

技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.4.395

복합열전달 해석을 이용한 배플 분사기 설계 개선

김성구*, 한영민*, 최환석*

Design Improvement of Baffle Injector Using Conjugate Heat Transfer Analysis

Seong-Ku Kim*, Yeoung Min Han* and Hwan Seok Choi*

ABSTRACT

Baffle injectors are protruded into the combustion chamber and form an anti-pulsating baffle to prevent high-frequency combustion instabilities in transverse modes. Being exposed to a high heat-flux environment, the baffle injector has self-cooling passages through which kerosene is convected and heated. The baffle injector with 20 spiral cooling channels has been developed and successfully applied to 30 ton_F-class combustors without any performance loss due to an additional cooling. In this work, numerical analysis of conjugate heat transfer in baffle injectors with various cooling channel designs has been performed in order to reduce the fabrication cost which would be considerably increased for the 75 ton_F-class combustor. Prior to the application to a full-scale combustor, the thermal durability of the modified design has been verified through the subscale hot-firing tests.

초 록

배플 분사기는 연소실 안으로 돌출되어 횡 방향 모드로 발생하는 고주파 연소불안정을 억제하는 배플을 형성한다. 고온의 연소가스에 노출되기 때문에 배플 분사기는 케로신 유로를 통해 자체 냉각이 가능하도록 설계한다. 20개의 나선형 냉각 채널을 갖는 배플 분사기가 개발되어 30톤급 연소기에 성공적으로 적용되어 왔으며, 별도의 외부 냉각을 필요로 하는 내열재 배플이 갖던 성능 감소 문제를 해결하였다. 본 연구는 케로신 냉각유로의 설계를 개선함으로써, 냉각 성능을 만족하는 범위 내에서 제작성을 향상시켜 연소기 대형화로 인해 증가하는 배플 분사기의 제작 비용을 절감하는 데 목적을 두었다. 이를 위해 배플 분사기에 대한 복합열전달 해석을 수행하였으며, 설계 수정된 배플 분사기는 75톤급 실물형 연소기에 적용하기 전에 축소형 연소기의 연소시험을 통해 열 내구성을 검증하였다.

Key Words : Liquid Rocket Combustor(액체로켓 연소기), Combustion Instability(연소 불안정), Baffle Injector(배플 분사기), Conjugate Heat Transfer Analysis (복합열전달 해석)

1. 서 론

† 2009년 10월 7일 접수 ~ 2010년 3월 5일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 연소기팀
교신저자, E-mail : kimsk@kari.re.kr
대전광역시 유성구 과학로 115

액체로켓엔진 연소실은 방출되는 에너지 밀도가 매우 높기 때문에 쉽게 고주파 연소불안정을 야기할 수 있으며, 이때 벽면으로 과도한 열유속

증가와 압력 섭동을 수반하기 때문에 열적, 기계적 손상을 초래하게 된다. 대부분의 액체로켓엔진 개발 과정에서 연소불안정 문제로 인해 개발 기간 및 비용이 현저히 증가한 사례를 흔히 찾아볼 수 있다. 특히 대형 연소기의 경우 초기 설계 단계에서부터 연소안정화 방안을 확보하는 것이 필수적이다[1].

국내의 경우에도 최초의 액체로켓인 KSR-III 개발사업에서 연소실에 1차 접선 방향 모드를 갖는 고주파 연소불안정을 경험하였으며, 수동안정화 기구로서 내열재 배플을 장착하여 효과적으로 연소불안정의 발생을 억제할 수 있었다. 그러나 내열재 배플은 분사면에서 형성되는 연소장의 발달을 방해할 뿐만 아니라, 고온/고압의 연소실에 노출되는 배플의 열적인 손상을 방지하기 위해 추가적으로 배플 주위에 막냉각이 필요하게 되므로 연소기의 성능 감소를 야기하였다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해, 이후로 30톤급 연소기 개발 과정을 통해 고성능 연소기에 적합한 배플 분사기를 개발하였다[2]. 30톤급 실물형 연소기에 장착된 배플 분사기는 현재까지 연소안정성평가 시험(SRT: Stability Rating Test)을 포함한 수십회의 연소시험을 통해 연소성능의 감소 없이 안정적으로 작동하는 것이 입증되었다[3].

배플 분사기에 요구되는 설계조건은 연소실 내부로 도출된 부분이 고압/고온의 연소환경에서 충분한 열적/구조적 내구성을 가져야 하는 작동성의 측면과 배플로서 유해모드인 횡 방향 모드에 충분한 음향 감쇠 능력을 가져야 하는 기능성을 모두 만족해야 한다. 배플 분사기의 개발 과정[2]을 살펴보면 초기에 열유동해석을 통해 케로신 냉각유로의 설계안을 도출하였으며, 30톤급 실물형 연소기에 적용하기에 앞서 충분한 배플 길이($L_B=69$ mm)를 갖는 시제품을 제작하여 축소형 연소기의 연소시험을 통해 열내구성을 검증하였다. 이 과정에서 20개의 냉각채널을 갖는 배플 분사기의 설계안이 확정되었으며 설계유량 대비 50%의 케로신 냉각 유량 조건에서도 충분한 열적 내구성을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 연소안정화 기구로서의 기능성을 좌우하는 배플 길이 L_B 는 30톤급 연소기의 1차 시제품에 스테인리스강으로 제작된 임시 배플을 장착하고 일련의 연소안정성평가시험(SRT)을 수행함으로써 최종적으로 $L_B=38$ mm로 결정할 수 있었다[3]. 2차 시제품 연소기부터는 총 325개의 분사기 중에서 60개의 배플 분사기를 사용하여 Fig. 1과 같이 6개의 블레이드와 1개의 허브로 구성된 배플을 장착하였다.

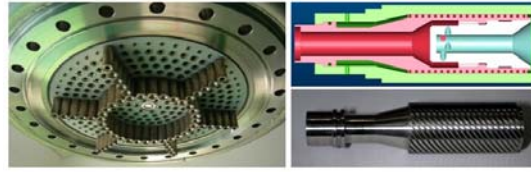


Fig. 1. Baffle injectors installed on injection head of 30 tonf-class combustor

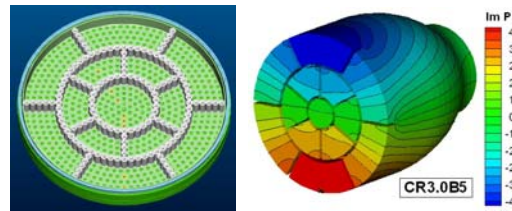


Fig. 2. Preliminary baffle design for 75 tonf-class combustor

현재 기본 설계가 진행 중인 75톤 연소기의 경우, 30톤급 연소기에 비해 연소실 직경이 380 mm에서 524 mm로 증가하게 된다. 초기 개발 단계에서는 연소안정성 여부를 충분히 확보하기 위해서 Fig. 2와 같이 이중 허브를 갖는 배플 형상을 결정하였다[4]. 배플의 주요 설계인자로서 유해 음향모드의 파장길이 λ 에 대해 배플에 의한 구획(baffle compartment)의 내부 길이 w_{max} 의 비를 정의한다. 현재 설계안은 일반적으로 가장 유해하다고 알려져 있는 1차 접선방향(1T) 음향모드에 대해 안쪽과 바깥쪽 구획의 길이비가 각각 $w_{max}/\lambda_{1T}=0.184$ 와 0.307 로 참고문헌[5]에서 제시한 설계지침($0.2 < w_{max}/\lambda_{1T} < 0.4$)을 만족한다. 이 경우 총 분사기 721개 중에서 138개의 배플 분사기가 필요하며, 주분사기에 비해 배플 분사기의 제작단가가 훨씬 높기 때문에 연소기 헤드의 제작비를 증가시키는 요인이 된다. 현재 배플 분사기의 제작에서 가장 많은 공정시간이 소요되는 부분은 엔드밀을 이용하여 내부 몸체(inner body)에 20개의 나선형 채널을 가공하는 공정이다. 지금까지의 축소형과 30톤급 실물형 연소시험 결과로 볼 때, 현재 적용되고 있는 배플 분사기의 채널 설계안은 냉각성능의 여분을 과도하게 포함하고 있다고 판단된다. 따라서 냉각 성능을 만족하는 범위 내에서 채널 개수를 줄임으로써 제작성을 향상시키고 제작비용을 절감할 수 있는 설계 개선 방안이 요구되었다.

본 연구는 복합열전달(conjugate heat transfer) 해석을 통하여 채널 수를 12개로 감소시킨 배플

분사기의 설계수정안을 도출하였다. 그리고 75톤급 실물형 연소기에 적용하기에 앞서 축소형 고압 연소시험을 수행하여 설계 수정된 시제품의 열내구성을 검증하고 냉각 여분을 평가하였다.

II. 전산해석을 통한 설계 개선

2.1 배플 분사기 설계 조건

배플 분사기의 냉각 채널은 직선형으로 설계하는 것이 제작에 상당히 유리하지만, 나선형 채널을 사용하면 국부적으로 고온 영역(hot spot)이 존재하더라도 여러 채널로 열부하를 분산시킬 수 있는 장점이 있다. 배플 분사기가 실물형 연소기에 장착되는 경우에 이웃한 배플 분사기와 접촉하는 부분과 주 분사기의 화염면이 직접적으로 부딪히는 부분이 구분되기 때문에 배플 분사기의 냉각채널은 나선형으로 설계하는 것이 필수적이라고 판단되었다.

75톤급 연소기에 적용될 배플의 길이는 아직까지 확정되지 않았으며, 초기 설계값으로 연소실 직경의 10%에 해당하는 $L_b=52.4 \text{ mm}$ 가 고려되고 있다. 그러나 배플 분사기의 열내구성을 검증하는 단계에서는 냉각 여분을 확보하는 측면에서 길이에 좀 더 여유를 두고 제작한 시제품에 대해 축소형 연소시험을 수행하고, 향후 실물형 연소기에 적용하는 과정에서 길이를 줄여나가는 것이 유리하다고 판단된다. 따라서 열내구성 검증용 시제품의 배플 길이는 75톤 연소실 직경의 약 13%인 $L_b=69 \text{ mm}$ 로 결정하였다.

채널이 가공되는 내부 몸체는 기존 설계와 동일하게 스테인리스강(STS316L)을 사용하였으며, 외피는 열전도가 좋은 구리합금 소재로 제작하고 내부 몸체와 브레이징으로 접합된다. 현재로서 75톤 연소기 헤드에 적용될 분사기의 단위 유량과 배열이 확정된 것은 아니기 때문에 배플 분사기의 전체 외경과 외피 두께는 변경될 소지가 있다. 이전 해석결과[2]를 보면 외피 두께가 1.0 mm에서 2.5mm로 증가할 때 최대 벽면 온도는 약 70 K 정도 증가하지만, 본 연구의 목적은 채널 설계 간의 상대적인 냉각성능을 비교하는 것이 목적이므로 외피 두께를 변화시켜 추가적인 해석을 수행하지는 않았다. 현재 75톤 연소기의 기본설계에서 분사기 단위 유량은 30톤급 연소기 설계와 동일하게 결정되어 있으나, 분사기 단위 유량을 증가시켜 분사기 개수를 줄이는 방안도 고려 중에 있다. 이 경우 분사열이 하나 줄어들기 때문에 배플 분사기의 전체 외경이 커지고 연

Table 1. Summary of cooling channel design for baffle injector

설계 번호	채널 개수	채널 폭* [mm]	채널 높이 [mm]	평균 유속 [m/s]	외피 두께 [mm]
BI-20-0	20	0.85	0.85	12.2	1.0
BI-08	8	2.0	1.1	9.8	1.6
BI-12-A	12	1.2	1.0	12.1	1.6
BI-12-B	12	1.5	1.0	9.7	1.6
BI-12-C	12	1.8	1.0	8.1	1.6

* 배플 분사기 중심축의 수직단면 기준

소실로부터 전달되는 열전달량은 증가하지만, 이에 비해 케로신 냉각유량의 증가량이 훨씬 커지므로 열내구성 측면에서는 보다 양호한 상태가 될 것이다. 따라서 축소형 연소시험에서 검증해야 할 배플 분사기 설계안은 현재의 연소기 설계안을 바탕으로 검토하였다.

냉각 채널에서 보면 반경방향으로 바깥쪽 벽면이 구리합금이고, 선회 유동에 의해 원심력이 작용하므로 유동이 바깥쪽으로 집중된다. 따라서 채널 단면적이 동일한 경우에는 상대적으로 채널 폭이 크고 높이가 작은 쪽이 열전달 측면에서 유리할 것으로 예상된다. 그러나 혹시 연료에 포함된 불순물에 의해 냉각채널이 막힐 수 있는 가능성을 고려하여 채널 높이는 1 mm 이상이 되도록 제한하였다.

Table 1은 본 연구에서 해석을 수행한 배플 분사기의 설계안들을 요약한 내용이다. BI-20-0은 지금까지 적용되어 온 기존 설계안이다. BI-08는 8개의 채널을 사용하는 비교 설계안이며, 내부 몸체의 소재를 스테인리스강(BI-08-A) 대신에 구리합금(BI-08-B)으로 사용할 때 얻어지는 냉각성능의 향상 효과를 살펴보았다. 나머지 3개의 설계안은 채널 개수를 12개로 고정하고 마지막 설계변수인 채널 폭을 변화시켰다. Table 1에서 보듯이 채널 폭이 작으면 평균유속이 증가하여 채널 벽면에서 열전달계수는 증가하지만 냉각유체가 접촉하는 표면적은 감소하게 된다.

2.2 수치해석 방법

케로신을 연료로 사용하는 액체로켓연소기의 경우에는 고온/고압의 연소환경과 더불어 과도한 검댕(soot)이 발생하므로 연소유동장에 대한 직접적인 계측이 매우 어렵다. 따라서 연소가스로부터 전달되는 열유속 조건을 결정할 수 있는 실험 데이터가 없으므로 배플 분사기의 벽면 온

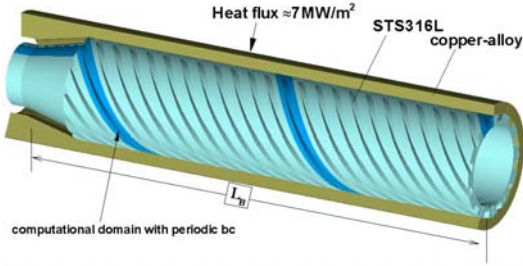


Fig. 3. Computational domain and boundary conditions(BI-12-A)

도를 정량적으로 정확히 예측한다는 것은 거의 불가능하다. 이러한 이유로 본 연구에서는 열유속을 근사적으로 가정하고, 동일한 열유속 조건 하에서 수치해석결과를 비교함으로써 채널 설계 간의 냉각 성능을 상대적으로 평가하였다.

채널 내부의 대류열전달과 내부 몸체 및 외피에서의 열전도를 동시에 고려한 복합열전달 (conjugate heat transfer) 해석을 수행하였다. 효율적인 계산을 위해 Fig. 3에 나타난 바와 같이 1개의 나선형 채널만을 해석하였다. 이에 따라 해석영역 역시 원주방향을 채널 개수로 나눈 일정 각도만을 포함하며 채널과 동일한 선회각으로 회전하는 영역으로 선정하였다. 이때 원주 방향으로 양쪽 경계면은 나선형 채널 rib의 중앙에 위치하고 주기적 경계조건(rotationally periodic b.c.)을 지정하였다(Fig. 8 참조).

열차폐 코팅이 없는 연소실 벽면에 대해 재생 냉각 설계코드[6]로부터 예측된 열유속은 약 7 MW/m²이었다. 배플 분사기는 주분사기에서 형성되는 화염면이 부딪혀 국부적으로 고온 영역 (hot spot)이 존재할 수 있으나 본 연구에서는 상대적인 냉각 성능을 비교하는 것이 목적이므로 모든 해석에서 연소실로부터 외피의 바깥 벽면으로 전달되는 열유속은 7 MW/m²으로 일정하게 가정하였다. LOx와 접촉하는 내부 몸체의 안쪽 벽면은 단열조건으로 가정하였다. 참고적으로 LOx 유로 벽면을 통한 열전달계수를 가정하고 해석한 경우에 약 15%의 열전달량이 LOx 유동으로 흡수되어 벽면 최대 온도가 약 20 K 정도 감소하였으나 채널 설계에 따른 냉각성능의 상대적인 비교 결과에는 영향을 주지 않았다.

상용 코드인 FLUENT version 6.1[7]을 사용하였으며, 채널 내부의 난류 열유동을 해석하기 위해 Realizable k-ε 모델[8]과 Non-equilibrium wall function 모델[9]을 적용하였다. 냉각채널을 지나면서 케로신의 온도가 증가하게 되므로 케로

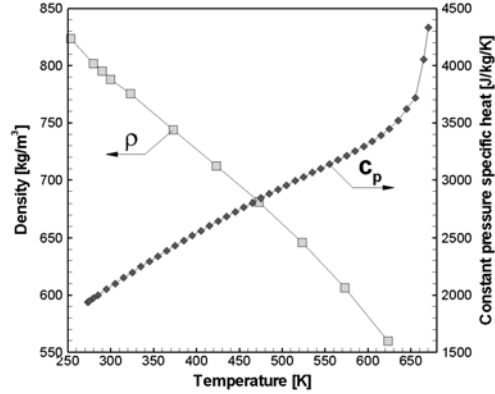
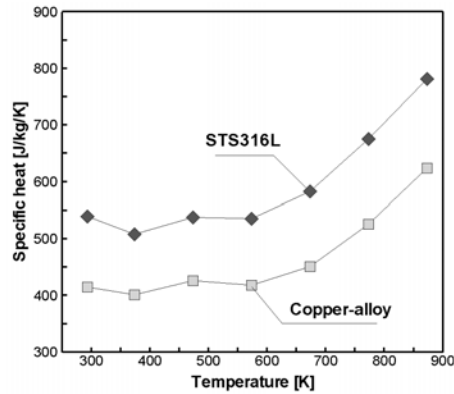
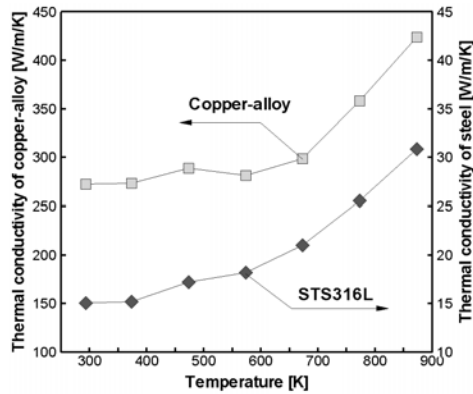


Fig. 4. Properties of kerosene(Jet-A1)



(a) constant pressure specific heat



(b) thermal conductivity

Fig. 5. Properties of materials

신의 물성치(밀도, 정압비열, 동점성계수, 열전도 계수) 변화를 고려하기 위해 Fig. 4와 같이 재생 냉각해석[6]에 사용되고 있는 케로신(Jet-A1)의 데이터를 적용하였다. 구리합금과 STS316L의 열전도 해석에서 필요한 물성치(정압비열, 열전도

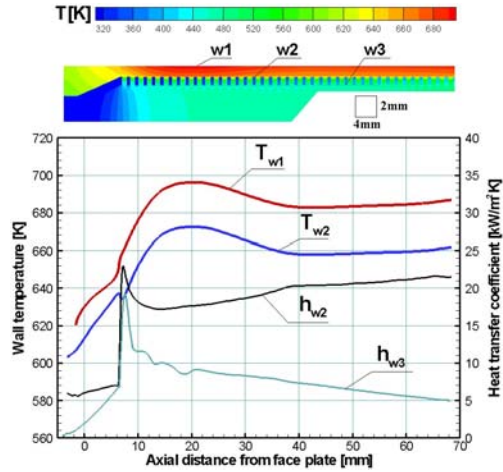
계수)는 Fig. 5와 같이 온도에 따른 측정결과를 사용하였다. 그리고 각각의 설계안에 대해 케로신의 유량은 설계유량(84 g/sec)의 100%와 50%인 두 가지 조건에서 해석을 수행하였다.

2.3 기본설계안(BI-20-0) 해석결과

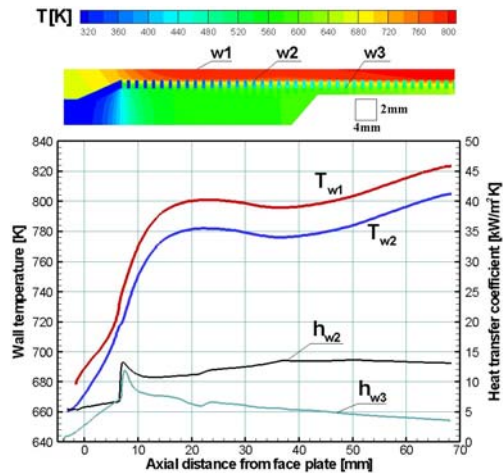
Figure 6은 기본설계안(BI-20-0)에 대해 각각 설계유량의 100%와 50%의 케로신이 냉각 채널로 공급될 때의 해석결과이며, 그래프는 채널 폭의 중앙지점에서의 온도 및 열전달계수 값을 유동의 진행 방향에 따라 나타낸 결과이다. 냉각채널로 전달되는 열유속은 채널 벽면에서 냉각유체의 열전달계수 값과 벽면과 냉각유체 간의 온도 차이에 의해 결정된다. 온도 차이의 측면에서 보면 하류로 갈수록 냉각유체의 온도가 점차 상승하게 되므로 냉각 성능은 그만큼 감소한다고 생각할 수 있다. 결과를 나타내지는 않았지만, 케로신의 온도 상승에 의한 물성치 변화를 고려하지 않는 경우에는 나선형 채널 내부의 선회 유동이 완전 발달하는 지점(대략 $x=20$ mm) 이후부터는 열전달계수가 크게 변하지 않기 때문에 하류로 가면서 외피의 벽면 온도(T_{w1} , T_{w2})가 점진적으로 상승하는 결과를 보였다. 그러나 케로신의 물성치 변화를 고려한 해석결과인 경우에는 Fig. 6(a)와 같이 $x=20$ mm에서 벽면 온도가 최대값을 보인 후 감소하였다가 다시 서서히 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이에 대한 이유는 축 방향을 따른 열전달계수의 변화로부터 이해할 수 있다. 냉각채널을 지나면서 케로신의 평균온도는 약 125K 정도 상승하였으며, Fig. 4(a)의 밀도 변화에 따라 평균속도는 약 10% 정도 증가하게 된다. 따라서 선회속도가 증가하게 되고 이는 강제회전(solid-body rotation)으로 가속화되어 Fig. 7과 같이 하류로 가면서 바깥쪽 벽면 근방의 유속은 증가하는 반면 안쪽 벽면에서는 감소하게 된다. 이와 같은 이유로 인해 Fig. 6(a)에서 바깥쪽 벽면에서의 열전달계수(h_{w2})는 하류로 가면서 증가하고 안쪽 벽면(h_{w3})에서는 감소하는 결과가 나타난다. 이와 함께 점성과 열확산율의 변화도 열전달계수에 영향을 미치는 요인이 된다.

설계유량의 50%로 케로신 유량이 감소한 경우에는 유속 변화에 의한 열전달계수의 변화보다는 케로신 온도 상승으로 인해 냉각성능이 감소하는 영향이 크게 나타나므로 Fig. 6(b)와 같이 하류로 가면서 벽면 온도의 증가 폭이 커지게 된다.

Figure 8은 $x=43.4$ mm에서 벽면의 온도와 채널 내부의 유속 분포를 나타낸 결과이다. 앞서 살펴보았듯이 선회유동으로 인해 대부분의 유량



(a) design condition of mass flow rate



(b) half of design mass flow rate

Fig. 6. Numerical results for BI-20-0

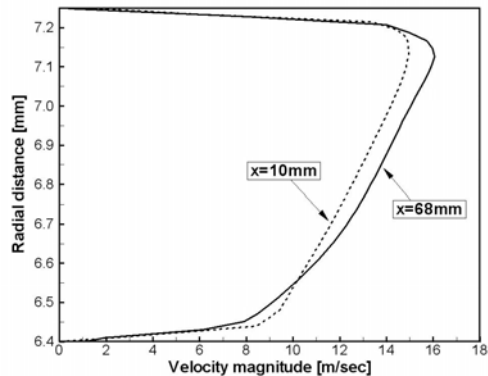


Fig. 7. Radial profiles of velocity magnitude at different axial positions

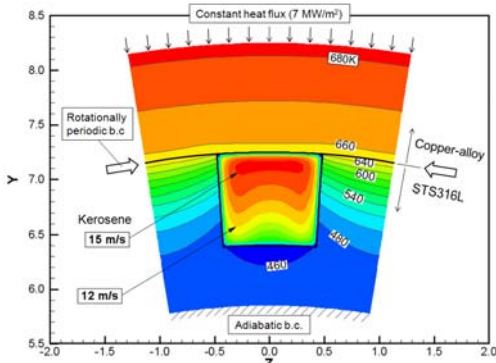
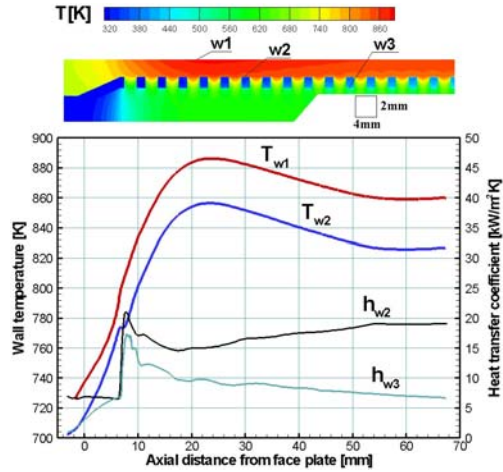


Fig. 8. Distributions of material temperature and coolant velocity magnitude in the channel ($x=43.4$ mm)

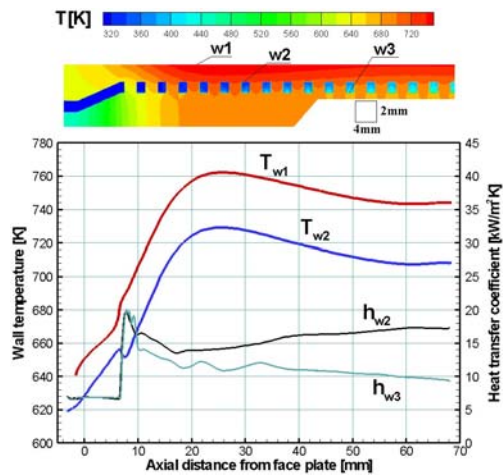
은 바깥쪽으로 집중되므로 채널의 바깥쪽 벽면에서의 열전달계수가 안쪽 벽면의 값보다 커지게 된다. 또한 구리합금 소재인 외피는 열전도가 크기 때문에 온도구배가 커지 않은 반면에, 열전도율이 1/15 정도 밖에 안 되는 내부 몸체(STS316L)에서는 온도구배가 커지면서 안쪽의 벽면 온도가 크게 감소하게 된다. 따라서 채널 벽면과 냉각유체간의 온도 차이도 바깥쪽 벽면에서 크게 나타나게 된다. 따라서 앞서 설명한 열전달계수와 온도차, 두 가지 영향으로 인해 채널을 통한 전체 열전달량의 40.4%가 바깥쪽 벽면에서 발생하고 나머지가 옆면과 안쪽 벽면을 통해 일어나는 것으로 예측되었다.

2.4 내부몸체 소재의 영향 평가

채널이 가공되는 내부 몸체의 소재를 다르게 하는 경우에 냉각 성능에 미치는 영향을 검토해보았다. Fig. 9(a)와 (b)는 동일한 8개 채널 형상에 대해서 내부 몸체의 소재를 각각 STS316L (BI-08-A)과 구리합금(BI-08-B)로 사용한 해석결과를 나타내고 있다. 구리합금을 사용한 경우 내부 몸체에서 열전도가 증가하기 때문에 옆면과 안쪽 벽면에서의 온도가 상대적으로 높아지게 되므로 전체적으로 채널의 냉각성능을 향상시키게 된다. 따라서 내부 몸체의 소재를 STS316L을 사용한 경우 외피의 최대 벽면 온도가 886 K인 데 비해, 구리합금 소재인 경우는 약 125 K 정도 감소하는 효과를 보여주고 있다. 또한 채널의 전체 냉각 열량 중에서 바깥쪽 벽을 통한 비율이 49% (BI-08-A)에서 34%(BI-08-B)로 감소되어 그만큼 옆면과 안쪽 벽면의 기여도가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 점화시 발생할 수 있는 초기 충



(a) BI-08-A (inner body: STS316L)



(b) BI-08-B (inner body: copper-alloy)

Fig. 9. Cooling effect of inner-body material

격에 대한 구조적 안정성을 높이고 LOx 선회부로의 과도한 열전달을 줄이는 측면에서는 30톤급 연소기에서 검증된 배플 분사기와 같이 내부 몸체를 스테인리스강으로 설계하는 것이 바람직하다고 판단된다.

2.5 채널 설계 수정안 도출

12개 채널 설계안에 대해서도 표 1에서 언급한 대로 채널 높이를 1 mm로 고정시킨 상태에서 채널 폭을 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 그 중에서 채널 폭이 1.2 mm인 경우(BI-12-A)의 해석결과와 정성적인 경향은 Fig. 6의 기본설계안(BI-20-0) 해석결과에서 설명한 바와 동일하였다. 평균 유속은 기본설계안(BI-20-0)과 동일하지

만 외피와 접촉하는 바깥쪽 벽면의 면적이 15% 정도 줄어들었고 외피 두께가 약 0.6 mm 정도 증가했기 때문에 외피의 최대 벽면 온도는 약 110 K 정도 증가한 804 K로 나타났다. 채널 폭을 각각 1.5 mm(BI-12-B)와 1.8 mm(BI-12-C)로 증가시킨 경우에도 정성적으로 유사한 해석결과를 얻었으나 외피의 최대 벽면 온도가 각각 827 K와 843 K로 증가하였다.

배플 분사기의 채널 설계안을 상대비교하기 위해 외피의 최대 벽면 온도에 대한 예측결과를 Fig. 10에 나타내었으며, 참고할 만한 정량적인 수치들을 표 2에 요약하였다. 12개의 냉각 채널로 고정시킨 경우에는 채널 폭이 1.2 mm인 설계안(BI-12-A)이 상대적으로 냉각능력이 좋은 것으로 판단되어 최종적인 설계수정안으로 선정하였다. 설계유량에서 최대 벽면 온도는 804 K으로 현재 30톤급 연소기에 적용되고 있는 기본설계안(BI-20-0)에 비해 110 K 정도 높게 예측되고 있다. 그러나 이 값은 Fig. 10에서 보듯이, 이미 기본설계안에 대해 수행한 축소형 연소시험에서 설계유량의 50% 케로신 유량 조건으로 검증한 영역 내에 포함되므로 우선 설계점에서의 열내구성을 만족할 것으로 판단되었다.

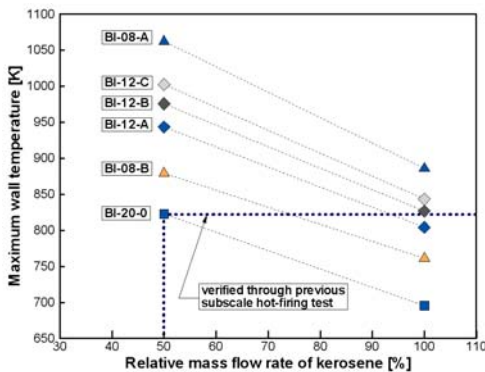


Fig. 10. Comparison between different cooling channel designs

Table 2. Summary of numerical results

설계 번호	$T_{w1,max}$ [K]	$T_{fuel,bulk}$ [K]	$h_{w2,max}$ [kW/m ² K]	$N_{ch} \times W_{ch}$ [mm]	Q_{upper}/Q_{total} [%]	ΔP_{ch} [bar]
BI-20-0	695.5	425.0	21.6	17.0	40.4	3.57
BI-08-A	885.9	432.7	19.1	16.0	48.9	1.28
BI-08-B	761.1	434.5	17.2	16.0	34.3	1.30
BI-12-A	804.3	433.6	22.4	14.4	42.9	2.55
BI-12-B	826.6	432.9	18.7	18.0	46.5	1.53
BI-12-C	843.4	431.0	16.0	21.6	50.2	1.02

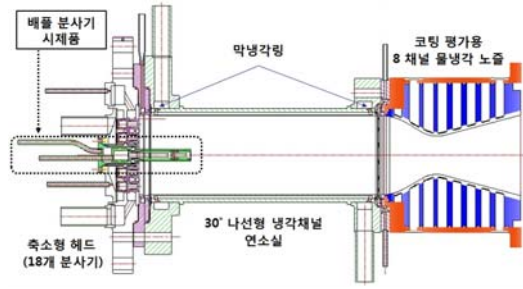


Fig. 11. Configuration of subscale combustor for verification of thermal durability

III. 축소형 연소시험을 통한 설계검증

전산해석결과를 바탕으로 설계 수정된 배플 분사기를 실물형 연소기에 적용하기 위해서는 탈설계점을 포함한 모든 작동조건에 대해 충분한 열내구성이 검증되어야만 한다. 이를 위해 Fig. 11과 같이 제작된 축소형 연소기를 이용한 고압 연소시험을 수행하였다. 이때 축소형 연소기 헤드는 2열의 18개의 동축 분사기로 구성되어 있으며, 이와는 별도로 배플 분사기는 축소형 연소기 헤드의 중앙에 카트리지 형태로 장착과 탈착이 가능하게 설계되었으며, 별도의 공급 배관을 통해 축소형 연소기와는 무관하게 추진제 유량을 제어할 수 있도록 하였다. 이를 통해 배플 분사기로 공급되는 케로신 유량을 설계유량 보다 적게 공급함으로써 배플 분사기가 갖는 냉각 성능의 여분을 평가할 수 있다.

설계 수정된 배플 분사기의 제작과정은 30톤급 연소기에서와 동일하며 이와 관련한 세부 공정은 참고문헌[2]에 자세히 설명되어 있다. 4축 엔드밀 기계가공을 통해 내부 몸체에 12개의 나선형 채널을 가공하는 시간은 배플 분사기 1개당 5시간으로 기존의 20채널에 대해 소요되는 8시간에 비해 35% 가량 단축되었다. 향후에 75톤급 실물형 연소기의 연소안정성 평가가 완료되어 배플 길이가 줄어들게 된다면, 기계가공에 소요되는 시간이 추가적으로 감소할 수 있다.

2회에 걸쳐 고압 축소형 연소시험을 수행하였다. 1차 연소시험은 케로신 설계유량 조건에서 4초간 수행되었으며, 2차 연소시험은 배플 분사기로 공급되는 케로신 냉각유량을 51 g/s(설계유량 84 g/s의 61%)로 감소시킨 상태에서 20초 연소시험을 수행하였다. 배플 분사기는 두 번의 연소시험을 통해 열적 손상이 발생하지 않았다. 축소형 연소기의 경우 중앙에 장착된 배플 분사기를 6개의 주 분사기가 둘러싸는 반면에, 실물형 연

소기에서는 배플 분사기끼리 연결되기 때문에 주 분사기의 화염이 부딪히는 면적이 상대적으로 줄어들게 된다. 따라서 배플 분사기로 전달되는 열유속 측면에서 실물형 연소기와 비교하면, 축소형 연소시험이 보다 가혹한 연소 환경이라고 판단할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 30톤급 연소기에 성공적으로 적용되어 왔던 배플 분사기에 대해 냉각 요구조건을 만족하는 범위 내에서 제작성을 향상시킬 수 있는 방향으로 배플 분사기의 냉각유로 설계를 개선하였다. 이를 위해 다양한 형상을 갖는 나선형 채널 설계안을 도출하였으며, 냉각채널 내부의 열전도와 케로신 유동의 대류열전달을 동시에 고려한 3차원 복합열전달 해석을 수행하였다. 해석 결과의 상대비교를 통해, 냉각 채널의 개수를 기존의 20개에서 12개로 줄인 설계 수정안을 결정할 수 있었다. 나선형 냉각채널을 기계 가공하는 데 소요되는 공정시간이 1개당 8시간에서 5시간 정도로 감소하였으며, 제작단가가 주분사기에 비해 높은 배플 분사기의 제작성 향상은 75톤급 연소기 헤드 제작에 소요되는 제작 비용 및 시간을 절감시킬 것을 기대된다. 설계 수정된 배플 분사기 시제품은 단위시간당 열충격면에서 75톤급 연소기에 비해 가혹한 연소 환경에서 냉각성능을 평가하였다. 실물형 연소기에서의 열내 구성은 75톤급 연소기의 개발과정에서 수행될 반복 연소시험을 통해 최종 검증될 예정이다.

후 기

본 연구는 기초기술연구회 지원의 “터보펌프 방식 액체엔진 성능향상 연구” 과제의 일부로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Liquid Rocket Engine Combustion Instability, Yang, V. and Anderson, W.E. (eds), Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 169, AIAA, 1995.
- 2) 김성구, 문윤완, 김홍집, 김종규, 김인태, 한영민, “연소안정화를 위한 배플 분사기 개발”, KARI-CCG-TM-2005-002, 한국항공우주연구원, 2005.
- 3) 최환석, 한영민, 김영목, 조광래, “추력 30톤급 액체산소/케로신 로켓엔진 연소장치 개발(I)-연소기”, 한국항공우주학회지, 제 37권 제 10호, 2009, pp. 1027-1037.
- 4) 김성구, 김홍집, “75톤급 연소기의 연소불안정 제어를 위한 배플의 예비설계”, KARI-CCT-TM-2006-022, 한국항공우주연구원, 2006.
- 5) Liquid Rocket Engine Combustion Stabilization Devices, NASA SP-8113, 1974.
- 6) 김홍집, 조원국, 문윤완, “막냉각 모형을 이용한 액체로켓엔진 연소기의 열해석”, 한국추진공학회지, 제 10권 제 4호, 2006, pp. 85-92.
- 7) Fluent 6.1 User's Guide, 2003.
- 8) Shah, N.G., "A New Method of Computation of Radiant Heat Transfer in combustion Chambers", PhD thesis, Imperial College of Science and Technology, London, England, 1979.
- 9) Kim, S.-E., "Large eddy simulation using unstructured meshes and dynamic subgrid-scale turbulence methods", AIAA-2004-2548, 34th Fluid Dynamics Conference and Exhibit, June, 2004.