

직선형 냉각채널에서의 압력손실에 대한 실험적 연구

윤원재^a · 안규복^{a,*} · 김홍집^bAn Experimental Study on Pressure Loss in
Straight Cooling ChannelsWonjae Yoon^a · Kyubok Ahn^{a,*} · Hongjip Kim^b^aSchool of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Korea^bDepartment of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Korea^{*}Corresponding author. E-mail: kbahn@cbnu.ac.kr

ABSTRACT

A regeneratively-cooled channel in a liquid rocket engine is used to effectively cool a combustion chamber inner wall from hot combustion gas, and the heat transfer/pressure loss characteristics should be predicted in advance to design cooling channels. In the present research, five cooling channels with different geometric dimensions were designed and the channels were respectively manufactured using cutter and endmill. By changing coolant velocity and downstream pressure, the effects of manufacturing method, channel shape, and flow condition on pressure losses were experimentally investigated and the results were compared with the analytical results. At same channel shape and flow condition, the pressure loss in the channel machined by the cutter was lower than that by the endmill. It was also found that the pressure loss ratio between the experimental result and the analytical data changed with the channel shape and flow condition.

초 록

액체로켓엔진에서의 재생냉각 채널은 높은 온도의 연소가스로부터 연소실 내벽을 효율적으로 냉각하기 위해 사용되며, 냉각채널 설계를 위해서는 열전달 특성과 압력손실 특성을 미리 예측하여야 한다. 본 연구에서는 서로 다른 형상을 갖는 5개의 냉각채널을 설계하고, 커터와 엔드밀로 채널을 제작하였다. 채널을 흐르는 유속과 후단 압력조건을 달리하여 가공방법, 채널 형상, 유동조건에 따른 압력손실을 실험적으로 측정하여 해석결과와 비교를 수행하였다. 동일 형상 및 유동조건에서 커터로 가공된 채널이 엔드밀로 가공된 채널보다 압력손실이 적었다. 또한 채널 형상, 유동조건에 따라 실험결과와 해석결과의 압력손실 비가 달라짐을 확인할 수 있었다.

Key Words: Regenerative Cooling(재생냉각), Cooling Channel(냉각채널), Pressure Loss(압력손실), Friction Coefficient(마찰계수), Surface Roughness(표면 거칠기)

Received 10 June 2016 / Revised 8 July 2016 / Accepted 13 July 2016

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

A_{de} : designed channel area
 AR_{de} : designed channel aspect ratio
 $D_{h,de}$: designed channel hydraulic diameter
 $D_{h,me}$: measured channel hydraulic diameter
 H_{de} : designed channel height
 H_{me} : measured channel height
 L : channel length
 P_{down} : pressure at the downstream point
 P_{up} : pressure at the upstream point
 V : coolant velocity in a cooling channel
 W_{de} : designed channel width
 W_{me} : measured channel width
 ΔP : pressure loss
 ρ : liquid density

1. 서 론

액체로켓엔진의 연소실은 3,000 K 이상의 고온, 고압의 연소가스에 노출되기 때문에 오랜 시간동안 안정적인 작동을 위해서는 냉각이 필수적이다. 연소실을 냉각, 보호하기 위해 사용되는 다양한 방법들 중 재생냉각이 가장 일반적이며 효율적인 것으로 알려져 있다. 또한 연소실 보호를 위해 재생냉각에 더불어 열차폐 코팅, 막 냉각 등의 다른 방법을 추가적으로 적용하고 있다[1-3].

재생냉각 채널은 추진제 탱크에서 분사기로 추진제를 공급하기 위한 통로가 되면서 연소실을 냉각시키는 역할을 수행하게 된다. 연소실 내벽은 열전도 성능이 뛰어난 소재를 사용하여 내부의 열을 냉각재로 빨리 전달함으로써 내부 벽면온도를 소재의 녹는 점 온도 이하로 낮추어야 하며, 외벽은 고압을 구조적으로 견딜 수 있는 소재를 사용하게 된다[4].

냉각의 관점에서 재생냉각 채널을 흐르는 냉각재의 속도가 빠를수록, 냉각재가 채널에 닿는 표면적이 클수록 열전달에 유리하다. 냉각재의 속도가 빠르게 되면 채널에서 발생하는 압력손실이 증가하게 되며, 표면적을 늘리기 위해서는 채널의 수 및 높이를 증가시켜야 하지만 이는

제작 비용 및 연소실의 무게에 악영향을 주게 된다. 따라서 채널의 너비와 높이는 적절한 타협점을 가지고 설계된다[5,6]. 또한 터보펌프 방식 액체로켓엔진의 펌프 토출압력은 규격에 따라 미리 정해져 있기 때문에 최적의 연소실 설계를 위해서는 재생냉각 채널에서 발생하는 압력손실을 정확히 예측할 필요가 있다[7,8].

냉각채널의 용도적 특수성 때문에 국내에서 수행된 냉각채널에 대한 기본적 연구는 많이 부족한 편이다. 국내에서는 액체로켓을 개발하는 한국항공우주연구원을 중심으로 냉각채널에 대한 연구들이 진행되어 왔으며, 해외에서는 열전달 및 압력손실에 대한 실험적, 수치적 연구결과들이 많이 발표되어 왔다. 압력손실에 대한 기존의 연구결과들을 살펴보면 한국항공우주연구원에서는 냉각채널의 분기 및 병합에 따른 국부적인 마찰손실에 대한 연구를 수행하였으며[9], 75톤급 연소기 재생냉각 채널의 수류실험에서 계측된 채널 내 압력손실과 해석결과를 비교하여 두 값에 다소 차이가 있음을 보고하였다[10]. Wang 등[11]은 형상과 거칠기에 따른 채널 내 열전달과 압력손실에 관한 연구를 수행하여, 채널 내 거칠기 증가가 열전달 및 압력손실을 증가시키는 결과를 보여주었다.

냉각채널 가공을 위해 커터와 엔드밀이 일반적으로 사용된다. 가공의 편이 및 요구 정밀도를 맞추기 위해 직선형 채널의 경우 커터가, 곡선형 채널의 경우 엔드밀이 주로 사용된다. 유체역학적인 관점에서 살펴보면 냉각채널의 압력손실에 영향을 주는 요소는 채널 내 유속, 채널의 너비/높이와 같은 형상, 그리고 표면 거칠기 등이다[12,13]. 많은 유체역학 서적 및 자료들에서 마찰손실에 따른 유체의 압력손실에 대한 경험식들을 제시하고 있지만, 실제 냉각채널을 모사한 형상에 대해 직접적으로 활용할 수 있는 자료는 국내에서 찾기가 힘든 상황이다. 따라서 본 연구에서는 커터와 엔드밀로 가공된 직선형 냉각채널에서 후단 압력, 유속 조건, 채널 형상에 따른 압력손실을 확인하여 기존 해석방법으로 수행한 결과와 비교를 수행하였다. 본 연구결과는 재생냉각 채널을 설계하는데 있어서 실질적인 데이

터베이스를 제공할 수 있을 것이라 기대된다.

2. 관련 이론

채널 내 압력손실은 유체역학적으로 해석할 때 마찰계수, 채널 내 유속, 밀도의 함수로 표현된다. 일반적으로 관 내 유동에 의한 압력손실은 Eq. 1과 같이 표현되는데 이 때 전체 손실(ζ_{ov})은 벽면 마찰에 의한 손실(ζ_{fr})과 유동방향이나 단면적이 급격히 변하면서 생기는 국부적인 손실(ζ_{loc})로 구분할 수 있다. 재생냉각 채널에서는 두 손실이 모두 발생하지만 상당한 손실이 마찰에 의해 발생하며[10] 국부적인 손실을 실험적으로 측정하는 것은 매우 많은 노력과 시간을 필요로 하기 때문에, 본 연구에서는 벽면 마찰에 의한 손실에 대해 초점을 두고 연구를 수행하였다.

$$\Delta P_{ov} = \zeta_{ov} \frac{\rho V^2}{2}, (\zeta_{ov} = \zeta_{loc} + \zeta_{fr}) \quad (1)$$

$$\zeta_{fr} = f(\Delta, D, Re) = \lambda_{non, cir} \frac{L}{D_h} \quad (2)$$

마찰에 의한 손실계수는 관의 거칠기, 직경, 그리고 관을 흐르는 유체의 레이놀즈 수의 함수로 Eq. 2와 같이 표현할 수 있다. 냉각채널은 사각 단면과 유사하기 때문에 관의 지름 대신 수력직경을 사용한다. 마찰 손실계수 역시 원형단면을 가정하기 때문에 사각단면에서는 보정계수($k_{non, cir}$)를 사용해야 한다. 최종적으로 재생냉각 채널에서 벽면 마찰에 의한 압력손실은 Eq. 3과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta P_{fr} = k_{non, cir} \lambda_{cir} \frac{L}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad (3)$$

$$\lambda_{cir} = 0.3164 / Re^{0.25} \quad (4 \times 10^3 < Re < 10^5)$$

$$\lambda_{cir} = \frac{1}{(1.8 \times \log Re - 1.64)^2} \quad (Re > 4 \times 10^3) \quad (4)$$

$$\lambda_{cir} = 0.11 \left(\overline{\Delta} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}, \quad \overline{\Delta} = \Delta / D_h \quad (5)$$

만약 채널의 표면이 매우 매끄러운 경우 (smooth wall) 원형단면에서의 마찰계수(λ_{cir})는 난류유동에서 레이놀즈 수에 따라 Eq. 4를 이용하여 구할 수 있다. 균일한 거칠기(uniform roughness wall)를 가지고 있다고 가정할 경우에는 Eq. 5를 사용할 수 있다. 여기서 사용되는 거칠기($\overline{\Delta}$)는 수력직경을 감안한 상대 거칠기를 의미한다. Eq. 5는 공학적인 오차를 고려한 마찰계수를 구하는 식이며, 좀 더 구체적으로는 참고문헌[13]의 112쪽 Table 값을 이용하여 구할 수 있다. Eq. 5에 사용되는 표면 거칠기(Δ)는 유효 표면 거칠기(grain roughness)를 의미하며 Rz로 측정되는 데이터에 0.978을 곱하여 사용한다 [13,14].

3. 실험장치 및 방법

3.1 냉각채널 설계 및 제작

본 연구에서는 실제 재생냉각 채널의 형상을 모사할 수 있도록 서로 다른 형상을 가진 5개의 채널을 설계, 제작하였다. 또한 가공방법에 따른 영향을 살펴보기 위해 5개의 채널을 커터와 엔드밀로 가공하여 제작하였다. 설계된 냉각채널의 형상 데이터와 실제 측정된 형상 데이터를 Table 1에 정리하였다. CH1, CH2, CH3은 동일한 채널 너비에서 높이를 0.5 mm씩 증가시켰으며, CH4, CH2, CH5는 동일한 채널 높이에서 너비를 1.0 mm씩 증가한 형상을 갖는다. 이는 동일한 유속 조건에서 채널의 단면 비, 면적 차이에 따른 압력손실의 변화를 살펴보기 위함이다. 채널 너비와 높이에 대하여 설계치수 대비 ± 0.05 mm 공차 내에서 제작이 완료되었다. 채널의 너비와 높이는 3차원 측정기를 이용하여 길이 방향으로 5 부분을 선택하여 측정된 값을 평균하였다.

Table 1의 채널 설계 데이터를 이용하여 실험 조건에 따른 압력손실 데이터를 예측하기 위해 해석을 수행하였다. Eq. 4의 smooth wall을 가정하여 계산을 수행하여 Table 2에 정리하였다. 사용 유체는 293.15 K, 1.01 bar의 상태의 물로 가정하였다. 유속의 제공에 비례하여 압력손실이

Table 1. Designed and measured geometric dimensions of the cooling channels.

Specification	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5
W_{dc} [mm]	2.0	2.0	2.0	1.0	3.0
H_{dc} [mm]	1.5	2.0	2.5	2.0	2.0
A_{dc} [mm ²]	3.0	4.0	5.0	2.0	6.0
AR_{dc} [mm]	0.8	1.0	1.3	2.0	0.7
$D_{h,dc}$ [mm]	1.71	2.00	2.22	1.33	2.40
L [mm]	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
$k_{non,cir}$	1.01	1.00	1.01	1.03	1.01
Cutter					
W_{me} [mm]	2.0158	2.0076	2.0155	1.0040	3.0222
H_{me} [mm]	1.5093	1.9764	2.4534	2.0382	2.0286
$D_{h,me}$ [mm]	1.7262	1.9919	2.2130	1.3453	2.4277
Endmill					
W_{me} [mm]	1.9849	2.0028	2.0029	1.0375	3.0056
H_{me} [mm]	1.5670	2.0797	2.5860	2.0885	2.0693
$D_{h,me}$ [mm]	1.7513	2.0405	2.2574	1.3863	2.4511

증가함을 알 수 있으며, 유속이 10 %인 경우 압력손실이 적어서 압력계의 정확도를 감안할 때 측정된 데이터의 신뢰도에 문제가 있을 것으로 예상되었다.

채널 가공방법에 따라 표면 거칠기는 달라지게 된다. Eq. 5에서와 같이 표면 거칠기는 압력손실에 영향을 주기 때문에 이에 대한 검토를 수행하였다.

설계된 채널의 깊이가 깊기 때문에 조도 측정기를 이용하여 측정하기가 어려우며 따라서 모사 시편에 동일한 틀을 사용하여 얇게 가공한 후 아래쪽 가공면의 표면 거칠기를 측정하는 방법을 사용하였다. Table 2에 측정된 데이터를 정리하였으며, 커터와 엔드밀 모두 매우 정밀한 가공이 가능함을 알 수 있었다. 예상과는 달리 커터로 가공된 면이 조금 더 좋은 표면 거칠기를 갖게 되었다. 하지만 이를 일반화시키기에는 아직 데이터가 부족하다고 생각된다.

설계된 2차원 도면과 3차원 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 2차원 도면의 아래 채널부터 CH1이

Table 2. Experimental conditions and calculated data for the designed cooling channels.

Item	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5
V [%]	Mass flow rate [kg/s]				
10	0.0299	0.0399	0.0499	0.0200	0.0599
20	0.0599	0.0799	0.0998	0.0399	0.1198
30	0.0898	0.1198	0.1497	0.0599	0.1797
V [%]	Reynolds number				
10	17119	19972	22191	13315	23966
20	34238	39944	44382	26629	47933
30	51357	59916	66573	39944	71899
V [%]	λ_{cir} - smooth wall				
10	0.0277	0.0266	0.0259	0.0295	0.0254
20	0.0233	0.0224	0.0218	0.0248	0.0214
30	0.0210	0.0202	0.0197	0.0224	0.0193
V [%]	Pressure loss [bar] - smooth wall				
10	0.8133	0.6654	0.5865	1.1339	0.5367
20	2.7355	2.2381	1.9729	3.8141	1.8052
30	5.5615	4.5504	4.0110	7.7545	3.6702

Table 3. Surface roughness measurement data.

Item	Ra [μ m]	Ry [μ m]	Rz [μ m]	Rq [μ m]	Δ [μ m]
Cutter1	0.39	1.64	1.36	0.47	1.33
Cutter2	0.34	1.53	1.18	0.41	1.15
Cutter3	0.47	2.17	1.69	0.55	1.65
Averged Cutter data	0.365	1.585	1.268	0.442	1.240
Endmill1	0.40	2.76	1.78	0.54	1.74
Endmill2	0.44	2.47	1.64	0.53	1.60
Endmill3	0.41	2.48	1.89	0.50	1.85
Averged Endmill data	0.417	2.570	1.770	0.523	1.731

되며, 한 평판시체에 5개의 다른 채널이 가공되도록 설계, 제작되었다. 평판시체의 아랫면은 STS30400 소재로 이 부분에 채널이 가공되며, 윗면은 STS31800 소재가 사용되었다. 실제 연소실의 냉각채널은 높은 열전달을 위해 구리합금

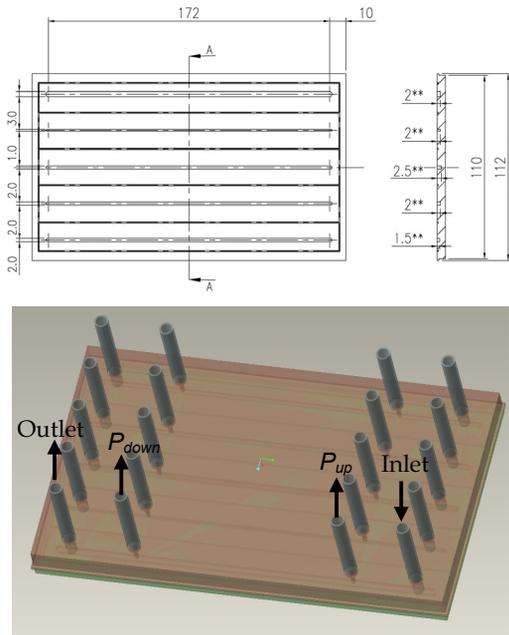


Fig. 1 2D drawing and 3D model of the straight cooling channel specimen.

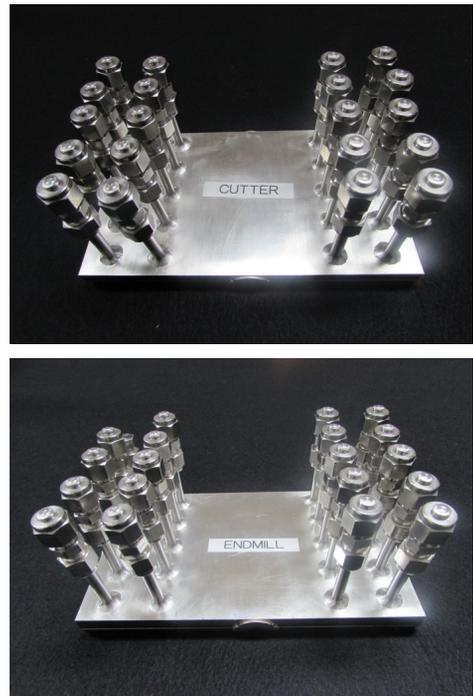


Fig. 2 Photographs of the manufactured straight cooling channel specimens.

과 스테인리스 스틸로 제작되지만 본 연구에서는 열전달을 고려하지 않기 때문에 두 금속을 모두 스테인리스 스틸 소재를 사용하였다. 두 면은 연소실 제작공정과 동일하게 브레이징으로 용접되었다. 윗면에는 채널에 냉각재를 유입할 수 있는 입구, 출구 튜브가 용접되며, 채널 사이의 압력은 Fig. 1의 P_{up} 과 P_{down} 위치에 설치된 튜브를 통해 차압을 측정하도록 하였다. 결국 두 압력 측정용 튜브 사이의 길이가 채널길이 L 이 된다. 각 채널의 형상이 압력 측정 위치에 따라 변하지 않아 두 압력 측정 위치에서의 동압은 동일하므로 이에 대한 보정은 고려하지 않았다. 제작된 평판시체의 사진을 Fig. 2에 나타내었다.

3.2 실험조건 및 방법

유속과 출구압력의 영향을 확인하기 위해 실험은 측정된 채널 형상 데이터를 바탕으로 채널 내 유속을 10, 20, 30 %로 바꾸어가며, 그리고 채널 출구압력을 10, 30, 50 bar로 변경시키면서 수행되었다. 케로신/액체산소를 추진제로 사용하는 open-cycle 액체로켓엔진의 경우 케로신이 냉

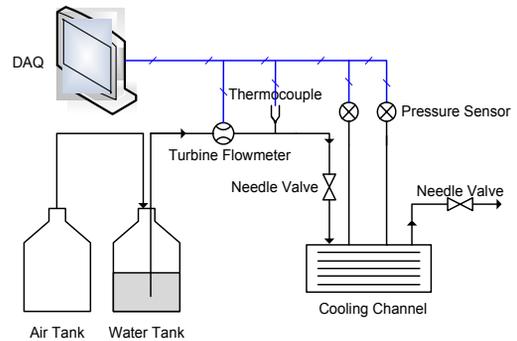


Fig. 3 Experimental setup.

각재로 사용되지만 본 연구에서는 시험의 편의를 위해 물을 모사 냉각유체로 사용하였다.

실험장치는 Fig. 3과 같이 구성되어 있다. 유량은 터빈 유량계(Kometer, NK-250)를 이용하여 측정하였으며, 압력은 100 barg까지 계측이 가능한 압력센서(Sensys, PSH model)를 사용하였다. 또한 압력손실에는 유체의 점성계수가 큰 영향을 주기 때문에 K-type 열전대를 설치하여 유체

의 온도를 함께 측정하였다. 측정된 데이터는 500 Hz의 샘플링 속도로 NI-cDAQ를 이용하여 저장하였다. 실험은 각 조건 당 2회씩 반복하였으며, 0.4 초의 압력, 유량, 온도 측정값의 평균값을 사용하였다.

4. 실험 결과

채널 내 유속에 따른 압력손실 데이터를 Fig. 4에 도시하였다. 채널 출구압력 10, 30, 50 bar에 대하여 같은 유속에서 2번씩 실험을 수행하였기 때문에 각 채널에서 같은 유속에서의 데이터는 6개가 표현되어 있다. Eq. 3에서 예측할 수 있듯이 압력손실은 유속의 제곱에 비례하며 수력직경에 반비례하기 때문에, 유속이 증가함에 따라 모든 채널에서의 압력손실이 2차함수와 같이 증가하고 있으며 같은 유속에서 CH4의 압력손실이 가장 크고 CH5의 압력손실이 가장 작게 측정됨을 확인할 수 있다. 하지만 커터와 엔드밀 채널의 결과를 비교하면 동일한 형상과 유속에서 엔드밀로 가공된 채널의 압력손실이 더 크게 측정되고 있음을 알 수 있다. 실험 시 물의 온도는 평균 286.5 K, 표준편차 0.9 K이었다.

보다 정량적인 분석을 위해서 측정 및 계산된 압력손실, 수력직경, 채널 길이, 밀도, 보정계수 $k_{non,cir}$ 등을 Eq. 3에 대입하여 실험적 마찰계수(λ_{cir})를 계산한 후, Eq. 4, Eq. 5 그리고 참고문헌 [13]의 Table에서 얻어지는 마찰계수 값들과 비교를 수행하였다. Fig. 5는 실험에서 계산된 마찰계수와 측정된 레이놀즈 수/표면 거칠기 값을 이용하여 참고문헌[13]의 Table에서 얻어지는 마찰계수의 비를 정리한 그림이다. 실험에서 얻어진 마찰계수는 2번 반복 실험결과의 평균값을 사용하였다. Fig. 4에서 예측할 수 있었듯이 동일한 채널 형상에서 엔드밀로 가공된 채널의 마찰계수 비가 더 값을 갖는다. 또한 CH3의 경우를 제외하면 수력직경이 커질수록 마찰계수 비가 증가하는 현상을 나타내고 있다.

유속과 출구압력의 변화에 따라 마찰계수 비가 약간 달라지긴 하지만 큰 차이를 보이지 않

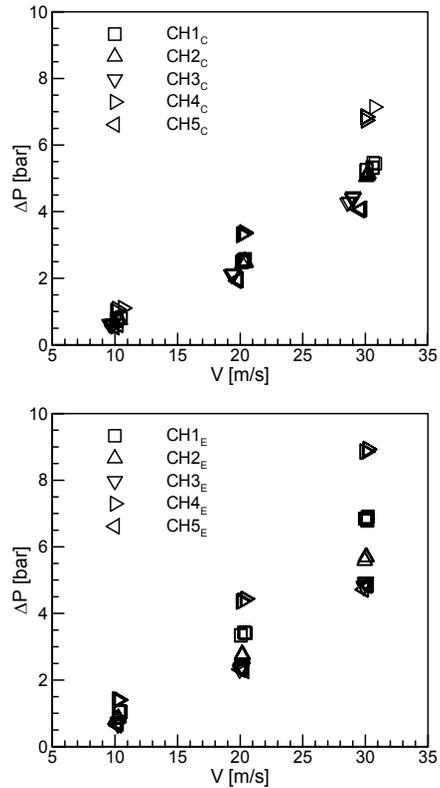


Fig. 4 Pressure loss data as a function of the coolant velocity (upper: cutter, lower: endmill).

았다. Fig. 5에서 점선 원으로 나타낸 데이터는 출구압력 10 bar, 유속 10 % 조건에서 측정된 데이터로 Table 2에서 알 수 있듯이 압력손실이 워낙 작기 때문에, 또한 100 barg까지 측정이 가능한 압력센서가 사용되었기 때문에 압력 측정의 오차와 실험 오차가 큰 차이로 표현될 수 있다. 따라서 이후 실험 데이터의 분석에서 유속 10 % 조건의 결과는 사용하지 않았다.

유속과 출구압력의 영향을 살펴보기 위해 엔드밀로 가공된 CH2에서의 마찰계수 비를 Fig. 6에 도시하였다. 여기에서는 해석 마찰계수의 영향을 살펴보기 위해 Eq. 4, Eq. 5, 그리고 참고문헌[13]의 Table에서 얻어지는 마찰계수를 모두 사용하였다. 마찰계수 비는 출구압력이 커질수록 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 물의 밀도가 온도만의 함수로 계산되었지만, 실제로는 압력의 증가로 인하여 밀도가 약간 증가하는데 이를 고

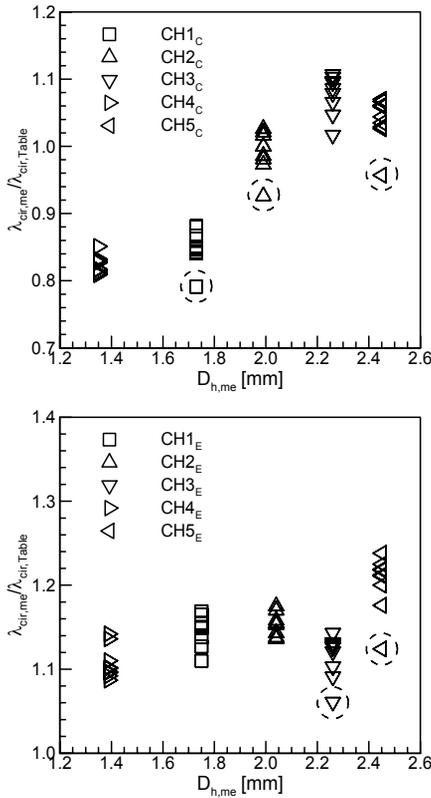


Fig. 5 Ratio of friction coefficient measured from the present tests by friction coefficient obtained from the table (upper: cutter, lower: endmill)[13].

려하지 않았기 때문으로 생각된다. Eq. 4나 참고 문헌[13]의 Table로 비교한 마찰계수 비의 경우 유속의 증가에 따라 증가하는 결과가 나타나지만, Eq. 5의 경우는 반대로 약간 감소한 결과를 보여주고 있다. 또한 마찰계수 비의 경우도 다른 경우와 달리 크게 작은 값을 나타내고 있다. Eq. 5는 참고문헌[13]의 Table을 간략화한 식으로 보다 정밀한 계산을 위해서는 Table을 직접 이용하는 것이 오차를 줄이는 방법으로 판단된다.

보다 구체적으로 채널 너비와 높이에 따른 영향을 살펴보기 위해 동일한 채널 높이에서 너비에 따른 마찰계수 비의 결과를, 동일한 채널 너비에서 높이에 따른 마찰계수 비의 결과를 Fig. 7에 정리하였다. 커터와 엔드밀로 가공된 채널 모두 기울기가 좀 다르긴 하지만 동일한 채널 높이에서 너비가 증가함에 따라 마찰계수 비는

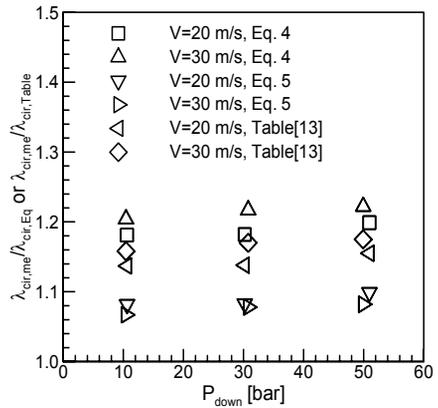


Fig. 6 Ratio of friction coefficient measured from the present tests by analytical friction coefficients.

증가하는 경향성을 나타내었다. 이에 반해 동일한 채널 너비에서 높이가 증가함에 따라 커터로 가공된 채널의 마찰계수 비는 증가하지만 엔드밀의 경우는 약간 증가했다 감소하는 결과를 나타내었다. 엔드밀 채널 가공의 경우 채널 아랫면 끝단의 곡면을 줄이기 위해 면이 평평한 엔드밀 (flat endmill)을 사용하였지만 공구의 보호 및 원활한 절삭을 위해 엔드밀 끝단은 0.1 - 0.2 mm의 곡률 반경을 갖게 된다. 동일한 채널 너비의 경우 높이에 상관없이 동일한 엔드밀을 사용하게 되는데 높이가 낮을 경우 단면적 대비 곡률 반경에 의한 면적 감소가 클 것이고 높이가 높을 경우 면적 감소는 작을 것이다. 이러한 영향이 마찰계수 비에 영향을 주었을 것으로 생각되지만 표본이 적기 때문에 일반화시키기에는 아직 무리가 있다.

Fig. 5와 7에서 살펴보았듯이 커터로 가공된 채널에 비해 엔드밀로 가공된 채널의 마찰계수 비가 큼을 알 수 있다. 이는 측정된 엔드밀의 표면 거칠기가 상대적으로 큰 것에서 이유를 찾을 수도 있겠지만, 현재 실험에서의 레이놀즈 수나 절대적인 표면 거칠기의 크기를 감안할 때 이 정도 표면 거칠기의 차이는 마찰계수에 거의 영향을 주지 못한다. 또한 표면 거칠기는 아랫면의 데이터를 측정된 것으로 측정이 불가능한 옆면이나 다른 소재로 부착되는 윗면의 값은 고려되지 않았다. 따라서 실제적으로 마찰계수 비에 영

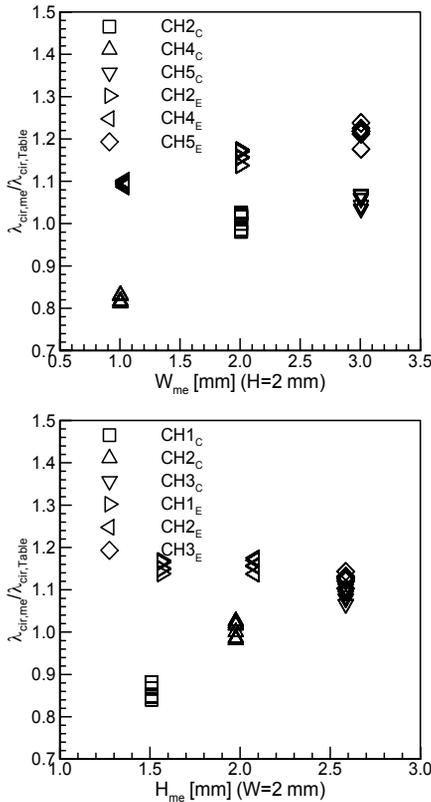


Fig. 7 Ratio of friction coefficient measured from the present tests by friction coefficient obtained from the table[13] as a function of channel width and channel height.

향을 주는 요인은 가공방법에 의한 단면적의 차이로 생각된다. 앞에서 언급하였듯이 커터에 비해 엔드밀의 공구 곡률 반경이 크기 때문에 채널 아랫면 끝단의 높이는 실제 설계값 보다 작았을 것으로 예상된다. 3차원 측정기로 높이를 측정하지만 프로브의 크기로 인해 채널 높이는 중간 위치를 기준으로 측정되므로 측정된 높이가 채널 단면적의 전체 높이로 판단하기는 어려울 것으로 생각되기 때문이다.

데이터를 논문에 나타내지는 않았지만 채널의 형상비에 따른 경향성은 두 시편 채널 모두에서 발견할 수가 없었다. 마지막으로 많은 형상 측정 및 실험의 불확실성에도 불구하고 본 연구결과에서 얻어진 마찰계수 비를 선형회귀분석을 통하여 다음과 같은 경험식을 도출하였다. 경험식

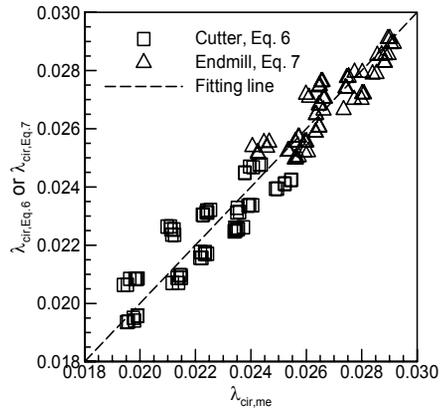


Fig. 8 Empirical equations for friction coefficients obtained from the present tests.

에서 알 수 있듯이 지수의 값들이 매우 작긴 하지만 레이놀즈 수, 출구압력, 수력직경이 커짐에 따라 마찰계수 비가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

$$\frac{\lambda_{cir,cutter}}{\lambda_{cir,Table}} = 0.4136 Re^{0.0625} \left(\frac{P_{down}}{P_{1atm}}\right)^{0.0072} \times \left(\frac{D_h}{D_{h,CIA}}\right)^{0.4453}, R^2 = 0.8881 \quad (6)$$

$$\frac{\lambda_{cir,endmill}}{\lambda_{cir,Table}} = 0.7192 Re^{0.0376} \left(\frac{P_{down}}{P_{1atm}}\right)^{0.0124} \times \left(\frac{D_h}{D_{h,CIA}}\right)^{0.0879}, R^2 = 0.5817 \quad (7)$$

5. 결 론

채냉각 채널에서 가공방법, 채널 형상, 유동 조건에 따른 압력손실을 실험적으로 측정하여 해석결과와 비교를 수행하였다. 실제 채냉각 채널의 형상을 모사할 수 있도록 서로 다른 형상을 가진 5개의 채널을 설계, 제작하였다. 그리고 가공방법에 따른 영향을 살펴보기 위해 5개의 채널을 커터와 엔드밀로 가공하여 제작하였다. 또한 유속과 출구압력의 영향을 확인하기 위해 채널 내 유속을 10, 20, 30 %로 바꾸어가며, 채널 출구압력을 10, 30, 50 bar로 변경시키면서

실험을 수행하였다.

커터로 가공된 채널에 비해 엔드밀로 가공된 채널에서의 압력손실이 크게 발생함을 확인하였으며 이는 가공방법에 의한 원인으로 판단되었다. 채널의 수력직경, 출구압력, 유속이 커질수록 마찰계수 비가 증가함을 알 수 있었으며 이에 대한 보정 경험식을 유도하여 제안하였다. 현재 우리나라 액체로켓엔진의 경우 채널 가공 시 대부분 엔드밀을 사용하므로, 채널 설계/해석 시 대략 10% - 20% 정도의 마진을 감안하여 설계하는 것이 필요하다고 생각된다.

본 연구는 직선형 냉각채널에 대해서만 수행되었지만 실제 열유속이 높은 연소실의 경우는 나선형 채널이 가공되어 사용되고 있다. 현재 본 연구와 동일한 단면 형상을 갖는 15°, 30° 나선형 채널들을 갖는 실린더시체를 가공하여 실험을 수행 중이며, 이에 따라 나선형 각을 갖는 냉각채널에서의 압력손실에 대한 보정도 곧 이루어질 것이다.

후 기

본 논문은 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2014R1A1A1002057, NRF-2015M1A3A3A02011346)을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Huzel, D.K. and Huang, D.H., *Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines*, 2nd ed., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington D.C., U.S.A., 1992.
- Yang, W. and Sun, B., "Numerical simulation of liquid film and regenerative cooling in a liquid rocket," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 54, No. 2, pp. 460-469, 2013.
- Kim, H.J. and Choi, H.S., "Investigation of Characteristics for Cooling Parameters of a Combustor in Liquid Rocket Combustors," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 14, No. 5, pp. 45-50, 2010.
- Sutton, G.P., *Rocket Propulsion Elements*, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., U.S.A., 1992.
- Ulas, A. and Boysan, E., "Numerical analysis of regenerative cooling in liquid propellant rocket engines," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 187-197, 2013.
- Ryu, C.S., Choi, H.S. and Lee, D.J., "Structure design of regenerative cooling chamber of liquid rocket thrust chamber," *The Korean Society For Aeronautical And Space Sciences*, Vol. 33, No. 12, pp. 109-116, 2005.
- Lee, J. and Kim, J., "A System Analysis of the Turbopump Type Liquid Rocket Engine," *The Korean Society For Aeronautical And Space Sciences*, Vol. 32, No. 5, pp. 109-115, 2004.
- Hong, S.S., Kim, J.S., Kim, D.J. and Kim, J.H., "Performance Test of Turbopump Assembly for 75 Ton Liquid Rocket Engine Using Model Fluid," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 56-61, 2011.
- Kim, H.J., Kim, S.K. and Choi, H.S., "Hydraulic Characteristics of Branching and Merging of Channels in Regenerative Cooling Passage in Liquid Rocket Combustors," *The Korean Society For Aeronautical And Space Sciences*, Vol. 36, No. 11, pp. 1087-1093, 2008.
- Ahn, K., Kim, J.G., Lim, B., Kim, M., Kang, D. and Kim, S.K., "Fuel-Side Cold-Flow Test and Pressure Drop Analysis on Technology Demonstration Model of 75 ton-class Regeneratively-

- Cooled Combustion Chamber," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 56-61, 2012.
11. Wang, H., Luo, Y., Gu, H., Li, H., Chen, T., Chen, J. and Wu, H., "Experimental investigation on heat transfer and pressure drop of kerosene at supercritical pressure in square and circular tube with artificial roughness," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 42, pp. 16-24, 2012.
 12. Huzel, D.K. and Huang, D.H., "Desing of liquid propellant rocket engines," NASA SP-125, 1971.
 13. Idelchik, I.E., *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3rd ed., Begell House, New York, N.Y., U.S.A., 1996.
 14. Adama, T., Grant, C. and Watson, H., "A Simple Algorithm to Relate Measured Surface Roughness to Equivalent Sand-grain Roughness," *International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, Vol. 1, No. 1, pp. 66-71, 2012.