

LNG 운반선용 증기터빈 고압단의 성능해석

박종후* · 정경남** · 김양익*** · 조성희****

Performance Analysis of HP Steam Turbines of LNG Carriers

Jong-Hwoo Park*, Kyung-Nam Chung**, Yang-Ik Kim*** and Seoung-Hee Cho****

Keywords : HP steam turbine(고압 증기터빈), mean-line analysis method(평균선 해석), partial admission(부분분사)

Abstract

A steam turbine is one of propulsion systems of a LNG carrier, which consists of high pressure (HP) and low pressure (LP) turbines. In order to obtain high power, each one has the form of a multi-stage turbine. Especially, the first stage of a HP turbine is Curtis stage and uses partial admission considering the turbine efficiency. The performance of a HP turbine can be predicted by a mean-line analysis method, because the relatively large value of hub-tip ratio makes the three-dimensional losses small. In this study, a performance analysis method is developed for a multi-stage HP turbine using Chen's loss model developed for the transonic steam turbines. To consider the feature of partial admission, different partial admission models are reviewed. This analysis method can be used in partial load conditions as well as full load condition. The calculation results are also compared with the CFD results about some simple cases to check the accuracy of the program. Performance of two HP turbine models are calculated, and the calculation results are compared with the designed data. The comparison shows the qualitative performance analysis result.

1. 서 언

증기터빈은 디젤엔진에 비해 상대적으로 구조가 간단하고 큰 마력으로 장시간 운전이 가능하며, 운전이 정속하다는 장점으로 인해 LNG선 추진용으로 사용되어 왔다. 최근 경제성을 이유로 디젤엔진의 사용이 증가하는 추세이나, 가스터빈의 선박 분야 적용 확대가 고려되면서 터빈에 대한 관심은 증가하고 있다. LNG선 추진용 증기터빈은 고압터빈과 저압터빈으로 구성되어 있으며, 각 터빈은 높은 출력을 얻기 위해 다단으로 구성되어 있다. 저압터빈의 경우와 달리 고압터빈의 경우 허브-팁 비(hub-tip ratio) 값이 상대적으로 크기 때문에 3차원 효과에 의한 손실이 작아서 평균선 해석법에 의한 성능해석이 가능하다.

일반적으로 터빈의 설계는 시스템 설계, 기본 공력 설계, 탈설계점 성능해석, 2차원 단면 설계, 3차원 유동해석, 구조해석 및 진동해석 등 복잡한 과정으로 이루어진다[1]. 시스템 설계는 터빈 시스템의 구성에 대한 개념설계가 이루어지는 단계로서 터빈의 출력, 유량, 터빈 입구에서의 압력과 온도, 회전수 등이 결정된다. 이러한 설계 사양에 따라 기본 공력 설계 단계에서는 평균 반경을 따라 1차원적인 유로 설계를 하게 되며 설계점에서의 성능해석이 수반된다. 기본 공력 설계에 이어 부분 부하 상태에 대한 탈설계점 성능해석이 이루어진다. 이후 상세설계가 이루어지고 구조해석과 진동해석이 수행되며 원하는 터빈 성능을 얻을 때까지 위의 설계 절차를 반복하여

수행하게 된다.

새로운 모델의 개발은 위와 같이 복잡하고 긴 시간을 필요로 하므로 고객이 요구하는 터빈 출력이 기존 모델의 출력과 크게 다르지 않은 경우 터빈의 유량, 회전수 및 터빈 날개의 스패 방향 길이를 국부적으로 조절하여 원하는 출력을 얻을 수 있도록 출력 변경 설계하는 것이 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 평균선 해석법을 이용한 증기터빈 고압단 성능해석 프로그램을 개발하고 현대중공업에서 건조된 실적선에 적용된 모델을 대상으로 성능해석을 수행하였으며 본 성능해석 방법이 출력 변경 설계에 활용될 수 있는지 살펴 보았다.

2. 성능해석 방법

2.1 Chen의 평균선 해석법

터빈의 성능을 구하는 방법 중의 하나인 평균선 해석법은 터빈 날개의 기본적인 형상과 터빈 입구에서의 증기 조건으로부터 터빈 유동의 손실 값을 추정하여 터빈의 효율, 동력, 출구 증기 상태 등을 계산한다. 이 성능해석 방법에서는 손실 개념을 도입하여 성능을 정의하는데 터빈의 손실을 날개 형상에 의한 손실과 2차 유동에 의한 손실, 날개 끝 간격에 의한 손실 등의 조합으로 표현하고 있으며 각 손실은 여러 실험을 통하여 도출된 경험식을 사용하여 구하고 있다[2][3][4]. 이러한 손실들을 구하는 방법에는 여러 가지 모델이 있는데 본 연구에서는 천음속 축류 터빈에 대하여 개발된 Chen[5]의 모델을 사용하여 증기 터빈의 성능을 구할 수 있도록 프로그래밍 하였다.

Chen의 손실 모델은 Craig and Cox[6]의 손실 모델을 기초로 하여 작성된 것으로 에너지 손실계수를 사용하여 손실을 구하고 있다. 에너지 손실계수 ζ 는 다음과 같이 정의된다.

* 현대중공업(주) 기계설계연구소, hwoo04@hhi.co.kr
** 현대중공업(주) 기계설계연구소, knchung@hhi.co.kr
*** 현대중공업(주) 기계설계연구소, daroo@hhi.co.kr
**** 현대중공업(주) 펌프터빈설계부, sunghcho@hhi.co.kr

$$\zeta = 1 - \frac{v_2^2}{v_{2i}^2} \quad (1)$$

식 (1)에서 v_2 는 출구에서의 유동 속도를 나타내며 v_{2i} 는 등엔트로피 유동에서의 출구 유속을 나타낸다. Chen은 Craig and Cox 모델이 아음속 유동에서 좋은 결과를 보이고 있으나 천음속 유동에서는 시험치와 차이를 주고 있어 마하수에 의한 손실을 수정하였다. Chen의 손실모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\zeta = \chi_b \cdot k_b \cdot N_r \cdot N_i \cdot N_m \cdot N_l + \Delta\chi_l + \Delta\chi_s \quad (2)$$

여기서 χ_b 는 형상 손실, k_b 는 형상 손실 수정 계수, N_r 은 레이놀즈 수에 의한 손실 계수, N_i 는 입사각에 의한 손실 계수, N_m 은 마하수에 의한 손실 계수, N_l 는 날개 뒷날에 의한 손실 계수, $\Delta\chi_l$ 는 뒷날 두께에 대한 부가 손실 계수, $\Delta\chi_s$ 는 날개 목과 뒷날 사이에서 흡입면 곡률에 따른 부가 손실 계수이다. 위의 식 (2)에서 마지막 항은 출구 유속이 마하수 1 이상인 경우에만 사용된다. 한편, 부분부하에서의 성능해석은 입사각에 의한 손실계수에 의해 계산된다.

2.2 부분분사에 대한 성능해석

부분분사에 의한 손실은 펌핑 손실(pumping loss), 확산 손실(expansion loss), 혼합 손실(mixing loss)로 나뉜다[2][4]. 펌핑 손실은 통로가 막혀 증기가 분사되지 않는 노즐 영역 뒤에서 로터의 회전이 정체된 증기를 펌핑하는 역할을 하므로 발생하는 손실이다. 때로는 동일 차원을 갖는 disc friction 손실과 함께 고려하여 windage loss라고도 불린다. 확산 손실은 노즐을 통하여 분사된 증기가 로터 블레이드 유로에서 유동이 확산되어 운동량의 손실이 발생됨으로써 일어나는 손실이다. 혼합 손실은 정체영역의 증기와 분사 영역의 증기가 혼합되면서 발생하는 손실이다.

식 (3)은 부분분사가 이루어지는 단(stage)의 효율을 계산하는 수식이다[2]. 전체분사가 이루어지는 것으로 가정하여 효율을 계산한 다음 부분분사에 의한 손실을 고려하여 계산된다.

$$\eta_{pa} = \eta_{fa} - \frac{P}{m \cdot \Delta h_{0is}} \quad (3)$$

여기서 η 는 효율, 하첨자 pa 는 부분분사, 하첨자 fa 는 전체분사, P 는 손실된 출력, m 은 부분분사조건에서의 질량 유량, Δh_{0is} 는 정체엔탈피(stagnation enthalpy)의 등엔트로피 감소를 나타낸다.

이러한 부분분사에 의한 손실을 예측하기 위해 여러 가지 모델이 제시되고 있다[2][7][8][9][10]. 본 연구에서는 동일 조건에서 각 모델에 대한 성능해석 결과를 비교하여 적정 모델을 선택하였다.

부분분사가 이루어지는 control stage에서는 부분부하 상태의 경우 질량유량의 변화와 더불어 실제 증기가 통과하는 단면적의 변화도 이루어진다. 따라서 본 연구에서는 질량유량 변화에 따른 control stage 후방의 압력 변화가 선형적이라는 조건을 추가로 가정하여 해석하였다.

부분분사로 이루어진 control stage의 하류 유동은 원주방향으로 높은 불균일성과 비대칭성을 갖는다. 챔버(Chamber)는 큰 반경의 control stage에서 작은 반경의 다단터빈 입구, 즉 2단의 노즐 입구로 유체를 전달하면서 총압력 손실을 최소화하고, 원주방향으로의 불균일성을 줄이는 역할을 담당하고 있다 [11]. 본 연구에서는 챔버 입·출구에서 정체 엔탈피가 일정하다는 조건과 다음의 손실계수 수식[12]을 이용하여 챔버에서의 유동을 해석하였다.

$$K_{SE} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \quad (4)$$

$$K_{SC} \approx 0.42 \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \quad (5)$$

여기서 d 는 (스팬방향에서의) 유로 폭, D 는 챔버 폭, 하첨자 SE 는 급격한 확대, 하첨자 SC 는 급격한 축소를 나타낸다. 식 (4)와 식(5)는 입·출구에서의 유동이 균일하다는 가정하에 급격한 확대와 급격한 축소를 갖는 일반적인 관 유동에서 사용되는 손실계수 수식이다. 즉, 2단 입구로 유입되는 증기 또한 챔버를 통과하면서 충분히 균일한 유동이 되었다고 가정하였다.

3. 해석결과 및 고찰

본 연구를 통하여 개발된 LNG 운반선용 고압 증기터빈 성능해석 프로그램을 출력어 서로 다른 두 터빈 모델(Turbine 1, Turbine 2)에 대해 적용하고 그 결과를 살펴보았다.

3.1 부분분사 손실모델의 선정

여러 부분분사 손실모델 중에서 가장 적절한 모델을 선정하기 위하여 Turbine 1 모델 100%MCR 조건에 대해 그 성능을 비교하였다.

Figure 1은 성능해석 결과로부터 얻은 각 단의 압력 분포이다. 시험치는 추기되는 증기의 상태량으로부터 얻은 값으로 Turbine 1 모델의 경우 4단과 고압터빈의 출구, 두 지점에서 추기된다. 5가지의 손실모델 모두 비슷한 경향을 보이고 있으나, 두 추기점에서의 시험치와 비교한 결과 Yahya and Doyle의 모델에 혼합손실 계수를 블레이드의 형상으로부터 구하는 Verneau의 방법을 사용한 모델이 가장 좋은 결과를 나타내었다. 따라서 이후의 성능해석은 모두 이 모델을 사용하여 얻은

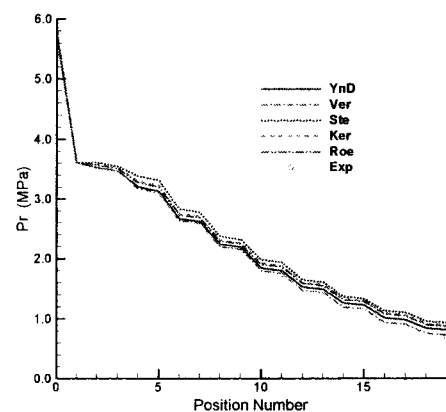


Figure 1 Stage pressure distribution of HP turbine with partial admission models (Turbine 1)

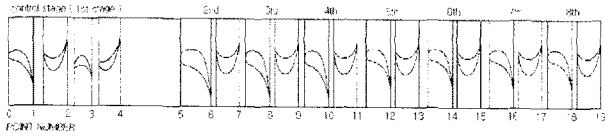


Figure 2 Location of position number with HP turbine profiles

결과이다. 가로축은 1단 입구에서 8단 출구까지 노즐과 블레이드의 경계면을 나타내고 있으며 그 위치는 Figure 2에 표시하였다.

3.2 CFD 결과와의 비교

작성된 평균선 성능해석 프로그램을 검증하고자 전산유체역학을 이용하여 control stage를 전체분사인 상태로 가정한 경우와 부분분사인 경우에 대하여 해석하였다. 전산유체역학을 이용한 유동해석에서는 평균선 성능해석에서의 동일한 경계조건으로 해석하였으며, Table 1과 Table 2에 노즐과 블레이드의 입구와 control stage 출구에서의 평균 유속, 평균압력 그리고 평균유동에 대한 유동각을 나타내었다.

Table 1에 보인 CFD 결과는 3차원 유동해석 결과인데 표에서 보듯이 고압터빈의 경우 평균선 해석법을 사용하더라도 정성적인 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 전체분사와는 달리 부분분사의 경우 2차원 유동해석이 수행되었으며 평균 유속과 유동각에 있어 두 해석법이 차이를 보이고 있다. 이러한 차이를 주는 원인 중 하나는 평균선 해석법을 이용한 해석시에는 증기가 실제로 통과하는 단면적이 로터를 통과하는 경우에도 원주방향의 일부만 사용하였기 때문이다. Figure 3은 CFD 해석에 의한 유선을 보여주고 있는데 막혀있는 노즐 후방에서 주 유동 지역을 서로 연결하는 유동이 존재하고 있는 것을 알 수 있으며 control stage 후방에서는 유동이 고루 퍼지도록 control stage의 두 번째 블레이드 후방에서 접선 방향 속도 성

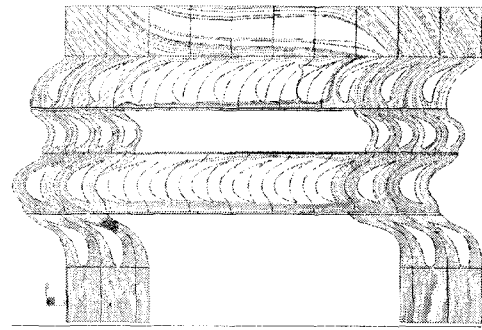


Figure 3 Streamlines at partial admission condition

분이 큰 유동이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 Turbine 1

Figure 4는 최대출력 조건에서 약 14,400 kW를 생산할 수 있도록 설계된 Turbine 1에 대하여 100% MCR, 90% MCR, 70% MCR 조건에서 고압단의 각 단에서의 압력 변화를 보여 주고 있다. 그림에서 보듯이 부분부하가 되면서 control stage에서의 압력 감소량이 크게 증가하는 경향을 보이고 있는데 특히 70%MCR의 경우 control stage 첫 번째 노즐에서의 압력감소가 입구 압력에 비해 약 60%에 다다르고 있다.

Table 3은 Turbine 1 모델에 대해 부하별로 출구에서의 압력과 고압터빈단의 출력을 설계치와 비교하여 나타내고 있다. 부분 부하 상태에서 출구압력이 시험치와 적지 않은 차이를 보이고 있으나 터빈 출력의 측면에서 보면 정성적인 해석 결과를 주고 있다고 말할 수 있다.

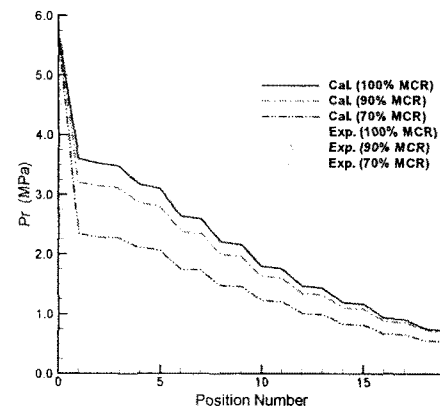


Figure 4 Stage pressure distribution of HP turbine (Turbine 1)

Table 1 Steam conditions at planes (full admission)

		S1_in	R1_in	S2_in	R2_in	Outlet
Mean pressure (Mpa)	CFD	5.979	4.760	4.538	4.437	4.343
	meanline	5.984	4.763	4.619	4.516	4.409
Mean velocity (m/s)	CFD	94.6	229.5	132.1	68.57	87.4
	Meanline	90.1	229.4	120.9	69.3	78.2
Flow angle (degree)	CFD	-0.05	61.76	37.68	-22.34	-45.71
	meanline	-0.99	61.95	32.22	-19.85	-43.07

Table 2 Steam conditions at planes (partial admission)

		S1_in	R1_in	S2_in	R2_in	Outlet
Mean pressure (Mpa)	CFD	5.696	3.465	3.298	3.213	3.091
	meanline	5.744	3.380	3.379	3.347	3.054
Mean velocity (m/s)	CFD	128.9	342.0	177.7	96.1	115.5
	Meanline	105.8	420.4	228.7	98.7	82.8
Flow angle (degree)	CFD	-0.28	58.44	9.30	11.64	-63.45
	meanline	-0.99	67.55	50.60	21.66	-1.13

Table 3 Comparison of HP turbine power

		Turbine 1			Turbine2
Load		100% MCR	90% MCR	70% MCR	100% MCR
Exit Pressure (Mpa)	Exp.	0.6877	0.6082	0.4807	0.5750
	Cal.	0.7274	0.7090	0.5443	0.6015
	Error (%)	5.8	16.6	13.2	4.6
Power (kW)	Design	14,416	12,974	10,091	11,584
	Cal.	15,204	13,182	9,490	12,789
	Error (%)	5.5	1.6	-6.0	10.4

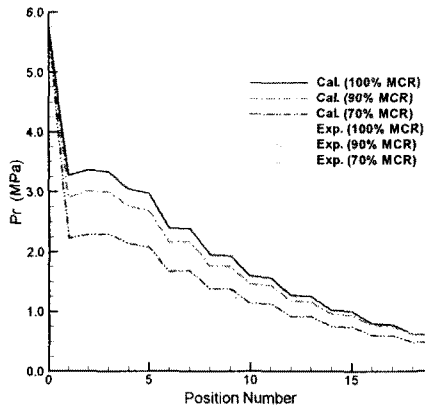


Figure 5 Stage pressure distribution of HP turbine (Turbine 2)

3.4 Turbine 2

Turbine 2 모델은 Turbine 1 모델을 기준으로 하여 출력이 약 20% 작도록 출력 변경 설계된 것이다. 날개 수의 경우 control stage의 첫 노즐에서만 2개 적고 나머지는 Turbine 1과 동일하다. 날개 높이의 경우 Turbine 1에 비해 전체적으로 조금씩 작은 값을 가지고 있으며 회전수는 약 2% 작게 설계되어 있는데 이러한 차이가 터빈 출력에 변화를 주고 있다. Figure 5는 각 날개의 경계면 위치에서 100% MCR, 90% MCR, 70% MCR의 경우에 대한 압력 변화를 보여주고 있다.

그림에서 보듯이 Turbine 2에서의 압력 변화는 전체적으로 Turbine 1의 결과와 동일한 경향을 보여주고 있으나 control stage에서 첫 번째 블레이드를 지나면서 압력이 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 터빈 출력은 Table 3에 Turbine 1의 결과와 함께 표시하였는데 Turbine 1에서와 같이 정성적인 해석 결과를 주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 평균선 해석법을 사용하여 서로 다른 출력을 갖는 두 개의 LNG 운반선 추진용 증기터빈 고압단에 대한 성능해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고압터빈에서와 같이 터빈 날개의 허브-날개 끝 비가 큰 경우 3차원 효과를 무시할 수 있음을 확인하였다.
- 2) Control stage에서 부분분사에 의한 손실을 예측하기 위하

여 여러 가지의 부분분사 모델을 적용하였는데 이 중에서 Yahya and Doyle의 방법에서 Verneau가 제시한 대로 혼합손실 계수를 날개의 스패 길이와 평균 직경의 함수로 표현한 경우 가장 좋은 해석결과를 얻을 수 있었다.

3) 평균선 해석법을 출력이 다른 두 개의 고압터빈 모델에 대해 적용한 결과 정성적인 해석결과를 얻을 수 있었다. 하지만 출력 변경 설계에 적용하기에는 부분부하 상태에 대한 보완이 필요하다.

참고문헌

- [1] 최범석, 오군섭, 박무룡, 2000, "축류터빈 블레이드 공력설계 기술 현황," 유체기계저널, 제3권 제3호, pp.60-65.
- [2] Horlock, J.H., *Axial Flow Turbines*, Krieger Publishing Company, 1966.
- [3] Kacker, S.C., and Okapuu, U., 1982, "A Mean Line Prediction Method for Axial Flow Turbine Efficiency," *Journal of Engineering for Power*.
- [4] Denton, J.D., 1993, "Loss Mechanism in Turbomachines," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 115, pp. 621-656.
- [5] Chen, S., 1987, "A Loss Model for the Transonic Flow Low-Pressure Steam Turbine Blades," IMechE Paper No. C269/87.
- [6] Craig H.R.M., and Cox, H.J.A., 1971, "Performance Estimation of Axial Flow Turbines," *Heat and Fluid Flow*, Vol. 1, No.2, pp. 174-207.
- [7] Glassman, A.J., 1994, "Turbine Design and Application," NASA SP-290, pp. 238-243.
- [8] Yahya, S.M., and Doyle, M.D.C., 1969, "Aerodynamic Losses in Partial Admission Turbines," *Int. J. Mech. Science*, Vol. 11, pp. 417-431.
- [9] 조중현, 조수용, 최상규, 2005, "부분분사 축류형 마이크로터빈에서의 성능예측 및 성능특성에 관한 연구," 2005 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 324-330.
- [10] Harrington R.L., 1992, *Marine Engineering*, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, page 21.
- [11] Bohn, D., Drexler, C., and Emunds, R., 1993, "Experimental and Theoretical Investigations into the Nonuniform Flow of a Partial Admission Turbine with a multistage Blading," *VGB Kraftwerkstechnik*, Vol 73, Number 8, pp. 601-608.
- [12] White, F.M., 1986, *Fluid Mechanics*, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Company, pp. 332-338.