

현재 日本 中部 電力(株)의 「가와 고에」(Kawagoe)발전소에는 세계에 서 가장 큰 700MW 규모의 초초임계 압(超超臨界壓) 증기(蒸氣)터빈이 설치되어 이미 1989년부터 운전중에 있

다. 여기서의 운전실적은 앞으로 초초 임계압 발전소 건설에 중요한 경험이 될 것이다.

## KAWAGOE 화력발전소의 超超臨界壓 실증시험 700MW 증기터빈 1989년부터 운전중

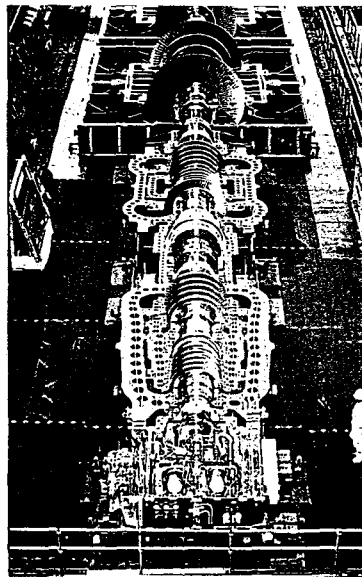
H.Mimuro, H.Nomoto, M.Fujii, Toshiba Corporation, Yokohama Japan

터빈의 높은 가동률과 신뢰성은 안정적인 전기공급을 위하여 필요하다. 터빈에 공급되는 증기의 온도와 압력을 높이는 것이 증기터빈 효율향상에 매우 중요한 인자이지만 증기의 온도와 압력 상승은 터빈 부품과 재질에 가혹한 조건을 주게된다. 따라서 높은 온도와 높은 압력을 사용하는 증기터빈의 개량은 점진적으로 이루어지고 있다.

일본에서는 대형 화력발전소의 표준 증기조건으로 단일 再熱蒸氣 242bar, 538/560℃가 설정된 이후 증기조건에 큰 변화가 없었다. 이것은 터빈의 재질이 표준증기 조건에 견디기에는 가혹한 조건이고, 재료의 개발 및 개량에는 많은 투자와 시간이 소요되어, 결국 터빈의 효율향상으로 인한 경제적 이득이 연료비 상승분을 상쇄할 수 없기 때문이다. 따라서 증기조건이 한계에 도달했으므로, 현재의 목표는 주로 容量增加를 통한 경제성 향상과 가동률 및 신뢰성 향상에 주력하고 있다.

또한 전력회사는 석유파동에 의한 에너지 가격 변동에 대처하기 위하여 대체 연료의 개발과 에너지절약을 적극 추진하고 있다. 그간, 재료기술의 꾸준한 발전과 대형터빈의 설계, 제작 및 운전경험의 축적으로 주증기조건 향상을 위한 기반이 확립되었다.

Kawagoe 화력발전소의 초초임계압 터빈(311bar, 566/566/566℃)은 이와



〈그림1 : Kawagoe 발전소 증기터빈〉

같은 상황에서 설계, 제작되었다. 계획된 두대의 발전소중 한대가 1989년 6월 상업운전을 시작하였다.

### I. 發電所 概要

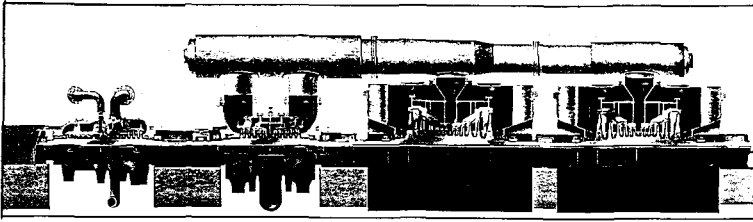
Kawagoe 화력발전소는 二重再熱蒸氣 사이클(311bar, 566/566/566℃)로 터빈의 열효율은 기존 재래식 터빈보다 약 5% 높다. 최근 중간부하용 화력발전소에서는 높은 이용률이 매우 중요하므로 이 발전소는 기존의 超臨界壓 발전소와 동등하거나 높은 이용률을 갖도록 설계되었다.

이와같은 목적을 위하여, 설비는 12Cr 주강으로 제작되어 고온에서 견딜수 있으며, 減壓운전을 채용함으로써 가동시간이 짧다. 발전소 정지 8시간후의 열간기동의 경우, 보일러점화로 부터 전부하까지의 가동시간은 132분이 소요된다. 부하변동의 설계치는 3~7%/分이며 또한 발전소는 부하急減發 운전이 가능하다. 터빈은 4개의 케이싱, tandem compound 형이며, 3600rpm 이고, 최종단에서는 85cm Bucket을 가지고 있다.

부하차단시에 터빈으로 유입되는 에너지는 정상운전시보다 큰데 그 이유는 증기조건이 개선되었고 또한 이중(double) 再熱시스템이 채용되었기 때문이다. 부하차단시에 발생하는 터빈의 과속도를 방지하고, 제어계통의 복잡함을 피하기 위해 디지털 전기유압 제어장치(DEHC)가 채용되었다.

발전기는 직접냉각식 수평축형이며 3相同期勵磁설비를 채용하는 등 성능향상을 위한 다각적인 방안이 강구되었다. 콘덴서는 신뢰성을 높이기 위하여 Titanium을 채용하였으며, 순환수펌프는 可動翼을 가진 50%용량 2기가 설치되었다. 복수계통은 재래식 700MW설비와 본질적으로 같다.

복수펌프는 50%용량 3대(1대는 예비용), Booster pump도 50% 용량 3대(1대 예비용), 그리고 2열 4단의 저압급수 가열기시스템, 탈기 및 2열 3단의 고



〈그림2 : Kawagoe발전소 증기터빈 단면도〉

압급수가열기를 채용하였다. 보일러 급수펌프와 고압급수가열기는 신기술을 적용하여 주증기(主蒸氣) 압력을 높일 수 있도록 되어 있다.

2대의 터빈-구동 급수펌프(50%용량)가 정상운전에 사용되며, 40%용량의 모터구동 급수펌프 1대가 예비용으로 설치되어 있다. 한대의 터빈구동 급수펌프와 모터구동 급수펌프를 병행운전함으로써 정격운전이 가능하다.

## II. 蒸氣터빈

그림 2는 Kawagoe발전소에 설치되어 있는 증기터빈의 斷面圖를 나타낸다. 이 발전소에는 전 보다 높은 온도와 압력을 가진 주증기가 초고압단(VHP)과 고압단(HP)에 유입되도록 설계된 터빈이 설치되었다. 중압단과 저압단의 설계는 700MW 재래식과 매우 유사하지만 VHP 및 HP 부위는 안전설비를 포함한 새로운 설계방식을 채택하였다.

VHP와 HP부위는 단일 외부 케이싱 내에 대향류(counter flow arrangement)로 설치함으로써 추력을 효과적으로 방지할 수 있고 또한 설치가 용이하다. first reheat chamber와 VHP부위의 내부 케이싱은 서로 밀폐되어 VHP부위의 외부 케이싱내의 軸方向 온도 기울기를 감소시킨다.

VHP외부 케이싱의 수평 joint flange는 20.2cm 직경의 bolt로 체결되어 있어 높은 내부 압력에 견디도록 되어 있다. VHP부위는 6단으로 구성되어 있으며 Single flow type이고 HP 부위는 5단, Single flow type이다. 그림 4는

Kawagoe의 터빈 실을 보여주고 있다.

## III. 材料

적당한 재료의 선택이 主蒸氣의 온도와 압력을 높일 수 있는 관건이다. Kawagoe터빈의 특징은 耐熱性 스테인레스강을 사용한다는 것이며, 여기서 VHP, HP부위의 경우 Cr함량이 9~12%인 것을 사용하고 있다. 고온에서 사용되는 부품에서 가장 필요로 하는 성질은 超高温強度로서 물질의 특성이 제작과정은 물론 오랜 사용기간에 변하지않고 일정하게 견디는 것이다.

VHP, HP 및 IP rotor는 12Cr 단조강으로 구성되었으며, 이것은 566℃의 증기조건에서 운전되는 모든 부분에 넓게 사용되고 있다. VHP, HP 및 IP 부위의 Bucket는 12Cr 단조강으로 제작되었으며 이것 또한 566℃ 再熱 부위에서 사용된 것이다.

VHP부위의 외부 케이싱, VHP 부위의 내부 케이싱, nozzle box, 주증기 발브(MSV)와 Control valve등에는 12

Cr 주강이 사용되었는데 在來式에서는 크롬몰리브덴 주강이 사용되고 있다.

12Cr 주강의 중요한 특징은 특수원소를 첨가한데 있다. 특수원소란 몰리브덴, 바나듐, 니오비움 및 질소 등인데 이들은 합금의 고온강도특성을 향상시킨다. 12Cr 주강은 12Cr강 rotor를 제작하면서 얻은 경험으로부터 개발되었다. 12Cr 주강의 주요한 성질은 재래식 크롬몰리브덴 주강과 비교할 때 高温特性이 우수하다는 것이다. 12Cr 주강을 사용하면 케이싱의 두께를 감소시킬수 있는데, 케이싱의 두께가 두꺼워지면 열응력이 추가로 발생된다.

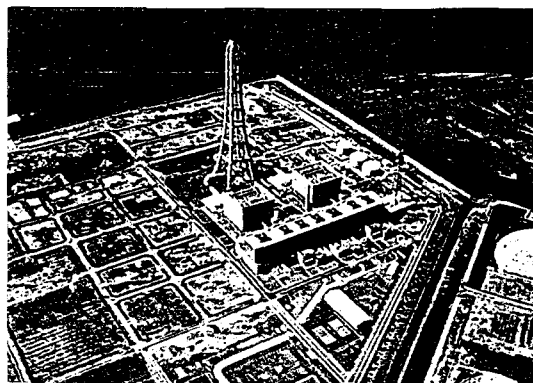
9Cr강이 주증기관의 직선부위에 사용되었으며, 12Cr 단조강의 후렌지와 엘보가 주증기관에 사용되었다.

LP터빈 rotor 또한 superclean 3.5Ni Cr Mo V 단조강으로 제작, 재질개선을 이루었다. 이들 재료는 불순물을 최소화하고 있는데 불순물들은 인, 유황, 주석 등으로 이들은 재질에 부스러지지 않고 견디는 인성을 준다.

Super clean rotor는 신뢰성을 향상시키고, LP section inlet에 내부냉각(internal cooling)을 생략할 수 있도록 한다.

## IV. 回轉部位

VHP단의 첫단인 조절단은 외부 Dovetail형으로, 고정방식은 기존방법으로



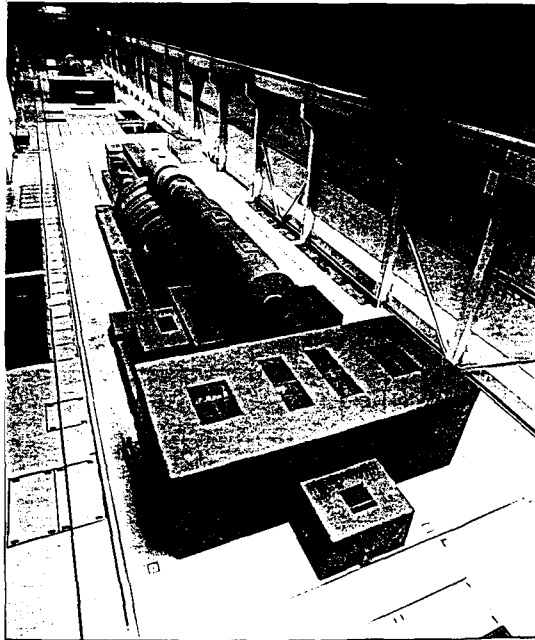
〈그림3 : Kawagoe 발전소 전경〉

부터 개량한 것으로 증기온도상승에 따른 許容應力을 감소시킬수 있도록 설계하였고, 피치직경과 높이는 증기조건에 따라 최적설계로 결정하였다. Fir Tree 형 고정방식은 원심력을 감소 시킬뿐 아니라 軸方向의 간격을 감소시킬 수 있으며, 뿌리의 반경방향 크기가 작기 때문에 축 직경을 증가시킬 수 있다. 따라서 주증기 압력이 증가될 때 발생되기 쉬운 증기선 회류를 처리할 수 있다.

증기의 통로는 터빈의 内部效率를 향상시킬 수 있도록 모든 수단을 동원하였다. 즉, 노즐, 버켓 및 그들 사이의 Castellated Fin등을 최신형태로 하였다. 불안정한 振動에 대하여 가장 우수한 저항 능력을 가진 Pad형 베어링이 VHP, HP 및 IP부위의 저널베어링에 사용되었으며, Thrust 베어링 또한 Pad형으로 고 부하 능력과 우수한 자체정렬 능력을 가지고 있다.

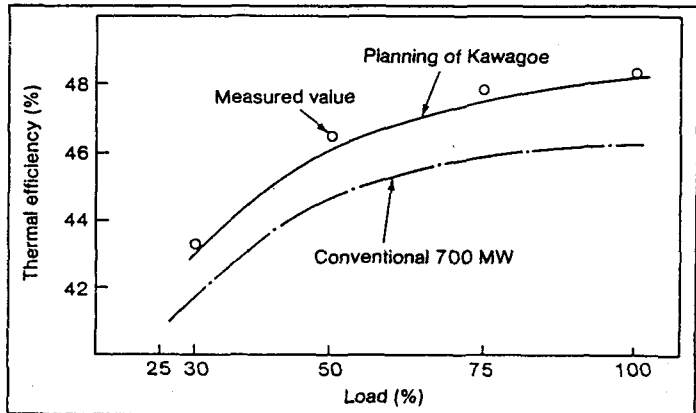
터빈의 설계와 材質분야에 기술개발의 결과가 반영되어 있으며 수행된 기술 개발의 범위는 아래와 같다.

- ① 12크롬주강 제조 및 주증기 입구부 위 VHP 외부케이싱의 실제규모 모형제작.
- ② 유한요소법을 이용한 응력분석 및 VHP 부위의 첫단의 회전시험.
- ③ Thrust 베어링의 특성시험.
- ④ 로타와 베어링의 안정도 분석.
- ⑤ 실제온도와 압력하에서의 노즐 Box의 응력해석 및 시험.

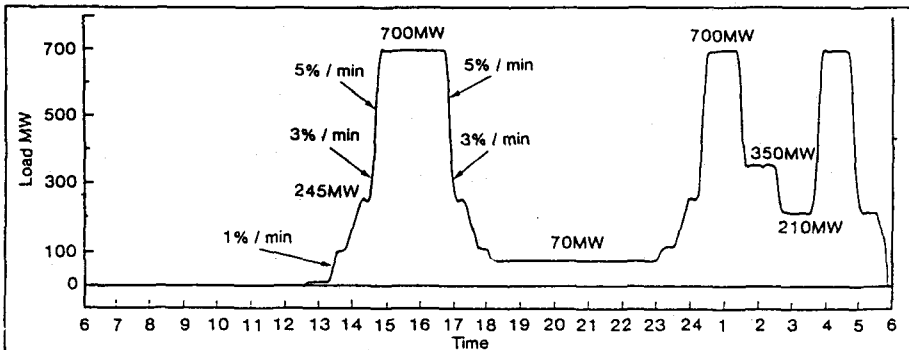


〈그림4 : Kawagoe 발전소 터빈실〉

〈그림5 : 터빈의 부하변동에 따른 효율변화〉



- ⑥ VHP부위의 외부 및 내부 케이싱의 응력해석.
- ⑦ 주증기관의 후렌지 및 엘보의 실제 크기의 모형제작.
- ⑧ 주증기발브의 실제크기 모형제작 및 응력해석. 연구개발활동은 대부분 실제규모의 모형을 이용하여 수행되었다. 실제규모



〈그림6 : 부하변동시험 곡선〉

의 모형은 VHP 부위의 첫단 버켓, VHP 외부 케이싱, 노즐박스, 주증기관의 후렌지 및 엘보, 주증기발브와 Thrust 베어링 등이다.

### V. 運転 및 性能

터빈은 1988년 1월부터 시운전이 시작되어, 최초 터빈 rolling과 系統並入은 1988년 12월에 수행되었다. 발전소의 출력은 정격 700MW에 도달되었으며 초초임계 증기조건인 311bar, 566/566/566°C를 1989년 2월 3일 달성하였다.

시운전 조정과 시험을 위한 그밖의 절차가 원활히 수행되었다. 증기의 압력과 온도를 높이도록한 기본적인 목적은 발전소의 열효율 향상이다. 따라서 열효율 달성여부를 확인하는 것은 시운전에서 가장 중요한 측정치중의 하나이다.

그림 5의 그래프는 동등한 재래식 발전소와 비교한 터빈의 負荷變化에 따른 효율변화를 나타낸다. 발전소는 모든 부하구간에서 만족스럽게 운전되었으며 전구간에서 계획된 효율을 상회하였다.

전부하에 대한 plant의 효율과 터빈의 효율은 각각 41.9% 및 48.4%였다. 효율의 상승은 재래식과 비교했을때 5%의 상승을 나타냈다. 주증기의 압력과 온도 상승 및 二重再熱 cycle의 채용이 효율 상승의 주된 요인이다. 노즐과 Bucket의 형상과 castellated fin과 super clean LP rotor도 효율향상의 요인이 되었다.

### VI. 起動節次

이 발전소는 중간부하와 일일기동정지(DSS)용으로 사용될 것이므로 기동절차의 확인을 중요하게 수행하였다. 매우 빈번하게 수행되는 Hot Start Up Mode에서는 보일러 기동후 全負荷까지 도달하는데 걸리는 시간은 139분이다. 따라서 이것은 우수한 일일기동정지

(DSS)능력을 증명하는 것이다.

그림 6에서 보는 바와같이, 부하변동 시험을 수행하였다. 여기서는 최저부하 10%를 포함하는 일일부하변동 곡선을 따라 수행되었다.

발전소의 기동과 부하변동중에 일반적인 성능요인들, 軸振動, rotor의 열응력, differential expansion등이 만족스러운 것으로 판명되었다.

그림 7은 부하차단시에 측정된 터빈의 최고속도를 나타낸다. 어떤 부하에서도 터빈의 최고속도는 비상조속기의 비상정지 속도보다 낮게 나타났다. 전부하에서의 과속도 비가 106%로 나타났는데 재래식 증기조건하의 동등한 터빈의 108%의 경우보다 낮은 값이다.

이와같은 만족스러운 결과는 EHC를 채용함으로써 얻어진 결과이다.

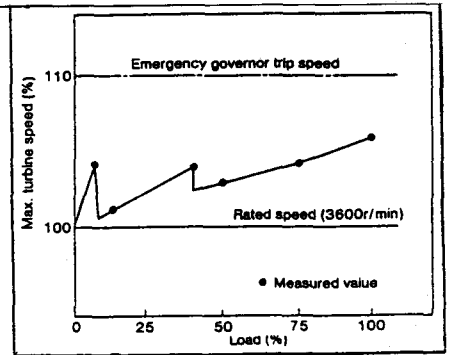
### VII. 振動監視

베어링의 축진동은 터빈의 운전 유연성을 지배하는 매우 중요한 因子이다. 모든 운전조건 즉, 안정운전, 부분부하운전, 순간적 기동, 부하변동, 과속도시험, 부하차단시험등에 대하여, 축진동은 발전기를 포함해서 40 microns 이하로 유지되었다.

### VIII. 向後改善

내부 냉각시스템의 냉각용 증기의 온도를 측정하도록 설계되었는데, 왜냐하면 주증기의 온도가 재래식 터빈의 증기 온도보다 높기 때문이다. 온도측정 결과치는 설계치보다 낮거나 동일한 것으로 나타났는데 이것은 충분한 冷却效果를 얻고 있다는 것을 나타낸다.

東芝는 蒸氣條件을 더욱 향상시키기 위한 다음단계의 연구개발을 수행중에 있다. Kawagoe의 증기조건을 phase 0으로 정의한다면 다음과 같은 두단계를 고려중에 있다.



<그림7 : 부하 차단시 터빈의 최고속도>

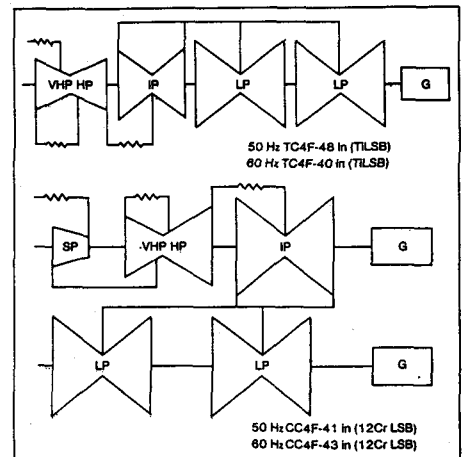
- phase1 311bar, 593/593/593°C
- phase2 346bar, 649/593/593°C

각 단계에서의 1000MW 규모의 증기 터빈의 각 section의 전형적인 배열이 그림 8a와 8b에 각각 나타나 있다. 8a와 같은 Tandem compound형에서는 최근에 개발된 티타늄 최종단 bucket가 사용될 것이며, phase 2에서는 고온고압부를 분리할 것을 고려중이다.

Phase 1에서 사용할 재질은 12Cr 단조강과 주강이 될 것이다. 텅스텐이 충분히 함유된 최신 12Cr강은 기존의 12Cr강보다 高溫에서 견디는 힘이 강하다.

Phase 2에서는 austenic steel이 넓게 쓰일 것이다. 그렇지만 이들 Step에 대한 타당성 조사를 수행해서 재료의 재질, 보일러 특성, 발전소 건설의 경제성 등을 검토해야 한다.

Kawagoe의 터빈제작은 中部電力의 협력과 조언에 힘입은 바 크다.



<그림8 : phase 上) · phase2(下) 초초임계압 배열>