

USC 증기터빈용 LP Exhaust Hood 유동특성

이병은* · 김진환** · 박구하** · 나운학** · 이수언**

Flow Characteristics of a LP Exhaust Hood for USC Steam Turbines

Byeong E. Lee*, Jin W. Kim**, Koo H. Park**, Un H. Nah**, Soo E. Lee**

Key Words : Steam Turbine (증기터빈), LP Exhaust Hood (저압배기후드)

ABSTRACT

CFD analysis has been performed to investigate flow behavior in LP exhaust hood of steam turbines and evaluate exhaust loss, which is directly related to the steam turbine performance, in it. Development of the optimum shape of LP exhaust hood has been done with an improved shape of steam guide, which plays a key role in terms of cost as well as performance. The newly developed LP exhaust hood will be applied for a large USC steam turbine having a capacity of 1,000 MW.

1. 서론

증기터빈의 LP exhaust hood는 최종단 회전익을 빠져 나온 증기를 복수기로 보내주는 최종통로이다. 그런데 이 부분에서 급격한 유동통로 단면적 및 유동방향 변화로 인하여 유동손실이 크게 발생하게 된다. 현재 사용되고 있는 LP exhaust hood는 최적설계 및 열효율 관점에서 개선이 요구되는 것으로 판단된다. 예를 들면, 기존 600 MW급 대형 증기터빈의 경우 터빈 전체 엔탈피 강하의 2% 정도가 전혀 일을 하지 못하는 LP exhaust hood에서 발생되고 있다⁽¹⁾. 따라서 증기터빈 성능향상 측면에서 LP exhaust hood는 연구 가치가 매우 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 LP exhaust hood는 현실적으로 블레이드를 비롯한 각종 증기터빈 핵심부품에 우선순위가 밀려서 기술개발이 비교적 느리게 진행되어 왔었다. 이는 LP exhaust

hood가 대형이고 이곳을 통과하는 작동유체가 습증기이기 때문에 실험에 과다한 비용이 요구되었을 뿐만 아니라 유동이 고속이면서 복잡하여 유동측정이 쉽지 않았기 때문이다. 그러나 최근 들어서는 발전설비 선진업체들을 중심으로 증기터빈 열효율을 향상시키기 위한 노력이 경쟁적으로 집중되면서 LP exhaust hood에 대한 기술적 중요성이 인식되어 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

최근 발전설비 선진업체에서 발표되는 자료에 의하면 증기터빈 retrofit 시 LP exhaust hood 형상개선을 통하여 약 0.5%에 가까운 열효율 향상을 얻고 있다^(2,3). 이는 LP exhaust hood가 설계 및 기술개발 측면에서 상당히 낙후되었었다는 것을 단적으로 나타내고 있는 것이다. 한편, 기존 증기터빈 브레이드 모두를 conventional blade에서 advanced vortex blade로 교체하는 경우 약 1.5% 정도의 열효율 향상을 얻을 수 있는 것에 비하면 LP exhaust hood에 대한 기술개발 중요성을 쉽게 인식할 수 있다.

LP exhaust hood에 대한 체계적인 실험적 연구는

* 항공기능대학, 항공기계과

** 두산중공업, 기술연구원

E-mail : ebyeong@kopo.or.kr

웨스팅하우스 연구진⁽⁴⁾에 의하여 수행되었다. 이들은 공기를 이용한 실험결과는 증기를 이용한 실험결과와 차이가 없다는 것을 확인하였다. 더욱 중요한 것은 증기터빈에 최초로 steam guide를 설치하여 exhaust loss를 획기적으로 줄였다는 것이다. 이들은 steam guide 설치를 통해서 증기터빈 효율을 0.3-0.6% 향상시켰다. Liu et al.⁽⁵⁾은 공기를 이용하여 실험적 연구를 수행하였다. 이들은 LSB(Last Stage Bucket) 출구면에서의 실제적인 유동분포를 구현하기 위하여 실험모델 입구에 스크린을 설치하여 속도 및 압력에 대한 반경방향 및 원주방향 성분을 고려하여 실험을 수행하였으며, 균일입구유동 분포를 사용하여 얻은 결과를 비교하였다. 그러나 선행연구 모두 LP exhaust hood에 대한 최적형상을 제시하지 않은 관계로 실제 설계에 반영할 수 있는 데이터는 확보할 수 없는 상태이다.

본 연구는 현재 국내 발전소에 설치된 가장 최신의 LP exhaust hood 형상을 기준으로 유동해석을 통하여 성능을 극대화 시킬 수 있는 최적형상을 개발하는 것이 목적이다. 본 연구를 통해 개발된 형상은 현재 개발 추진중인 1,000 MW급 대형 화력발전용 USC급 증기터빈에 채택될 예정이다.

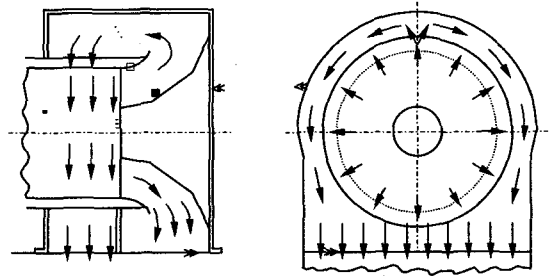
2. LP Exhaust Hood 유동특성 및 배기손실

증기터빈에서는 저압 후단으로 갈수록 증기의 비체적이 급격히 증가되는 관계로 고속(마하수 0.6-0.8)으로 LSB(Last Stage Bucket)를 빠져 나가 Fig. 1에 나타나 있는 것처럼 LP exhaust hood로 보내지게 된다. 따라서 증기는 비교적 큰 운동에너지를 가진 상태로 LSB를 떠나게 된다. 이것이 Fig. 2에 나타나 있는 LL(Leaving Loss)이다. LP exhaust hood를 통과하는 증기는 이곳에서 벽면과의 마찰과 collector 및 steam guide 끝단에서 형성되는 선회유동으로 인하여 유동손실이 발생하게 되는데, 이를 HL(Hood loss) 또는 exhaust loss라 한다.

LP exhaust hood의 주요 구성품인 steam guide는 bearing cone과 디퓨저를 형성하여 LSB를 떠나는 증기의 운동에너지를 압력에너지로 변환시키는 역할을 수행한다. 결국 이 압력은 복수기 압력과 조화를 이루기 때문에 증기의 운동에너지는 사용 가능한 에너지로 변환되는 것이라 할 수 있다. 따라서 bearing cone과 steam guide 형상은 성능 측면에서 매우 중요하다.

Collector에서는 큰 선회유동이 형성된다. 이 선회유

동의 크기와 강도는 유동손실과 직결되기 때문에 크기와 강도를 작게 해주기 위한 노력이 필요하다. 아울러 steam guide 형상에 따라 steam guide를 떠나는 유동에 선회유동이 발생할 수 있다. 그렇게 되는 경우 추가적인 유동손실이 발생하는 관계로 steam guide 형상은 주의를 기울여 설계해야 한다.



- : Annulus plane; • : Bearing cone; • : Steam guide; • : Collector;
- : Turbine inner casing; • : Turbine outer shell; • : Flange plane

Fig. 1 Steam turbine exhaust system: general arrangement (from Tindell et al.⁽⁶⁾)

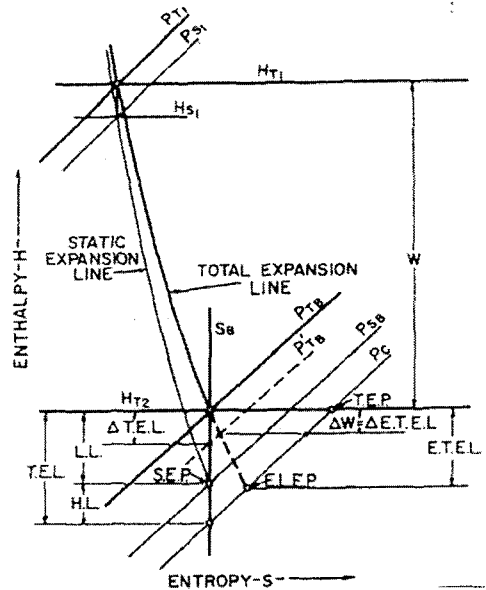


Fig. 2 Expansion lines and definition of losses (from Seglem and Brown⁽⁴⁾)

일반적으로 LP exhaust hood에서의 손실에 대한 판단자료는 HL나 정압회복계수(SPRC: Static Pressure

Recovery Coefficient)를 사용한다. 본 연구에서는 SPRC를 사용하였으며, 그 정의는 다음과 같다:

$$C_{pr} = \frac{P_{S_F} - P_{S_{ANN}}}{P_{T_{ANN}} - P_{S_{ANN}}} \quad (1)$$

여기서, P_S 는 정압, P_T 는 전압, 하첨자 F 와 ANN 은 각각 flange plane과 annulus plane (Fig. 1 참조)을 나타낸다.

3. LP Exhaust Hood 구성품 영향 분석

최근에 소개된 해외 선진업체의 LP exhaust hood 형상은 Fig. 3에 나타나 있는 것처럼 여러 개의 구성품으로 이루어져 있어서 매우 복잡하다.

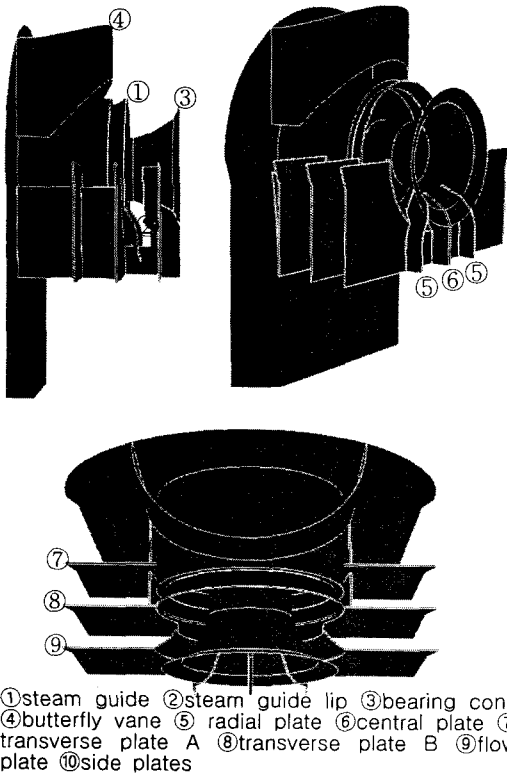


Fig. 3 LP exhaust hood.

이들 각각의 구성품이 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 주요 구성품을 순차적으로 반영하여 해석

한 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 유동해석은 상용해석 코드인 FLUENT를 사용하였다.

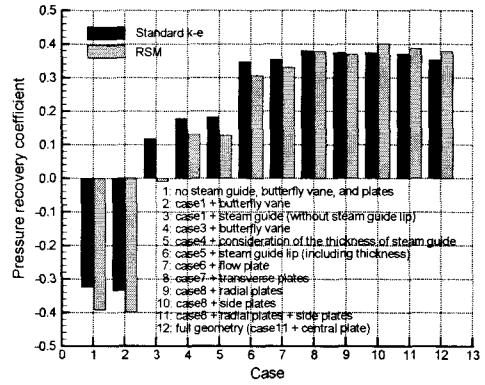


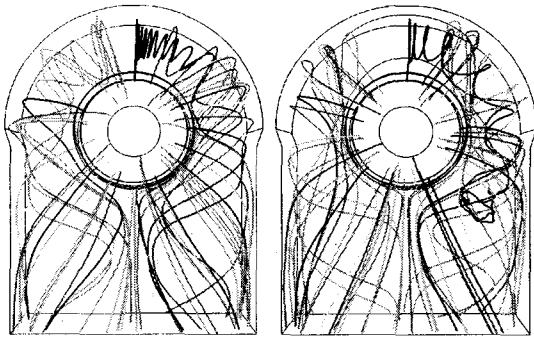
Fig. 4 Performance evaluation for a recent LP exhaust hood.

Figure 4에서 Case 1은 Fig. 3에 나타나 있는 모든 구성품들을 제거한 상태에서 유동해석을 수행한 결과이다. 이 경우 압력회복계수가 음(-)의 값을 가지기 때문에 exhaust loss가 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

Case 2는 butterfly vane만을 설치한 상태에서 유동해석을 수행하였다. Butterfly vane의 기능은 크게 두 가지로 볼 수 있다. 하나는 collector에서 생기는 선회 유동 크기를 작게 하는 것이고, 다른 하나는 상부에서 하부로 내려가면서 3차원적으로 유동 단면적을 증가시켜서 steam guide를 빠져 나오는 증기의 유동분포를 고르게 해주는 것이다. 그러나 해석결과에 의하면 butterfly vane을 설치하더라도 성능에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

Case 3은 steam guide만을 설치한 상태이다. 해석 결과 압력회복계수가 크게 향상되고 있음을 알 수 있다. 이는 steam guide를 통해서 유동이 원활하게 확산되기 때문인 것으로 판단된다.

Case 4는 steam guide와 butterfly vane을 설치한 것이다. Case 2와는 달리 butterfly vane을 추가로 설치함에 따라 압력계수가 비교적 크게 향상되었음을 알 수 있다. 이는 steam guide 설치에 따라 LP exhaust hood의 end wall에 부딪히는 속도가 작아지고, butterfly vane을 설치함에 따라 Fig. 5에 나타나 있는 것처럼 collector에서 증기유동의 선회강도가 작아지기 때문이다.



(a) Case 3 (b) Case 4
Fig. 5 Comparison of pathlines.

Case 5는 steam guide 두께를 고려한 형상이다. 해석결과 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

Case 6은 Case 5에 steam guide lip을 추가한 형상이다. 해석결과 압력회복계수에 큰 향상이 나타났는데, 이는 steam guide lip으로 인하여 유동이 더욱 원활하게 하류로 확산시켜주기 때문이다.

Case 7-12는 각종 plate를 부착시킨 형상이다. 이 plates의 역할은 Fig. 6에 나타나 있는 것처럼 선회유동의 강도를 작게 하고 하류에서의 유동분포를 고르게 하는 것으로 밝혀졌다.

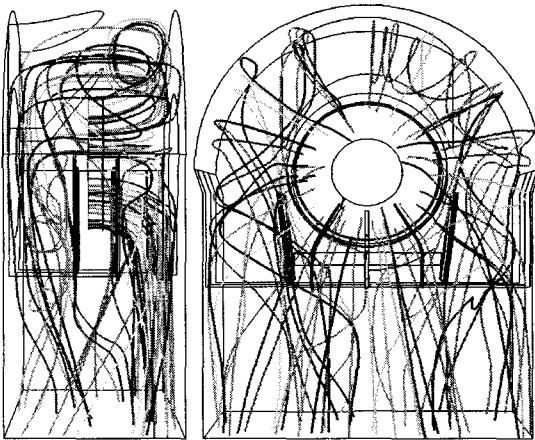


Fig. 6 Pathlines of Case 12.

본 연구에서 채택된 steam guide 형상은 오래 전부터 사용되고 있는 것으로 LP exhaust hood의 외부 형상이 변경되었음에도 그대로 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 최적의 steam guide 형상을 도출하기 위하여 해석을 수행하였다.

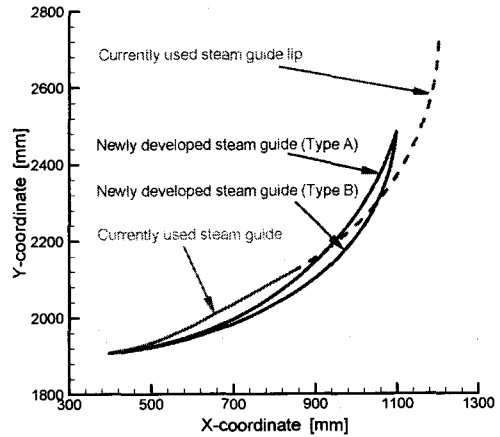


Fig. 7 Newly developed steam guide.

Figure 7에 새로 설계된 steam guide 형상을 나타냈다. 새로운 steam guide는 두개의 아크(arc)로 구성되어 있어 제작이 용이하도록 하였다. 한편 두개의 아크로 구성된 steam guide 성능은 하나의 직선과 하나의 아크로 이루어진 선진업체의 그것에 비해 성능이 매우 우수하다는 것이 밝혀졌다⁽⁷⁾.

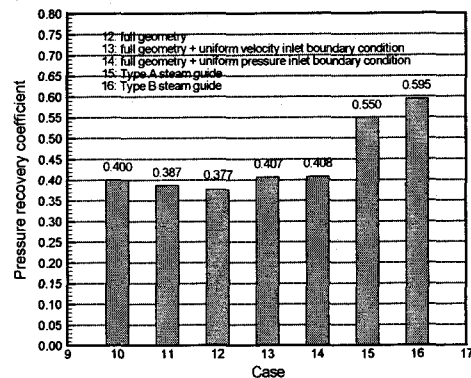
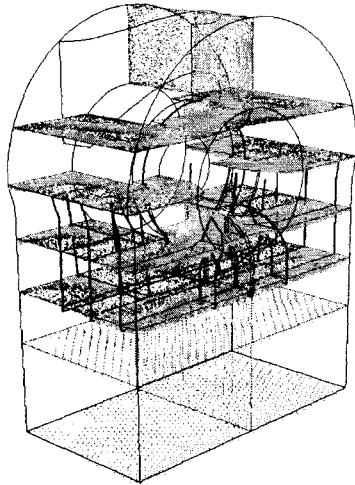


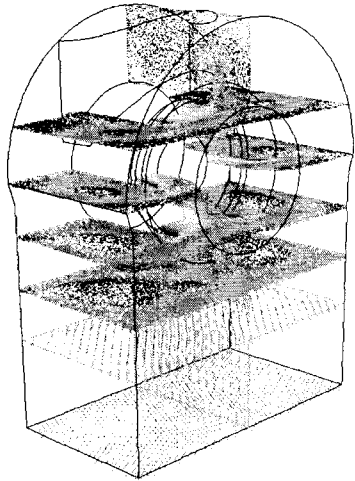
Fig. 8 Comparison of pressure recovery coefficient.

Figure 8에 RSM 난류모델을 사용하여 구해진 pressure recovery coefficient를 비교하였다. Case 10-12는 Fig. 4에서 언급된 경우와 동일하다. 여기서 한 가지 밝혀줄 것은 LP exhaust hood 입구에서의 전압력 분포는 반경방향을 따라 바뀐다는 것이다. Case 12는 이런 변화를 반영하여 해석한 결과이다. Case 13과 14는 각각 입구 속도와 압력이 균일한 경우에 대

한 해석 결과이다. 이 결과로부터 LP exhaust hood 입구에서의 유동분포가 균일한 경우 성능이 향상된다는 것을 확인할 수 있다. 한편, 새로운 steam guide를 이용한 해석결과를 살펴보면 뚜렷한 성능향상을 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다. Type B가 Type A의 steam guide에 비해 우수한 성능을 나타낼 것이라는 것은 선행연구^(7,8)를 통해 확인할 수 있다.



(a) Case 12

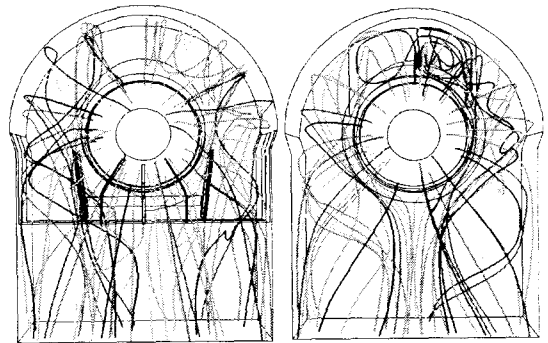


(a) Case 16

Fig. 9 Comparison of velocity vectors.

Case 16이 Case 12에 비해 성능이 우수하다는 것을 확인하기 위하여 Fig. 9에 LP exhaust hood 내부에서의 속도벡터를 비교하였다. 이 그림에서 Case 12와 16을 비교하면 collector에서의 유동구조에 뚜렷한 변화가 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 즉, Case 16의 경

우 Case 12에 비해서 선회유동강도가 현격히 줄어들고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 Case 16에서는 LP exhaust hood의 end wall에 부딪히는 속도성분이 작기 때문에 마찰에 의한 유동손실이 현격히 줄어드는 것으로 판단된다. 이는 기존 steam guide 출구에서의 접선 각도가 30°인데 반하여 새로운 steam guide의 그것은 85°로서 유동을 축방향으로부터 반경방향으로 바꾸어 주기가 훨씬 쉽기 때문인 것으로 판단된다. 현재 전세계적으로 steam guide에 대한 개선은 대개 이런 형태로 추진되고 있다⁽⁸⁾. 한편 Fig. 10에 나타나 있는 증기의 pathlines를 비교하면 Case 16이 Case 12에 비해 더욱 완만히 LP exhaust hood를 통과하는 것을 확인할 수 있다. Case 12로부터 Case 16의 형태로 LP exhaust hood를 바꾸는 경우 1,000 MW 증기터빈을 기준으로 약 3 MW 이상의 출력 증진을 얻을 것으로 판단된다.



(a) Case 12

(b) Case 16

Fig. 10 Comparison of pathlines.

4. 결론

본 연구에서는 LP exhaust hood에 대한 유동특성을 분석하고 exhaust loss를 줄여서 증기터빈의 성능을 향상시키기 위하여 CFD해석을 수행한 내용을 정리하였다. 여기서 한 가지 추가로 언급할 것은 CFD해석결과를 검증하기 위하여 실험적 연구도 병행하였으며, 실험결과와 CFD해석결과는 거의 일치하였다는 것이다. 본 논문에서는 실험적 연구에 대한 내용을 배제시켰다. 한편, 본 연구를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 증기터빈 LP exhaust hood 역할은 증기터빈 LSB를 빠져나온 증기의 유동방향을 축방향으로부

터 반경방향으로 원활하게 바꾸어 복수기로 유입 되도록 하는 것이다. 이 과정에서 steam guide는 bearing cone과 디퓨저를 형성하여 고속 증기가 가지고 있는 운동에너지를 압력에너지로 바꾸어주는 역할을 수행한다. 따라서 steam guide를 설치하면 steam guide가 없는 경우에 비해 유동손실을 현격하게 줄일 수 있다.

- 2) Steam guide를 설치하여 유동을 원활하게 확산시키는 경우 collector에는 강한 선회유동이 형성된다. 이 경우 butterfly vane을 설치하면 이 선회유동의 크기와 강도를 줄일 수 있기 때문에 LP exhaust hood에서의 유동손실을 크게 줄일 수 있다. 한편 butterfly vane은 상부에서 하부방향으로 단면적을 증가시켜주는 역할을 수행하기 때문에 LSB 출구면을 빠져 나오는 유동 분포를 더욱 균일하게 해준다.
- 3) Steam guide 출구에서의 접선각도가 클수록 LP exhaust hood에서 발생하는 exhaust loss가 작아진다. 이는 접선각도가 커질수록 유동을 축방향으로부터 반경방향으로 원활하게 유도하며, end wall에 부딪치는 속도성분이 작아지기 때문에 마찰손실이 줄어들기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) Steam guide 끝단에서 발생하는 와류성분은 유동손실에 큰 영향을 미친다.
- 5) 본 연구에서 제시된 steam guide는 기존 형상에 비해 유동손실 측면에서 매우 우수한 것으로 밝혀졌다. 새롭게 개발된 steam guide를 1,000 MW급 증기터빈에 이용하는 경우 3 MW 이상의 출력 증진을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하는 전력산업연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Liu, J., 1998, The calculation of asymmetric flow in turbine exhaust systems, PhD Thesis, University of Cambridge.
- (2) Brown, R. D., F. Y. Simma, and R. J. Chetwynd, 2000, Efficiency improvement features of recent ABB-ALSTOM HP-LP turbine retrofit at southern California Edison's San Onofre nuclear generating station, Proc. International Joint Power Generation Conference, pp. 23-26.
- (3) Hesler, S. H., D. VanBronkhorst, K. D. Wang, 1998, An assessment of low pressure turbine exhaust system improvements at Mayo generating station, RPRI TR-109225.
- (4) Seglem, C. E. and R. O. Brown, 1960, Turbine-exhaust losses, ASME Publication, Paper number 60-PWR-7.
- (5) Liu, J., Y. Cui, and H. Jiang, 2001, Investigation of flow in a steam turbine exhaust hood with/without turbine exit conditions simulated, Proc. ASME Turboexpo, 2001-GT-0488.
- (6) Tindell, R. H. and T. M. Alston, C. A. Sarro, G. C. Stegmann, L. Gray, and J. Davis, 1996, Computational fluid dynamics analysis of a steam power plant Low-Pressure turbine downward exhaust hood, J. Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 118, pp. 214-224.
- (7) 이병은, 박구하, 김진환, 2003, 증기터빈 배기계통 steam guide 형상개선, 항공기능대학 논문집 제3집 pp. 99-105.
- (8) 이병은, 2004, LP exhaust hood 유동해석 및 최적 형상설계, 연구보고서, 두산중공업.