔탈피 손실 변수 및 압력 값에 따른 평균 상태량을 lookup table로 구성할 수 있으며, KPP2D에서는 lookup table의 다차원 보간에 의해 평균 상태량을 계산하는 방식으로 해석이 수행된다.

초임계압력 조건에서 고온의 연소실 내부로 선회 분사되는 막냉각 연료는 일종의 천이임계제트 (transcritical jet)로 연소실 내에서 급격한 밀도 구배와 상태량 변화를 수반하는 기체 제트 (variable-density gas jet)와 유사한 거동을 보이는 것으로 파악되며[3, 4], KPP2D에서는 단상 (single-phase)의 실제 유체 혼합물 모델로 모사하고 있다.

2.3 케로신 대체 모델

재생냉각 추력실에 대한 성능 해석의 정확도 향상을 위해서는 냉각유체/연료의 열역학적/전

달 상태량 데이터를 확보할 필요가 있다. 초임계 조건을 포함한 광범위한 압력 및 온도 조건에 대하여 신뢰할 수 있는 상태량 데이터를 확보하는 데에 어려움이 있거나 케로신 계열의 연료와 같이 수백 가지 이상의 화학종이 혼합되어 있어 이론적 방법에 의한 상태량 예측 또한 용이하지 않을 경우 15 종 이내의 대표 물질로 연료를 재구성하는 대체 혼합물 모델 (surrogate mixture model)을 고려할 수 있다. 대체 혼합물은 예측하고자 하는 상태량의 특성에 따라 크게 물리적 대체 혼합물과 화학적 대체 혼합물로 구분된다.

본 연구에서는 Table 1에 제시한 바와 같이 내각유체로서의 연료를 모사하기 위한 물리적 대체 혼합물로 NIST의 Jet-A 대표 연료 표본에 대한 3종 대체 연료 모델[5]을 채택하였으며, 재생냉각 해석에 필요한 온도와 압력 범위에서의 열역학적/전달 상태량 (밀도, 비열, 점성계수 및 열전도율)은 NIST의 SUPTRAPP[6]을 이용하여 계산하였다.

Table 1. Physical Surrogate Mixture for Kerosene[5]

화학종	화학식	질량분율
n-dodecane	C12H26	0.31
n-tetradecane	C14H30	0.38
1,2,4-trimethylbenzene	C9H12	0.31

한편 케로신 연료의 연소 특성을 모사하기 위하여 사용된 화학적 대체 혼합물은 Table 2에 제시한 바와 같고, 이에 따라 연소 반응은 층류 화염면 해석 코드 내에서 209 화학종이 참여하는 총 1673 가지의 가역반응식[7]으로 모사된다.

Table 2. Chemical Surrogate Mixture for Kerosene[7]

화학종	화학식	몰분율
n-decane	C10H22	0.74
n-propylbenzene	C9H12	0.15
n-propylcyclohexane	C9H18	0.11

2.4 추진제 질량유속 분포 모델

KPP2D에서는 연료와 산화제의 질량유속이 분

사기 중심축을 기준으로 가우스 함수 형태로 분포한다고 가정한 추진제 질량유속 분포 모델[8]을 적용할 수 있으며, 각 추진제가 인접 분사기에 의한 추진제 유동과 충돌한 후 축방향 운동량만 갖는 상태인 것으로 가정하고 분사기면에 생성한 격자계에 대하여 수치적분을 수행함으로써 분사기 면에 위치한 임의의 지점에서의 질량유속 및 혼합비 분포를 모사하게 된다.

현재의 모델로는 동축 와류형 분사기의 분부 특성이나 추진제 혼합에 따른 영향 등을 세부적으로 모사하는 데에 한계가 있으나, 본 해석에서 처럼 외곽 분사기의 혼합비에 따른 성능 변화를 정성적으로 평가하는 목적으로는 활용 가능할 것으로 판단된다.

3. 해석 결과 및 고찰

해석 대상으로 선정한 연소기는 Fig. 1에서 확인할 수 있는 바와 같이 재생냉각 및 실린더부 벽면에 장착된 2개의 막냉각 벨트를 통한 막냉각이 적용되는 추력 75톤급 연소기의 1/2.5 축소형 모델 연소기[1]로, 주요 설계 규격은 Table 3에 나타난 바와 같고 추력실 내벽 전체에 TBC가 도포되어 있다.

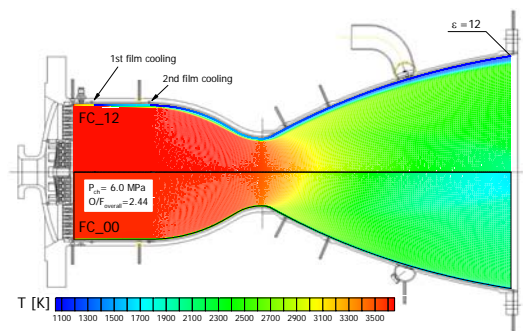


Fig. 1 Schematic of Model Combustor and Temperature Distribution with/without Film Cooling Scheme (FC_12 & FC_00)

Table 3. Design Specification for Model Combustor

연소압력 [bar]	60
연료/산화제	Kerosene/LOX
혼합비	2.44
추진제 유량 [kg/s]	88.8
연료 유량 [kg/s]	25.82
팽창비	12

3.1 막냉각 유량에 따른 연소/냉각 성능 변화

막냉각 유량에 따른 연소/냉각 성능 변화를 평가하기 위한 해석 case의 구성은 Table 4에 나타낸 바와 같다. 각 case에서 막냉각 유량을 제외한 모든 조건은 동일하며, 1차/2차 막냉각 유량의 비율 또한 3:7로 일정하게 유지되도록 하였다.

Table 4. Analysis Cases for Film Cooling (FC) Amount (% of Total Fuel) Variation

case ID	1차 막냉각	2차 막냉각	막냉각 총유량	분사면 혼합비
FC_12	3.6%	8.4%	12.0%	2.77
FC_10	3.0%	7.0%	10.0%	2.71
FC_08	2.4%	5.6%	8.0%	2.65
FC_06	1.8%	4.2%	6.0%	2.60
FC_04	1.2%	2.8%	4.0%	2.54
FC_02	0.6%	1.4%	2.0%	2.49
FC_00	0.0%	0.0%	0.0%	2.44

막냉각 유량 변화에 따른 특성속도 및 진공 비추력 예측 결과는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 전체 혼합비는 막냉각 유량에 관계없이 동일하게 유지되므로, 막냉각 유량이 작아질수록 분사기를 통해 분사되는, 즉 산화제와의 혼합 및 연소 과정에 보다 적극적으로 참여할 수 있는 연료량은 증가하게 되어 연소 효율을 평가하는 지표인 특성 속도 또한 커지는 것으로 예측되었다. 막냉각 유량 감소에 따라 추력실 중심부의 혼합비가 낮아지는 효과로 인해 진공 추력 계수는 소폭 감소할 것으로 예측되었으나, 진공 비추력은 특성 속도와 유사한 경향을 나타냈다.

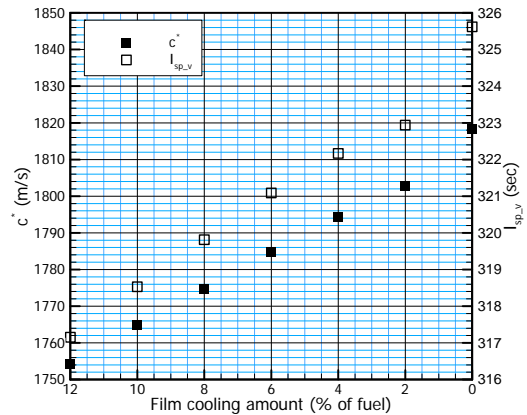


Fig. 2 Predicted c^* and $I_{sp,v}$ with Varying FC Amount

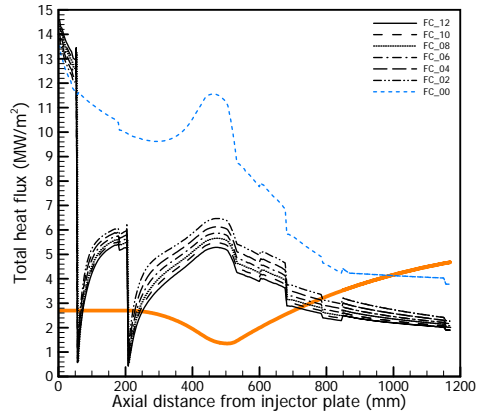


Fig. 3 Predicted Total Heat Flux with Varying FC Amount

막냉각에 의한 벽면으로의 열유속 감소 효과는 Fig. 3에서 확인할 수 있으며, 막냉각 유량이 증가할수록 냉각 효과가 커지는 경향을 나타내고 있다. 해석 대상 연소기는 팽창비가 상대적으로 크지 않고 추력실 내벽 전체에 TBC가 도포되어 있어 Fig. 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 막냉각을 적용하지 않더라도 연료의 bulk 온도가 약 460 K 이하로 유지될 수 있을 것으로 예측되었다. 반면 Fig. 5에 제시된 재생냉각 채널의 연료측 벽면 온도는 설계점 조건에서도 실린더부에서 허용 온도 이상으로 상승할 수 있는 것으로 나타나 본 연소기에 대해서도 막냉각 적

용이 필요할 것으로 예측되었다.

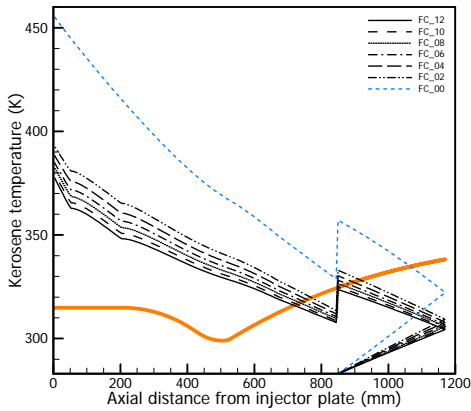


Fig. 4 Predicted Kerosene Temperature with Varying FC Amount

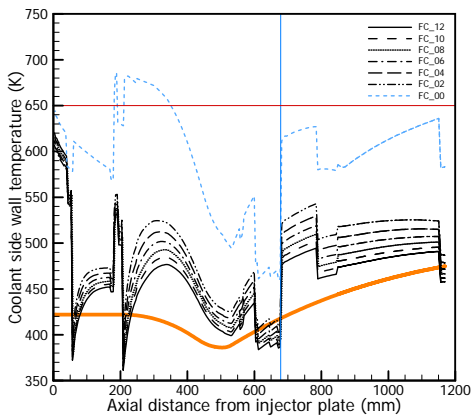


Fig. 5 Predicted Coolant Side Wall Temperature with Varying FC Amount

3.2 외곽 분사기 혼합비에 따른 성능 변화

막냉각 연료가 선회 분사되는 벽면 근처에서는 Fig. 1의 FC_12 case 온도분포도에서 확인할 수 있는 바와 같이 저온의 연료 과농 혼합기가 형성되며, 막냉각 유량이 증가함에 따라 연소 효율은 감소하는 결과를 얻었다. 막냉각 유량이 일정한 상태에서 분사면 외곽에 상대적으로 혼합비가 높은 분사기를 배치할 경우 연소/냉각 성능에 미치는 영향을 확인하고자 Table 5에 나타난

바와 같은 해석 case를 구성하였다. 막냉각 유량을 제외한 분사면에서의 혼합비가 2.77, 즉 전체 혼합비가 2.44로 유지되도록 내부 분사기열의 혼합비를 함께 조정하였다. MR_350 case에 대하여 추진제 질량유속 분포 모델로부터 얻어진 분사면에서의 혼합비 분포는 Fig. 6에 예시하였다.

Table 5. Analysis Cases for Mixture Ratio Variation at the Peripheral Injectors

case ID	내부 혼합비	외곽 혼합비	분사면 혼합비	막냉각 유량
MR_277	2.77	2.77	2.77	12.0%
MR_310	2.69	3.10	2.77	12.0%
MR_330	2.64	3.30	2.77	12.0%
MR_350	2.59	3.50	2.77	12.0%

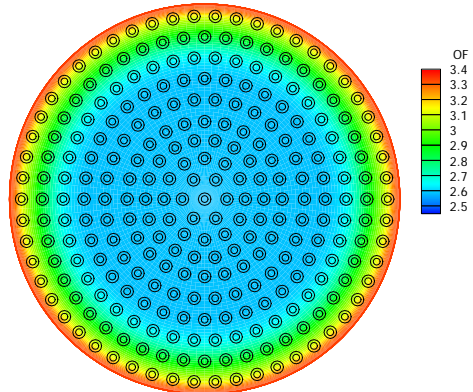


Fig. 6 Modelled Mixture Ratio Distribution (MR_350)

해석 결과 외곽 분사기열의 혼합비가 증가할수록 Fig. 7에서 확인할 수 있는 바와 같이 특성속도 및 비추력이 상승하여 연소 효율 개선에 도움이 될 것으로 예측되었다. 벽면 근처에서의 혼합비 증가에 따른 온도 상승으로 인해 열유속 및 연료측 벽면 온도는 Fig. 8 및 Fig. 9에서 확인할 수 있는 바와 같이 소폭 상승하는 경향을 나타냈으나, 냉각 성능의 저하 폭은 크지 않을 것으로 예측되었다. 다만 외곽 분사기열의 혼합비 변경을 위해서는 분사 특성이 서로 다른 2종의 분사기를 적용하는 등의 추가적인 개발 노력

이 요구되는 만큼 막냉각 유량 최적화 이후에 고려할 설계인자인 것으로 판단된다.

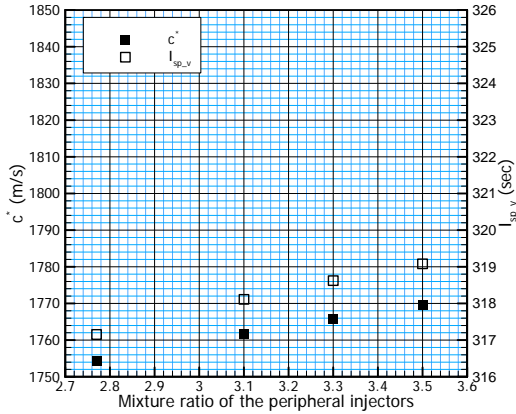


Fig. 7 Predicted c^* and $I_{sp,v}$ with Varying Mixture Ratios for Peripheral Injectors

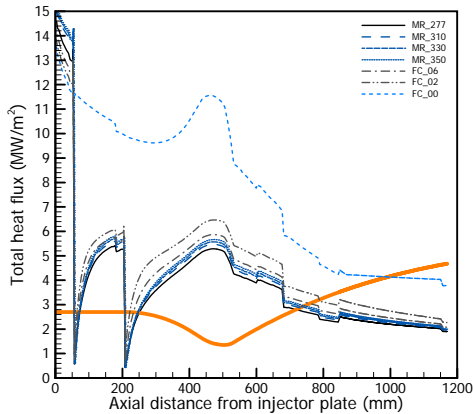


Fig. 8 Predicted Total Heat Flux with Varying Mixture Ratios for Peripheral Injectors

4. 결 론

재생냉각 연소기의 연료 막냉각 유량 및 혼합비 분포 변화에 따른 연소/냉각 성능 trade-off 해석 결과 막냉각 유량의 증가가 연소 성능에는 부정적으로, 냉각 성능에는 긍정적으로 작용한다는 점을 정성적으로 확인할 수 있었으며, 막냉각

유량 변화 없이 외곽 분사의 혼합비만 증가시킬 경우에도 연소 성능 개선에 도움이 될 것으로 예측되었다. 향후 연소기 개발 과정에서 시험 결과와의 비교를 통하여 해석 도구의 유용성 및 활용 범위를 지속적으로 평가/개선해나갈 계획이다.

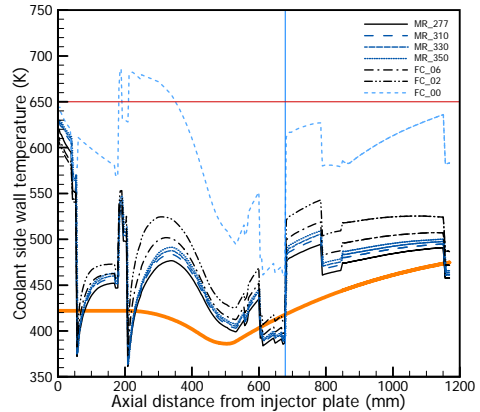


Fig. 9 Predicted Coolant Side Wall Temperature with Varying Mixture Ratios for Peripheral Injectors

참 고 문 헌

1. 김성구, 조미옥, 최환석, "막냉각 모델을 이용한 재생냉각 연소기 성능/냉각 해석," 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회, 2011
2. 김성구, 한상훈, 조미옥, 최환석, "액체로켓 연소기의 케로신/액체산소 고압 연소 해석기술 개발," 한국항공우주학회 2011년도 추계학술대회, 2011
3. Kim, S., Choi, H. and Kim, Y., "Thermodynamic Modeling based on a Generalized Cubic Equation of State for Kerosene/LOx Rocket Combustion," Combustion and Flame, Vol. 159, Issue 3, March 2012, pp.1351-1365
4. Ashgriz N., Handbook of Atomization and Sprays - Theory and Applications, Springer, 2011

5. Bruno, T. J. and Huber, M. L., "Evaluation of the Physicochemical Authenticity of Aviation Kerosene Surrogate Mixtures. Part 2: Analysis and Prediction of Thermophysical Properties," *Energy & Fuels*, Vol. 24, 2010, pp.4277-4284
6. Huber, M. L., "NIST Thermophysical Properties of Hydrocarbon Mixtures Database (SUPERTRAPP) Version 3.2 Users' Guide," NIST Standard Reference Database 4, January 2007
7. Dagaut, P. and Cathonnet, M., "The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 32, 2006, pp.48-92
8. 이광진, 김종규, 김인태, 한영민, 설우석, "가스 발생기용 단일 스윙 동축형 분사기의 추진제 분포 예측에 관한 기법 연구," 한국추진공학회 2004년도 추계학술대회, 2004