

Realignment 하여 해결할 수 있다.

6) 회전상승에 따라 축위치 이동으로 인한 Rubbing
운전상승에 따라 Bearing Oil Film의 압력이 형성되어 축이 횡 또는 상향으로 이동하므로 각부의 간극이 적절하지 않으면 접촉을 일으키고 진동을 발생시킨다.

7) Bearing 마모에 의한 Rubbing

Bearing이 Wiping 또는 화학적 부식에 의하여 Clearance 가 과도하게 되면 Rotor가 내려 앉아 불량 축의 Oil Deflector 또는 Gland 부가 접촉하여 진동을 발생한다. 또 Bearing 조임 Bolt를 죄지 않거나 외적 사고로 절손되는 경우는 Rotor가 윗쪽으로 움직이게 되어 상부가 접촉하게 된다.

8) 진공도 변화에 의한 Rubbing

저압 Turbine의 Bearing은 저압 Casing 위에 얹혀 있는 경우가 많고, 상당한 강성을 지니고 있다고는 하나 높은 진공에 의해 Alignment가 변화되며 Packing Clearance도 변화되어 Rubbing이 발생한다.

부하운전중 진동 발생은 고중압 Section 보다 저압 Section에 많으므로 진공도 조정으로 진공치가 내릴 경우가 있다.

일반적으로 진공도를 내리는 쪽이 소멸되는 예가 많으나 부하의 증감방향과 함께 Unit의 특성을 파악해 두면 응급대책이 되는 수가 있다.

9) Nozzle Diaphragm 변동에 의한 Rubbing

Nozzle Diaphragm은 Plate Spring으로 위치를 고정시키고 있는 것이 있기 때문에 이 Spring이 경년적으로 열화되거나 L.P. Inner Casing의 수평부가 변화되었을때는 Nozzle Diaphragm이 좌우로 움직이기 쉽고 Rubbing을 일으키기 쉬운 결점을 지니고 있다.

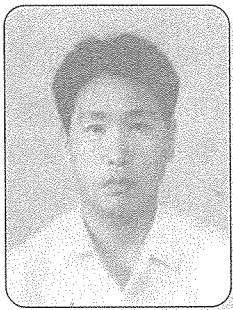
10) Oil Deflector 의 Carbon 퇴적에 의한 Rubbing

Bearing Pedestal 안은 Gas Extractor에 의해 약간의 진공이 되어 있어서 Oil Deflector의 Clearance에서 외기를 흡입하고 있다.

특히 보온재를 사용하는 고중압 Section에서는 보온가루나 먼지가 Oil Deflector에 부착 퇴적하여 기름과 함께 고온에 시달려 Carbon화 될 경우가 있다.

이 Carbon이 성장하여 Rotor와 접촉하여 탈락하고 또 재성장을 반복하기 때문에 Rubbing 진동이 발생하며 그 특징은 수 시간마다 비교적 주기적으로 발생, 소멸하는 경우가 많다.

가스터빈 발전기용 회전자 계자리드 구조연구



한전기공(주)
기술개발원 전문원실
김상식 과장
Tel : (031)710-4402

1. 서론

개발 도상국들의 급격한 산업설비의 증가와 문화생활의 향상은 특정시기에 많은 전력량을 요구하게 되었고 특히 급격한 산업발전을 이룩한 아시아 지역에서의 전력수요 증가율은 가스터빈 전력공급설비의

급격한 증가양상을 보여왔다.

최근의 일본을 포함한 아시아지역 국가들의 경제불황으로 전력공급설비 이용율은 잠시 주춤하고 있으나 꾸준한 회복세를 나타내고 있고 설비 댓수와용량이 계속적인 증가일로에 있다

이러한 단 기간 내에서 전력급증 상황은 그 동안 산업설비의 자가 비상 발전용으로만 이용하던 가스터빈 발전기를 복합발전, 열병합 발전이라는 새로운 전력공급형태의 발전설비로 이용하게 되었다. 가스터빈 복합발전기술은 60년대 정립이된 이후로 환경문제를 포함하여 높은 열효율, 짧은 기동정지 시간으로 신속한 부하운전응동등 기존 원자력, 기력 발전설비와는 다른 특성으로 인하여 전력수급형태가 급증,급감하는 시장에서 많은 인기를 누릴 것으로 전망되며 아시아 지역에도 4천여기 약 200GW의 용량에 달하는 가스

터빈 발전기가 각국에서 운전되고있다.

대 용량의 송전망에 연결되어 운전되는 전력공급 가스터빈 발전기는 일반산업설비에 이용되는 비상전원 발전기와는 달리 그 부하상황에 따라 DSS(Daily Start Stop),WSS(Weekly Start Stop)와 같은 잦은 기동정지를 수반하기 때문에 발전기의 기본적인 구조적 설계에 있어 각각 구성품들의 구조는 반복적인 전기적,기계적,열적 피로에 대한 강성(Rigidity) 및 운전상태 변화에 대한 유연한 응답성(Flexibility to Various Load)이 요구되며 특히 터어빈 축과 연결되어 기계적 스트레스를 받고 운전되는 회전자(계자)의 코일구조, 코일지지구조, 고정자(전기자)코일구조,단부권선 지지구조들은 더욱 그러하다.

여기에서는 가스터빈과 운전되는 발전기의 전형적 계자권선 리드 지지구조를 변경 최적화 모델링하여 그 적합성을 다음과 같은 항목에 대해 유한요소해석을 통하여 입증하였으며 향후 대전력 공급망과 연계된 소용량 가스터빈 발전기의 운용특성을 최대한 유지시키고자 한다.

- 일반적인 구조형태의 계자리드 유한요소 해석
- 부분적 계자리드 지지구조 변경과 유한요소 해석
- 전반적인 계자리드 지지구조변경과 유한요소 해석

2. 본 론

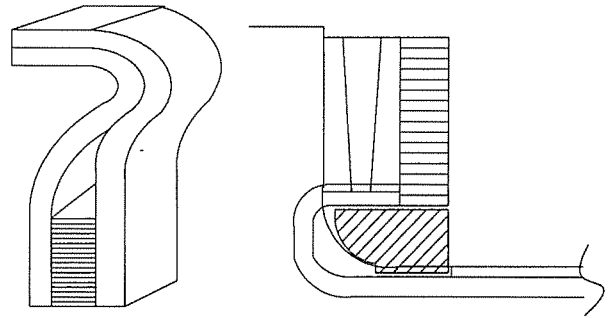
가. 발전기 계자권선 플렉시블 리드(Field Flexible Leads)의 구조

계자코일의 1번 코일그룹에 연결되는 리드(Leads)는 연결점과의 상호 신축성 있는 움직임을 흡수하고 반복적인 기계적 응력을 흡수하며 전기적인 계자회로를 구성하기 위해 수장의 얇은 플렉시블 동판으로 연결되어 있다.

이러한 플렉시블 리드의 지지구조는 각각의 제작사에서 각기 특징 있는 구조로 제작되고 있으며 그 구조는 크게 J-Strap 형태와 거위목(Goose Neck) 형태를 취하고 있다.

J-Strap 형태의 경우 리드(Leads)부분을 회전자 body 축상에 슬롯을 가공하여 삽입시키며 도체는 절연을 하며 철 웨지(Steel Wedge)를 이용하여 도체를 슬롯 내에 고정시킨다. J 부분이 1번 코일 그룹 하부 코일에 접속되어 있는 형태와 Top Coil 에 접속되는

형태가 있다. 이러한 형태의 제작인 경우 회전자 몸체와 슬롯부, J형태 연결부, 몸체 상승부 모두를 지지블록을 이용하여 지지하는 경우가 대부분이다. 이러한 형태의 경우 일부 지지블록의 파괴현상은 보이나 반복굽힘응력에 의한 J-Strap의 Stress, 크랙, 일부파단, 절단등의 현상은 나타나는 경우가 드물다.



[그림1] Goose neck type [그림2] J-Strap type

거위목(Goose Neck) 형태는 계자전류를 공급하기 위한 중공축의 동 부스(Copper Bus)에 리드볼트(Stud Bolts)를 연결하고 이 볼트에 직접 플렉시블 계자리드를 용접(Brazing) 연결하여 코일에 접속되며 리드볼트와 축(Shaft)에 너트로 고정하며 축상 공간에 절연하여 위치시킨다. 일부 모델에서는 계자리드 상부 지지블록을 설치하는 경우가 있으나 기존 설치되어 있는 이 형태의 경우에는 계자리드 자체의 파단사고가 잦다.

나. 계자리드 연결점의 Stress원인

계자리드에 Stress가 작용하는 주된 원인은 반복하중 작용에 의한 반복 굽힘응력과 전류 전달부의 열응력을 고려할 수 있으며 이중 도체에 작용되는 반복굽힘응력으로 인한 파단이 주된 원인이라 할 수 있다. 이러한 반복적인 굽힘운동량은 회전자 자체의 기계적 설계치와 그 변화, 잦은 기동정지 운전상태 변화로부터 나타나며 크게 다음과 같은 요인으로 구분할 수 있다.

- 1)계자리드 연결점과 지지블록간의 과도한 Clearance
- 2)계자단부권선과 리테이닝 링과의 과도한 Clearance
- 3)굽힘운동 방지 블록 미설치
- 4)회전자 body와 코일간의 열팽창 차이

5)계자리드 볼트의 설치불량

6)계자코일의 단락에 의한 고진동

7)터닝기어(Turning Gear)운전시 코일의 자중에 의한 운동

현재 운전되고 있는 발전기중 특히 계자리드 지지 형태가 Goose Neck형태를 취하고 있는 가스터빈발전기에서 크랙 및 파단사고가 주로 발생하고 있으며 위에서 언급한 원인들을 제거하지 않았을 경우에는 사고 보고된 발전기는 기동정지/횟수가 300-500회정도에서 크랙 및 파단이 초기 시작되는 것으로 나타나고 있다.

원인 1 경우는 블록이 설치 되어있으나 그 길이가 충분하게 계자리드를 지지하지 못하고 리드와 블록간에 간극이 존재하므로써 계자리드의 레이디얼 방향 운동을 촉진시키므로써 손상되는 경우이다. 지지블록의 길이조정을 하므로써 그 손상정도를 줄일 수 있다.

원인 2 경우 단부절연재의 두께조정을 잘못하여 링과 단부코일과의 간극이 커짐으로서 역시 단부권선의 레이디얼 움직임을 증가시키는 경우이다. 이러한 원인은 단부권선 하부고정을 시키지 않는 경우가 소용량 가스터빈발전기의 경우 대부분으로 코일그룹과 하부권선의 원상복구운동과 함께 리드부에 Stress를 발생시킨다. 즉 잦은 기동정지를 수행하는 가스터빈 발전기의 경우 단부권선 지지구조의 정밀하고 견고한 지지구조를 유지해야 한다는 것이다.

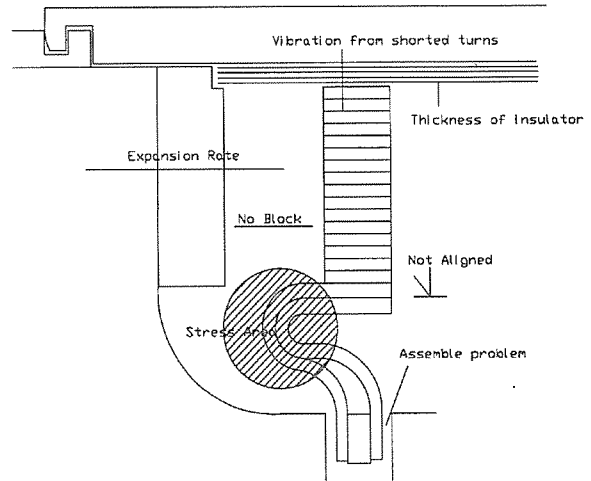
원인 3은 1,2의 원인보다 계자리드의 운전시 원심력에 의한 형태변형 및 정지시 원상복구 반복응력집중에 더욱 심각한 영향을 미치게 된다.

4의 원인은 심수분내에 전기적 출력을 내게되는 가스터빈의 발전기의 운전특성으로 인해 나타나며 회전자 몸체의 정상적인 열팽창계수와 계자코일 그룹의 열팽창계수의 차이로 발생된다. 즉 회전자 몸체의 정상적인 열팽창 전에 계자권선에 전류를 공급함으로써 보다 많은 계자코일의 축방향 팽창을 발생시키며 이것은 계자리드에 축방향의 반복 Stress를 발전기의 기동정지시마다 주게된다.

5원인은 계자 리드볼트의 고정불량으로 고정넛트 Lock 불량, 볼트의 조립불량(Misalignment Between two axial bars) 으로 인해 리드볼트 자체가 견고하게 고정이 되지못하는 경우이다. 이 경우 회전자의 운전 에 따라 발생하는 기계적 진동과 함께 계자리드 움직임(Axial, Radial, Rotating운동)을 발생시키며 Stress에

의한 단선사고 또는 리드볼트의 접촉불량에 의한 사고까지 더욱 진전시킨다.

7원인은 저속운전시 코일 자중에 의한 레이디얼 방향으로의 왕복운동에 의한 굽힘응력이 작용하는 것으로 일부제작사에서는 이러한 저속운전시간 및 회전수를 제한하고 있다.



[그림3] 계자리드 응력발생 원인

다. 운전시간, 기동정지횟수와 계자리드 사고 비교

최근 연속적으로 발생하는 계자리드의 단선사고는 아래 표에서 나타나듯이 기동정지횟수가 300-500회에 초기 시작되며 2000회내에서 모두 절단되며 특히 계자권선의 턴간 단락이나 기계적 고진동이 동반되면 기동정지 횟수에 관계없이 과도한 계자전류에 의한 전기적, 기계적 스트레스가 동시에 부가되므로 급진전하는 경향을 보인다.

< 표 1 > 계자리드 고장과 운전시간,기동정지횟수

번호	고장내용	운전시간	기동정지횟수	발생내용
1	-고진동 -Field Leads	24,584	1,182	100%절단
2	-계자접지 발생 -Field Leads	3,395	362	27%절단
3	-계획예방 정비기간 -Field Leads	25,584	1,532	55.5%절단
4	-계자접지 발생, 고진동 -Field Leads용융	25,180	1,243	100%절단
5	-계자접지발생 -Field Leads	27,278	1,688	47.2%절단
6	-계획예방정비기간중 -Field Leads	25,238	1,288	13.8%절단
7	-보어스코프 검사 -Field Leads	21,082	458	55%절단
8	-Field Leads V notch 발생 -Field Leads	31,173	1,858	13.8%절단
9	-Field Leads 절단	122,09	881	47.2%절단
10	-계획예방정비중 -Field Leads	29,294	359	5.5%절단

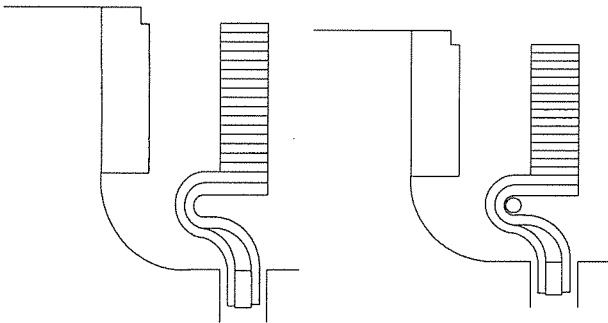
또한 운전시간과 비교하면 3만시간 이내에서 모두 절단되는 현상을 보이며 특히 고정불량,턴간단락에 의한 고진동을 내포한 사고는 운전시간, 기동정지횟수와 관계없이 응력과피현상이 급진전함을 볼수 있다.

라. 계자권선 플렉시블 리드구조 및 유한요소 해석

1) 계자리드 구조 및 모델링

시험용 모델의 일반적인 형태는 최근 문제가 발생되고 있는 Goose Neck Type 계자리드를 선정하였으며 그 형태는 다음과 같다. 모델 (1)은 일반적으로 가장 많이 설치되어있는 형태로서 계자리드 지지구조를 전혀 보강하지 않은 상태이다.

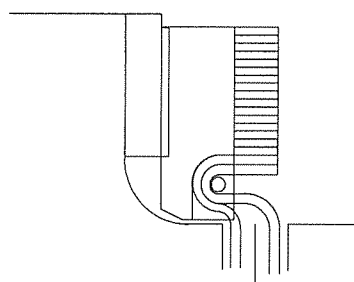
모델 (2)는 계자리드 연결점의 내부 반경에 Glass fiber Bar를 삽입하고 계자 리드와 바인딩을 하였다. 발전기의 기동과 정지시 계자단부코일의 상하운동으로 인한 리드 변형을 최소화할 수 있도록 하였으며 V-Notch와 같은 현상은 나타나지 않았으나 삽입된 봉과 계자리드 자체 질량으로 인한 반경방향 변형은 나타났다.



[그림4] 전형적 모델

[그림5] 변경 모델 (1)

모델 (3)은 계자리드 곡선에 봉을 삽입하여 바인딩하고 발전기의 기동정지시 반복되는 계자코일의 상하운동과 리드의 원심력을 지지하기 위하여 지지블록을 설치한 경우로 운전되고있는 발전기중 형태의 변형이 가장 적게 일어났다.



[그림6] 변경모델(2)

해석에 사용한 범용 유한요소해석 프로그램은 ANSYS 5.3이며 Field lead의 적용물성은 Copper의

C10200계열 Temper M20으로 물리화학적 특성은 아래표와 같다.

<표 2> 적용모델 특성

물 성	황동터미널	Field Lead
탄성계수	4.2e9 kg/m ²	4.78e9 kg/m ²
밀도	8600 kg/m ³	8900 kg/m ³
열전달계수	21.2e-6°C	17.6e-6°C
포와송비	0.34	0.36
두께		0.5e-3m

손상부위에 걸리는 전체적인 응력분포와 거동을 확인하기 위하여 황동절연 터미널과 field lead, 필드 리드의 변위를 제한하려는 봉, 블록을 각각 3차원 모델링 하였다. 그리고 필드리드의 끝부분의 변위를 제한하고자 끝부분에 스너버 역할 (이동 가능 변위는 3mm로 제한하였다)을 하는 모델을 추가하였다.

사용 엘리먼트의 종류는 황동터미널은 solid 45, 필드 리드는 shell 43, 봉과 블록은 solid 45, 그리고 봉과 필드 리드, 블록과 필드 리드의 접촉에 의한 영향을 묘사키위해 콘택트 엘리먼트인 Contact 49를 사용하였다.

2) 하중 및 경계조건 설정

필드 리드와 회전자 코일은 운전중 발전기 로타의 원심력을 받기 때문에 인장 응력을 경험하게 된다. 정지 중에는 접촉하지 않는 필드 리드의 끝부분이 운전중 관성력에 의해 접촉하게 되는데 높이방향의 이동변위 가능량은 3mm로 제한하였다. 황동절연 터미널은 발전기 로터에 고정되어 있으므로 전 자유도를 고정하였고 봉과 블록 또한 전 자유도를 고정하였다.

하중은 X축에 대하여 필드리드와 황동터미널을 분당 3600회전시켜 발생하는 관성력을 입력하였다. 그리고 필드리드에 아무 것도 지지되어 있지 않는 모델과 봉만 끼여져 있는 경우, 그리고 봉과 블록이 필드리드 사이에 끼여져 있는 경우 등 총 3가지 경우에 대해서 각각 해석을 수행하였다. 그리고 필드 리드의 재질에 대해서는 응력-변형을 곡선 상에서 탄성역과 소성역에서 서로 다른 2개의 기울기를 갖는 것으로 생각할 수 있는데 여기서는 각각의 기울기는 7.0e-6과 4.78e-8으로 근사화 하였다.

3) 각 모델별 응력해석 결과

해석 결과 최대 응력은 황동 터미널과 필드 리드의

용접부위(A)와 또는 필드리드부위중 최대 곡률 반경을 가지는 부위(B)에서 발생하는 것으로 나타났다. 각 모델별 응력은 위에서 언급한 2개의 부위를 가지고 비교하였다.

가) 기존 모델

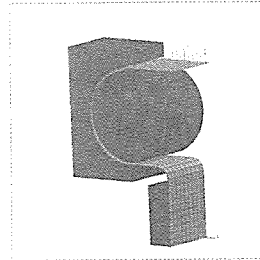
최대응력은 황동터미널과 필드 리드의 용접부위에서 발생하였고 B부위 에서도 많은 응력이 발생하였다. 이때의 응력은 A부위가 1,514 Kgf/cm², B부위가 1,065 Kgf/cm² 가 발생하였다. 이 수치는 Temper M20의 항복강도인 704 Kgf/cm² 보다 훨씬 큰 수치로 재질에 소성변형이 발생하게 된다. 실제 현장에서 1주기 운전 시간동안 2000여회에 가까운 기동/정지에 의한 반복하중을 받는 것을 고려할 때 A부위와 B부위에서 피로 균열이 생성된 것으로 추정된다.

나) 봉을 삽입한 모델

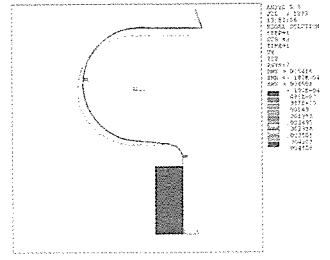
최대 발생응력은 기존 모델에 비교해서 약 30%가 감소한 상태를 보여준다. 그런데 위의 경우와는 달리 최대응력 발생지점은 봉에 접촉하는 B부위에서 발생하는 것으로 나타났다. 그렇지만 필드리드의 이동변위는 봉에 의해 거의 발생하지 않는 것을 고려한다면 소성변형에 의한 필드리드 곡률부위의 파괴양상은 대폭 줄어 들 것이라고 생각된다. A부위에서는 919Kgf/cm², B부위에서는 983Kgf/cm²의 응력이 발생되었다.

다) 봉과 블록을 삽입한 모델

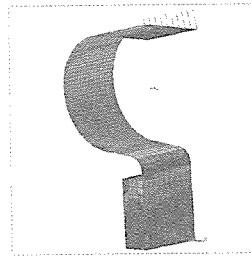
최대응력은 기존모델에 비해서 40%정도 감소한 것으로 나타났다. A부위 에서 889Kgf/cm², B부위에서는 698Kgf/cm²의 응력이 발생하는 것으로 나타났고 B부위는 탄성영역안에 포함되는 응력이 발생되고 있다. 또한 필드리드의 이동변위는 봉과 블록에 의해 거의 발생하지 않기 때문에 소성 변형에 의한 A부위나 B부위에서의 파괴는 거의 발생하지 않을 것으로 생각된다.



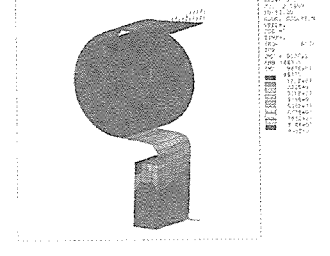
[그림9] 봉과 블록을 삽입한 모델



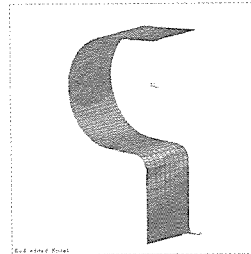
[그림10] 기존모델의 변형



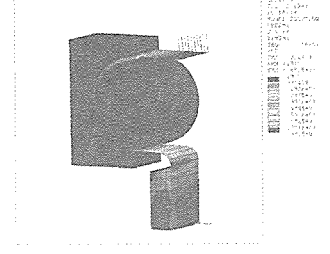
[그림11] 기존모델의 응력분포



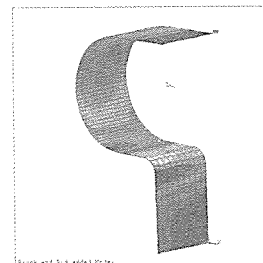
[그림12] 봉 삽입모델의 응력분포



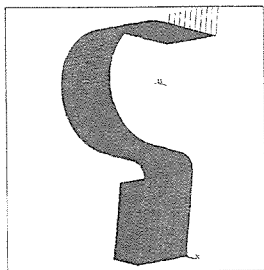
[그림13] 봉 삽입모델의 응력분포



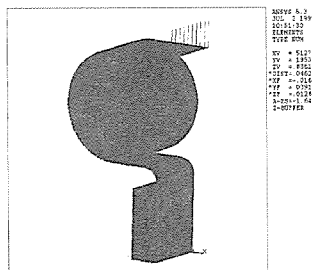
[그림14] 봉과블록 삽입모델의 응력분포



[그림15] 봉과블록 삽입 모델의 응력분포



[그림7] 기존 계자리드 모델



[그림8] 봉을 삽입한 모델

3. 결론

가. 가혹한 운전환경에서의 가스터빈발전기 계자리드의 적절한 지지구조를 구성하고 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 발전기의 FieldLead에 발생하는 응력분포와 변형상태를 해석한 후 파단원인을 규명하고, 이에 대한 대책을 수립하여 운전중 응력이 가장 적게 발생하는 방안을 제시하였다. 이를 위하여 거시적인 응력장과 변위를 해석하기 위하여 3차원 모델링을 한 후 탄소성 해석을 수행하였다.

나. 각 모델별 발생응력은 다음과 같다.

재 질	항복강도	인장강도	응력발생 부위	기존모델	봉삽입 모델	봉,블럭 삽입모델
Temper M20	704Kgf/cm ²	2,393Kgf/cm ²	A	1514 Kgf/cm ²	919 Kgf/cm ²	889 Kgf/cm ²
			B	1065 Kgf/cm ²	983 Kgf/cm ²	698 Kgf/cm ²

다. 위의 결과를 고려할 때 봉과 블럭이 함께 필드 리드에 삽입된 모델이 응력발생량의 감소나 필드 리드의 변형방지에 가장 효과가 있는 것으로 나타났다.

2. 가스터빈강좌 한전기공주식회사 1999. 최열
3. New technology for turbine generator 1996. HITACHI LTD
4. 기술정보 Letter TIL 1002. GE
5. ANSYS 5.3 Elements Manual,1996. ANSYS, INC
6. A Development of Technique on the analysis assessment & Diagnosis for Power Plant Facilities. 1997. KPS
7. 가스터빈 아시아지역 운전현황. 1999. KPS 가스터빈 정비센터

참고문헌

1. 복합화력 기술자료 한국전력공사 1995. 발전처

회원사 동정 (The State of Major Affairs in Membership Companies)

o 수상을 축하합니다.

- 제 22회 에너지절약 촉진대회(2000. 11. 22) 수상자
 - 산업포장 : 삼성코닝(주) 엄선호 부장
 - 대통령표창 (개인) : 에너지관리공단 노종환 반장 한국지역난방공사 한건택 처장 (단체) : SK(주), 팬아시아페이퍼코리아(주)
 - 산업자원부 장관표창 한국지역난방공사 손창일 부장 서울에너지(주) 강용훈 대리

- 제 26회 국가품질경영대회(2000. 11. 21) 은탑산업 훈장
 - 한전기공(주) 김형국 대표이사
- 공기업 고객만족도 1위 (정부(기획예산처)주관 2000년 공기업평가)
 - 한국지역난방공사

- o 회사명(대표이사) 변경(2000. 11. 1)
- 변경전 : (주)삼양사 (김 윤)
 - 변경후 : (주)휴비스 (조민호)

협회활동 (Activities of K.C.A)

1. 2000 사업실적 종합 및 2001 사업계획(안) 작성

2000년 사업실적 종합 및 수지결산을 실시하였으며 이는 협회 감사의 감사를 받은 후 2001년 정기총회에 보고할 예정임. 아울러 2001년 사업계획(안)을 작성하였음. (참고자료 참조)

2. 임원회의 개최

지난 2000. 12. 8 오후 임원 간담회를 개최하여 협회 업무실적 및 발전방안 등에 관하여 논의 하였음.

3. 회원사 방문 · 견학