

스팀터빈 Exhaust System에서 LP터빈과 Exhaust Hood 사이의 간섭에 대한 수치해석적 연구

임지현* · 주원구** · 김영상*** · 임홍식****

Numerical investigation of LP turbine-exhaust hood interaction in the steam turbine exhaust system

Ji-Hyun Im*, Won-Gu Joo**, Young-Sang Kim*** and Hong-Sik Im****

Keywords : Steam Turbine(스팀터빈), Actuator Disk Model(디스크 모델), Steam Turbine Exhaust System(스팀터빈 Exhaust System)

Abstract

Exhaust system of steam turbines consists of an annular diffuser and a collector and connects the last stage turbine and the condenser. The system is used to transfer the turbine leaving kinetic energy to potential energy while guiding the flow from turbine exit plane to the downstream condenser. In the steam turbine exhaust system, distorted pressure profile is arisen by the nonaxisymmetric collector structure at the diffuser outlet, and this distorted pressure is propagated to the last stage LP turbine exit plane through the diffuser, then the last stage LP turbine experiences asymmetric back pressure. It is known that the pressure recovery performance of diffuser is strongly influenced by diffuser inflow condition.

In this study, the effect of exhaust system due to the changing of inlet flow condition is observed by using CFD, and the interaction of last stage LP turbine and exhaust system is investigated by using actuator disk model as modeling of turbine blade row of exhaust hood inlet.

1. 서론

발전용 스팀터빈 시스템에서 Exhaust hood는 저압터빈과 콘덴서 사이에 위치하며, 축-반경 디퓨저(axial-radial diffuser)와 콜렉터로 구성되어 있다. Exhaust hood는 유동이 가지고 있는 높은 속도 에너지를 포텐셜에너지로 변환시키면서 유동을 터빈 출구에서 콘덴서로 안내하는 역할을 한다. 대부분의 exhaust hood는 축방향에서 90° 꺾인 아랫방향으로 배출시키고 있으며 이는 콜렉터 위쪽의 강한 와류와 큰 손실을 만들어 낸다.

또한, 콜렉터의 비축대칭 형상으로 인하여 디퓨저 출구에서 비균일 정압분포가 형성되어 디퓨저의 작동에 영향을 미친다. 디퓨저 출구의 비균일 정압은 상류로 전파되어 저압터빈 출구면에서의 정압도 비균일 분포를 갖게 한다. 저압 터빈은 일반적으로 균일 압력분포에서 설계되므로, 터빈 출구면의 비균일 압력은 터빈의 압력상승 특성에 영향을 미쳐 터빈출구에서의 비균일 총압분포를 형성한다. 이러한 비균일 총압분포는 다시 디퓨저와 콜렉터 유동에 영향을 미치게 된다.

스팀터빈 Exhaust hood에 대한 실험적인 연구는 full-scale, small-scale 모델을 실험을 통해 이루어진다. Exhaust hood 축소 모형 실험을 통해 균일한 입구 조건에서의 디퓨저와 콜렉터 형상에 따른 디퓨저 성능^[1]과 Exhaust hood 성능^[4]을 평가하였고,

full-scale 실험을 통해서 동일한 exhaust hood에서 전방의 터빈을 변화시킴으로서 전체 hood의 성능을 향상시킬 수 있음을 알았다.^[1]

Exhaust hood에 대한 full-scale 실험은 전체 스팀터빈 시스템을 설치해야하므로 많은 예산과 측정의 어려움이 따른다. 따라서 CFD는 exhaust hood의 성능 평가 및 설계 개선을 위한 좋은 수단이 될 수 있다. Liu^[2]는 Joo^[1]에 의해 개발된 디스크 모델을 반경방향으로의 면적 확장이 큰 스팀터빈에 적용할 수 있도록 수정된 디스크 모델을 수정하여 정렬 격자계를 이용한 간단한 exhaust hood 시스템에 적용하였다.

본 연구에서는 균일한 입구 유동 조건과 LP 터빈 출구 유동 조건을 기술한 경우에 따른 Exhaust hood의 유동장 및 성능변화를 알아보고, 마지막 터빈 단을 디스크 모델로 모사하여 LP 터빈과 간섭된 Exhaust hood의 내부 유동장을 수치해석적 기법을 이용하여 살펴보았다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 기법

레이놀즈 평균된 Navier-stokes 방정식은 비정렬 격자 기반의 유한체적법을 통해 계산되었다. 압력보정 방정식 기반으로 Runge-kutta 시간 전진법을 이용하여 정상상태 수치해석을 수행한다. 속도-압력 분리와 충격과 감지를 조절하기 위하여 인공점성항을 추가하였고, 난류 모델은 벽함수를 적용한 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

* 연세대학교 기계공학과, fluidman@yonsei.ac.kr

** 연세대학교 기계공학부, joo_wg@yonsei.ac.kr

*** 두산중공업 young.sang.kim@doosan.com

**** 두산중공업 hongsik.im@doosan.com

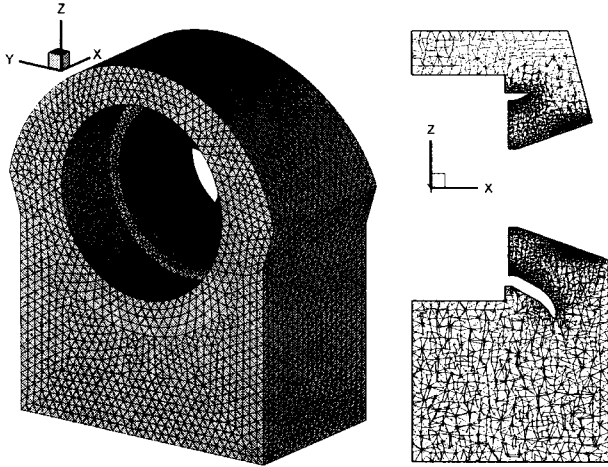


Fig. 1 3-D hood mesh and 2-D cut

2.2 격자

Fig. 1은 본 연구의 대상인 Exhaust hood의 격자를 나타낸 것이다. 비정렬 사면체 격자를 이용하였으며 전체 격자수는 46만 개이다. 비정렬 격자는 복잡한 형상의 구현이 용이하고, 계산 결과에 따른 격자의 변환을 쉽게 할 수 있는 이점이 있다. 본 연구에 사용된 격자는 상용코드인 Gambit 2.0을 사용하여 구현하였다.

2.3 경계 조건

입구 경계면에는 총압, 총온도, 유동의 피치각과 선회각이 기술하였고, 출구 경계면에는 정압을 기술하였다. 점성 벽면에는 점착 조건을 기술하는 대신 벽함수를 이용하여 경계면에서의 점성 응력을 계산하였다. LP 터빈 출구 조건을 입구에 기술한 경우에는 두산중공업에서 제공한 Msteam code의 마지막 터빈 단의 익렬 계산 결과를 이용하였다.

디스크 모델은 익렬을 두께가 없는 판으로 묘사하여 익렬 입출구 면은 디스크에 의해 분리되고, 수치적인 경계조건으로 연결되어 디스크를 통과하는 유동 변수값이 불연속적으로 변하게 된다. Fig. 2에 도시한 바와 같이 디스크 모델은 기하학적으로 연속적이고 물리적으로 불연속면이 된다. 디스크를 가로질러 전후방 유동장을 연결시키는데는 아래와 같은 네 가지 경계조건이 적용된다.

- 질량보존

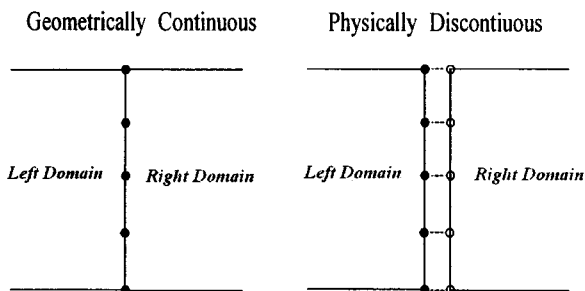


Fig. 2 Actuator disc model^[2]

- 로탈피(rothalpy) 보존
- 익렬에 대한 상대출구유동각 기술
- 전압손실 기술

익렬에서의 상대출구유동각과 전압손실을 익렬에 대한 실험이나 수치해석 결과를 이용하게 되는 본 연구에서는 두산중공업에서 제공한 Msteam code를 이용한 터빈 익렬 계산 결과를 이용하였다.

3. 해석 결과

3.1 입구 조건에 따른 Exhaust hood 유동장

Fig. 1에 도시한 격자를 이용하여 입구 경계면에 균일한 조건이 주어진 경우와 LP 터빈 출구 유동장을 기술한 경우에 exhaust hood 내부 유동장 변화를 살펴 보았다. 균일한 조건의 경우 입구 경계면에 총압 6770 Pa, 총온도 314 K, 경계면에 수직인 속도 성분으로 기술하였고, LP 터빈 출구 유동을 exhaust hood 입구 경계면에 기술한 경우는 Fig. 3에 도시한 유동 분포를 사용하였다.

Fig. 4 (a),(b)는 각각 균일한 입구 유동과 LP 터빈 출구 유동 조건을 입구면에 기술한 경우의 exhaust hood 내부 압력 분포를 hood 위쪽 디퓨저 끝단에서의 축방향에 수직인 단면과 Fig. 1의 좌표계에서 축기준의 y축에 수직인 단면에서 도시한 것이다. Fig. 4 (a), (b)의 디퓨저 내부 압력 분포를 보면 균일한 입구 유동 조건의 경우는 좌우 대칭을 이루고 있으나, 입구면에 유동 분포를 기술한 경우는 대칭축이 반시계 방향으로 기울어져 있는 것을 볼 수 있다. 입구 경계면의 선회 속도 성분으로 인하여 디퓨저 내부에 원주방향으로 비균일 압력 분포가 형성되고, 이러한 영향은 콜렉터 내부에도 전파되는 것을 알 수 있다.

y축 수직 단면의 압력분포를 보면 두 경우 모두 디퓨저를 통한 압력 상승이 발생하고 허브와 벽면이 맞닿는 지점에 정체점 형태의 높은 압력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 hood 아래쪽 디퓨저 벽면에 압력이 급격히 떨어지는 영역이 존재하는데 입구면에 터빈 출구 유동조건을 기술한 경우에 압력 강하가 크게 나타나고, 영역의 면적도 넓게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig. 4 (b)의 축방향 단면을 보면 디퓨저 아래쪽 벽면의 모든 부분에서 이러한 압력 강하 영역이 자리하고 있음을 알 수 있다. 이러한 압력 강하는 Fig. 3의 총압분포에서 Tip 쪽의 총압이 높기 때문에 유동이 상대적으로 원활히 배출될 수 있는 hood 아래쪽에서의 속도가 hood 위쪽이나 균일한 입구 유동에 비해 크게 나타나기 때문이다.

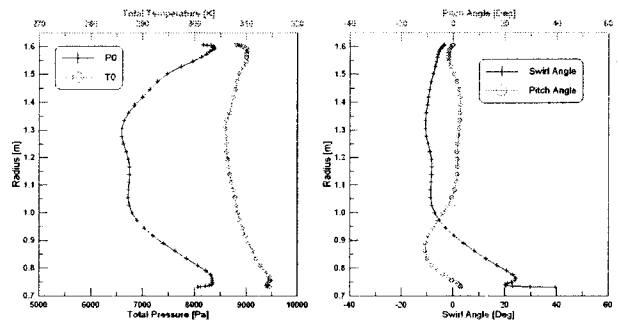


Fig. 3 Inlet boundary profiles

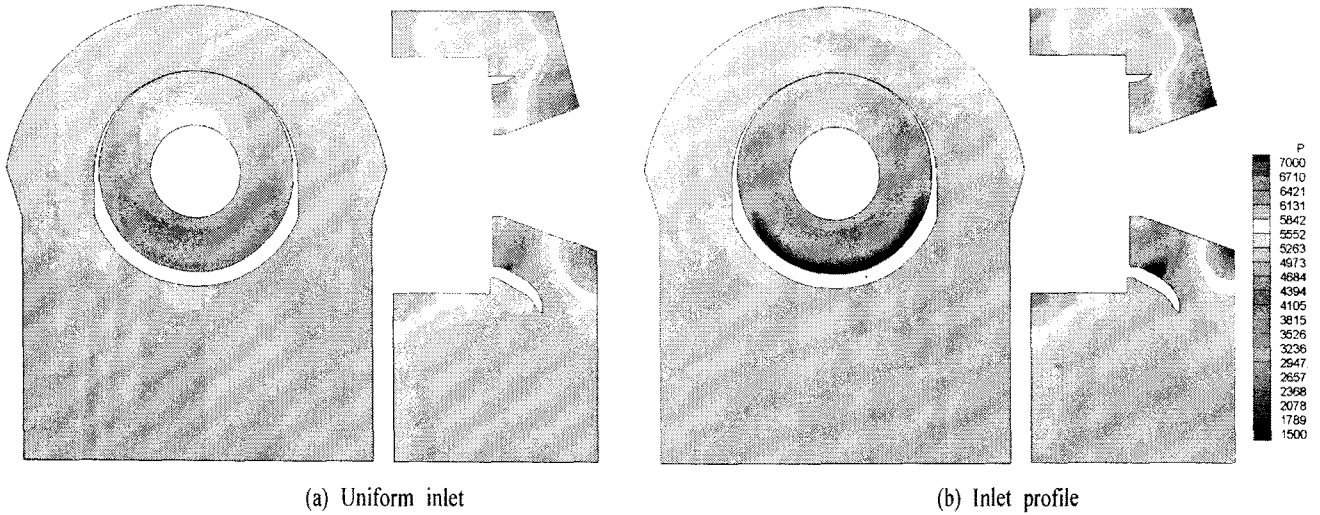


Fig. 4 Pressure contour at a section in the exhaust hood

Fig. 5 입구 경계조건 변화에 따른 exhaust hood 의 압력회복 성능을 나타낸 것이다. 압력회복계수($C_{pr} = \frac{p_2 - p_1}{p_{o1} - p_1}$)는 기준 위치의 평균 압력값에서 입구 평균압력을 뺀 값을 입구 동압으로 나눈 값이다. Fig. 5에서 첫 번째 점은 입구, 두 번째 점은 디퓨저 출구이고, 세 번째 점은 hood 출구를 의미한다. 본 연구에 사용된 exhaust hood 의 디퓨저 형상은 hood 위쪽과 아래쪽이 대칭이 아니기 때문에 hood 위쪽의 디퓨저 끝단에서 허브에 내린 수선을 축방향으로 회전시킨 면을 디퓨저 출구로 정의하였다. Fig. 5의 터빈 출구 조건이 입구면에 기술된 계산의 경우 디퓨저를 통과하면서 압력이 떨어지는 것을 볼 수 있는데 이는 디퓨저 출구면의 위치가 Fig. 4 (b)의 y축 수직 단면의 압력 분포에서 볼 수 있는 압력이 급격히 떨어지는 영역과 일치하기 때문이다. hood 전체에 걸쳐서는 입구 유동이 균일한 경우의 압력 회복 성능이 입구면에 터빈 출구 조건을 기술한 경우에 비해 좋은 것을 볼 수 있다. 터빈 출구 조건을 기술한 계산의 경우는 exhaust hood를 통한 압력 회복이 나타나지 않았다.

3.2 Disk Model의 적용

Exhaust hood 입구에 위치하는 마지막 터빈 단의 정익과 동

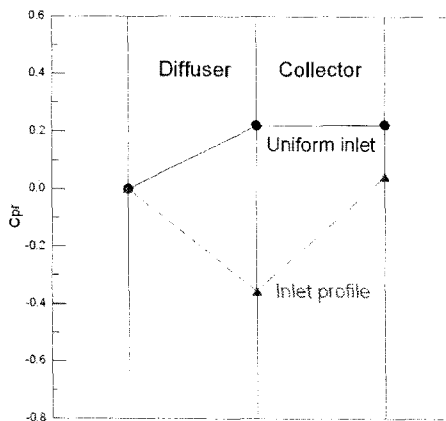


Fig. 5 Pressure recovery coefficient

익을 actuator disk로 모사하여 LP 터빈과 exhaust hood 사이의 간섭 유동장을 계산하였다. exhaust hood의 격자 형상은 Fig. 1과 동일하고 hood 입구면에 터빈 동익을 모사한 disk 면이 존재하고 그 앞에 정익을 모사한 disk면, 그리고 정익 앞단의 터빈단 출구면을 입구면으로 설정하였다. Disk model에서 기술되는 유동각과 익렬을 통한 전압손실은 마지막 터빈 단의 정익과 동익의 단일 유로 3차원 유동해석 code인 Msteam의 계산 결과를 두산중공업으로부터 지원받아서 적용하였다.

입구 경계면에는 균일한 총압과 총온도, 그리고 속도 성분은 입구면에 수직이 되도록 설정하였다. 출구 경계면에는 균일한 정압을 설정하였다.

Fig. 6은 y축 방향에 수직인 단면에서 hood 위쪽의 마하수 분포를 도시한 것이다. 입구면에서부터 디퓨저로 이어지는 유로에 마하수 분포의 불연속면이 존재하는데 이 면이 유동방향으로 각각 정익 익렬 disk와 동익 익렬 disk를 나타낸다. 두 개의 actuator disk에 의해서 유동장이 분리되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7의 (a), (b)는 각각 동익을 모사한 actuator disk의 입구면과 디퓨저 출구면에서의 압력 분포를 도시한 것이다. 디퓨저 출구면에서의 압력분포를 보면 동익 disk 출구면에서의 선회 속도 성분으로 인하여 대칭축이 시계방향으로 기울어져 있으며, 이러

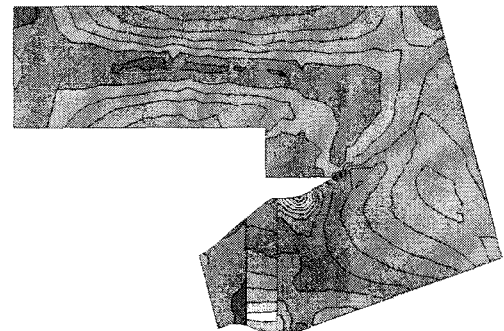


Fig. 6 Mach number contour at a plane normal to y-dir

본 연구는 두산중공업 위탁기술개발과제를 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사의 말씀을 드립니다.

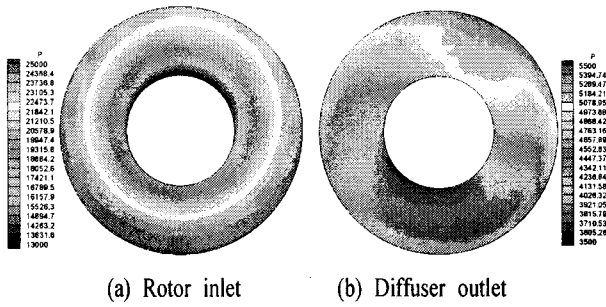


Fig. 7 Mach number contour at a plane normal to y-dir

한 압력분포 형태는 동익 익렬에 해당하는 disk 면을 통해 전방으로 전파되어 Fig. 7 (a)에서 보는 바와 같이 동익 익렬 전방에 비균일 압력분포를 형성하게 된다. 이와 같은 비균일 압력 분포는 LP 터빈의 작동상태에 영향을 미치게 되고, 터빈 출구면에 위치한 디퓨저 입구면의 유동 분포에 영향을 주게 되므로 exhaust hood 전체 유동장에 영향을 끼치게 된다.

4. 결론

Exhaust hood 입구면에 균일한 유동조건과 터빈 출구의 유동 분포를 적용한 계산을 통해 입구 경계 조건에 따른 hood의 유동장 변화 및 성능을 살펴 보았다. 입구 조건에 따라 hood의 성능에 변화를 보이고 있으며, hood 내부에서 압력 회복을 일으키는 디퓨저 내부 유동에도 변화를 보이고 있다.

디스크 모델을 비정렬 격자 기반 코드에 적용하여 LP 터빈과 exhaust hood 사이의 간섭 유동을 해석하였다. 디스크를 통과하는 유동 변수들이 불연속적으로 변화하는 것을 확인하였고, 디퓨저 후방의 비균일 압력분포가 디스크 전방으로 전파되는 것을 볼 수 있었다.

후 기

참고문헌

- [1] Joo, W. G., and Hynes, T. P., 1997, "The Application of Actuator Disks to Calculations of the Flow in Turbofan Installations," ASME J. Turbomach., Vol. 119, pp. 733-741.
- [2] Liu, J. J., and Hynes, T. P., 2003, "The Investigation of Turbine and Exhaust Interactions in Asymmetric Flows - Blade-Row Models Applied," ASME J. Turbomach, Vol. 125, pp. 121-127.
- [3] Zaryankin, A. E., Zatsepin, M. F., and Shakh, R. K. D., 1966, "Effects of the Geometrical Parameters on the Operation of Annular Mixed Flow Diffusers," Therm. Eng., Vol. 13, pp. 39-43.
- [4] Owczarek, J. A., Warnock, A. S., and Malik, P., 1989, "A Low Pressure Turbine Exhaust End Flow Model Study," *Latest Advances in Steam Turbine Design, Blading, Repairs, Condition, Assessment, and Condense Interactions*, D. M. Rasmussen, ed, ASME, New York, 7, pp. 77-88.
- [5] Gray, L., Sandhu, S. S., Davids, J., and Southal, L. R., 1989, "Technical Considerations in Optimizing Blade-Exhaust Hood Performance for Low Pressure Steam Turbine," *Latest Advances in Steam Turbine Design, Blading, Repairs, Condition, Assessment, and Condense Interactions*, D. M. Rasmussen, ed, ASME, New York, 7, pp. 89-97
- [6] Watterson, J. K., 1994, "A New, Pressure-Based, Unstructured Mesh, Navier-Stokes Solver and Application to 3D Compressible Vortex/Boundary Layer Interactions," Ph.D thesis, Cambridge University Engineering Department, Cambridge, United Kingdom.
- [7] Joo, W. G., 1994, "Intake/Engine Flowfield Coupling in Turbofan Engines," Ph.D thesis, Cambridge University Engineering Department, Cambridge, United Kingdom.