

액체로켓엔소실의 양 방향 재생냉각유로 설계/해석

김성구*, 김종규**, 한영민***, 최환석****

Design and Analysis of Two-Directional Regenerative Cooling Passages for Liquid Rocket Nozzle

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

Abstract

The 30 tonf-class liquid rocket combustor currently being developed is designed to connect the fuel feeding line at a middle position of the supersonic nozzle in order to reduce both pressure loss in the regenerative cooling passage and overall envelope of the thrust chamber in spite of increase in design complexity. To verify the design of cooling passages including fuel ring, connecting holes, two-directional cooling channels and collectors, numerical analysis has been performed.

초 록

30톤급 액체로켓엔진용으로 개발된 일체형 재생냉각 연소기는 연료를 확대노즐부의 중간에서 공급하는 방식으로 설계되었으며, 노즐 끝단에서 공급되는 방식에 비해 냉각유로는 복잡해지지만 열유속이 상대적으로 낮은 확대노즐부의 냉각유량을 줄임으로서 압력손실을 감소시키는 동시에 공급라인을 포함한 연소기 전체 외경이 줄어들어 엔진 구성에 유리한 장점을 있다. 본 연구에서는 이와 관련한 연료링과 양 방향 냉각채널, 그리고 연결/분기 유로에 대해 수치해석을 통한 세밀한 설계검토를 수행하였다.

키워드 : Liquid Rocket Combustor(액체로켓연소기), Regenerative Cooling(재생냉각), CFD(전산유체역학)

1. 서 론

30톤급 액체로켓엔진용으로 팽창비 12인 일체형 재생냉각 연소기가 개발되었다[1]. 재생냉각유로는 그림 1에서 보듯이 확대노즐부의 중간에서 연료를 공급하는 방식과 노즐 끝단에서 공급하는 방식으로 설계할 수 있다. 노즐 끝단에서 공급하는 방식에

비해 중간에서 연료를 공급하면 유로 설계는 복잡해지지만, 열유속이 상대적으로 낮은 노즐 하류 부분의 냉각유량을 줄임으로서 압력손실을 감소시킬 수 있고 공급포트를 포함한 연소기 전체 크기(envelope)를 줄일 수 있으므로 엔진 구성에 유리한 장점이 있다. 따라서 30톤급 연소기는 그림 2와 같이 연료를 2차 확대노즐부의 중간쯤에서 공급하고, 연료링에서 채널로 연결된 홀(3열×원주방향 130

접수일(2007년 11월 14일), 수정일(1차 : 2008년 6월 5일, 2차 : 2008년 6월 17일, 게재확정일 : 2008년 7월 1일)

* 연소기팀/kimsk@kari.re.kr

** 연소기팀/bellstar@kari.re.kr

*** 연소기팀/ymhan@kari.re.kr

**** 연소기팀/hschoi@kari.re.kr

set)을 통해, 상류와 하류로 각각 50:50으로 냉각유량이 배분되도록 설계하였다[2]. 이와 같은 재생냉각 설계안은 처음으로 도입되는 것이며, 동일한 냉각방식이 75톤 연소기[3]에도 적용될 예정이므로 냉각 유로 설계안에 대해 CFD 해석을 통한 세밀한 설계 검토를 수행하였다.

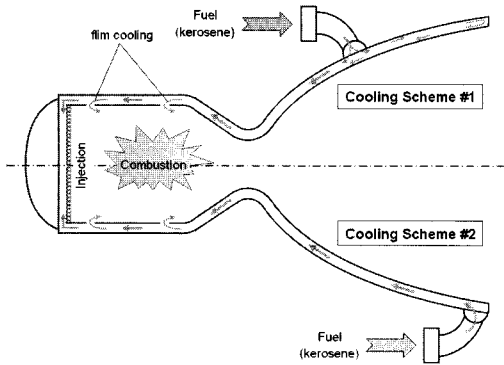


그림 1. 재생냉각유로 설계방식 비교

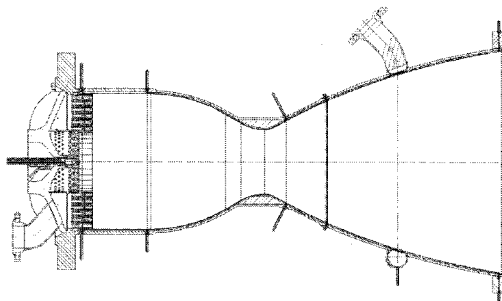


그림 2. 30톤급 재생냉각 연소기 설계안(EM#5-2)

2. 양 방향 냉각 유로 설계/해석

2.1 설계조건

연료 포트를 거쳐 확대노즐부의 중간에 위치한 연료링으로 공급된 연료는 연결 홀을 통해 각각 노즐 상/하류의 재생냉각채널로 분기되어 들어간다. 이때 설계유량에 맞춰 양 방향으로 정확히 냉각유량을 배분하기 위해서는 연료링과 채널 사이

의 연결유로를 정교하게 설계하고 하류 방향의 냉각채널을 포함한 전체 유로의 각 부분에서 발생하는 압력손실을 정확히 예측할 수 있어야 한다. 30톤급 연소기에 적용된 설계안은 그림 3과 같이 원주방향으로 총 520개 채널 중에서 4개의 채널이 하나의 set을 이루게 된다. 먼저 노즐 하류 방향 유로를 살펴보면, 연료링 하단에 설치된 직경 5.2mm인 2개의 홀(단면 A1, A2)을 통해 단위 연료유량의 50%가 공급되고 안쪽 2개의 재생냉각채널(단면 B→C)을 통해 노즐 하류 방향으로 유동이 흘러가게 된다. 이후에 각 채널로 들어온 유량은 노즐끝단의 하단 collector에서 합쳐지고 유동방향이 180° 선회하여 바깥쪽 2개 채널(단면 D)을 통해 노즐 상류 방향으로 공급되어 최종적으로 연료링 상류의 collector(단면 E)로 나오게 된다.

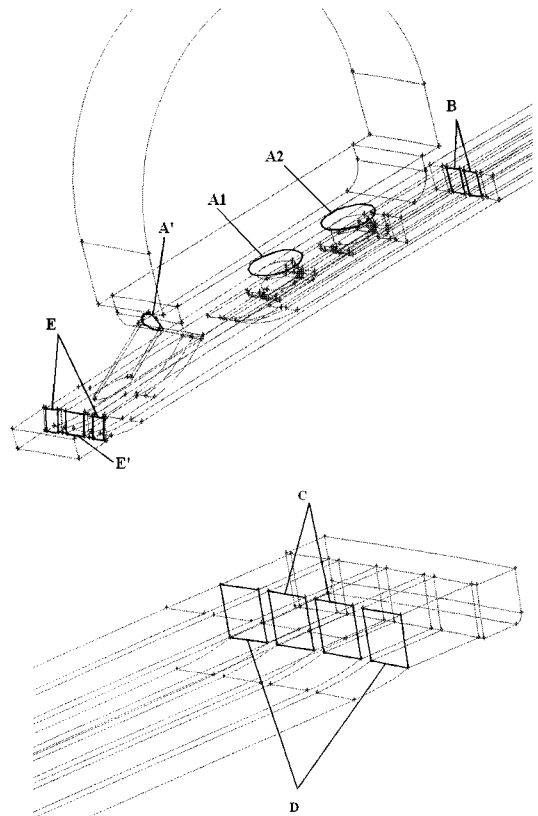


그림 3. 연료링과 연결된 양 방향 재생냉각채널 분기 구조

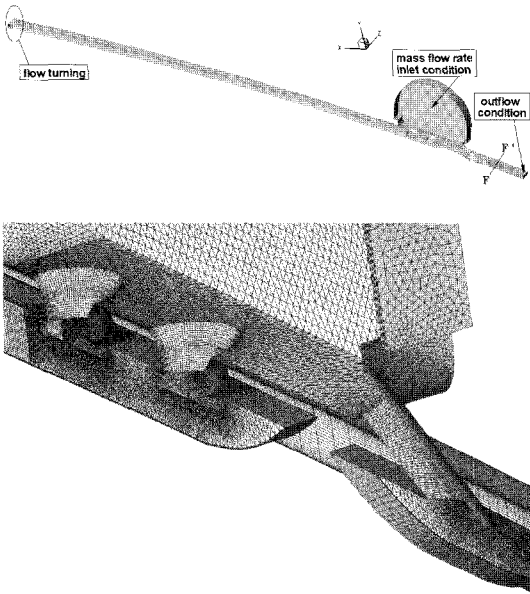


그림 4. 냉각 유로 해석을 위한 계산영역(위)과 격자계(아래)

반면 나머지 절반의 유량은 작은 홀(그림 3의 단면 A')을 통해 곧바로 collector(단면 E')로 유입되게 되어, 노즐 하류방향 유로를 거쳐 되돌아온 유량(단면 E)과 합쳐지게 된다. 이때 작은 홀의 직경은 유량 배분을 결정하는 중요한 설계인자이며, 하류로 유입되어 되돌아오는 냉각채널 유로(A→B→C→D→E)의 압력손실을 보정할 수 있게 설계되어야 한다. 초기 설계에서 차압 1.7bar를 기준으로 상류 홀(단면 A')의 직경은 d=3.05mm로 결정되었다.

2.2 수치해석 방법

그림 3에 나타난 1 set의 채널구조를 각 홀의 중심축을 포함하는 단면을 기준으로 나누어 그림 4와 같이 절반만을 해석영역으로 고려하였으며, 중앙 단면에 해당하는 경계는 대칭조건을 주었다. 입구포트와의 상대적 위치에 따라 연료링에서 유동이 유입되는 조건이 달라질 수 있으나 이 부분은 3장에서 별도로 검토하기로 하고, 여기서

는 그림 4와 같이 연료링의 단면에서 단위유량의 절반이 유입되는 질량유량 입구조건을 주었다. 이것은 입구포트와 반대쪽 연료링에 채널이 위치한 경우로 생각할 수 있다. 상류 collector 이후를 약간 확장하여 outflow 출구조건을 주었다.

유량 및 차압 배분을 예측하기 위해서는 채널 벽면을 따라 발생하는 마찰손실을 정확히 고려하는 것이 중요하므로 벽면 경계층으로 격자를 충분히 밀집시켰으며($y^+ < 5$), 상용코드인 FLUENT의 Realizable $k-\epsilon$ 난류모델과 “Enhanced wall treatment” 벽면경계조건을 사용하였다. 최종 격자계는 1,403,329개의 셀과 911,004개의 노드로 구성되었다. 작동유체(케로신)의 밀도와 점성계수는 796.5 kg/m^3 과 $1.4785 \text{ kg/m} \cdot \text{sec}$ 로 계산하였으며, 냉각채널을 따른 온도상승으로 인해 점성이 감소하는 효과는 고려되지 않았다.

2.3 해석 결과 검토

유동해석을 통해 초기 설계안(d=3.05mm)에 따른 유량 배분과 차압을 검토하였으며, 상류 홀 직경을 수정한 설계수정안(d=2.50mm로)을 제시하였다.

중력의 영향을 무시하면 상류지점(1)과 하류지점(2)의 압력-속도 관계는 아래와 같이 주어진다.

$$P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} + \Delta P_{1-2} \quad (1)$$

여기서 ΔP 는 마찰(friction)과 유동저항(flow resistance)[4]에 의해 발생하는 전압력 손실(total pressure loss)을 의미한다.

표 1과 2는 초기설계안과 설계수정안에 대한 해석결과를 통해 각각 연결 홀을 통한 유량 배분과 압력손실을 비교한 결과이다. 초기설계안의 경우 53.9%의 유량이 상류 홀(그림 1의 단면 A')을 통해 곧바로 상류 collector로 들어가게 되므로 나머지 46.1%가 2개의 하류 홀을 공급되어 노즐 끝단까지 냉각채널을 되돌아오게 된다. 이때 하류로 연결된 유로 전체에서 발생하는 전압력손실은 1.581 bar이며 그 중 24%는 하류 끝단의 collector에서 유동이 되돌아 나올 때 발생하

는 유동저항(flow turning)에 의한 압력손실로 예측되었다. 반면 설계수정안의 경우에는 상류 홀의 직경이 2.50 mm로 줄어들었으므로 통과 유량이 44.3%로 감소하게 되는 반면, 하류 채널로 유입되는 유량이 55.7%로 증가하게 되므로 전체 압력손실도 2.224 bar로 증가하였다. 여기서 결과로 제시하지는 않았지만 난류모델(Realizable $k-\epsilon$ model with nonequilibrium wall function, STD $k-\omega$ model)에 따라 예측된 유량 배분량은 약 $\pm 5\%$ 정도 편차를 나타내었다. 이 값은 예측오차로 생각한다면 2차 노즐부의 냉각성능에 대한 여분을 확보하는 측면에서 0.64 bar 정도의 압력손실이 증가하는 것을 감수하고 설계수정안($d=2.50$ mm)을 채택하는 것이 바람직하다고 판단된다.

그림 3에서 보듯이 상류와 하류 유로가 상단 collector에서 만날 때 각 단면 크기가 약간 차이가 있으며, 초기설계안의 경우 표 2에서 보면 단면 E와 E'에서 평균유속의 차이가 4.2 m/s로 다소 크게 나타난다. 반면 설계수정안의 경우 하류 유로의 유량이 증가하였으므로 평균 유속의 차이가 0.3m/s로 줄어들게 되므로 상단 collector에서의 측면에서 압력손실과 collector 이후의 채널로 들어가는 냉각유량의 불균일성을 감소시키는데 도움이 될 수 있다.

참고적으로 해석결과에서 나타난 몇 가지 부수적인 부분들을 살펴보았다. 하류 유로에서 1차와 2차 홀은 직경이 같지만 통과 유량은 2차 홀이 2.7배 정도 많게 된다. 따라서 설계에서 1차/2차 홀에 대해 동일한 C_d 값을 사용하더라도 홀 직후 단면을 통과하는 평균 유속의 증가로 인해 정압 차이는 2차 홀을 전후로 더 크게 발생하는 점을 감안할 필요가 있을 것이다.

하류 유로의 홀은 가능하면 차압이 걸리지 않도록 최대한 크게 설계하는 것이 유리하므로, 결과적으로 상/하류로의 유량 배분은 상류 홀의 직경을 조정함으로써 결정된다. 해석결과를 통해 얻은 C_d 값은 초기설계안과 수정안에 대해 각각 0.822와 0.845로 나타났으며, 초기 설계에서 사용된 0.8의 값과 유사하다. 상단 collector 단면(E-E')에서 정압이 같아져야 하므로 상류 홀을 설계할 때 홀 전후 정압 차이 $\Delta p_{A'-E}$ 는 하류 유로에서 발생하는 총 압력손실과 E 단면에서의 동

압을 합한 값과 같도록 홀의 직경이 결정되어야 한다. 여기서 단면 A-A'는 홀 직전의 연료링 내부지점을 의미하므로 유속은 무시할 수 있다.

$$\Delta p_{A'-E} = p_A - p_E = \frac{\rho V_E^2}{2} + \Delta P_{A-E} \quad (2)$$

$$m_{A'} = C_d A_{A'} \sqrt{2\rho \Delta p_{A'-E}} \quad (3)$$

본 연구에서 수치해석을 통해 얻은 냉각채널의 각 구간에서 발생하는 마찰 및 유동저항에 의한 압력손실 결과들은 현재 사용 중인 수력 해석(hydraulic analysis)을 통한 설계방법[5]을 검토하기 위한 비교 데이터로 활용될 수 있다.

표 1. 냉각유량 배분 해석결과

냉각유량 해석결과		초기설계안 (d=3.05mm)	설계수정안 (d=2.50mm)
상류 홀	유량계수 C_d	0.822	0.845
	정압차 $\Delta p_{A'-E}$	1.994 bar	2.826 bar
	유량	107.05 g/s (53.9%)	87.98 g/s (44.3%)
1차 하류 홀	유량	24.22 g/s (12.2%)	29.49 g/s (14.9%)
2차 하류 홀	유량	67.23 g/s (33.9%)	81.03 g/s (40.8%)

표 2. 압력손실 해석결과

압력손실 해석결과		초기설계안 (d=3.05mm)	설계수정안 (d=2.50mm)
상류유로 (A'→E')	$\Delta P_{A'-E}$	1.101 bar	2.071 bar
	E' 단면 유속	13.7 m/s	11.2 m/s
하류유로 (A→B→C→D→E)	ΔP_{A-E}	1.581 bar	2.224 bar
	E 단면 유속	9.5 m/s	11.5 m/s
	ΔP_{A-B} hole	0.204 bar (12.9%)	0.292 bar (13.1%)
	ΔP_{B-C} friction	0.402 bar (25.4%)	0.558 bar (25.1%)
	ΔP_{C-D} turning	0.380 bar (24.0%)	0.551 bar (24.8%)
ΔP_{D-E} friction	0.595 bar (37.6%)	0.822 bar (37.0%)	

3. 연료링 내부 유동 균일성 해석

3.1 설계조건 및 수치해석 방법

연료 입구포트에 의해 연료링 내부에서 원주 방향으로 발생할 수 있는 유동 불균일성을 검토하기 위해 유동해석을 수행하였다. 해석을 용이하게 하기 위해 입구포트의 중심축을 포함하는 단면을 기준으로 원주방향으로 180°에 해당하는 절반을 해석영역으로 선정하였으나, 이 경우에도 고려되어야 하는 채널 set이 65개나 된다. 따라서 2.2절에서와 같이 실제 채널 구조를 동일하게 모사하는 것은 불가능하며 3장에서 주된 관심은 연료 입구포트와 연료링 내의 유동특성이므로, 연결 홀과 채널구조는 차압 조건을 등가로 만족하는 범위 내에서 단순하게 모사하기로 하고, 하류유로가 되돌아오는 구조를 과감히 생략하였다.

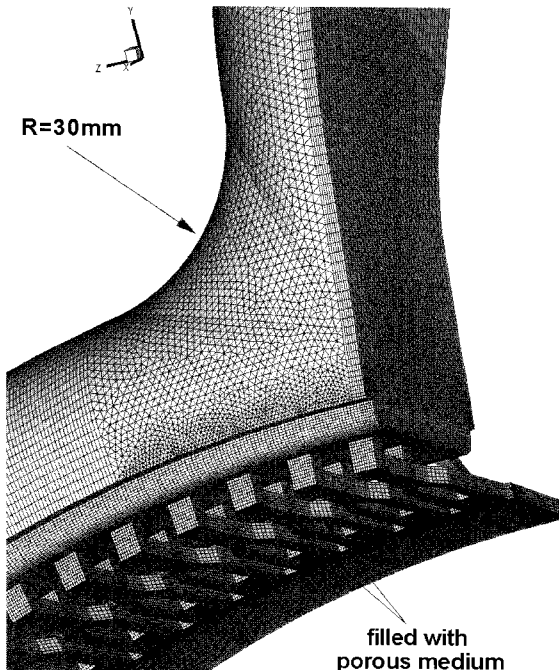


그림 5. 연료링 내부 유동해석을 위한 채널 구조 단순화 (모서리 곡률이 있는 경우)

또한 그림 5와 같이 2개의 하류 홀로 들어온 유동이 곧바로 양쪽으로 분기되어 상단

collector(그림 3의 단면 E)로 들어가게 하였다. 이 경우 실제와 같이 노즐 끝단의 collector의 영향을 고려할 수 없고 채널 길이가 줄어들게 되므로 하류 유로에서 걸리는 압력손실도 상당히 작아지게 된다. 따라서 하류 유로에서 걸리는 차압 조건을 2.3절에서 얻은 결과와 동일하게 맞춰주기 위해서 그림 5에서 보듯이 하류 유로가 분기되는 일부 영역을 다공성 매질(porous medium)로 가정하고 porosity에 의한 viscous resistance를 조정하여 차압조건을 맞추어 주었다.

유동 균일성을 향상시키기 위해 그림 5와 같이 입구포트와 연료링의 연결 부위에 30 mm의 곡률을 적용한 경우를 기본형상으로 설계하였으며, 이로 인한 유동 균일성의 효과를 살펴보기 위해 곡률이 없는 비교형상을 함께 고려하여 유동해석을 수행하였다.

3.2 해석 결과 검토

먼저 표 2에서 초기설계안에 대해 나타난 압력손실인 1.581 bar와 유사한 차압조건을 맞추기 위해 다공성 매질의 viscous resistance를 $6.74 \times 10^8 / \text{m}^2$ 로 지정하였다. 표 3의 해석결과를 보면 곡률을 갖는 기본 형상에 대해 전체적으로 1.48 bar의 압력손실이 발생하였다. 물론 이 값은 입구포트와 연료링에서 발생한 압력손실이 포함된 값이므로 채널에 의한 차압조건은 약간 낮게 지정되었겠지만 연료링 내부 유동에 대한 해석결과에는 큰 영향을 주지는 않을 것을 판단된다. 동일한 경우에 곡률이 없는 비교형상에 대한 압력손실은 2.25 bar로 나타났다. 채널부 차압은 거의 두 형상 모두 동일할 것으로 생각되므로 곡률이 없는 경우 입구포트에 의해 약 0.7 bar의 추가적인 압력손실이 발생하는 것으로 생각할 수 있다.

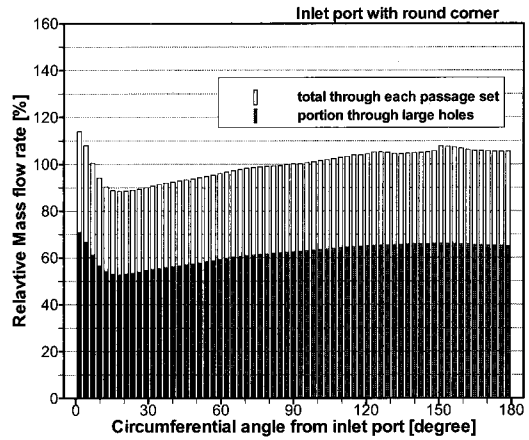
그림 6은 입구포트의 중심축을 0°로 할 때 원주방향으로 각 채널 set으로 유입되는 유량 분포에 대한 예측 결과를 나타낸 것이다. 이때 100%는 모든 채널 set으로 균일한 유량이 흘러간다고 생각할 때 각 채널 set의 단위유량인 198.5 g/s를 의미한다. 그림 6의 막대그래프에서

색칠된 부분은 상/하류간의 유량배분을 정성적으로 파악하기 위해 각 채널 set의 유량 중에 2개의 하류 홀로 유입된 유량을 표시한 결과이다. 이 결과는 채널 구조를 단순화하여 얻어진 해석 결과이므로 정량적인 값은 큰 의미가 없으나, 원주방향으로 각 채널 set의 상/하류 유량 배분이 국부적으로 큰 변화를 보이는지를 평가할 수 있다. 해석결과에서 보듯이 입구포트 바로 밑에 있는 채널 set에서 유량이 최대가 되고, 이후에 급격히 감소하여 5~6번째 채널 set에서 유량이 최소가 되었다가 원주방향으로 다시 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 입구포트의 모서리에 곡률이 있는 기본 형상의 경우에는 최대 유량편차가 $\pm 13\%$ 정도 인데 비해 곡률이 없는 비교형상에서는 유량분포의 불균일성이 훨씬 두드러져 유량편차가 약 $\pm 46\%$ 까지 증가하였다. 두 경우 모두 상/하류 유량배분 값은 대체적으로 일정하게 유지되고 있었다.

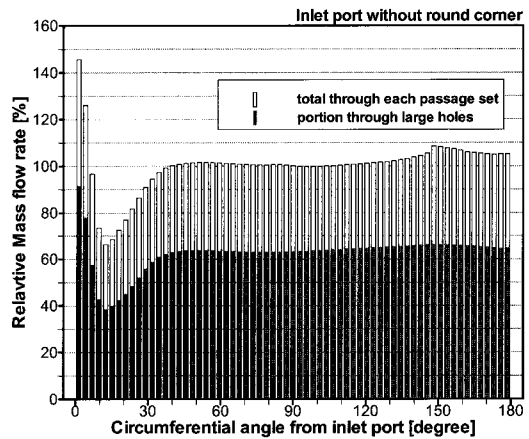
지상시험설비를 감안하여 연소실이 수평으로 놓여 있다고 가정하고 y-축 방향으로 중력가속도를 고려하였을 때 유량편차 변화는 1% 미만으로 미비하였다. 따라서 유량 분포에 미치는 중력의 영향을 무시할 수 있다고 판단된다. 또한 해석결과에서는 노즐 끝단의 collector 영향을 고려되지 않았으며, 이는 실제 경우 유량편차를 국부적으로 감소시키는 효과가 있을 것으로 사료된다.

표 3. 연료링 내부의 원주방향 유동 불균일성 해석결과

	초기설계안 (d=3.05mm) 차압조건		설계수정안 (d=2.5mm) 차압조건
	with round corner	w/o round corner	with round corner
압력 손실 (입구-단면 F)	1.48 bar	2.25 bar	2.16 bar
최대유량편차 (단면 F)	$\pm 13\%$	$\pm 46\%$	$\pm 10\%$



(a) inlet port with round corner



(b) inlet port without round corner

그림 6. 입구포트 모서리 형상에 따른 원주방향 냉각유량 분포 비교

위와 같은 유량 불균일성의 원인을 파악하기 위해 1차 하류홀(그림 3의 단면 A1)의 중심축을 포함하는 수직 단면에서 모서리 곡률이 없는 비교형상의 속도분포를 그림 7에 나타내었다. 곡률이 없는 경우에는 입구포트와 연결된 연료링의 모서리 부근에서 재순환 유동이 형성되므로 수직 방향 유동 속도가 크게 증가하고 곧바로 연료링 아래 벽면에 부딪히게 된다. 반면 모서리 곡률이 있는 경우에는 곡률을 따라 완만하게 연료링 내부로 유입되므로 재순환 영역이 형성되지 않았다. 따라서 재순환 유동의 존재는 표 3과 같이 0.7bar의 추가적인 압력

손실을 야기하는 직접적인 원인이 된다.

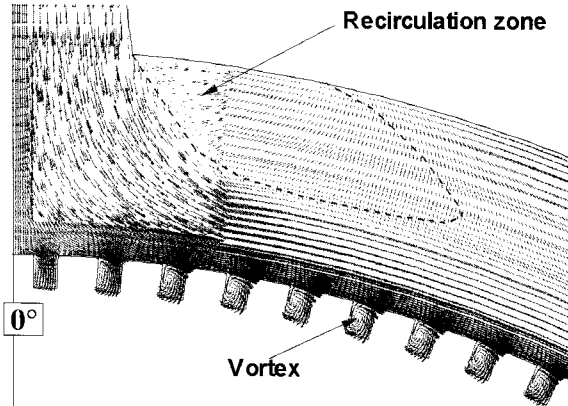


그림 7. 2차 하류홀의 중심축을 포함하는 수직단면에서 연료링 내부 속도장 (모서리 곡률이 없는 경우)

그림 7의 결과를 보면 입구포트 바로 아래에 위치한 하류 홀은 입구 포트의 수직방향 동압 성분이 그대로 유지되어 들어가므로 상대적으로 유량이 커지게 된다. 그러나 이후에 유동이 연료링의 아래 벽면을 따라 원주방향으로 진행되면서 홀의 중심축과 수직한 속도를 갖게 되므로 공동 유동(driven cavity flow)과 같이 홀 내부에서 와류(vortex)가 발생하게 되고 C_d 값이 감소하게 된다. 이러한 현상은 입구 포트로부터 5~6번째에 위치한 홀에서 최대가 되고, 그 이후에는 벽면에서의 속도가 감소하므로 와류(vortex)의 크기도 점차 감소하여 60° 이후에는 공동 현상이 거의 사라지게 된다. 모서리 곡률이 있는 기본 형상의 경우에는 재순환 유동이 없이 완만한 팽창 유동을 따라 홀 주위의 유속이 감소되므로 와류의 강도가 상대적으로 약해지고 그림 6(b)와 같이 원주 방향 유량 편차가 감소하는 요인이 된다.

마지막으로 2.3절의 설계수정안($d=2.5\text{mm}$)과 같이 상류 홀의 직경이 감소하여 전체 압력손실이 약 2.2 bar로 증가한 영향을 살펴보았다. 이때 상류 홀에 해당하는 사각단면 덕트의 크기를 조정하여 격자를 다시 생성해야하지만 현재 유량 배분의 정량적 값은 큰 의미가 없으므로 동일한 격자에서 viscous resistance만 $2.2 \times 10^9 / \text{m}^2$ 로 증가시켜 전체적인 차압조건을 맞춰 주었다. 표 3의 해석결과를 보면 전체 차

압은 2.16 bar 정도로 기존 차압조건에 비해 약 0.68 bar가 증가하였으며, 최대 유량 편차가 $\pm 13\%$ 에서 $\pm 10\%$ 로 줄었다. 따라서 설계수정안($d=2.5\text{mm}$)은 유량 균일성 측면에서도 다소 유리할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 재생냉각 연소기에서 연료가 공급되어 양 방향 냉각채널로 분기되는 유로의 상세 설계를 위해 수치해석을 수행하였다. 먼저 상/하류 유로의 각 유동영역에서 발생하는 압력손실과 유량분포를 정량화하였으며, 상류 홀 직경에 대한 설계수정안을 제시하였다. 그 다음으로 입구 포트와 연료링 내의 유동 특성에 의해 원주방향으로 야기되는 유동 불균일성을 검토하였으며, 입구포트와 연료링의 연결부위에 곡률을 줌으로써 유량 분포를 보다 균일하게 만드는 방안을 검토하였다. 본 연구에서 시도한 냉각 유로의 설계 방식은 향후 개발될 75톤급 재생냉각 연소기에도 직접적으로 적용될 예정이며, 본 연구의 해석결과는 수력해석(hydraulic analysis)을 이용한 냉각 유로 설계기법을 검증하기 위한 비교 데이터로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

1. 최환석, 한영민, 유철성, 김성구, 조광래, "추력 30톤 LOx/Kerosene 재생냉각 연소기 개발현황", 한국추진공학회 추계학술대회, 2007.
2. 김종규, 한영민, 서성현, 이광진, 최환석, "지상연소 시험용 실물형 재생냉각 연소기(확대비 12)의 설계 및 제작", 한국추진공학회 추계학술대회, 2007.
3. 한영민, 김종규, 이광진, 김성구, "75톤급 엔진 비행용 연소기 개념설계 보고서", KARI-CCT-DR-070405, 한국항공우주연구원, 2007.
4. Idelchik, I. E., Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd edition, Begell House.
5. 김홍집, "로켓연소기의 재생냉각 채널에서의 수력학적 특성 파악을 위한 해석적 검토", KARI-CCT-TM-2007-011, 한국항공우주연구원, 2007.