

이차유로 누설 유동이 고압터빈 유동 및 효율에 미치는 영향

최민석*† · 김명호** · 송성진***

Effects of Leakage Flows from Secondary Flow Passages on the Flow and Efficiency of a High-Pressure Turbine

Minsuk Choi*†, Myungho Kim**, Seung Jin Song***

Key Words : Leakage flow(누설 유동), Secondary Flow Passage(이차유로), Efficiency(효율), High-Pressure Turbine(고압터빈)

ABSTRACT

In this work, numerical simulations were conducted to analyze the effects of leakage flows from secondary flow passages on the main flow and the efficiency of a high-pressure turbine. Among a total of six leakage flows, it was observed that the leakage flows located upstream of the nozzle had a limited impact on the main flow. In contrast, other leakage flows downstream of the nozzle significantly influenced the total pressure distribution in the spanwise direction of the high-pressure turbine. The results showed that the efficiency of a high-pressure turbine decreased by approximately 0.31% in the presence of leakage flows compared to the case without leakage flows. Furthermore, the isentropic efficiency could decrease by up to 0.50% with variations in the leakage flow rate. Finally, the effects of the four leakage flows downstream of the nozzle on the turbine efficiency were analyzed using a response surface method, and an attempt was made to physically interpret the relationship between the turbine efficiency and each leakage flow.

1. 서 론

항공용 가스터빈에서 고압터빈(High-pressure turbine)은 연소기 하류에 위치하므로, 고온의 열에 의한 터빈의 손상을 막기 위한 여러 냉각 기법을 사용하고 있다. 압축기 마지막 단으로부터 얻은 압축공기를 이차유로를 통해서 터빈의 허브, 슈라우드 및 블레이드 표면에 분사하는 막냉각 기술은 이러한 냉각 기법 중 가장 중요한 기술 중 하나이다. 터빈 입구온도(Turbine inlet temperature)의 증가는 가스터빈 전체 사이클 효율을 높일 수 있기 때문에, 지금까지는 높은 터빈 입구 온도에서 터빈의 열손상을 방지하기 위해 냉각 효과를 높이는 방향으로 많은 연구가 진행되었다. 그러나, 터빈 입구온도가 재료, 열차단 코팅 및 냉각 기술로 버틸 수 있는 임계점에 다다르게 되면서, 최근에는 이차유로에서 주유동으로 유입되는 누설 유동의 영향을 분석해서 터빈의 공

력 효율을 높이려는 연구가 진행되고 있다.

이차유로에서 누설 유동은 고압터빈 노즐과 동익 사이의 휠 스페이스(Wheel-space)로 연소가스가 유입되는 것을 방지하는 동시에 허브와 슈라우드에 냉각 공기의 막을 형성하여 터빈 열손상을 방지하는 역할을 수행한다. 이 때 터빈 내 주유동과 이차유로 누설 유동이 혼합되면서 엔트로피 증가에 의한 전압손실이 발생한다 [1]. 허브 이차유로에서 누설되는 유동에 의한 손실 메커니즘은 여러 연구자들에 의해서 연구되었는데, Zlatinov 등 [2]은 누설 유동이 주유로로 유입될 때 허브 표면에서 블레이드의 압력면에서 흡입면으로의 교차 흐름이 강화되는 것을 발견하였다. 강화된 교차 흐름은 중간 스펜으로 이동하면서 스펜 별 유동의 변화를 유도하였고, 통로 와류(Passage vortex)와 상호작용하면서 추가적인 손실을 발생시켰다. 허브 누설 유동의 유량 및 스월비(Swirl ratio)를 변화시키면서 많은 연구가 진행되었는데, 누설 유

* 명지대학교 기계시스템공학부(Division of Mechanical Systems Engineering, Myongji University)

** 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

*** 서울대학교 기계공학부(Department of Mechanical Engineering, Seoul National University)

† 교신저자, E-mail : mchoi@mju.ac.kr

량과 스월비가 증가함에 따라 터빈 블레이드에서의 말굽 와류(Horseshoe vortex)가 강화되고 통로 와류와 관련된 손실이 증가함을 확인하였다 [3-9]. 익단 누설 유동(Tip leakage flow)이 있는 슈라우드에서의 누설 유동에 의한 손실 연구는 상대적으로 적은데, Zlatinov 등 [2]은 수치해석을 통해서 슈라우드 누설 유동에 의해서 강화된 교차 흐름이 유도하는 스펠방향 유동 변화가 통로 와류와 상호작용하여 손실이 증가함을 확인하였다. Hong 등 [10]은 슈라우드 누설 유동이 손실에 미치는 연구를 진행하여, 슈라우드 누설 유동에 의해서 통로 와류에 의한 손실은 증가하지만 익단 누설 유동에 의한 손실이 감소함을 실험을 통해서 확인하였다.

국내에서 항공용 가스터빈 개발에 대한 수요가 늘고 있는 현 상황에서, 터빈에서 허브 및 슈라우드 누설 유동이 터빈 내 유동과 공력 성능에 어떠한 영향을 미치는지 확인하는 것은 의미가 있다. 이 연구에서는 수치해석을 활용하여 실제 터빈 형상에서 누설 유동 유량이 고압터빈 효율에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것을 목표로 한다.

2. 수치해석 기법 및 반응면 기법

2.1 계산 영역 및 격자

허브 및 슈라우드 누설 유동이 고압터빈 내부 유동과 공력 성능에 미치는 영향을 살펴보기 위해서, Fig. 1에 나타난 것처럼 계산 영역을 국내에서 개발된 5,500lbf급 소형 가스터빈의 연소기 하류부터 고압터빈 하류까지의 영역으로 설정하였다. 일반적으로 터빈 유동해석에는 노즐베인과 동익의 상호작용이 중요하기 때문에 계산 영역을 노즐을 포함하는 유로와 동익을 포함하는 유로로 구성하였다. Fig. 1에서 ①~⑥은 주유로로 유입되는 누설 유동의 이차유로 위치를 나타낸다. 이 연구에서는 허브와 슈라우드에 존재하는 6개의 누설유로를 모두 포함하기 때문에, 격자를 생성할 영역을 상류영역, 노즐 베인, 중간 영역, 동익 및 하류 영역의 5개로 분할하였다. 상류, 중간 및 하류 영역의 허브와 슈라우드는 누설 유로가 배치되어 있다. 노즐 베인에는 허브 및 슈라우드 근처에서 필렛(Fillet)이 모두 구현되었고, 동익에서는 허브 필렛과 오목한 익단(Recessed tip)이 모두 구현되어 있다. 이렇게 분할함으로써 계산 영역 전체에 육면체 격자를 사용할 수 있으며, 각 유로에 사용되는 격자수를 손쉽게 설정할 수 있다. 각 분할된 영역에 사용된 격자수는 Table 1에 정리되어 있는데, 격자 의존성을 시험하기 위해서 총 격자수가 약 57만개, 120만개 및 235만개인 세 개의 격자를 생성하였다. 세 격자 모두 벽면에서의 y^+ 값은 5~10의 값을 사용하였다.

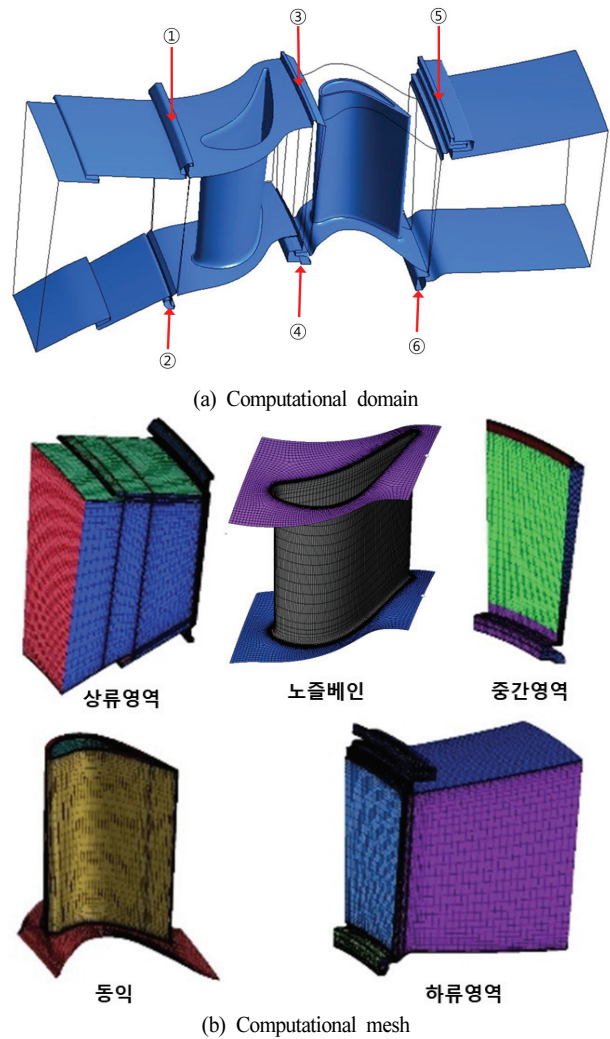


Fig. 1 Computational domain and mesh for high-pressure turbine

Table 1 Number of nodes for three different grids

Domain	Grid No.		
	1	2	3
Upstream	161,364	275,100	561,834
Nozzle	114,144	208,608	386,753
Mid	28,640	78,750	118,976
Rotor	249,810	391,332	820,830
Downstream	138,368	245,240	463,392

2.2 계산 기법 및 경계 조건

고압터빈 내 3차원 정상상태 유동해석에는 상용 유동해석 프로그램인 Ansys CFX를 이용하였다. 질량 보존, 운동량 및 에너지 방정식의 대류항은 수치적인 확산에러를 최소화하기 위한 고-분해능(High-resolution) 기법을 사용하였고, 확산항은 FEM에서 사용되는 모양 함수(Shape function)를 이용하여 차분화되었다. 고압터빈 내의 유동은 난류로 가정하고

k- ω SST 모델을 이용하여 난류 점도를 계산하였다.

고압터빈 입구에서의 경계조건으로 연소기 하류 평균 전압력을 고정하였고, Fig. 2와 같이 스펠에 따른 전온도 분포를 적용하였다. 유동해석을 마친 후 계산 결과로부터 얻은 입구 전온도 분포는 고압터빈 설계에 사용된 분포와 잘 일치한다. 참고로 이 그림에서 전온도는 노즐 베인 입구 질량평균 전온도로 무차원화였다. 출구 경계조건은 터빈 하류 허브의 정압을 고정하고 반경방향 평형 방정식(Radial equilibrium equation)을 적용하여 각 스펠에서의 정압을 계산하여 사용하였다. 계산 영역간 인접면에서는 프로즌 로터(Frozen rotor)기법을 사용하여 유동 특성이 인접면에 전달되도록 하였다. 벽면에서는 노-슬립(No-slip) 조건을 사용하였고, 벽 근처 첫 번째 격자점에서의 속도는 확장가능 벽함수(Scalable wall-function)를 사용하여 결정되었다. 노즐 베인과 동익은 각각 하나의 유로만 사용하므로 회전 주기 조건(Rotational periodic condition)을 적용하였다. 허브 및 슈라우드의 누설 유로에 대한 경계조건은 모두 설계 유량을 반영한 유량 조건으로 주었으며, 주유로 유량의 0.3~0.7% 범위 내에 있다. 고압터빈 입구 가스 조건, 동익 코드 길이 및 익단 회전 속도에 기반한 레이놀즈 수는 약 320만이다.

2.3 반응면 기법(Response surface method)

고압터빈은 복잡한 내부 유동, 주유동 및 여러 누설 유동 간의 상호작용 등으로 해석 결과가 선형관계가 성립되지 않기 때문에 제한된 비용과 짧은 시간 안에 관심 영역에서의 관계를 효과적으로 찾기 위해서는 대리 모델을 구축하여 분석하는 것이 필요하다. 이 연구에는 2차 다항식에 기반한 반응면 기법을 사용하였는데, 이 방법은 가능한 적은 수의 데이터를 이용하여 목적함수의 반응을 이끌어 내는 통계적인 분석 방법이다. 반응면 기법은 설계 변수를 2차 다항식으로

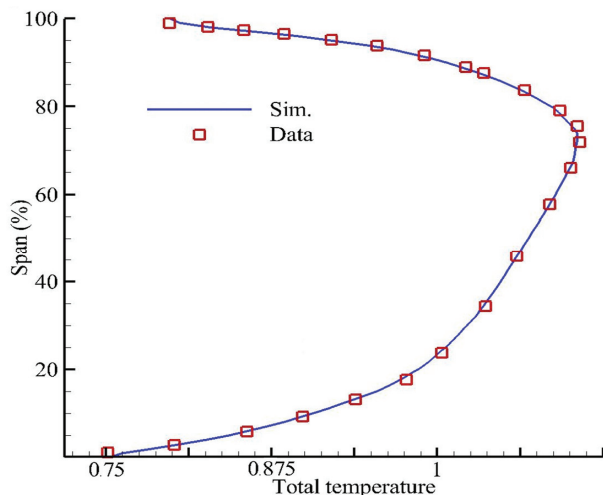


Fig. 2 Total temperature distribution just downstream of combustor

표현하며, 2차 다항식에는 교차항이 포함된다. 2차 회귀함수를 적용하기에 앞서 설계 변수를 식 (1)과 같이 선형변환해야 한다.

$$x_i = \frac{\xi_i - \xi_{0i}}{C_i} \quad (1)$$

여기에서 ξ_i 는 설계 변수이며 ξ_{0i} 는 해당 설계변수 변화의 중심값이다. x_i 는 선형변환된 새로운 설계 변수이며 C_i 는 각 인자의 수준인데, 일반적으로 변수의 설계영역의 반으로 설정한다. 반응면은 새로운 설계 변수를 이용하여 식 (2)와 같은 2차 회귀모형 식을 통해 표현한다.

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

β 는 회계분석에 쓰이는 미정 계수이고 n 은 설계 인자의 수이다. 미정 계수와 새로운 설계변수를 이용하여 목적함수 Y 를 표현한다. 미정계수는 최소자승법(Least square method)을 이용하여 구하며, 미정계수의 수는 전체 실험 횟수보다 작아야 한다.

3. 유동해석 결과

3.1 누설 유동의 주유동에 대한 영향

누설 유동이 주유동에 미치는 영향을 분석하기에 앞서, 수치해석 결과의 격자 의존성을 확인하였다. Table 1에 제시된 세 격자에 대해서 누설 유동이 있는 경우에 고압터빈의 효율을 계산하고, 결과를 Fig. 3에 비교하였다. 격자 1번(57만개)과 격자 2번(120만개)의 설계점 효율 차이는 0.49%이지만, 격자 2번과 격자 3번(235만개)의 효율 차이는 약 0.08%로 거의 차이가 없다. 더 많은 격자를 사용한다 하더라도 격자수에 따른 효율 차이는 작을 것으로 판단되므로, 격자 2번을 사용하여 누설 유량이 터빈 효율에 미치는 영향을 분석하였다.

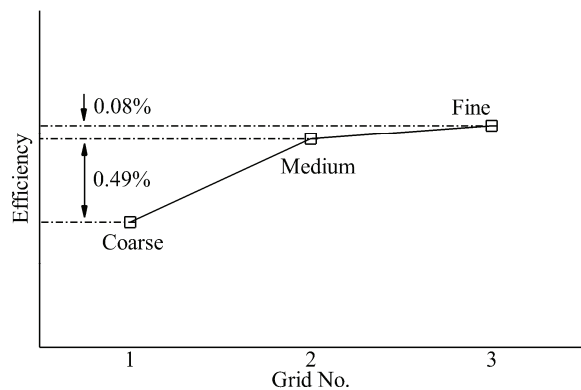


Fig. 3 Efficiency variation depending on number of nodes

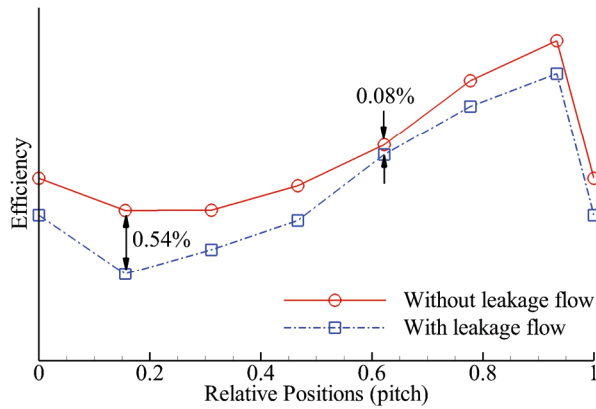


Fig. 4 Efficiency variation depending on relative positions of rotor to nozzle vane

고압터빈의 노즐 베인과 동익 사이에 적용된 프로즌 로터 조건은 정상상태 해석에서 상류 익렬의 후류 효과를 고려할 수 있는 장점이 있지만, 노즐 베인과 동익의 상대적인 위치에 따라서 터빈의 성능이 변할 수 있다. 따라서, 노즐 베인과 동익의 상대적인 위치를 변화시키면서, 누설 유동이 있는 경우와 없는 경우에 효율 변화를 계산하고 Fig. 4에 나타내었다. 누설 유동이 없는 경우와 비교하여, 누설 유동이 있는 경우에는 노즐 베인과 동익의 상대위치에 관계없이 고압터빈 효율이 0.08~0.54% 감소한다. 이 연구에서는 상대적인 피치 변화가 0인 경우를 사용하였으며, 이때 효율 감소는 0.31%로 상대위치 변화에 따른 효율 감소량의 중간 값이다.

고압터빈 설계운전 조건에서 허브와 슈라우드의 누설 유동이 있는 경우와 없는 경우에 대해 유동해석을 수행하고 누설 유동이 설계점에서의 주유동에 미치는 영향을 먼저 분석하였다. 누설 유동을 제외한 다른 경계조건을 동일하게 유지하면서 계산한 결과, 누설 유동이 없는 경우에는 터빈 출구 유량이 설계값보다 0.01% 높게 예측되었고, 누설 유동이 있는 경우에는 유량이 설계값보다 약 2.5% 높게 계산되었다.

Fig. 5에는 누설 유동이 없는 경우와 있는 경우에 노즐 및 동익의 80% 스패에서의 정압분포를 나타내었다. 압력은 누설 유동이 없는 경우의 동익 내 최저 압력으로 무차원화하였다. 두 경우 모두 누설 유동의 유무에 관계없이 비슷한 유동 현상을 나타내고 있다. 노즐 흡입면 압력분포에서 차이가 발생하지만, 동익 내의 유동은 거의 동일하다. 고압터빈 설계 운전점에서 누설 유동이 허브 및 슈라우드 근처의 유동에는 큰 영향을 미칠 수 있지만, 20%~80% 스패에 걸쳐 있는 코어 유동에는 영향력이 제한적임을 알 수 있다. 참고로, 마하 수 분포와 유선을 확인해도 코어 유동은 누설 유동의 유무에 관계없이 거의 일정하다.

Fig. 6은 누설 유동이 없는 경우와 있는 경우에 고압터빈 내부 네 위치에서 스패에 따른 전압분포를 나타내었다. 전압은 노즐 베인 입구 평균 전압으로 무차원화하였다. Fig. 1에 나

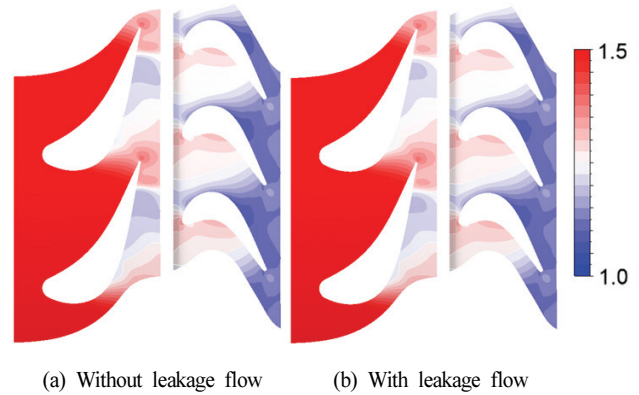


Fig. 5 Static pressure distribution at 80% span

타난 것처럼, 노즐 상류의 유동은 누설유동 ① 및 ②의 영향을 받고, 동익 상류 및 하류의 유동은 누설 유동 ①~④의 영향을 받으며 터빈 하류의 유동은 6개 누설 유동의 영향을 받는다. 노즐 상류의 그림에서는 누설 유동의 유무에 관계없이 동일한 전압 분포가 나타나는데, 이것은 누설유동 ① 및 ②가 주유동에 미치는 영향이 제한적임을 의미한다. 동익 상류에서는 허브 및 슈라우드 근처에서 누설 유동에 의해서 전압이 상당히 감소하지만, 20~80% 스패에서의 유동은 일정

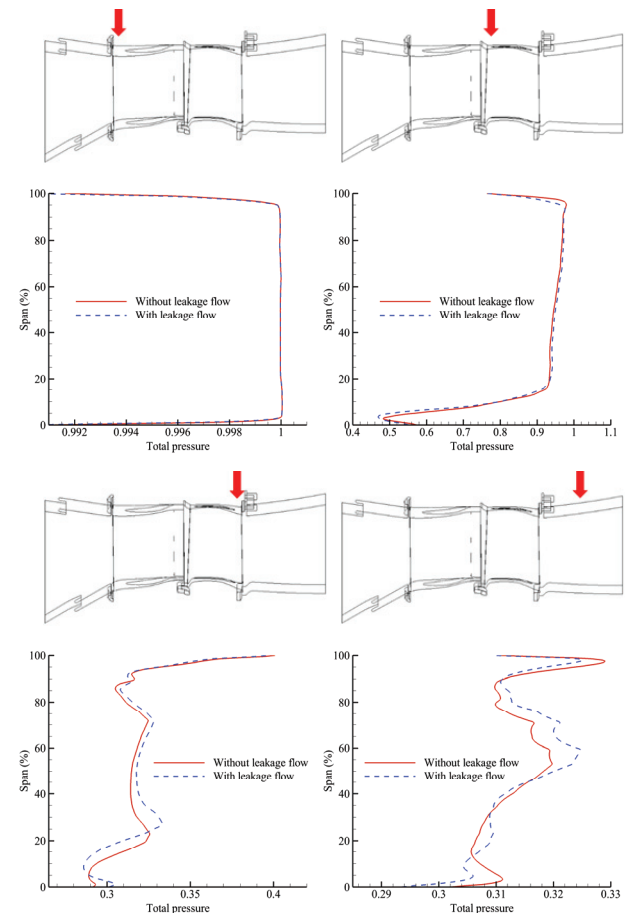


Fig. 6 Spanwise total pressure distribution at each streamwise position

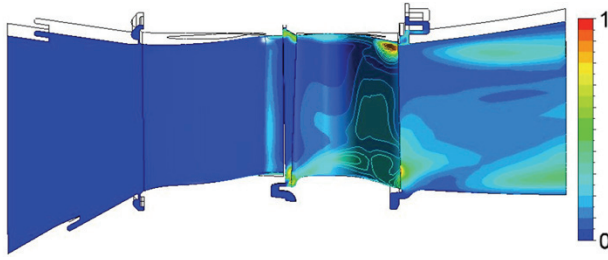


Fig. 7 Turbulence kinetic energy distribution on periodic surfaces with leakage flows

함을 확인할 수 있다. 동익 하류 및 터빈 하류에서는 누설 유동에 의한 영향이 스펠방향으로 전파되면서 허브 및 슈라우드에서는 전압이 낮게 나타나지만, 코어 유동에서는 전압이 높아지게 된다.

허브와 슈라우드에서 발생하는 누설 유동이 터빈 내부 주 유동에 미치는 영향을 살펴보기 위해서, 각 계산영역의 주기면(Periodic surfaces)에서의 난류 운동에너지 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 난류 운동에너지는 터빈 주기면 내 최대값으로 무차원화였다. 전압분포에서 확인한 것처럼 누설 유동 ① 및 ②는 노즐 상류 주유동과 혼합되지 않고 허브와 슈라우드에 부착되어 하류로 이동한다. 반면에 누설 유동 ③ 및 ④는 동익 유로에서 주유동과 혼합되면서 높은 난류 운동에너지를 나타낸다. 특히, 허브에서 유입되는 누설 유동은 동익 유로에서 20% 스펠까지는 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 동익 하류의 누설 유동 ⑤ 및 ⑥은 주유동과의 혼합에 의한 난류 운동 에너지 증가는 크지 않은 것으로 확인되는데, 이것은 동익에서 주유동 에너지의 상당부분이 동력으로 전환되고 유체 압력 및 속도가 감소하여 누설 유동과의 상호작용이 줄어들기 때문이다. 그러나, 터빈 하류 영역에서 출구에 가까워질수록 허브와 슈라우드 근처에서 난류 운동 에너지가 높은 영역이 나타나는데, 이 혼합영역은 노즐 및 동익의 후류(Wake)가 지나는 영역으로 판단된다.

3.2 누설 유동의 효율에 대한 영향

누설 유동 ① 및 ②는 터빈 내부 유동에 미치는 영향이 제한적이므로, 누설 유동의 유량 변화에 따른 주유동 손실의 변화를 파악하기 위해서 누설 유동 ③~⑥의 유량을 변화시키면서 누설 유동이 없는 경우와 비교하여 효율 감소($\Delta\eta$) 및 동익 1개의 토크 감소($\Delta\tau$)를 Table 2에 정리하였다. 각각의 누설 유동에서 유량 변화는 $\pm 50\%$ 로 제한하였으며, Box-Behnken의 방법에 따라 실험계획법에서 해석할 25개의 경우를 결정하였다. Box-Behnken 방법은 반응면 기법을 적용하기 위한 실험계획 시 전배치법(Full-factorial design) 대비 실험 횟수를 줄이면서도 2차 모델의 적합성을 극대화 할 수 있는 방법이다 [11]. 고압터빈에서 누설 유량이

Table 2 DOE generated by Box-Behnken method

CaseNo.	Leakage No.				$\Delta\eta$ (% point)	$\Delta\tau$ (N · m)
	③	④	⑤	⑥		
00	0	0	0	0	-0.3091	-0.4692
01	-1	-1	0	0	-0.2456	-0.4068
02	1	-1	0	0	-0.3892	-0.4648
03	-1	1	0	0	-0.3580	-0.6303
04	1	1	0	0	-0.5005	-0.6781
05	0	0	-1	-1	-0.3465	-0.4550
06	0	0	1	-1	-0.3274	-0.4421
07	0	0	-1	1	-0.2985	-0.4636
08	0	0	1	1	-0.2795	-0.4502
09	-1	0	0	-1	-0.2689	-0.4342
10	1	0	0	-1	-0.4112	-0.4827
11	-1	0	0	1	-0.2204	-0.4426
12	1	0	0	1	-0.3629	-0.4932
13	0	-1	-1	0	-0.3259	-0.4268
14	0	1	-1	0	-0.4362	-0.6470
15	0	-1	1	0	-0.3064	-0.4178
16	0	1	1	0	-0.4181	-0.6312
17	-1	0	-1	0	-0.2537	-0.4484
18	1	0	-1	0	-0.3958	-0.5000
19	-1	0	1	0	-0.2360	-0.4391
20	1	0	1	0	-0.3760	-0.4918
21	0	-1	0	-1	-0.3375	-0.4277
22	0	1	0	-1	-0.4485	-0.6275
23	0	-1	0	1	-0.2901	-0.4314
24	0	1	0	1	-0.4034	-0.6399

없는 경우에 비해서 설계 누설 유량을 가지는 경우 약 0.309%의 효율 감소와 0.4692N · m의 동익 토크 감소가 있는 것으로 예측되었고, 특히 누설 유동 ③ 및 ④의 유량이 동시에 50%씩 증가된 경우에는 효율은 0.501%, 토크는 0.6781N · m 감소하였다.

효율과 터빈 동익에 작용하는 토크의 관계를 확인하기 위해서 Table 2의 25개 경우에 대해서 두 변수의 상관관계를 Fig. 8에 나타내었다. 일반적으로 터빈의 경우 효율이 증가할수록 동익의 토크가 증가하는 양의 상관관계를 가지게 되는데, 이 연구에서도 동일한 결과를 확인할 수 있다. 그러나, 누설유동 ④의 유량이 증가되는 경우(3, 4, 14, 16, 22, 24)에는 토크가 급격히 감소하는 현상이 나타난다. Fig. 9에는 Table 2의 2번 및 4번 경우에 대해서 동익 10% 스펠에서 동익 전연에서의 압력으로 무차원화 된 압력분포를 나타내었다. 누설유동 ④가 증가함에 따라 허브 근처에서 유동의 입사각이 감소하여 동익의 부하가 크게 감소함을 확인할 수 있다. 이 때문에 다른 누설 유동에 비해서 상대적으로 누설유량이 큰 누설 유동 ④의 유량이 증가하면 토크의 급격한 감소가 나타나게 된다.

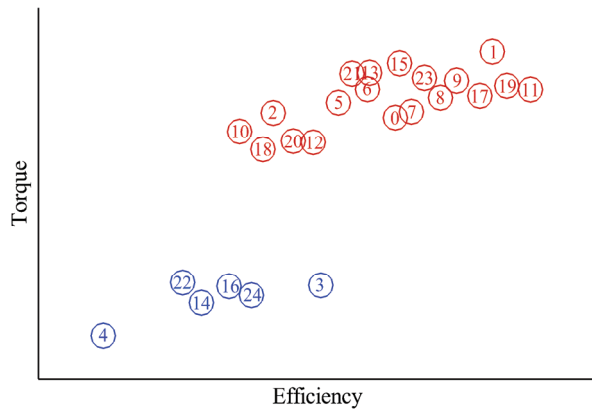


Fig. 8 Relationship between efficiency and torque

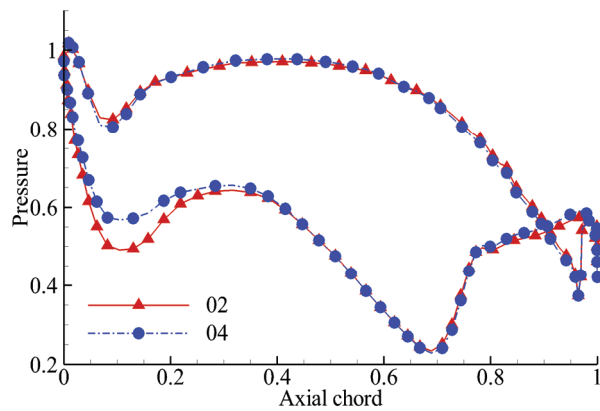


Fig. 9 Blade loading at 10% span

각 누설 유동이 고압터빈 효율에 미치는 영향을 분석하기 위해서, Table 2의 결과를 이용하여 식 (2)의 2차 회귀함수를 구하였고 각각의 누설 유동에 대한 반응면을 그려 Fig. 10에 나타내었다. 여기에서 설계 변수는 누설 유동 ③~⑥의 유량이며 목적함수는 Table 2에 정해진 효율 감소이다. 총 6개의 반응면을 분석하면, 각 누설 유동이 고압터빈 효율에 미치는 영향을 아래와 같이 세 가지 내용으로 정리할 수 있다. 첫 번째, 동익 하류에 위치하는 누설 유동 ⑤와 ⑥은 노즐과 동익 사이에 위치하는 누설 유동 ③과 ④에 비해서 고압터빈 효율 감소에 미치는 영향이 적다. 두 번째, 노즐과 동익 사이 슈라우드에 위치하는 누설 유동 ③은 유량이 증가할수록 효율이 감소하는데, 이러한 결과는 서론에서 소개한 다른 연구자의 결과와도 일치한다. 세 번째, 노즐과 동익 사이 허브에 위치하는 누설 유동 ④는 유량이 설계값일 때 효율 감소가 가장 적고 유량이 감소하거나 커지면 효율 감소가 증가한다.

누설 유동 ④의 유량이 고압터빈 효율에 미치는 영향을 분석하기 위해서 Fig. 11에는 주기면에서의 속도 벡터를 나타내었다. 이 그림에서 속도 크기는 주기면 내 최대값으로 무차원하였다. 누설 유동 ④는 6개의 누설 유동 중 유량의 약

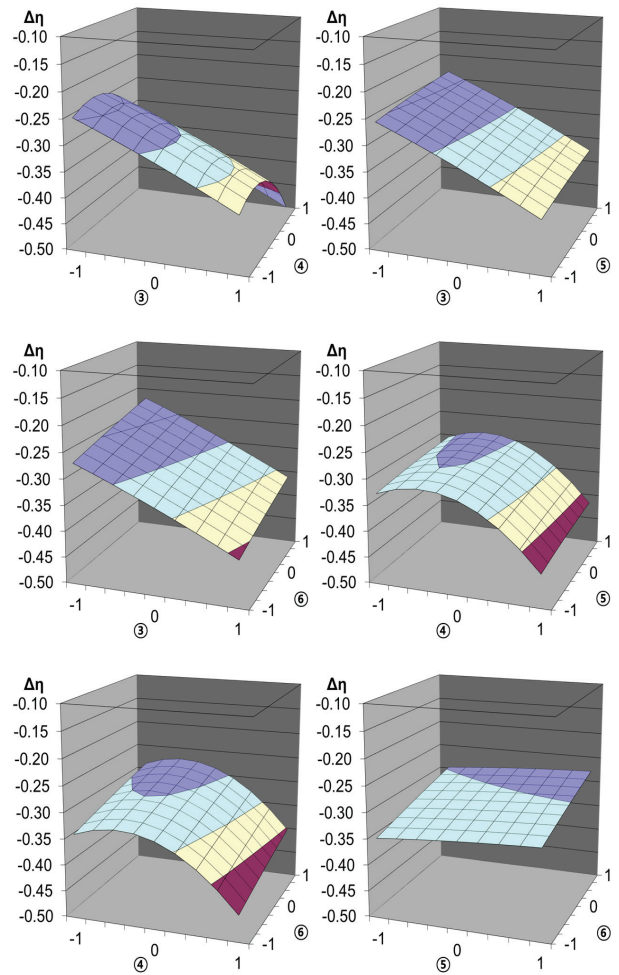


Fig. 10 Efficiency reduction depending on each leakage flow

1/3을 차지하며, 다른 누설 유동과 달리 노즐과 동익 사이에서 상대적인 움직임을 가지는 휠스페이스에서 넓은 출구를 통해 주유동으로 흘러간다. Fig. 11의 하단에 나타난 누설 유동 ④를 살펴보면, 설계 유량보다 유량이 큰 경우에는 누설 유동과 주유동의 혼합이 많이 발생하여 손실이 발생하고, 설계 유량보다 유량이 적은 경우에는 주유동이 누설 유로로 일부 유입되어 손실이 증가하는 것으로 판단된다.

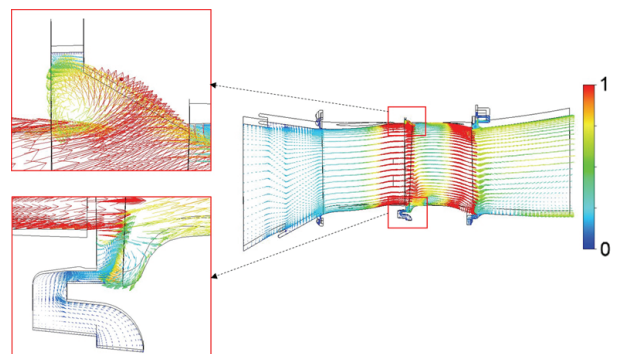


Fig. 11 Velocity vector on periodic surfaces with leakage flows

4. 결 론

이 논문에서는 고압터빈 허브와 슈라우드에서 터빈 냉각 및 연소가스 유입을 막기 위해서 사용되는 누설 유동이 고압 터빈 유동과 효율에 미치는 영향을 분석하기 위해서 수치해석이 사용되었다. 수치해석 결과를 바탕으로 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

- 1) 노즐 상류에서 주유로로 유입되는 누설 유동은 유량이 크지 않고 허브와 슈라우드에 부착되어 하류로 이동하므로, 주유동 전압에 미치는 영향이 제한적이다. 노즐과 동익 사이의 허브 및 슈라우드에서 유입되는 누설 유동은 동익하류 전압분포에 영향을 미쳐 허브 및 슈라우드 근처에서 전압을 감소시키지만, 20~80%의 주유동에는 영향을 미치지 않는다. 다만, 누설 유동은 하류로 이동할수록 스펙방향으로 이동하여 주유동이 중간 스펙 방향으로 모이도록 하여 터빈 하류에서는 중간 스펙에서 전압이 증가한다.
- 2) 6개의 이차유로에 설계 누설 유량을 적용할 경우, 누설 유동이 없는 경우에 비해서 터빈 효율이 약 0.31% 감소하는데, 이것은 누설 유동이 주유동과 혼합되면서 전압 손실이 발생하기 때문이다. 상류 누설 유동을 제외한 다른 누설 유동의 유량을 설계값의 $\pm 50\%$ 변화시키면서 수치해석을 수행한 결과, 누설 유동은 터빈 효율을 최대 0.50% 감소시킬 수 있다.
- 3) 노즐과 동익 사이 슈라우드에서 발생하는 누설 유동은 유량이 증가할수록 터빈 효율이 감소하는데, 이 결과는 타 연구자들의 연구결과와 일치한다.
- 4) 노즐과 동익 사이 허브에서 발생하는 누설 유동은 설계 유량에서 혼합손실이 가장 적다. 이 누설 유동의 유량이 증가하면 주유동과 누설 유동의 혼합손실이 증가하고, 누설 유동의 유량이 감소하면 주유동이 이차 유로로 유입되어 손실이 발생하는 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UD220004JD).

References

- (1) Denton, J. D., 1993, "Loss Mechanisms in Turbomachines," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 115, pp. 621-656.
- (2) Zlatinov, M. B., Tan, C. S., Montgomery, M., Islam, T. and Harris, M., 2012, "Turbine Hub and Shroud Sealing Flow Loss Mechanisms," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 134, p. 061027.
- (3) Gallier, K., Lawless, P. and Fleeter, S., 2000, "Investigation of Seal Purge Flow Effects on the Hub Flow Field in a Turbine Stage Using Particle Image Velocimetry," AIAA Paper. AIAA-2000-3370.
- (4) McLean, C., Camci, C. and Glezer, B., 2001, "Mainstream Aerodynamic Effects Due to Wheel-space Coolant Injection in a High-Pressure Turbine Stage: Part I-Aerodynamic Measurements in the Stationary Frame", ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 123, pp. 687-696.
- (5) McLean, C., Camci, C. and Glezer, B., 2001, "Mainstream Aerodynamic Effects Due to Wheel-space Coolant Injection in a High-Pressure Turbine Stage: Part II-Aerodynamic Measurements in the Rotational Frame", ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 123, pp. 697-703.
- (6) Ong, J., Miller, R. J., and Uchida, S., 2012, "The Effect of Coolant Injection on the Endwall Flow of a High Pressure Turbine," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 134, p. 051003.
- (7) Regina, K., Kalfas, A. I. and Abhari, R. S., 2014, "Experimental Investigation of Purge Flow Effects on a High Pressure Turbine Stage," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 137, p. 041006.
- (8) de la Rosa Blanco, E., Hodson, H. P. and Vazquez, R., 2009, "Effect of the Leakage Flows and the Upstream Platform Geometry on the Endwall Flows on a Turbine Cascade," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 131, p. 011004.
- (9) Popović, I. and Hodson, H. P., 2013, "Investigation of Seal Purge Flow Effects on the Hub Flow Field in a Turbine Stage Using Particle Image Velocimetry," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 135, p. 061014.
- (10) Hong, D., Choi, M., Kim, M. and Song, S. J., 2022, "The Effect of Casing Coolant Injection on Aerodynamic Loss in a Linear Turbine Cascade with Tip Clearance," ASME Paper. GT2022-80252.
- (11) Box, G. E. P. and Behnken, D. W., 1960, "Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables," Technometrics, Vol. 2, pp. 455-475.