증기조건 향상에 따른 증기터빈 기술 동향

나운학†· 조성일* · 신훈* · 김영상* · 양승헌*

Steam Turbine Technology for Advanced Steam Condition

U.H.Nah, S.I.Cho, H.Shin, Y.S.Kim, S.H.Yang

Key Words : Tandem-compound design(직렬형 설계), Longer last stage bucket(최종단 긴 버켓). Ultra-super critical(초초임계), Advanced vortex stage(진보된 선회단), Dense pack turbine(최적화 터빈)

Abstract

For many years, T/G Supplier has constructed a number of thermal power plants and researched to improve the performance and the reliability of steam turbine, which are achieved by advances in design and materials technology. In recent, interest is renewed in advanced steam condition as means of improving economy of thermal power plant and reducing environmental pollution. Improvements in the maximum power have been driven by the development of advanced rotor and bucket material and longer last stage bucket. Improvements in efficiency have been brought through advances in mechanical efficiency and thermodynamic efficiency. This paper describes a number of new steam path design features introduced to the steam turbine product. And also this paper describes new design technologies' development, new technologies' trend and technologies' development for ultra-super critical steam turbine.

1. 서 론

발전소의 경제적인 운영, 이산화탄소 배출량 제한 등 발전시장에서 요구하는 제반조건을 충족시키기 위하여 효율향상, 출력증대를 위한 새로운 기술의 개발 및 적용을 통하여 발전소의 효율은 지속적으로 개선되어지고 있다. 1980 년대 이후 열효율의 개선을 통한 증기터빈의 효율을 향상시키기 위해 증기조건의 개선에 관심이 증가하게 되었고, 일본 및 유럽의 경우 발전설비 제작사와 정부의 주도하에 연구개발을 통하여 증기조건은 점진적으로 고온, 고압화 되고 있다.

새로운 소재의 개발 및 소재 제작기술의 향상과 더불어 새로운 기술을 적용함으로써 증기터빈도 성능향상이 더욱 가속화 되어지고 있다.

† 두산중공업(주) 증기터빈기본설계팀장
E-mail : nahunh@doosanheavy.com
TEL : (055)278-8158 FAX : (055)278-8528
* 두산중공업(주)

최대출력은 1930 년대 이후 지속적으로 증가해 왔으며, 1980 년대 이후 새로운 발전소는 그 규모가 대형화되면서 출력이 급속하게 증가되고 있는 경향을 보이고 있고, 이러한 추세의 변화에 맞추어 지속적인 기술개발이 이루어지고 있다.

최종단 긴 버켓(Longer Last Stage Bucket), 터빈 배열, 대형 발전기의 개발 등을 통하여 점진적인 출력증대가 가능했고, 마찰저감 베어링 개발, 증기유로(Steam Path) 및 증기밀봉(Steam Seal) 등의 개선에 의한 손실저감으로 기계적 효율향상이 이루어지고 있다. 진보된 고온용 소재의 개발 및 제작기술의 발달로 증기의 온도와 압력이 증가되어 열역학적 효율이 향상되고 있다. 최적 싸이클 구성, 컴팩트한 증기유로 설계, 진보된 선회단(Advanced vortex Stage) 등과 같은 설계 최적화 기술과 기동과 정지, 효율적인 운전, 신뢰성 향상 등에 대한 기술개발이 꾸준히 이루어지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 새로운 설계유형 및 개발내용, 신기술의 동향 및 향후 초초임계(Ultra-super critical) 증기터빈 개발을 위해 이루어져야

할 기술개발 방향과 내용을 기술하고자 한다.

2. 터빈 싸이클 최적화

2.1 증기온도 상승 효과

증기터빈의 열성능(Heat rate)을 향상시키기 위한 가장 효과적인 방법은 증기의 압력과 온도를 증가시키는 것이다. 1990년대 이전까지는 초임계(Super critical) 증기조건이 널리 이용되었지만 최근의 발전시장 추세는 증기의 압력과 온도가 상승한 초초임계 증기조건으로 변해가고 있다. 이런 변화가 가능한 것은 지난 10년 동안 고온용 소재의 신규개발 및 제조기술의 발달과 더불어 초임계 조건에 대한 다양한 운전경험들이 축적되어 증기터빈의 최적설계가 이루어 졌고, 최적 운전 방안들이 마련되어 초임계 및 초초임계 발전에 대한 신뢰성이 확보되었기 때문이다.

주증기의 압력과 온도가 과거 165bar/538℃에서 310bar/600℃이상으로 상승될 경우 얻을 수 있는 증기 조건에 따른 열성능의 개선 효과는 Fig. 1에서 볼 수 있다. 순수하게 증기의 온도와 압력 상승에 의한 열성능은 증기조건 161bar/538/538℃를 기준으로 할 경우, 주증기 및 재열증기(Reheat steam) 온도가 10℃ 상승할 때마다 0.5%, 압력이 10bar 상승할 때 마다 0.2%의 개선효과가 있다.

주증기 조건을 310bar, 600℃이상 상승시키고, 2단 재열(Double reheat)을 사용하고, 복수기 압력을 낮추었을 경우 예상되는 열소비율 개선은 Fig. 2에 나타나 있다.

초초임계 증기조건에서 최대의 열효율을 얻기 위해서는 급수 가열기(Feedwater heater)의 배열을 최적화하여야 하며, 더 향상된 증기조건을 만들기 위해서는 추가적으로 급수 가열기 및 최종 급수의 온도와 압력이 최적의 조건이 되도록 하여야 한다.

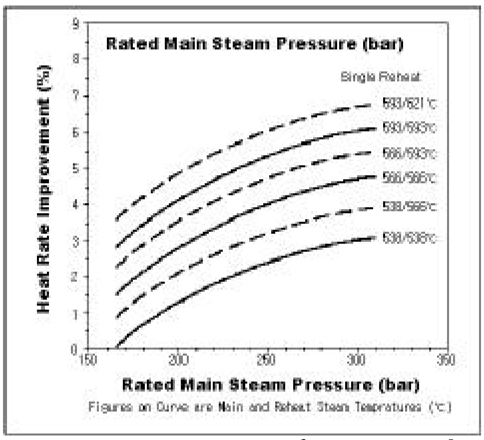

Fig. 1 Heat rate improvement for steam conditions

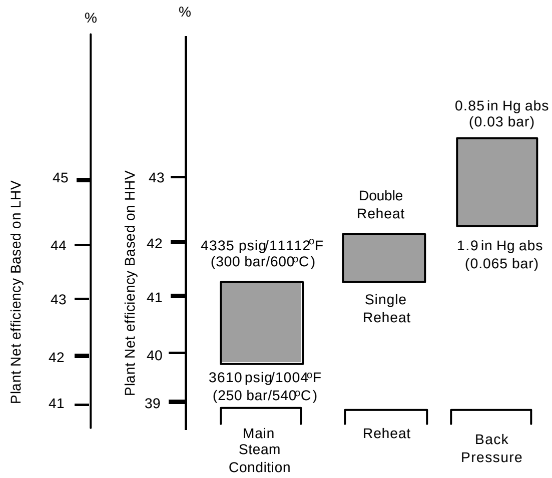

Fig. 2 Heat rate improvement for cycle parameters

일반적으로 대부분의 경우 싸이클의 최적화를 위하여 HARP (Heater above reheat point)를 채택한다. Table 1에는 HARP 사용여부 및 급수 가열기의 배열에 따른 열소비율의 개선을 나타냈다. 그러나 이와 같은 것은 보일러의 설계와 비용 등에 영향을 미치므로 경제성을 고려하여 최적의 싸이클 조건을 선택하여야 한다.

2.2 터빈배열

발전소 최대출력 증가는 발전기의 출력용량 및 최종단 긴 버켓의 한계로 병렬형(Cross compound) 터빈 발전기 배열을 사용해왔다. 병렬형 배열은 속도가 서로 다른 두개의 터빈 축에 발전기를 각각 설치하여 요구되는 출력을 얻는 방법으로 구조 및 제어가 복잡하다는 단점이 있다. 발전기의 설계와 제작기술이 발달함에 따라 큰 용량의 발전기 제작이 가능하게 되어 대용량 발전소의 경우에도 직렬형(Tandem compound) 터빈 발전기 배열을 적용할 수 있게 되었다. Fig. 3은 단일 재열 방식을 적용하는 경우, 출력, 재열기 수, 배압조건 등에 따른 터빈 발전기 배열을 나타낸 것이다.

Table 1 Heat rate impact of alternative feedwater heater configurations

Cycle	No. of Feedwater Heaters	HARP	Heat Rate Benefit
Single Reheat	7	No	Base
	8	No	0.2%
	8	Yes	0.6%
	9	Yes	0.7%
Double Reheat	8	No	Base
	9	No	0.3%
	10	Yes	0.5%

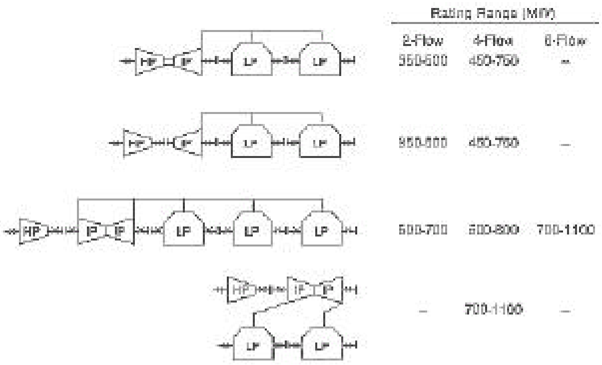

Fig. 3 Single reheat application turbine configuration

국내에서는 현재까지 대부분의 화력터빈 배열이 고압/중압 일체형 반류(Opposed flow) 터빈과 1 대 혹은 2 대의 복류(Double flow) 저압터빈으로 3600rpm, 직렬배열 및 재열 형식으로 구성되어있다.

출력증대를 충족시키기 위해 단일유동(Single flow)의 고압 터빈과 복류 중압 터빈, 3 대의 복류 저압 터빈을 적용한 것이 격상용량의 발전소에 적용할 수 있는 터빈 배열 형식이다.

3. 터빈 성능 향상

3.1 효율향상을 위한 설계

증기터빈의 설계는 크게 열역학적 설계, 공력설계, 기계적 설계로 구분된다. 열역학적 설계에서는 열정산(Heat balance calculation)을 통하여 각 터빈의 크기 및 출력이 결정되고, 성능해석을 통하여 각 단별 에너지 분포가 결정된다. 열역학적 설계가 끝나면 증기유로에 대한 공력설계를 통하여 속도분포, 반동도, 버켓의 입/출구 설계 유동각 등이 계산된다. 이러한 증기유로 설계과정을 통하여 각 단별로 부품설계를 위한 상세설계 입력자료가 정리되고, 이를 바탕으로 버켓과 노즐을 포함한 터빈의 구성품에 대한 설계가 수행된다. 증기터빈의 효율향상을 위하여 다양한 설계가 적용되고 있고, 새로운 설계개념이 적용되고 있다.

3.1.1 진보된 선회 단(Advanced vortex stage) 설계

터빈의 단을 통과하는 증기흐름은 반경 방향 평형(Radial equilibrium)상태를 만족해야 한다. 반경 방향 평형 방정식은 유체에 작용하는 압력에 의한 힘과 유체의 속도에 의한 관성력의 관계를 표현한 것이다. 3 차원의 완전한 반경 방향 평형 방정식은 매우 복잡하다. 그러나 반경 방향의 속도 성분을 무시하고, 반경 방향과 접선 방향의 속도성분의 곱이 일정하다고 가정하면 자유선회유동(Free vortex flow)을 얻을 수 있다. 대부분의 운전 중인 터빈은 자유선회 반경 방향 유동 분포를 사용하고 있다. 짧은 단의 경우 자유선회설계는 매우 적합하고 효율이 높으나, 긴 버켓의 경우 비틀림 양이 많기 때문에 기계적으로 설계가 어렵고 팁에서 반동력 및 손실이 크다. 저압 터빈의 긴 버켓은 좋은 효율을 얻기 위하여 비자유선회단(Non free vortex stage)을 사용하고 있으며, 버켓과 노즐을 적절히 설계하여 2 차 유동 손실, 익형 손실(Profile loss)을 최소화하고, 버켓의 중간 부분의 효율을 증가시키기 위하여 1980 년대 중반이후 다양한 제어 선회(Controlled vortex) 설계개념을 연구하기 시작했으며 1990 년대에는 컴퓨터를 이용한 설계방법이 개발되어 최대의 효율을 얻을 수 있는 진보된 선회단을 설계 및 시험하게 되었다.

진보된 선회단의 경우, 루트부의 반동력이 증가하여 성능을 증가시키고, 팁부 반동력 감소로 팁 손실이 감소된다. 공기를 매체로한 실험 결과, 진보된 선회단이 기존의 자유선회단보다 효율이 향상됨이 입증되었다. Fig. 4는 진보된 선회단의 전형을 보여준다.

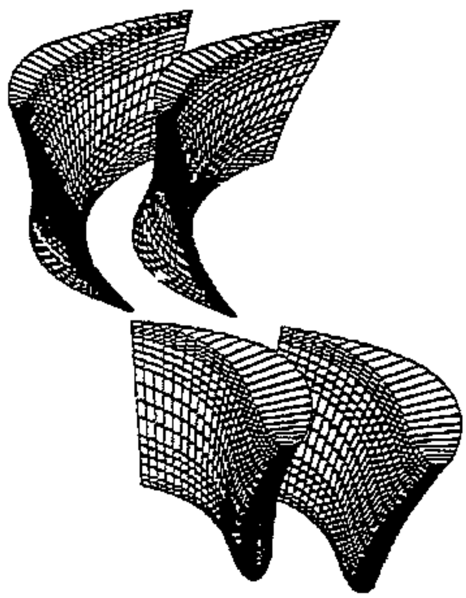

Fig. 4 Advanced vortex stage

이와 같은 설계는 유체점성에 의하여 벽면에 발생되는 압력면(Pressure surface)과 흡입면(suction surface)의 압력차가 심할 경우 2 차 유동의 강도가 커서 주증기 유동을 방해하는 2

차 유동손실(Secondary flow loss)을 감소시키기 위해 개발되었다.

3.1.2 최적화 유로 설계(Dense pack design)

고효율의 증기터빈을 설계하기 위해서는 온도와 압력의 증가에 의한 열역학적인 효율향상 이외에 기계적인 손실에 의한 효율 저하를 줄여야 동일한 온도와 압력 조건에서 요구하는 효율을 달성할 수 있다. 복합화력 발전 및 대형화력 발전에 대하여 이와 같은 효율향상을 달성하기 위해 새로운 설계방법의 개발이 요구되었다.

터빈에서 손실은 대부분 고압, 저용적 유량, 고속의 증기흐름, 짧은 버켓, 상대적으로 낮은 유선형 입구 형상비(Aspect ratio) 등에 의해 발생하므로 효율개선을 위해서는 고압부의 증기유로에 대한 개선이 이루어져야 한다. 항공기 엔진 혹은 가스터빈 기술에서 도입한 새로운 설계기술을 증기터빈에 적용하여 반동도(Reaction) 증가, 로터 직경 감소, 버켓 길이 증가, 증기가 통과하는 환형면적(Annulus area) 증가 등에 의한 새로운 형태의 증기유로 설계기술이 개발되어 적용되고 있다.

Fig. 5에 대형증기터빈에서 기존의 증기유로 설계와 개선된 증기유로 설계를 적용했을 경우의 고압 터빈 구성에 대해 나타냈다. 이 기술이 적용될 경우 터빈 길이(Span Length)의 변화 없이 전체 단의 수는 증가하게 되어 증기의 유속을 줄여주므로 버켓의 마찰손실 및 곡면손실을 줄여주게 되고, 더 큰 환형면적과 긴 버켓은 버켓의 형상비를 개선시켜 2차 유동손실을 감소시킨다.

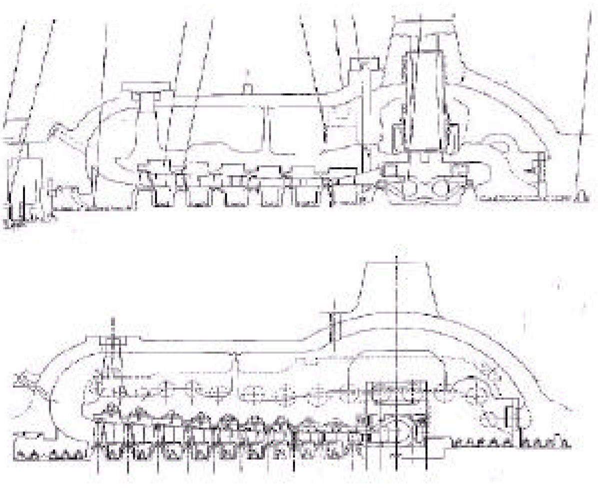

Fig. 5 Comparison of conventional design and dense Pack design for a typical large steam turbine

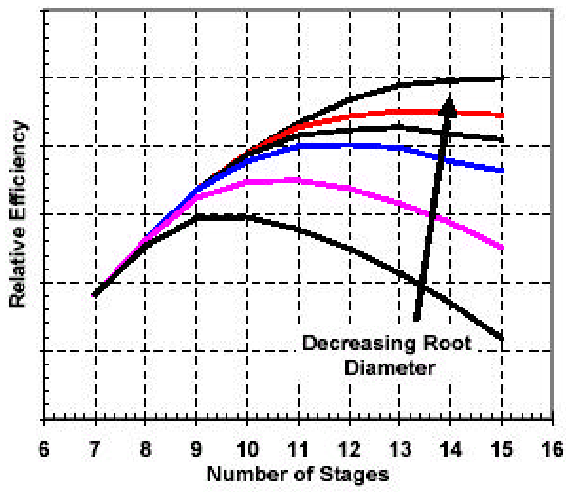

Fig. 6 Effect of stage count and root diameter on steam path efficiency

Fig. 6에 버켓의 루트부 직경(bucket root diameter)과 터빈의 단 수의 최적화를 통한 효율개선 효과에 대해 나타냈다. 대략 8인치 정도의 버켓 루트부 직경 감소와 더불어 터빈의 단 수가 7단에서 11 혹은 12단으로 증가할 경우 약 2.5~3% 정도로 단 효율이 개선된다. 또한 버켓의 루트부에서 반동도를 증가시켜 마찰에 의한 손실을 줄이므로 효율을 개선시킨다.

3.2 설계 개선

증기터빈의 구성품에 대한 설계 개선을 통한 효율향상을 위하여 다양한 부분에 대한 설계검토와 새로운 설계개념이 적용되고 있다. 특히 제작기술의 개선, 개선된 증기밀봉 등을 통하여 유동손실을 줄이고 효율을 향상시키기 위한 연구는 지속적으로 수행되어 왔다.

3.2.1 일체형 커버 버켓(Integral Cover Bucket)

터빈 버켓 커버는 팁의 누설 손실을 줄이기 위한 스필 스트립(Spill strip)이라는 밀봉장치를 설치할 수 있는 공간을 제공한다. 고정부와 팁 사이의 누설량을 최소화하여야 2차 유동손실을 줄일 수 있다. 또한 버켓 커버는 버켓들을 서로 연결함으로써 진동에 대한 감쇠효과를 얻을 수 있다.

일체형 커버 버켓을 사용하는 주요한 이유 중의 하나는 버켓 팁에서 밀봉효과를 증가시켜 성능을 향상시키는 것이다. 성능향상의 방법으로는 버켓 끝단부의 경사각을 자유롭게 조정함으로써 최적의 증기흐름을 유도할 수 있는 유로 형상의 설계가 가능하여 유동손실을 줄일 수 있다. 그리고 버켓 끝단부의 경사

각을 유지하면서 커버를 수평으로 제작이 가능하여 기존에 양 가장자리에 스필 스트립을 위치시켜 밀봉을 하던 방식을 가운데에도 스필 스트립이 위치할 수 있어 밀봉효과가 향상된다.

3.2.2 **대곡면 루트 디플렉터**(Large Radius Root Deflector)

터빈 단에서 누설 증기는 손실로 존재한다. 이 누설 증기는 일을 하지 못하고 다음 단으로 이동한다. 노즐과 버켓 루트부의 형상을 변경하여 누설 증기가 터빈 단 내로 유입되는 방향을 조절하여 손실을 줄이는 방안이 고안되어 설계에 적용되고 있다.

루트부 디플렉터를 사용하는 목적은 버켓 루트부에서 고정체와 회전체가 충돌했을 경우에 회전체와 고정체의 손상을 방지하기 위해서 설계된 것으로 기존의 설계방식은 이 부분으로 유입되는 증기의 방향이 주증기의 흐름을 방해하여 성능에 역효과를 가져왔다.

Fig. 7에서와 같이 반경을 크게하여 디플렉터를 설계하게 되면 터빈 단으로 유입되는 증기 흐름이 주증기의 흐름과 동일한 방향으로 흐르도록 변경시켜 손실을 줄이게 되므로 성능을 향상시킨다.

3.2.3 **브러쉬 실**(Brush seal)

터빈의 다이아프램(Diaphragm)과 로터 사이의 누설을 줄이기 위해 적절한 간극을 유지하도록 설계된 패킹 실(Packing seal)을 사용한다.

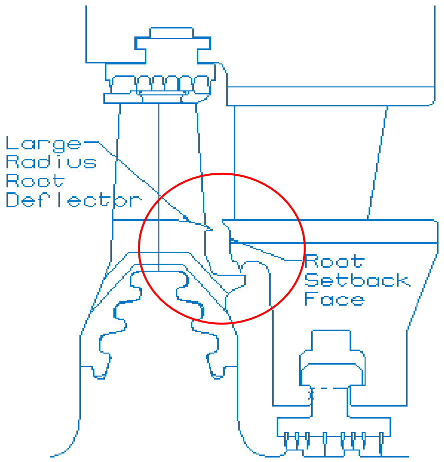

Fig. 7 Large radius root deflector

터빈의 패킹 실에서의 누설손실을 최소화기켜 효율을 증대하기 위한 방안으로 상대적으로 강성이 작고 회전체와 직접 접촉이 가능한 브러쉬 실을 사용하게 되었다. 브러쉬 실은 로터와 직접접촉을 통해 증기누설을 방지하는 밀봉장치로서 마찰에 의한 진동 문제를 최소화 하면서 밀봉효과를 크게 할 수 있다. 브러쉬 실은 터빈 단 내, 일체형 커버 버켓의 팁부위와 터빈 단 바깥 쪽의 밀봉 등을 위해 사용될 수 있으며, 이를 적용할 경우 고압터빈의 경우 0.5~1.2%정도의 효율 향상이 가능하다.

3.2.4 **최종단 긴 버켓**(Longer last stage bucket)

효율적인 터빈 설계를 위해서는 증기가 매우 낮은 압력까지 팽창되어 많은 양의 증기에 포함되어 있는 에너지가 일을 할 수 있도록 하여야 하는데 이를 위해서는 매우 큰 배기환형 면적이 필요하다. 또한 버켓이 길어질수록 상대적인 유속은 증가하게 되는데 최종 단 버켓의 팁부위는 초음속 상태가 된다. 1967 년에 33.5 인치와 최종단 긴 버켓에 작용하는 응력 및 운전조건을 충족시킬 수 있는 신소재인 티타늄을 사용하여 1980 년대에 티타늄 40 인치 버켓이 소개되어 터빈의 최대출력 및 출력 밀도증가에 결정적인 역할을 담당하게 되었다.

최근 기존의 12Cr 합금강의 물리적 특성을 개선한 고강도 12Cr 합금강을 사용한 최종단 긴 버켓이 개발되었다. 버켓 재료의 강도, 피로특성, 응력 부식 균열(SCC : Stress corrosion cracking), 인성 등 재질 특성과 베인(Vane)형상을 개선시켰고, 연속적 연결 설계(Continuously-coupled design)를 적용하였다.

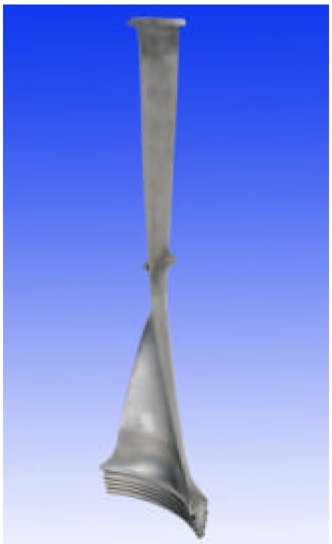

Fig. 8 12Cr Steel longer last stage bucket

이 버켓은 효율검증, 진동특성, 구조평가 등의 실험을 통하여 효율개선 및 신뢰성을 입증하였다. Fig. 8은 12Cr 합금강 최종단 긴 버켓의 형상이다.

4. 터빈 신뢰성 향상

4.1 터빈 냉각유로 설계

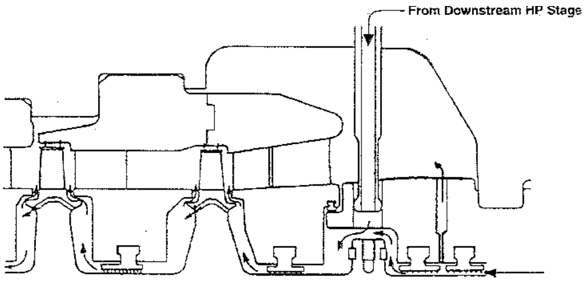

Fig. 9 Reheat stage cooling configuration

초초임계 증기조건이 사용되어짐에 따른 증기온도 상승으로 재열 터빈 1단 및 2단의 버켓과 휠은 고온에서 강도저하 현상으로 계산응력이 허용응력을 초과하게 된다. 최적설계를 통한 구조적 개선을 통한 방법으로는 허용응력 조건을 만족시키기 어려우므로 이 영역에 외부에서 보다 낮은 온도의 냉각증기를 유입시켜 온도를 낮춘다.

고압/중압 일체형 반류 터빈은 고압터빈의 단에서 추기된 증기와 고압터빈과 중압터빈 사이의 패킹을 통해 누설되는 증기를 이용하여 냉각시킨다. Fig. 9 에 재열 터빈의 냉각구조를 나타냈다.

4.2 고온용 강

상승된 증기조건에서 사용이 가능한 고크롬(10-12Cr)강이 일반적으로 사용되고 있으며 고온강도를 높이기 위해 여러 첨가물이 사용된 소재 및 제작기술이 개발되고 있다. 저압터빈에 사용되는 NiCrMoV강의 경우 350~370℃이상에서 취화를 일으키는 경향이 있으므로 강에서 P, Sn, Mn, Si 등의 불순물 함량을 낮춘 청정강을 사용하고 있다. 향후 증기조건이 지속적으로 향상될 경우 새로운 재료의 개발이 이루어져야 한다. 이와 같이 증기터빈의 열역학적 효율향상을 달성하기 위해서는 소재의 개발과 더불어 가능하다.

4.3 향상된 축계 진동 해석 기술 및 베어링

터빈의 설계기준, 허용응력, 하중범위, 진동허용치 등은 해석과 실증실험, 운전을 통한 경험을 토대로 개선되어 왔다. 효율향상을 위하여 초초임계 증기조건 도입, 대형화, 고밀도화가 최근의 추세이므로 터빈 발전기의 안정적인 운전을 도모하기 위해서는 설계단계에서부터 정확한 예측이 가능하고, 안정성이 확보된 신뢰성이 높은 터빈 발전기를 설계하여야 한다. 정확한 축계진동해석 기술 및 고속으로 회전하는 로터를 안정하게 구속, 지지할 수 있는 베어링 설계기술이 요구된다.

특히 가혹한 운전환경에서 터빈의 기계적 손실을 최소화하고, 동적 안정성을 확보하기 위해 개량된 베어링 개발이 지속적으로 이루어져야 한다.

5. 결 론

5.1 발전시장은 연료비 증가, 부지의 부족 등으로 인하여 발전소의 경제성에 관심이 증가하게 되었고, 환경규제 및 효율향상, 출력증대 등의 요구조건을 충족시키기 위해 지속적으로 새로운 기술의 개발이 이루어지고 있다. 증기터빈에서의 기술개발은 새로운 분야보다는 기존 터빈을 개선하는 방법 채택하고 있다. 본 논문은 터빈의 효율향상과 출력증대 및 신뢰성 확보를 위한 기술을 소개하고 초초임계 증기터빈 개발을 위해 필요한 기술에 대해 간략하게 소개하였다.

참고문헌

(1) K.M. Retzlaff, G. Schlottner, 1998, “Steam Turbines for Ultra-super critical Power Plants,” Power Gen Europe Milan Italy

(2) Oeynhausen, H.,Bergman, D., and Termuehlen, H, 1993, "Large Steam Turbines for Advanced Power Plants," Prodc. of American Power Conference, vol.55, part1, Chicago, pp.656-668

(3) Moriya, S., Haraguchi, M., and Yamazaki, 1993, "High Efficiency technology for Steam Turbines," Hitachi Review, vol.42, No.1,pp.31-36

(4) Yuji Nameki, Takanori Murohoshi, Futoshi Hiyama, Kiyoshi Namura, 1998, “Development of Tandem-Compound 1,000MW Steam Turbine and Generator,” Hitach Review, vol.47, No.5, pp.176-182

(5) James R. Maugham, Lawrence D. Willey, J.Michael Hill, Sanjay Goel, 2000, “Development of the Dense Pack Steam Turbine:A New Design Methodology for Increased Efficiency,” International Joint Generation Conference, Florida

(6) Jens Kure-Jensen, Klaus Retzlaff, 1994, “A 440MW Extraction steam turbine for advanced steam conditions,” International Joint Power Generation Conference, Arizona

(7) U.H. Nah, S.I. Cho, H.C. Ha, 2000, “An update on steam turbine design technology,” Journal of KSPSE, vol.4, No.4, pp.5-15

(8) A. Morson, 1990, “Steam turbine long bucket development,” GE Power Generation Turbine Technology Reference Library Paper GER-3647

(9) A.M. Morson, J.C. Williams, J.R. Pedersen, S.G. Ruggles, 1988, “Continuously-coupled 40-inches titanium last stage bucket development,” GE Power Generation Turbine Technology Reference Library Paper GER-3647