

증기터빈 1단 노즐의 조속현상이 터빈성능에 미치는 영향

윤인수, 이태구*, 문승재**, 이재현**†

한양대학교 대학원 파워엔지니어링공학과, *한양대학교 대학원 기계공학과, **한양대학교 기계공학부

Effects of flow variation in the first stage nozzle on the performance of a partial arc admission in a steam turbine

In-Soo Yoon, Tae-Gu Lee*, Seung-Jae Moon**, Jae-Heon Lee**†

Department of Power Engineering, Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

**School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received May 28, 2008; revised July 26, 2008; accepted September 7, 2008)

ABSTRACT : Power plant industry has been developed at high-capacity, high-technology, and innovation. Steam turbine became the most useful equipment that dominate more than 50% of all the world electricity production. And developed new materials of the turbine blade and extended length of the turbine last blade brought reform in steam turbine performance upgrade. In this paper, when do partial load driving in high-capacity steam turbine, optimum driving method found whether there is something. In operating steam turbine, there is a lot of loss from secondary wake and throttle of the 1st stage nozzle by the biggest leading factor that load fluctuation affects in high-pressure steam turbine performance.

Effect of internal efficiency by 1 stage nozzle is the biggest here, but here fluid flow and flow analysis were not yet examined closely definitely.

So, Analyzed design data and acceptance performance test result to applying subcritical pressure drum type 560 MW, supercritical-pressure once through type 500 MW, and 800 MW steam turbines actually. In conclusion, at partial load driving, partial arc admission(PAA) is more efficient than full arc admission(FAA) efficiency. This is judged by because increase being proportional with gross energy of stream that is pressure - available energy if pressure of stream that is flowed in to the turbine increases, available energy becomes maximum and turbine efficiency improves. Therefore, turbine performance is that preview that first stage performance fell if decline is serious in partial load because first stage performance changes according to load.

Key words : 1st stage nozzle(1단 노즐), turbine operating mode(터빈운전모드), turbine performance(터빈성능)

1. 서론

인류문명의 발달과 함께 인간에게 필요한 에너지

의 소비량이 점점 증가 하여 현대의 에너지로 대표 되는 화석연료와 그를 기반으로 생산되는 전기가 그 대표적인 에너지원이 되었다. 120년 전 에디슨에 의해 전기가 실용화된 이후 산업발달과 함께 전기의 수요가 급증하면서 발전설비 분야의 기술도 함께 발달되었다. 21세기가 되면서 전기를 생산하기 위한 발전소가 대용량화, 첨단화되고 기술진보의 혁신이 가속화되면서 증기터빈은 전 세계 전기생산의 50%

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0425; fax: +82-2-2220-4425

E-mail address: jhlee@hanyang.ac.kr

이상을 차지하는 가장 유용한 설비가 되었다.

1990년대 들어와서 증기터빈 분야에서 2가지의 기술적 변화가 일어나기 시작했다. 첫 번째는 효율 향상을 위한 고온, 고압 증기터빈 제작을 가능하게 하는 재질분야의 혁신이었다. 기존의 페라이트계 재질에서 고온강도가 우수한 오스테나이트계의 재질 개발이 성공한 것이다. 또한 이 재질을 적용한 초임계압의 발전 실증설비가 건설되었다. 미국 Philo 6 호기, Eddystone 1호기가 선구적 역할을 했으며 최근에는 미국, 일본, 독일 등지에서 초초임계압 조건을 가능하게 하는 설비가 속속 건설되고 있는 실정이다. 두 번째 기술적 변화로는 CFD의 발달로 증기유동의 3차원 해석이 가능하게 됨에 따라 플랜트 성능을 좌우하는 최종단 날개의 길이를 길게 하여 손실을 최소화 시키는 長翼(Long Last Blade) 기술이 발달된 것이다.

이처럼 발전플랜트에서 대용량 및 고성능 증기터빈이 개발되면서 대한민국도 경제개발에 편승하여 2008년 8월 1일 현재 7,138만 kW의 발전설비를 보유한 세계 10위권의 에너지 소비국으로 성장했다. 하지만 한국이 지난 60년간 보유한 발전설비는 여러 가지 면에서 선진국과는 비교하기 어려운 점들을 가지고 있다. 우선 설비구성에서 43%가 원자력 발전으로 운용되며 나머지 대부분의 설비 중 가장 많이 차지하는 것이 증기터빈을 기반으로 하는 화력 발전이 37%로 구성되어 있다. 부하변동이 가장 많은 중간부하용 발전설비는 주로 화력에서 담당하고 있는데 화력발전소에서는 증기터빈이 주종을 이루고 있어 증기터빈의 성능관리 기술이 전체 전력설비에 미치는 영향이 크다.

특히 부하변동이 많은 증기터빈에서 가장 성능에 영향을 미치는 요인으로 1단 노즐의 교축, 혼합손실과 마지막 단 날개에서의 증기배출 손실을 들 수 있다. 이들 중 부하변동에 따라 고압터빈 1단의 터빈 내부효율 변동이 가장 크지만 이곳에서의 유체흐름과 유동해석이 명확히 규명 되지 않아 실험에 의한 추정값으로 설계와 운전을 반복하고 있는 실정이다. 따라서 이 부분에서의 손실과 성능분석이 화력발전의 주종을 이루는 증기터빈 효율향상에 지대한 기여를 할 것으로 판단하여 증기터빈 1단 노즐에서의 교축손실과 열소비율의 상관관계를 규명하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 운전방식에 따른 고압터빈의 성능

화력용 증기터빈의 운전방식은 교축조속법(전주분사, Full Arc Admission : FAA, Throttle Control)과 노즐조속법(부분분사, Particle Arc Admission : PAA, Nozzle Control)의 2가지가 있다. 이들은 화력발전소의 운용방식이 기저부하용과 중간부하용으로 운용하는 운전기법에 따른 것으로 이들 운전방식에 따른 증기터빈의 1단 형상에 차이가 있다. 교축 조속법은 기계적인 열응력 면에서 유리한 반면 저부하 시 발생하는 교축손실 때문에 효율면에서 불리하다. 이를 보완하기 위해 사용되는 것이 변압운전(Sliding Pressure) 방식인데 원자력과 같이 대용량의 기저부하용에서는 이에 대비한 설계가 되어 있지 않는 것이 보통이다.

노즐 조속법은 증기 유입구가 4개 정도로 분할되어 공급되며 1단의 Nozzle Block도 같은 수로 분할되어 설치된다. 또한 부분분사 운전 시 1개의 밸브가 완전히 닫힌 상태로 운전되어도 나머지는 완전히 열린 상태로 운전하여 교축에 의한 손실을 방지할 수 있다. 노즐의 단면도를 Fig. 1에 나타내었다. 일반적으로 부분분사 운전방식에서 고압터빈 1단의 성능은 전 부하 운전 시의 전주분사 운전방식보다 약간 낮다. 이는 부분 분사형 터빈 1단에서의 회전 날개가 부분부하 운전 시 부하변화에 따른 가혹한 증기유입 조건에 견딜 수 있도록 설계되었고 1단의 Shell 증기 혼합구역을 통과한 증기는 평형흐름으로 변하여 2단에 유입되어야 하기 때문이다. 따라서 전 부하 운전에서는 부분 분사형 터빈 1단의 성능이 같은 조건에서의 전주분사 운전방식보다 약간 낮다. 그렇지만 90% 부하 이하의 운전에서는 부분분사 운전방식이 전주분사 운전방식 보다 1단의 교축손실 저감 때문에 성능이 더 좋아진다.

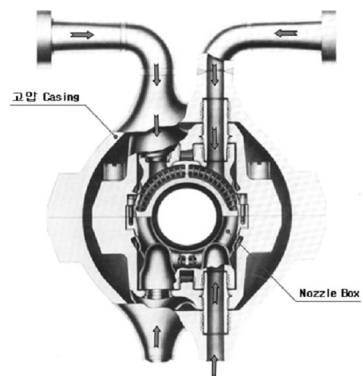


Fig. 1 Nozzle box assembly.

2.1 교축 조속법

교축 조속법의 운전방식을 전주분사(Full Arc Admission : FAA)라고도 하며 터빈 제1단이 충동단, 반동단 모두 적용되는 방법으로 주증기 조절밸브를 교축 밸브(Throttle Valve)로 사용, 증기를 교축하여 터빈에 유입되는 증기량과 압력을 변화시켜 속도조절을 행하는 방법이다.

교축 조속법은 밸브 장치가 간단하게 구성되나, 입구증기를 교축하여 감압하므로 부분 부하에 있어서 교축 손실(Throttle Loss)이 크게 되어 즉, 단열 열낙차가 감소하여 터빈 효율이 감소된다. 이는 기동 및 터빈 롤링(Rolling)시 주증기 조절밸브(CV)를 모두 열고 주증기 정지밸브 내부의 바이패스 밸브로 증기량을 조절하는 운전방식이다. 터빈을 일정하게 가열하여 국부 가열에 의한 열응력(Thermal Stress) 발생을 감소시킬 수 있는 장점이 있고 바이패스 밸브를 교축(Throttle)하여 운전하므로 증기통로부분에 걸리는 증기 속도가 낮아 열전달이 저하하고 온도변화가 감소되어 국부적인 열응력 발생을 최소화시킨다.

터빈 부하가 정격출력의 약 20%까지 상승되면 부분 분사를 위하여 주증기 조절밸브를 서서히 닫으면서 주증기 조절밸브의 증기실 압력과 입구증기 압력과의 차이가 약 15 ~ 20%이내로 되었을 때 주증기 정지밸브를 전개한다. 부분분사로 교체 후 증기압력을 정격압력까지 올린 후, 주 조속기에 의해 부하를 조절하는 방식이다.

2.2 노즐 조속법

노즐 조속법은 유량조속법이라고도 하며, 제 1 단에 부분유입이 가능한 충동단일 때 사용된다. 이 방식의 운전형태를 부분분사 운전방식(Partial Arc Admission : PAA)이라고 하며 증기의 초기상태를 유지 하고 제1단의 사용 노즐(Nozzle)수를 변경하여 증기 통로의 단면적을 증감시켜 증기 유량을 가감하여 속도조절을 한다.

대용량의 경우 수많은 노즐을 개개로 개폐하는 것은 구조상 불가능하므로 전체 노즐을 몇 개의 조로 나누어서 각 조 단위로 증기 조절밸브를 설치, 밸브를 조절하여 각 노즐에 증기를 공급하도록 되어있다. 터빈이 일정출력 이상 되면 주증기 정지밸브를 전부 열고 주증기 조절밸브로 증기량을 조절하는 운전방식이다. 터빈 부하에 따라 주증기 조절밸브의 열리는 갯수를 조절하여 터빈에 증기를 부분적으로

유입한다.

부하에 따라서 필요한 노즐을 열므로 교축은 반쯤 열린 상태로 있는 조절 밸브에서만 발생되므로 부분 부하에서도 교축손실이 적다. 그러므로 처음 증기 조절밸브를 열 때는 교축 현상이 발생하며, 각 노즐의 조 단위로는 노즐 조속법이 이루어지고 부분부하시 제2단 이후는 증기량의 감소로 엄밀한 의미의 노즐 조속은 이루어지지 않는다.

2.3 조합 조속법

조합 조속법은 교축 및 노즐 조속법의 장점을 조합한 방식으로 저부하 영역에서 교축 조속법을 사용하고, 고부하 영역에서는 노즐 조속법을 사용한다. 이 방식은 기동 시 터빈의 열응력을 경감하고, 기동시간을 단축시켜 주며, 부하 변동에 따라 발생하는 터빈 축의 열응력 발생이 낮으므로 부하가 빈번하게 변동하고 기동·정지횟수가 많은 급속 기동용에 적합하다.

3. 발전소별 고압터빈 열소비율

3.1 삼천포화력 4호기

삼천포화력 발전소 3, 4 호기 터빈 공급계약서에 따라 시행된 삼천포화력 4호기의 인수성능시험 결과('94. 12. 16 ~ 2. 28)를 Table 1 및 2에 나타내었다. 시험 및 평가방법은 계약조건에 의해 ASME

Table 1 HP Turbine efficiency on Load (Samcheonpo #4) (%)

	BMCR	100% NR	75% NR	50% NR	30% NR	3rd VP	2nd VP
Flow rate (ton/hr)	1786	1625	1205	838	-	163756	117576
Design	1	0.91	0.68	0.47	-	0.09	0.07
Experiment	-	84.57	79.6	69.18	-	-	-
Experiment	84.68	83.53	79.33	70.51	-	83.50	79.35

Table 2 Heat rate on Load(Samcheonpo #4) (kcal/kWh)

	BMCR	100% NR	75% NR	50% NR	30% NR	3rd VP	2nd VP
Design	1867	1868	1892	1958	-	1945	1945
Experiment	1935	1924	1952	2054	-	1921	1938

증기터빈 1단 노즐의 조속현상이 터빈성능에 미치는 영향

PTC 6 FULL SCALE TEST 방식으로 실시되었으며, ASME PTC 6A에 따라 계산되었다.

3.2 삼천포화력 6호기

삼천포화력 발전소 5, 6호기는 미국 General Electric Licence에 의해 한국중공업(주)에서 제작 설치한 500 MW급 터빈으로 Maximum Power Output이 541,650 kW용량을 가진 설비이다. 터빈 공급계약서에 따라 시행된 삼천포화력 6호기의 인수 성능시험결과를 Table 3 및 4에 나타내었다. 시험 및 평가방법은 계약조건에 의해 ASME PTC 6-1996 FULL SCALE TEST 방식으로 실시 했으며, ASME PTC 6A에 따라 계산하였다. 각 Valve Point에서 터빈의 Heat Rate 산정을 위해 VWO, 3rd Valve Point, 2nd Valve Point에서 수행하고 100%NR, 75%NR, 50%NR, 30%NR에서 시험이 이루어졌다.

3.3 영흥화력 2호기

영흥화력 발전소 1, 2호기 터빈은 미국에 의해 두산중공업(주)에서 제작 설치한 800 MW급 터빈으로 Maximum Power Output이 847,606 kW, 2,405.3 ton/h로 설계된 설비이다. 터빈공급계약서에 따라 영흥화력 2호기의 성능시험결과를 Table 5 및 6에 나타내었다. 시험 및 평가방법은 계약조건에 의해 ASME PTC 6-1996 FULL SCALE TEST

방식으로 실시했으며, ASME PTC 6A에 따라 계산하였다. 각 Valve Point에서 터빈의 Heat Rate 산정을 위해 VWO, 1st Valve Point에서 수행하고 100 %MGR, 75 %MGR, 50 %MGR에서 시험이 이루어졌다.

4. 발전소 유형별 고압터빈 열소비율 분석

대용량 발전소는 주로 기저부하 운전을 하지만 우리나라처럼 일별, 계절별로 부하의 변동이 심한 나라에서는 부분부하 운전이 가능하도록 설계되어 있는 것이 보통이다. 따라서 대용량 증기터빈 운전 시 부분부하에 따른 운전방식의 변화가 Cycle 효율에 미치는 영향은 커지게 된다. 특히 부하변동에 따라 가장 효율변화가 심한 증기터빈 고압단의 열소비율 관리는 운전방식에 따라서 최적의 성능을 유지할 수 있는 중요한 요소가 된다. Fig. 2는 삼천포화력 4호기, 6호기, 영흥화력 2호기의 고압터빈(HP) 내부효율을 비교한 것인 데 횡축은 속도비에 따르는 유량을 표시하고 종축은 고압터빈 내부효율을 표시한 것이다.

삼천포화력 4호기(MGR 577 MW, 169.77 ata, 537.8°C, 1,660 ton/h)는 아임계압으로 설계된 것으로 부하가 저하함에 따라 현저하게 효율도 저하하는 것을 알 수 있다. 또한 초임계압으로 설계된 삼천포화력 6호기(MGR 542 MW, 255 ata, 541°C,

Table 3 HP Turbine efficiency on Load (Samcheonpo #6)

	(%)						
	BMCR	100% NR	75% NR	50% NR	30% NR	3rd VP	2nd VP
Flow rate (ton/hr)	1704	1512	1088	709	444	1467	1044
	1	0.89	0.64	0.42	0.26	0.86	0.61
Design	-	85.97	84.66	84.87	85.59	-	-
Experiment	87.14	85.30	83.81	83.56	82.32	83.91	80.32

Table 4 Heat rate on Load(Samcheonpo #6)

	(kcal/kWh)						
	BMCR	100% NR	75% NR	50% NR	30% NR	3rd VP	2nd VP
Design	1867	1868	1892	1959	2113	-	-
Experiment	1863	1866	1891	1941	2119	1866	1902

Table 5 HP Turbine efficiency on Load (Yunghung #2)

	(%)						
	BMCR	100% NR	75% NR	50% NR	30% NR	3rd VP	2nd VP
Flow rate (ton/hr)	2408	2368	1642	1068	-	2080	-
	1	0.98	0.68	0.44	-	0.86	-
Design	89.4	88.39	86.85	86.83	-	88.56	-
Experiment	86.67	85.06	84.51	84.35	-	84.77	-

Table 6 Heat rate on Load(Yunghung #2)

	(kcal/kWh)						
	BMCR	100% NR	75% NR	50% NR	30% NR	3rd VP	2nd VP
Design	1780	1782	1800	1856	1987	-	-
Experiment	1806	1806	1824	1883	2018	1812	-

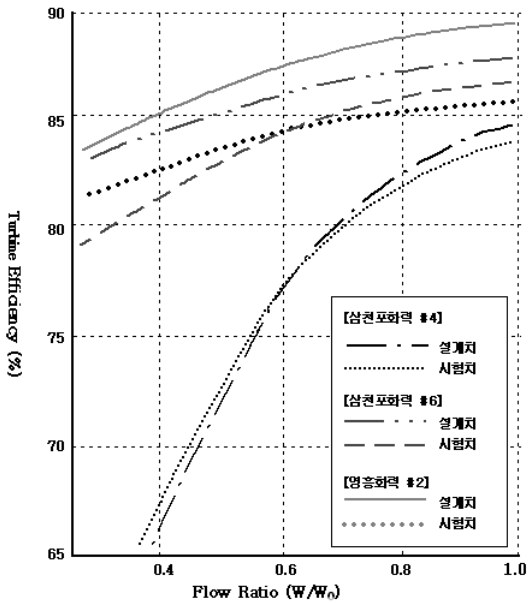


Fig. 2 Comparison of high pressure turbine efficiency over the load range for single admission turbine at constant pressure.

1,671 ton/h), 영흥화력 2호기(MGR 847 MW, 255 ata, 569°C, 2,405 ton/h)는 전체적으로 효율 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 50% 부하에서 고압 터빈의 효율이 삼천포화력 4호기가 70.51%인 반면에 삼천포화력 6호기가 83.56%를 나타내고 있어 이 둘의 효율은 13.05%의 차이가 나고, 영흥화력 2호기는 84.35%로서 삼천포화력 4호기와는 13.84%의 차이를 내고 있다. 100% 부하에서는 고압터빈 내부효율은 삼천포화력 4호기가 83.53%로 삼천포화력 6호기 85.3% 와 1.77% 차이를 나타내며, 영흥화력 2호기는 85.06%로 삼천포화력 4호기와는 1.53%의 차이를 나타내고 있어 전체적으로 아임계압 설비보다는 초임계압 설비가 저 부하운전 시 현저히 성능향상을 꾀할 수 있는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 국내에서 실제 운용 중인 500 MW 이상 대용량 석탄화력 발전소 38기를 3가지 유형으로 나누어 아임계압 드럼형 보일러로 대표되는 삼천포화력 4호기(560 MW), 초임계압 관류형 한국 표준형 보일러로 대표되는 삼천포화력 6호기(500

MW), 그리고 국내 최초 초임계압 관류형 Up-grade형 보일러로 대표되는 영흥화력 2호기(800 MW)를 선정하여 고압터빈의 설계자료와 인수성능 시험 결과를 수집하여 부하변동에 따른 운전모드 변환이 1단 노즐의 조속현상에 따른 고압 증기터빈 효율과 열소비율에 미치는 상관관계를 분석했다. 또한, 부분부하 운전 시 노즐조속(Partial Arc Admission)이 교축조속(Full Arc Admission)에 비해 효율이 높은 근거를 확인하였으며 다음과 같은 종합적인 결론을 얻었다.

(1) 증기터빈에서 전 부하에 걸쳐서 내부효율 변화를 살펴보면 아임계압에서 운전되는 삼천포화력 4호기의 고압터빈 내부효율에서 100%NR 부하와 50%NR 부하의 효율차이는 13.02 %였고 초임계압 표준화력 삼천포화력 6호기는 100%NR 부하와 50%NR 부하의 효율차이가 1.74 %, 초임계압 영흥화력 2호기는 100%NR 부하와 50%NR 부하의 효율차이는 0.16%를 보여 고온·고압 초임계압 발전소로 갈수록 부하변화에 따른 고압터빈의 효율차이가 적어짐을 보였다. 이는 운전 시 사용되는 압력이 높을수록 열역학적으로 좋은 내부효율이 발생되어 전 부하에 고르게 좋은 성능을 내는 것이다. 따라서 터빈에 유입되는 증기의 압력이 증가하면 압력-체적에너지는 증기의 총에너지와 비례하여 증가하기 때문에 가용에너지가 최대가 되며 터빈 사이클 효율이 개선된다.

(2) 증기터빈에서 나타난 열소비율(Heat Rate)은 조절밸브의 교축손실 때문에 부분부하 시 부하변동을 위한 조절밸브의 밸브 점(Valve Point) 주변에서 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 특히 증기터빈의 첫 단 노즐로 유입되는 증기는 부하변화에 따라 다르게 흐르므로 1단 노즐 전(Bowl)·후(Shell)에서의 유량변화에 따른 압력비(P2/P1)가 달라지고 적정 설계값의 속도비(W/V0)를 이탈하게 되어 유입증기의 입사각이 변하므로 오직 고압터빈 첫 단에서만 터빈효율이 변한다. 따라서 고압터빈 첫 단 성능이 부하에 따라서 변하므로 부분부하에서 터빈성능 저하가 심하다면 첫 단 성능이 저하했음을 시사하는 것이다.

참고 문헌

1. Dr. Alexander S. Leyzerovich, August. 2002, "New Benchmarks for Steam Turbine

- Efficiency”, *Journal of Power Engineering*.
2. K.C. Cotton, 1998, “Evaluating and Improving Steam Turbine Performance”, Cotton Fact Inc. Second Edition, pp. 41–76.
 3. Steam Turbine Performance Seminar 2006, G.E., 2006.
 4. Rugby, UK, 2005, “Admission Conversion Improves Part Load Performance”, *Journal of Modern Power Systems*, pp. 11–13.
 5. Steam Turbines, ASME Power Test Codes, PTC–1996.
 6. KC Cotton & B. Bornstein, 2006, “Determining Turbine Throttle Flow from Measured First Stage Shell Pressure—A Critical Assessment”, *Journal of Power Plant Engineering*.
 7. A.T Sayers, 2005, “Hydraulic and Compressible Flow Turbomachines”, McGraw Hill, pp. 301–330.
 8. GFC Roger & H Cohen, 2001, “Gas Turbine Theory”, Prentice Hall, 5th Edition, pp. 374–383.
 9. David Gordon Wilson, 1998, “The Design of High Efficiency Turbomachinery and Gas Turbines” Prentice Hall, Second Edition, pp. 173–252.
 10. Budugur Lakshminarayana, 1996, “Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery” John Wiley & Sons, Inc., pp. 505–595.
 11. Reza Abhari & ETH Zurich, 2006, “Unsteady Flow Physics and Performance of a One-and-1/2-Stage Unshrouded High Work Turbine”, IGIT [GT2006–90959]