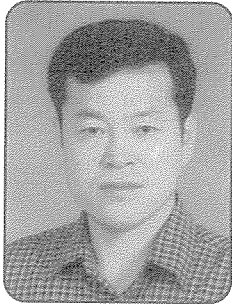


# 터빈의 성능과 구조 (Ⅱ-2)



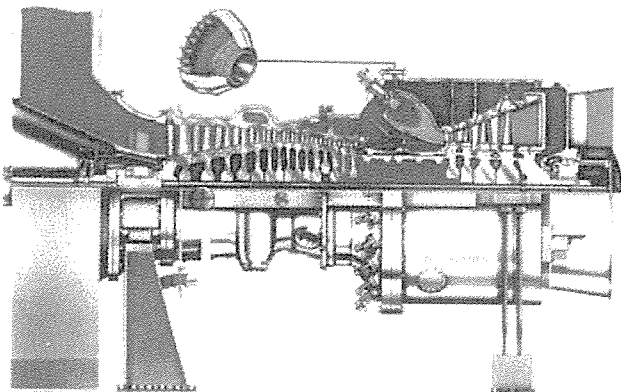
**한전기공(주)**  
**기술연구원**  
**선임전문원 윤정태**  
**Tel : (031)710-4378**

### 4.3. 후지 Siemens

VX4.3A형(3A형)은, 1,400°C급으로, 최초 호기가 1990년에 운전을 개시하였다. 1,300°C급의 제3세대 VX4.3형을 베이스로, 항공기 엔진의 기술을 도입하여 고효율, 고 출력 화를 도모한 개량 기이다. 3A형에 도입되어진 새로운 기술 특징은, 고온화에 대응한 이하의 개량에 있다.

- 24개의 버너를 애놀러 형 대형 연소기 실의 원주 상에 배치한 「하이브리드 버너 링 연소기」(HBR 연소기)
- Pratt & Whitney 사(PWA)의 항공기 엔진 기술을 도입, 재설계한 압축기, 터빈 익열

[그림47]에 V84.3A/94.3A의 단면도를 나타내었다.

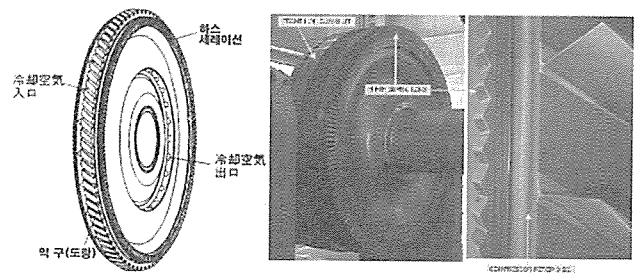


[그림 47] Simense V84.3A/94.3A 가스터빈

### 4.3.1. 가스터빈 본체

외부 케이싱은 내부에 연소기와 압축기 및 터빈 정익 홀더를 지지하고, 그 전후에는 압축기 입구 케이싱 및 터빈 배기 케이싱이 접속되어져 있다. 압축기와 터빈 베어링 하우징은 압축기 입구 케이싱 및 터빈 배기 케이싱의 반경 방향으로 각각 지지되어져 있다.

로터는 각 디스크와 3개의 증공축을 1본의 센터 타이볼트(Tie Bolt)로 결합하는 조립구조이다. 각 디스크와 증공축은, 접촉 단면에 반경 방향으로 가공되어진 하스 세레이션 이라고 하는 치형으로 연결되어져 있다.[그림48]. 이 세레이션은 높은 토크 전달기능과 함께, 각 디스크 개개에 열 팽창되었을 때에 상호의 중심을 유지하는 자기조심 기능을 가지고 있다.



[그림 48] Hirth Serration

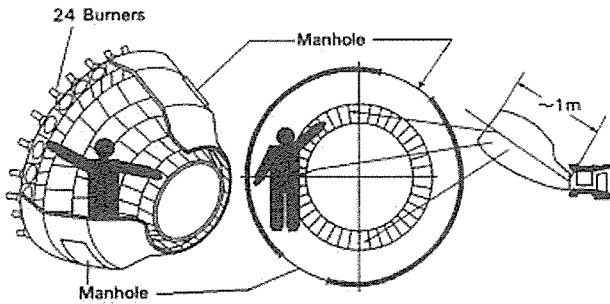
### 4.3.2. 압축기

압축기 익열은 3차원 유동으로 설계되어졌다. 압력비는 콤팩트 사이클에 적합한 약17이다. 압축기 전방 단 5단의 내경은 증가율을 높이고, 주속을 증가시켜 Blade 단수는 종래의 17단보다도 2단 적은 15단이다. 전체 단에 채용되어진 감속을 제어익형(CDA 익)은, 익 면상의 감속을 일정하게 하고, 경계층의 발달을 억제시켜 박리를 제어하고 있다. 또, 내/외경부에서는 익형의 벽면 수정을 채용하여, 경계영역의 저에너지 흐름을 유효하게 이용하고 있다.

### 4.3.3. HBR 연소기

시멘스의 전통적인 사이로 형 연소기로부터 발전한 HBR 연소기는 24개의 버너와 연소 영역을 터빈

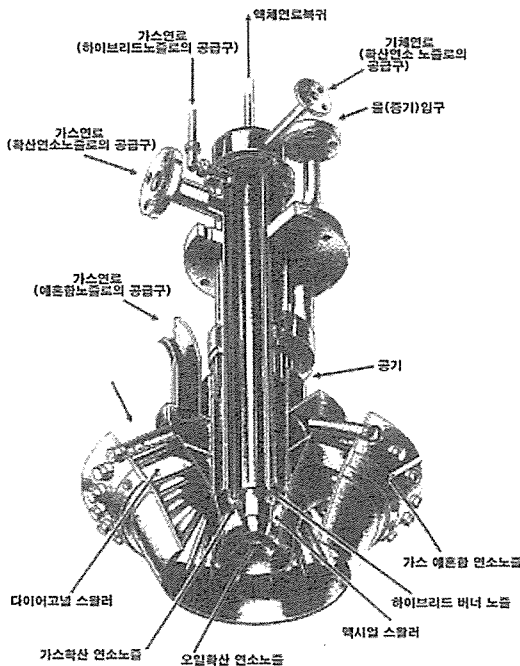
초단 입구부의 원주 상에 배치한 애놀러형 구조이다. [그림49] 종래와 마찬가지로, 대형 연소기 실내 멀티 버너 압축기 익 열은, 3차원 흐름으로 설계되어지고 있다. 압력 비에 의한 연소방식이고, 균일한 연소 온도 분포가 얻어져, 저NOx, 고연소효율에 유리하다.



HBR Combustion Chamber (V84.3A)  
HBR(하이브리드버너링)환상연소기

[그림 49] HBR 연소기

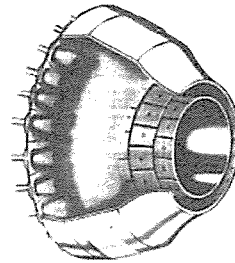
Dry Low NOx의 하이브리드 버너[그림50]는, 저 부하영역에서는 확산연소, 고 부하 영역에서는 예혼합연소운전으로 교체되어진다. 예혼합연소운전 시에는 파이로트 화염을 부분적으로 확산 연소시켜, 예혼합 주 화염을 안정화시키고 있다. 연소실은 주강제의 연소실 케이싱에 다수의 히트 실드를 내재한 2중벽 구조이다.[그림51] 히트 실드는 Ni기 합금으로 만들고, 고온의 연소 가스에 저축되어지는 외면은 차열 코팅(TBC)되어져 있고, 배면은 압축기 토출 공기로 인편지먼트 냉각되어지고 있다.



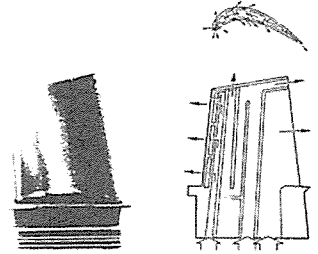
[그림 50] HBR 연소실

#### 4.3.4. 터빈

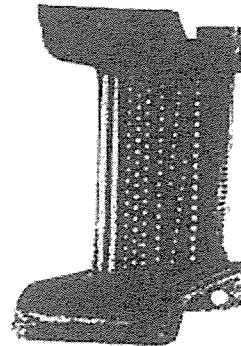
터빈 단수는 종래대로의 4단이다. 제4단 동익 이외의 공냉 익이다. 제2단 동/정익은 압축기의 토출 공기로 냉각되어진다. 제2~4단 정익의 냉각공기는, 압축기의 각 중간 단계에서의 추기가 공급되어지고, 시일링을 통한 일부의 공기는 시일 공기로서 디스크 표면을 고온 가스로부터 보호한다. 제1단 정익은, 대류, 인편지먼트, 필름 냉각의 조합[그림52], 제1단 동익은 턴 프로 식 대류 냉각과 필름 냉각의 조합(그림53)에 의해 종래기보다 효율이 좋게 냉각되어진다. 재료 선택은 Ni기 합금을 베이스로, 제1,2단 동익에는 단결정(SC)을 채용하고 있다. 제1~3단 동/정익에는 차열 코팅(TBC)을 적용하고 있다.



[그림 51] HBR연소실



[그림 52] 터빈 동익 1단



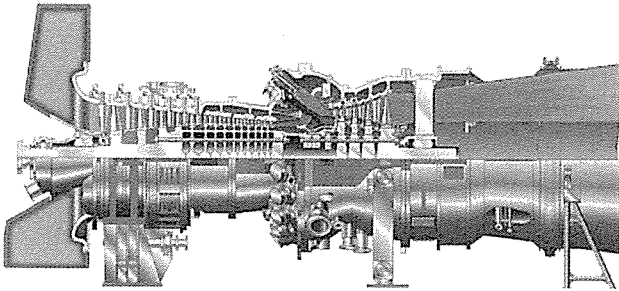
[그림 53] 터빈 제1단 정익

#### 4.4. 미츠비시(三菱)

미츠비시 중공업에서는, 1,150°C급 D형 가스터빈, 1,350°C급 F형 가스터빈의 개발에 이어서, 회수형 증기냉각 연소기를 채용한 1,500°C급 G형(M501G/M701G) 가스터빈을 개발하였다.[그림54] G형 가스터빈의 기본구조는 터빈 입구 온도(TIT) 1,150°C급의 D형으로 시작하는 미츠비시 가스터빈의

설계개념을 답습하여, 이하의 특징을 가진다.

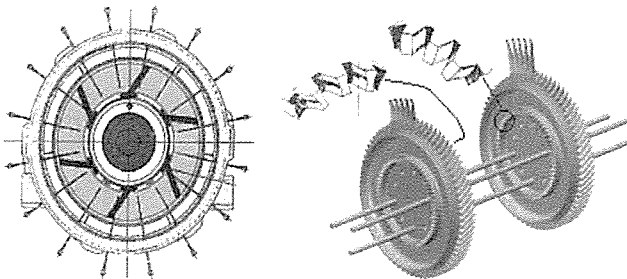
- 로터 2베어링 지지 구조
- 배기 측 베어링 탄젠셜 스트레이트 지지
- 수평 2분할 식 차실
- 캐논러 형 연소기
- 콜드 엔드 드라이브 축류 배기
- 카빅 커플링에 의한 터빈 토크 전달 방식



[그림 54] M701G 가스터빈

#### 4.4.1. 가스터빈 본체 구조

로터를 지지하는 베어링에 대해서는 압축기측 베어링을 Radial strut, 터빈측 베어링은 Tangential Strut로 지지하는 구조로, 특히 배기 측에 대해서 Casing 열신장을 흡수하여 축 중심 변형이 생기지 않도록 하는 구조로 되어져 있다. [그림 55]

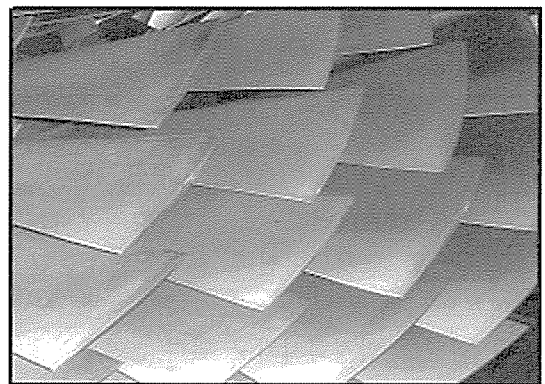


[그림 55] Tangential Strut [그림 56] Curvic Coupling

로터 조립은 디스크 방식으로, 압축기 로터는 Spigot을 가진 디스크를 볼트로 결합, 터빈 로터는 디스크 간의 접촉면에 Cubic 커플링이라고 하는 치형 연결부를 가지고 있다. Curvic 커플링의 치형상은 한 편이 중앙부가 잘록한 모래시계의 형상, 다른 쪽의 중앙부는 볼록한 형상으로[그림56], 쌍방의 치의 조합에 의해 디스크 간의 큰 토크 전달이 가능하고, 또한 축 중심의 변화가 생기지 않는 커플링의 역할을 담당할 수 있게 되어져 있다.

#### 4.4.2. 압축기

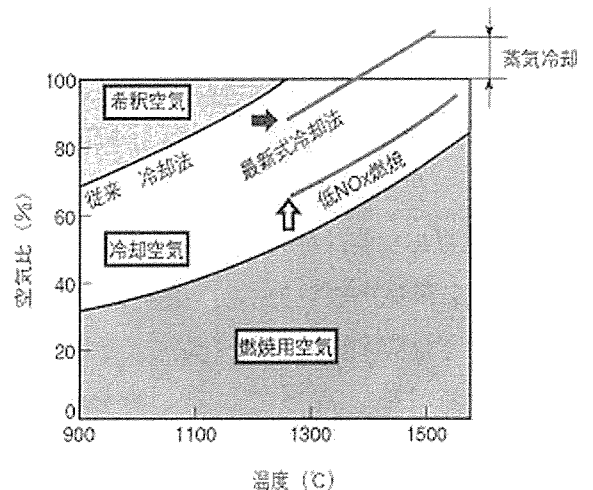
대용량화에 동반하는 대용량화, 고압력비화, 고효율화를 달성하기 위해, G형 가스터빈에는 전방 단의 동익에 초음속 익 열로서 다중 원호 익(MCA : Multiple Circular Arc)을 적용하고, 그 외의 익열은 감속 율 제어 익(CDA : Controlled Diffusion Airfoil)으로 구성되어 경계층의 성장을 억제하여 고효율화에 공헌하고 있다. [사진2]에 압축기 제1단 동익을 나타내었다. 기동시의 선회 실속, 서진을 피하기 위하여 중간 단에서의 추기, 가변식 입구 안내 익에 의한 풍량 조절을 수행하고 있다.



[사진 2] 압축기 동익

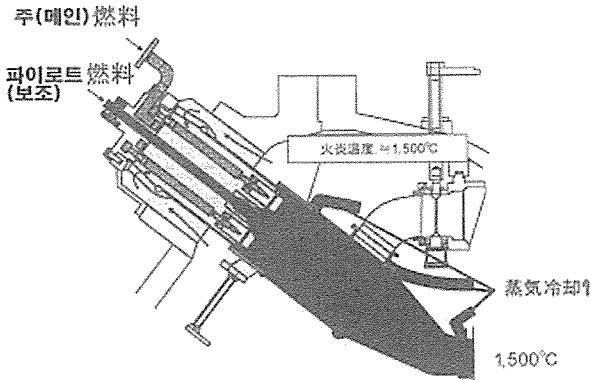
#### 4.4.3. 연소기

연소기는 멀티 캔 형으로 Dry low NOx 연소기이다. G형의 연소기는 D, F형의 기술을 답습하고, 중심에 배치한 파이로트 노즐이 형성하는 확산화염에 의해 메인 노즐의 예혼합화염을 안정연소시키는 방식으로 되어있다. 예혼합방식에 있어서 1,500°C급 가스터



[그림 57] 가스터빈 입구온도와 연소기 내부 공기 배분

빈으로 F형 정도의 저 NOx를 적용하기 위해서는, 연소용 공기를 증가할 필요가 있다. 그러나 [그림57]에 나타난 것과 같이 종래의 냉각방식에서는 필요한 연소기 냉각용 공기량을 확보할 수 없다.



[그림 58] 증기 냉각 연소기

그래서 연소기 벽면에 냉각용 공기를 필요로 하지 않는 회수형 증기냉각방식을 적용하였다.[그림58] 이것에 의해 F형 클래스와 동등의 화염 온도를 유지해 가면서, 연소기 하류측에서의 냉각 공기의 혼입을 막아, 보다 고온의 가스를 터빈으로 유입하여 고효율화를 도모한다. 또, 연소기 증기냉각에 의해 얻어진 증기 열량을 증기사이클측에서 회수되어져, 콤팩트 플랜트 종합 열효율에 상승에 공헌한다.

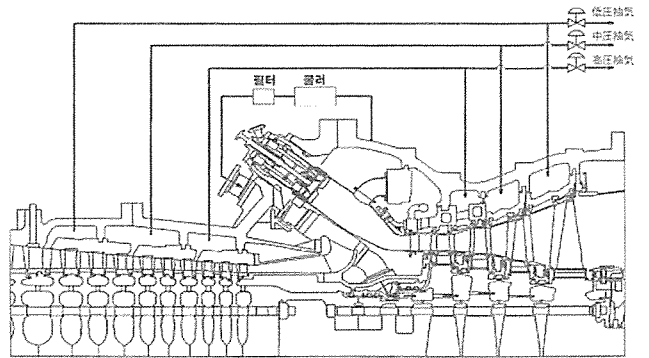
#### 4.4.4. 터빈

터빈은 4단 축류터빈이다. 고온 부품공용화의 설계 컨셉으로부터, 1,2단 동/정익에 대해서는 50Hz, 60Hz 모두에 동일한 터빈 익을 사용하고 있다. 결국, 터빈 제1,2단에 대해서는 M501G와 M701G는 동일 구조, 대형 동익, 정익을 사용하고 있다.

터빈 동/정익의 냉각 공기 계통은 종래 가스터빈의 냉각 방식을 답습하고, 압축기 중간 단 및 토출로부터 추기한 공기에 의해 냉각하고 있다.[그림59] 추기 단수는 가스터빈 성능에 미치는 손실을 최대한 줄이기 위해 압력 밸런스를 고려하여 결정하였다. 또, 동익 및 로터 부의 냉각은 종래와 동일하게 압축기 토출공기를 외부쿨러에서 냉각한 공기로 수행하고 있다.

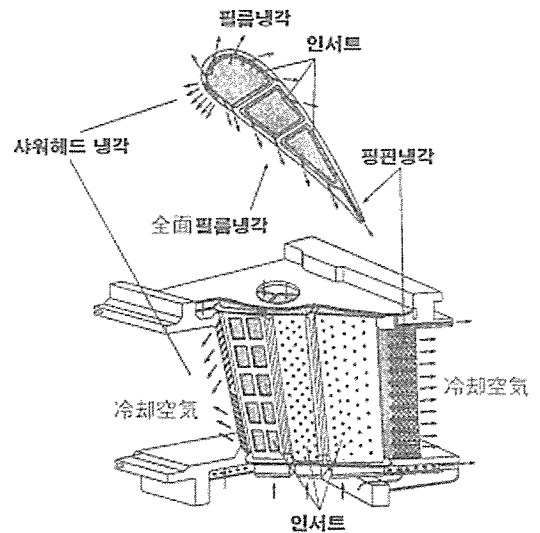
제1단 정익의 재료는 Ni기 초합금 MGA2400제의 정밀주조(단일)이다. 종래의 설계와 동일하게 제1단 정익은 터빈 차실을 분해하는 일 없이 연소기를 분리하면 탈착이 가능하도록 되어져 있다. 제2단 정익은 MGA2400의 정밀 주조 2세그먼트 익으로 구성되어져

고, 제3,4단 정익도 정밀 주조 익으로 각각 3세그먼트 익과 4세그먼트 익 이다. 동익은 전체 단에 MGA1400의 재료의 정밀 주조 익을 사용하고 있다. 1단, 2단 동익은 일방향 응고 익(DS : Directionally Solidified)이다.



[그림 59] 터빈 Cooling System

제1단 정익의 냉각은 인핀지먼트 냉각과 필름 냉각으로 이루어지고 있다. 필름 냉각 공은 슈프트 필름 공이라고 불리어지는 부채모양을 하고 있어, 필름 냉각효율을 높이고 있다. profile과 슈라우드부 모두 전면 세라믹 차열코팅(TBC)이 이루어져 있다.

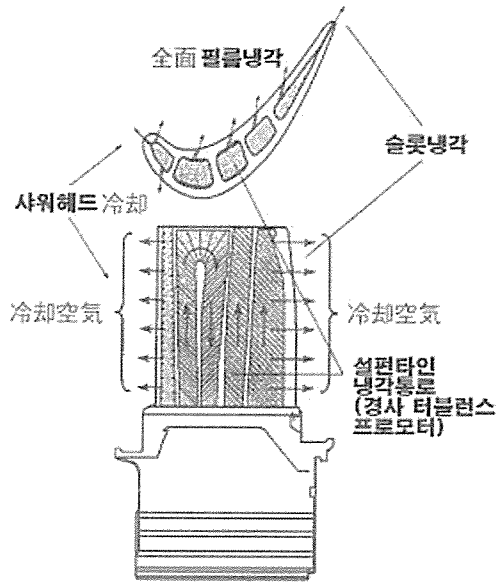


[그림 60] 제1단 정익 냉각 구조

제 1단 정익 냉각의 구조를 [그림60]에 나타내었다. 익프로파일부에 샤워 헤드 냉각, 필름 냉각방식, 후연(後緣)부에는 Fin-pin 냉각, 3캐비티인서트에 의한 인핀지먼트 냉각을 조합하고 있다. 내측과 외측 슈라우드의 냉각도 대류냉각과 인핀지먼트 냉각 및 필름 냉각에 의해 냉각이 이루어지고 있다.

제1단 동익은 종래와 같이, 통로 내에 터블레이터

부착의 리턴프로냉각방식을 채용하고 있다.[그림61] 필름 냉각의 효율을 높이기 위하여 분출 냉각 공기는, 정익과 동일하게, 슈프트 필름 냉각 공(부채모양의 냉각공)을 채용하고 있다. 동익에 대해서도, 내측 플랫폼 및 팁의 냉각을 확실하게 하기 위해, 플랫폼·팁 부에 대해서도 필름 냉각을 채용하고 있다. 프로파일은 정익과 동일하게 전면 차열코팅이 되어져 있다.



[그림61] 제1단 동익 냉각 구조

#### 4.5. 증기냉각 가스터빈

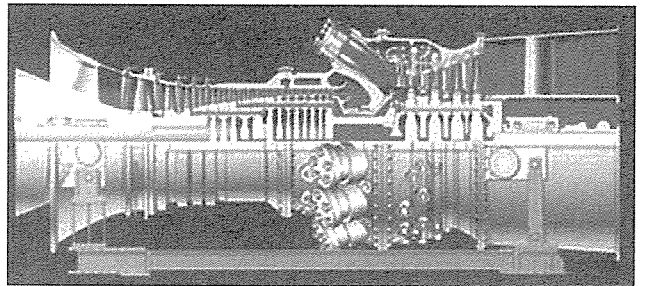
중합 콤바인드효율 60%(LHV)를 목표로, 최신 기술을 적용한 가스터빈이 실용단계에 있다. 도시바/GE는 차세대 콤바인드 사이클 발전 플랜트용 파워트레인 “H 시스템”을 개발하고, 2003년도에 영국에서 운전이 개시되어지고 있다. H 시스템의 중핵이 되는 1,500°C급 가스터빈[그림62]은, MS9001H(50H), MS7001H(60Hz)이다.

터빈 제1,2단 동/정익에 적용되어진 증기냉각은, 종래의 공기 냉각에 비해, 비열이나 물성치의 차이로부터 열전도율이 1.5배나 되어, 우수한 냉각성능을 보유하고 있다.

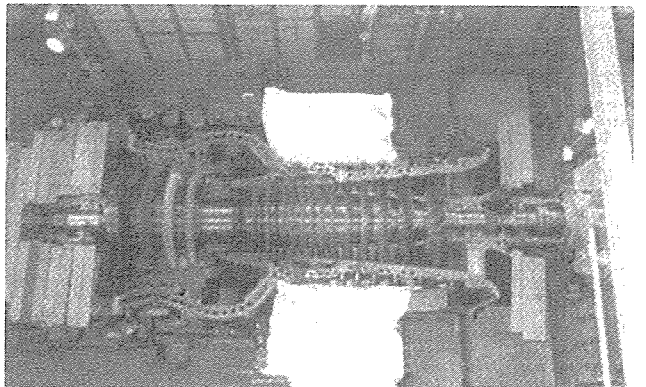
단, 공기냉각 익에 비해 익, 기지 내의 온도 구배가 크기 때문에, 열응력과 변형이 증대되어, 제1단 동/정익에는 고온 강도에 뛰어난 단결정 Blade를 채용하고, 차열코팅(TBC)을 터빈 제1,2단에 적용하여, 종래의 공기냉각 익과 동등의 수명을 실현하고 있다. 터빈

제1단 동익 입구 온도는 1,430°C 이상이다.

미츠비시 중공업에 있어서는 터빈에 회수형 증기냉각을 채용한 위와 동일한 개발을 1996년에 개시하였다. 각종의 요소시험을 거친 후, M501H형의 제1차 시운전은 1999년 2월에 개시하여 각종 작동 확인을 순차적으로 실시 후, 동년5월6일에 220MW(GT160MW, ST60MW)의 출력을 달성하고, 고압 압축기 특성 및 증기시스템(증기 냉각 익 냉각 특성)의 검증을 목적으로 한 제1 스텝의 운전을 완료하였다. [사진3]에 터빈 로터를 나타내었다.



[그림 62] GE사 1,500°C급 가스터빈

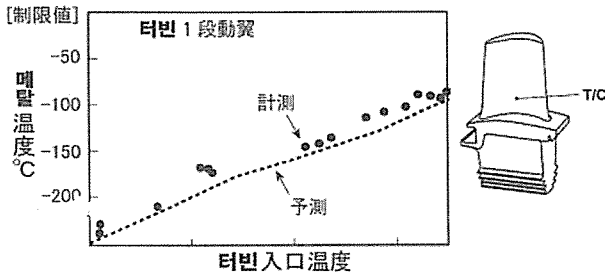


[사진3] M501H 가스터빈 로터

계측 결과로부터, 냉각증기가 터빈 입구, 동/정익으로의 공급과 냉각 성능을 확인할 수 있고, 시운전에서는, 약1,500점의 특수 계측을 실시, 증기 냉각Blade에서는 400점 이상의 특수 계측을 수행하였다. [그림 63]에 그 결과를 나타내었다.

제2차 시운전은, 2000년 12월부터 2001년 3월에 걸쳐서 실시하고, 증기 냉각 부 워밍 시험, 기동 승속 시험, 무 부하 정격속도 운전, 냉각 증기 절체 시험, 병입·부하 변화 시험 등을 수행, 미츠비시 중공업(주) 고사 제작소 내의 실증 발전 플랜트 전 부하 출력인 가스터빈 225MW, 증기터빈 105MW, 계330MW에서의 부하시험을 세계 최초로 성공, 경제 산업성의 인허

가를 취득하게 되었다. 또, 부하시험 종료 후의 부하 차단 시험을 수행, 플랜트의 동특성의 데이터 취득을 수행, 시스템으로서의 건전성도 확인하게 되었다.



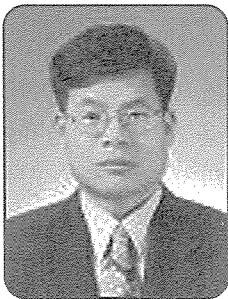
[그림 63] 터빈 제 1단 동익Metal Temperature

이클발전플랜트의 종합 열효율은 대폭적인 향상이 가능하게 된다. LNG 연소의 콤바인드 발전설비는 그 탁월한 열효율로 CO<sub>2</sub>의 발생이 다른 화석연료를 이용한 발전보다 적다. 예를 들면, 석탄 연소의 전통적인 발전설비에 비해, CO<sub>2</sub> 배출량은 약 절반정도로 낮아 지구 온난화 대책의 방안으로서 주목을 받고 있다. 또, 저 NOx 화 등의 연소기술의 진보에 의해, 그 밖의 배기 배출도 적은 환경친화적 발전이며, 차세대 를 향한 고효율 대용량 발전의 열쇠를 쥐고 있다. 가스 터빈은 대용량 발전설비 시장을 리드하는 주기기로 서, 앞으로도 신 재료의 개발, 압축기, 터빈 등, 요소 효율의 향상, 저 공해 등, 사회가 요구하는 니즈에 응 답하기 위한 개발이 가속적으로 이루어질 것으로 예 상된다.

## 5. 금후의 가스터빈 개발

가스터빈의 고온·고 효율화에 의해 콤바인드 사

# 고압전동기 및 발전기 운전 중 부분방전 감시기술



한전 전력연구원  
수화력발전연구소  
전기정비지원그룹  
선임연구원 김희동 공학박사  
Tel : 042-865-5461

## 1. 서론

고압전동기 및 발전기 고정자 권선의 주절연재료 로 마이카/에폭시 복합재료가 사용되고 있으며, 운전 중에 열적, 기계적, 전기적 응력(stress) 및 외부환경에 의한 열화요인이 단독 혹은 복합적으로 작용한다. 열

적요인은 열응력과 열분해로 분류되는데, 열응력은 기계적 응력과 더불어 균열(crack)을 발생시키고 열 분해는 에폭시 분해로 인해 가스압력이 증가하여 접착강도를 저하시켜 계면에서 박리(delamination)를 발생시킨다. 기계적 응력은 계면과 마이카/에폭시 테이 프 내부에서 각각 미소 균열을 발생시키고 동시에 이 미 다른 원인에 의해 생성된 균열을 확대시킨다. 전기적 응력은 박리, 균열과 같은 결함부에서 부분방전 이 발생하여 유전정점의 증가, 코로나 침식 및 트리 (tree) 등으로 진행하다가 마이카 조각이 존재하면 진 전이 억제된다. 열화의 최종단계에서는 독립적으로 발생된 미소 균열이 상호결합하고 트리가 급속히 진 전하여 절연파괴에 이른다[1].

이와 같이 여러 종류의 결함이 고압전동기 및 발전 기 고정자 권선 제작시에 존재하거나 장기간 운전되