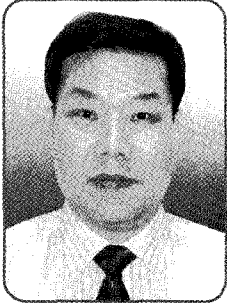


30MW 증기터빈 최종단 회전익 파단 사고 분석(Ⅱ-1)



한진KPS(주) 기술연구원
책임전문원 김성봉
Tel : (031)710-4393

- 운전모드 : Sliding Pressure Mode
- 배기형식 : Axial Exhaust
- 증기조건 : HP 94kg/cm²/ 486℃ / 141T/hr
- 터빈단수 : 16단 (HPs+IPs+LPS=10+3+3)
- 터빈로터 : Solid Rotor
- 냉각수계통 : Treated Water with Cooling Tower
- 운전책무 : Continuous Operation on a Base Load Basis and Cyclic Load Variation
- 설치위치 : Indoor

1. 서론

발전소에서 운전되고 있는 증기터빈 블레이드는 발전소 핵심 설비중 손상이 많이 발생하는 부품으로 발전소 신뢰성 증진 및 유지 정비비용 절감 면에서 매우 중요한 부품이다. 국내외 증기터빈 블레이드 손상사고를 분석하면 저압단 터빈 블레이드 사고가 총 블레이드 사고의 70% 정도를 차지 할 정도 많이 발생하며 특히 진동 손상모드가 중요한 요인으로 작용하고 있다. 특히 터빈 블레이드 손상에 대하여 체계적인 블레이드 분석 기술을 통하여 터빈 블레이드 운전 및 유지관리를 최적화 할 수 있다. 운전 중인 증기터빈이 고진동으로 정지하여 증기터빈을 분해 점검 한 결과 LP 최종단 회전익 59개 중 1개 블레이드가 파단, 비산되고, 3개의 날개가 균열되었다.

운전이력과 블레이드 파단면 분석을 통하여 블레이드 손상 메커니즘을 규명하고 사고 방지책을 모색하였다.

2. 증기터빈 사양 및 사고 전 운전내용

2.1 증기터빈 사양

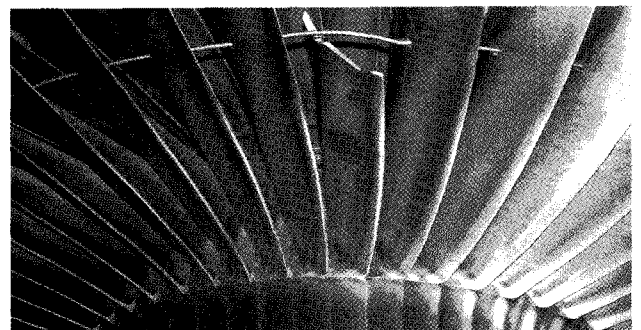
- 형식 : Single Pressure, Single Casing, No.n-Reheat Condensing.
- 회전수 : 터빈 6,850 rpm, 발전기 1,800 rpm
터빈 1차 Critical 3,246 rpm,
2차 Critical 7,548 rpm
발전기 Critical 2,601 rpm
- 회전방향 : C.W.(증기흐름방향에서 볼 때)

2.2 사고전 운전 내용

- 전기출력 : 0.98 MW
- 증기유량 : 16.3 ton/hr
- 압력 : 95 Kg/cm²
- 온도 : 481℃
- 터빈 Exhaust 온도 : 76.6℃
- 터빈 Exhaust 압력 : -0.79 Kg/cm²

3. 증기터빈 손상 내용

3.1 주요 손상내용 요약



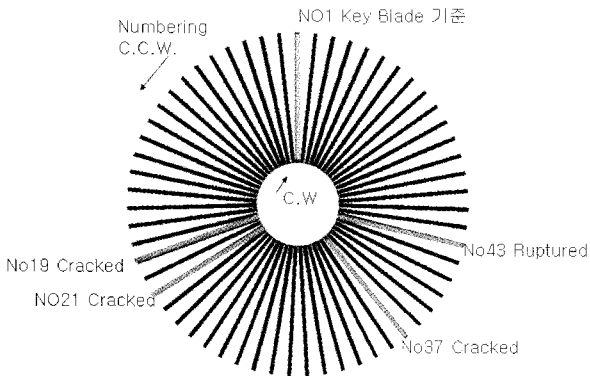
[그림 1] 탈락된 블레이드

- Shaft Vibration(TBN Rear Radial Bearing, Y-axis) High로 Trip됨. (Alarm 83 μ m, Trip 110 μ m)
- 터빈 로타 Last Stage의 동익 1개가 사진과 같이 탈락되고, 비파괴 MT 결과 동익 3개가 Damping Wire 구멍을 기점으로 균열이 발생됨.

- 탈락된 동익이 회전방향 바로 뒤 동익 상부와 충돌하면서 굽힘 손상이 발생됨.
- 동익 Leading Edge(입구)와 Trailing Edge(출구)부 오목면은 습분 침식이 발생함.
- 동익 탈락으로 인한 2차 손상은 발견되지 않음.

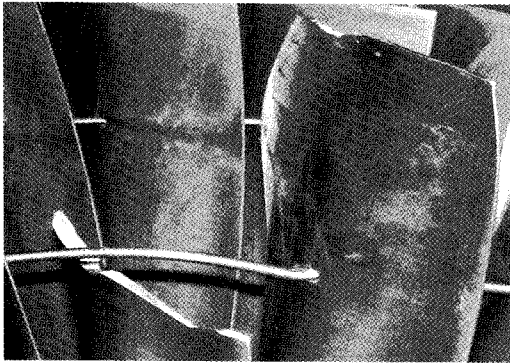
3.2 손상 위치 및 특성

- 모든 회전익 균열은 Damping Wire Hole에서 1차 Trailing Edge 방향으로 진행 후 2차 Leading Edge 쪽으로 발생함.



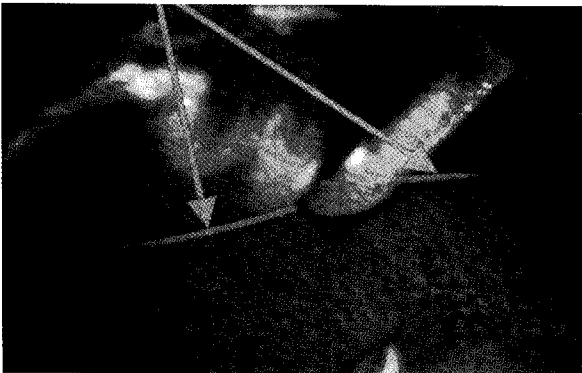
[그림 2] 최종단 회전익 손상 위치

- No.43 회전익은 완전 파단이 되어 No.44 회전익의 Tip부에 손상을 입히고 탈락됨.



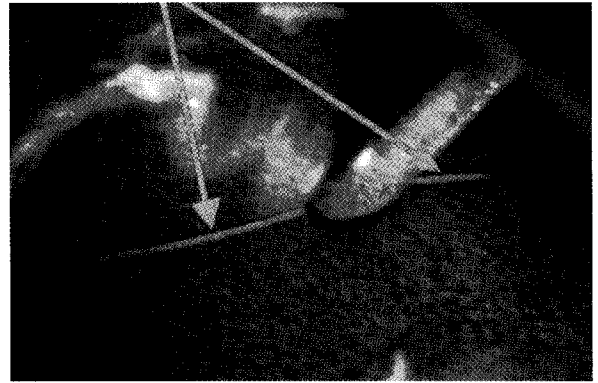
[그림 3] 절손된 블레이드

- No.19, 21, 37 회전익은 MT 결과 균열이 발견됨.

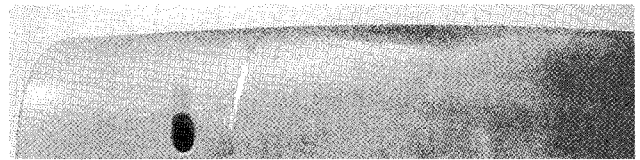


[그림 4] 회전익 MT 균열

- No.19, 21, 37 회전익은 MT 결과 균열이 발견됨.



[그림 5] 회전익 MT 균열



[그림 6] 최종단 회전익 Leading Edge 침식 손상

3.3 사고시 진동 특성

○ Shaft Vibration Limit (Units : μm peak-peak)

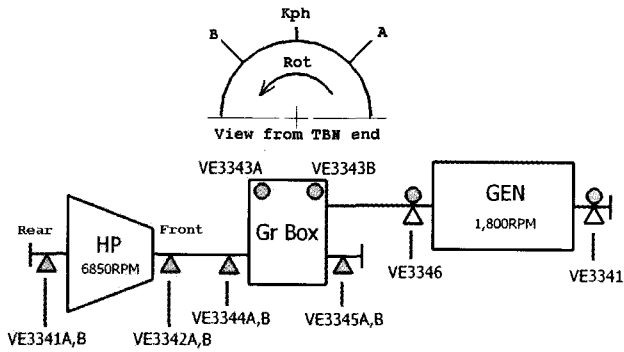
- Turbine Front X, Y : Alarm > 84, Trip > 110, No,minal=59
- Turbine Rear X, Y : Alarm > 84, Trip > 110, No,minal=59
- Gear Box Pinion Front X, Y : Alarm > 87, Trip > 129, No,minal=46
- Gear Box Pinion Rear X, Y : Alarm > 87, Trip > 129, No,minal=46
- ※ Sensor Type : NCPU 8mm (7.87V/mm)

○ Casing Vibration Limit (Units : mm/s veff)

- Gear Box Front Hor. : Alarm > 4.5, Trip > 7.1, No,minal=3.2
- Gear Box Rear Hor. : Alarm > 4.5, Trip > 7.1, No,minal=3.2
- Generator Front Hor. : Alarm > 7.1, Trip > 11, No,minal=3.5
- Generator Rear Hor. : Alarm > 7.1, Trip > 11, No,minal=3.5
- ※ Sensor Type : Velomitor (4mV/mms-1)

○ Turbine Bearing 및 Sensor 위치/방향

- Shaft Vibration Sensor : VE3341A,B / VE3342A,B / VE3344A,B / VE3345A,B



[그림 7] 베어링 및 Sensor 위치 개요도

- Casing Vibration Sensor : VE3343A / VE3343B / VE3346 / VE3341
- Trip 되기 약 10분 전 거의 전체 신호에서 미세한 진동 Hunting 현상이 나타났던 것으로 보아 그 시간 동안 집중적으로 Blade에 어떤 가진력이 작용한 것으로 추정된다.
- Trip 되기 전 축진동은 10 μ m 내외, 케이싱 진동은 0.28~0.59mm/s로 전반적으로 양호하였다.
- Trip 당시 TBN Rear 측 B 방향에서 137 μ m(1X 116 μ m)로 최대 진동값을 나타내었으며 주 진동주파수는 회전주파수이다. TBN 축진동은 Trip 전 진동값에 비해 전반적으로 7~14배로 진동이 증폭되었으며, Gear Box 축진동도 5~10배로 증폭되었다. Generator 케이싱 진동은 동일 상황에서 최대 2배로 증폭된 것으로 분석된다.

- 최대 진폭은 L-O단 Blade 1개가 탈락되면서 그 Mass Unbalance로 인하여 진동 증폭이 발생하여 전형적인 Blade 탈락에 따른 진동 현상을 보였으며 Last Stage와 가까운 Turbine Rear (VE3342A,B)측 진동값이 모두 진동 Trip치인 110 μ m를 초과하여 Trip으로 이어졌다. Trip 이후 시도된 3차례의 기동 및 정지시 상황은 3번 모두 정격회전수에 도달하기 전 4,806~5,124rpm에서 Turbine Front(VE3342A)측 진동값이 110 μ m에 근접하여 Trip된 것으로 보이며 각 Point의 진동값으로 보아 Trip 이후 손상 상태를 악화시키지는 않았던 것으로 판단된다.

※ 아래 표에 나타난 진동값은 System-1 으로부터 Backup된 진동 Data가 Software Version이 맞지 않는 관계로 정밀한 수치 파악이 되지 않았으며, System-1에서 출력(Print Out)된 Plots을 근거로 하여 각 Plot의 Scale에 의존한 진폭 추정치이다.

4. 최종단 손상원인 분석

4.1 손상 위치 및 특성

- Damping wire hole 주변 부식
- Damping wire hole 주변 부식은 파단의 시작점이 될 수 있고, 정지 기간 중 상대습도가 60% 이상이 되면 대기부식의 조건이 되므로 정지 기간 중 부식발생

[표 1] 블레이드 사고 시 진동값

Sensor Position	Item No..	Trip 5분 전	Trip 시	1차 재기동	2차 재기동	3차 재기동	Units
	Time	03:00:00	03:05:35	04:46:30	05:33:56	10:49:45	
	RPM	6,850	6,854	5,124	4,806	4,835	
TBN Rear	VE3341A	10 (4)	75 (80)	44 (45)	49 (51)	54 (52)	μ m Direct (1X)
TBN Rear	VE3341B	10 (5)	137 (116)	81 (85)	78 (69)	66 (63)	
TBN Front	VE3342A	10 (5)	114 (113)	109 (108)	103 (103)	108 (113)	
TBN Front	VE3342B	10 (5)	98 (79)	52 (51)	49 (49)	50 (49)	
Gr Box Pin, Rear	VE3344A	(8)	(52)	-	-	-	
Gr Box Pin, Rear	VE3344B	(8)	(78)	-	-	-	
Gr Box Pin, Front	VE3345A	(3)	(16)	-	-	-	
Gr Box Pin, Front	VE3345B	(3)	(15)	-	-	-	
Gr Box Rear Hor.	VE3343A	0.28	2.71	3.48	3.1	2.32	mm/s
Gr Box Front Hor.	VE3343B	0.3	2.33	2.04	2.43	1.84	
Gen, Rear	VE3346	0.59	0.87	1.17	0.59	0.78	
Gen, Front	VE3341	0.58	1.07	1.06	0.68	-	Direct

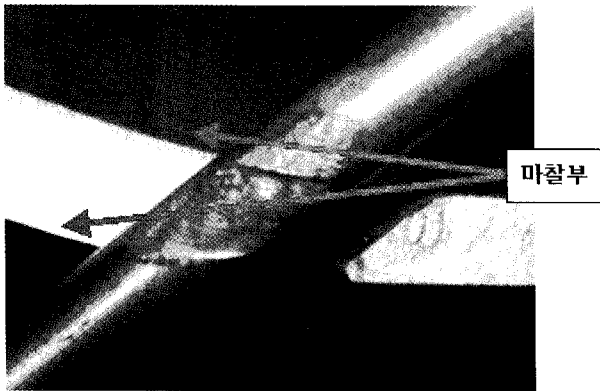
가능성이 있고, 3-4일 이상 터빈 정지시에는 습분제거기를 운전해야 됨.

- Damping wire

분해시 Damping wire 2곳의 결합부분 중 1곳은 Sleeve 일부 파손되었지만 남아있었고, 180° 반대방향의 Sleeve는 완전 탈락되어 없어졌고, 이 연결부분의 Damping wire는 파손 탈락된 No.43 Blade 쪽으로 밀려나갔음. Damping wire 밀려나가는 메카니즘은 다음과 같이 2가지로 생각할 수 있다.

첫째, No.43 Blade 파손 탈락 후 No.43 위치에서의 Damping wire 원심력에 의한 No.43 Blade 쪽으로 Tensile stress 발생으로 Damping wire가 밀려오는 경우.

둘째, Damping wire Sleeve가 먼저 탈락되면서 Damping wire와 Blade Hole 사이의 접촉 구간과 마찰 Damping Force변동을 발생함. 이는 제작, 설계 또는 조립 불량 가능성.



[그림 8] No.43 Damping Wire 마찰부

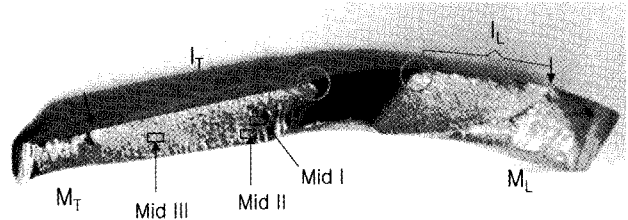
4.2 파단면 분석

분석용으로 제공된 최종단 회전익은 No.6, 21, 32, 37 4개였다. No.21, 37은 완전 파단되지 않았으나, 균열이 발견된 블레이드이다. 균열은 Tie Wire Hole 관통부에서 시작되어 Leading Edge 및 Trailing Edge 양쪽으로 발견되었다. 균열은 직선형태였다. No.21과 No.37 회전익은 파면분석을 위하여 사용하였으며, No.6 회전익은 Tie Wire Hole 부근의 형상 관찰과 미세조직 분석을 위하여 사용하였다.

- 파면의 일반적인 특성

제공된 회전익 중 2개의 균열이 내재된 회전익의 파단면 관찰을 위하여 균열의 위치를 파악하고 (비파괴검사 결과 활용) Leading Edge 및 Trailing Edge 부에서 Ligament를 Grinding Out한 후 인장시험기로

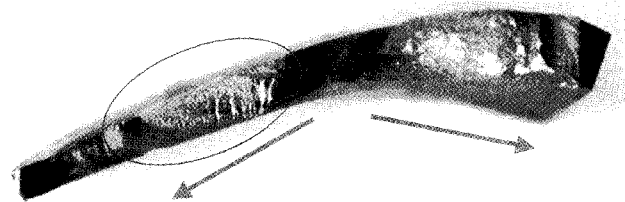
회전익을 인장시켜 완전 파단에 이르게 하였다. 파단면은 Tie Wire Hole에서 발생한 균열을 따라 진행되었고, 기존에 파단되었던 부분과 시편준비를 위한 인장력에 의하여 파단된 부분이 극명하게 구분되었다. 파단면은 고주기피로(High Cycle Fatigue)의 전형적인 모습을 보여주고 있다.



[그림 9] No.37 회전익 파단면

사진에서 빨간 동그라미 부분이 각각 균열 발생의 원인점이 되는 부분이고, II, IT 부분이 피로균열, ML, MT부분이 파면 관찰을 위하여 인위적으로 인장력으로 파단시킨 파면이다. 피로균열전과부분은 원호형태로 보여지고 있다. 피로균열파면은 대체적으로 평탄하였으며, 전체 영역에 걸쳐서 특별한 차이점은 관찰되지 않았다. 파단면 전체에 걸쳐서 녹슨 흔적은 볼 수 없었다. No.21 회전익의 파단면은 다음 그림과 같이 Trailing Edge 쪽만 피로균열이 발생되었다.

이후 모든 파면사진에서의 균열 전진방향은 TE에서는 우상 → 좌하의 방향이고, LE에서는 좌상 → 우하의 방향이다.



[그림 10] No.21 파단면 사진

- 검사결과

① 균열 시작점의 위치

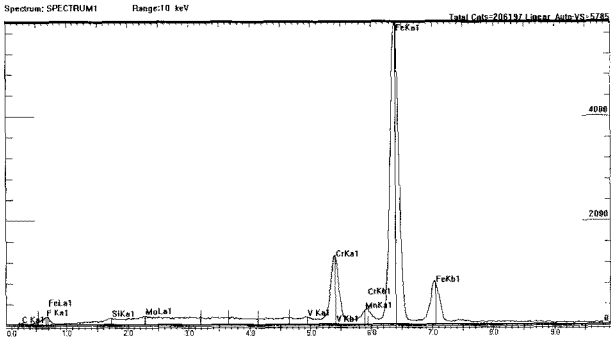
균열은 Trailing Edge 및 Leading Edge 쪽 모두 Tie Wire Hole에서 시작되었으며, Tie Wire와의 반복적인 접촉에 의하여 형성된 것으로 판단된다.

No.21의 Origin 부근에 멍그리진 흔적이 관찰되었으나, 직접적인 연관성은 판단 불가능하며, 전반적으로 파면에 균열면 끼리의 마멸흔적이 나타나고 있다. 검사한 파면으로부터 균열시작 시점의 유추는 어렵다.

균열 시작점 부근의 파괴의 양상은 결정립계를 가로지르는 입내파괴(Transgranular Fracture)였다.

② Mid Range 영역의 파면

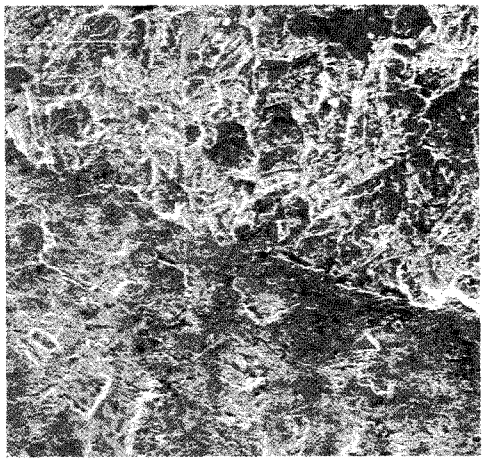
Mid Range 영역에서의 파면은 결정립 형상이 비교적 뚜렷하게 관찰되는 입계파괴(Intergranular Fracture)였다. 곳곳에 피로균열에서 전형적인 줄무늬(Striation)이 나타나고 있었으며, 결정립계를 따른 2차 균열도 관찰되고 있다. 부식피로균열의 전형적인 파면 양상이라고 보이지만, 성분분석결과 특이할만한 부식 성분은 관찰되지 않았다.



[그림 11] No.21 파면에서의 EDS 분석결과

③ 피로파면-인장파면 경계

피로파면과 인장파면의 경계부는 극명하게 구분된다. 피로파면의 Mid Range에서 보여주었던 결정립계의 모습이 MoNo,tonic한 인장파면에서는 관찰되지 않고 있다.



[그림 12] No.21 TE 경계

- 시편 준비

최종단 회전의 미세조직 분석을 위하여 건전한 회전익인 No.6 회전익의 Tie Wire Hole 부근을 시편 채취하였다. 미세조직 관찰 시험편을 Abrasive Cutter를 사용하여 수냉하면서 조심스럽게 절단하였으며, 회전익의 볼록한 면을 연마하여 미세조직을 관찰하였다.

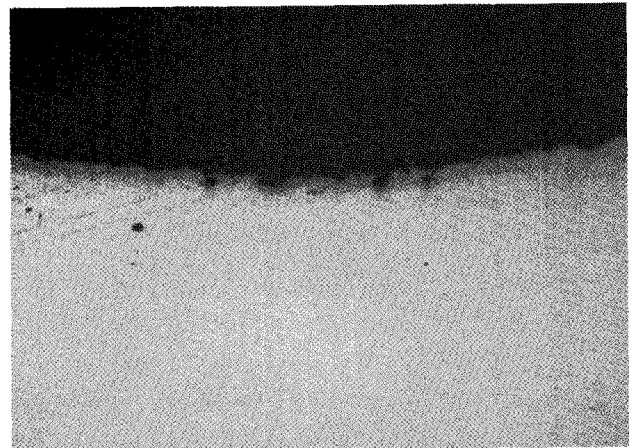
연마는 No.120 Grit → No.400 Grit →

No.800 Grit → No.1200 Grit → No.1500 Grit의 순서로 실시하였으며, 각각 이전 연마방향에 수직인 방향으로 연마하여 이전 연마에서 나타난 연마흔을 제거하는 방법으로 수행하였다.

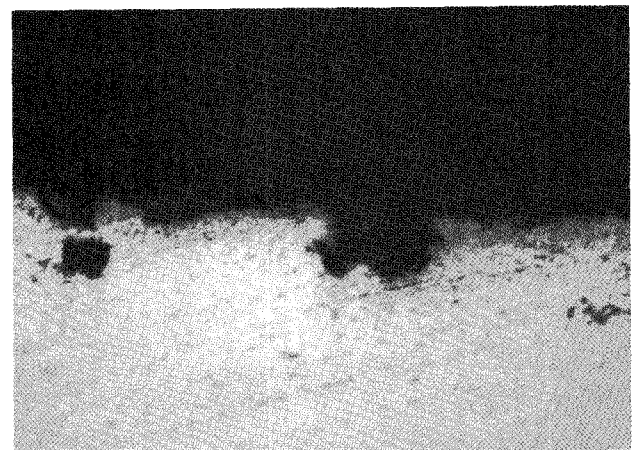
경면연마를 위하여 다이아몬드 페이스트 6 μ m → 3 μ m → 1 μ m의 순서로 연마한 후 최종적으로 알루미나 슬러리 0.05 μ m를 사용하여 경면연마하였다. 경면연마 후 물 및 알코올로 세척하여 건조시킨 후 연마상태를 관찰하였으며, 미세조직 관찰을 위한 부식은 [HNO₃ : HCl : H₂O = 1:2:3]을 사용하였다. 미세조직의 관찰에서 사용된 배율은 X50, X100, X500 이었으며, 각각의 사진에서 가로의 길이는 2mm, 1mm, 200 μ m이다.

- 연마상태

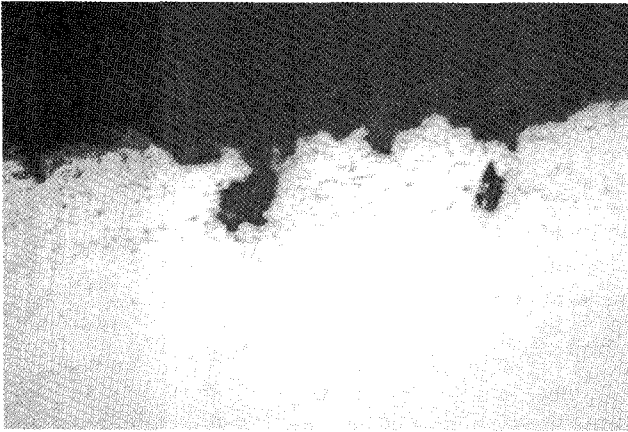
연마상태의 Tie Wire Hole 주변을 관찰하였다. 사진의 좌우가 회전의 길이방향이다. 연마상태 관찰결과 홀 주변에 상당수의 표면 결함이 관찰되었다. 이러한 표면결함의 발생 원인을 명확하게 규명하지는 못하지만, 균열의 발생자리를 제공할 수 있다. 표면결함의 최대 깊이는 약 30 μ m였다.



[그림 13] Hole 주변의 형상



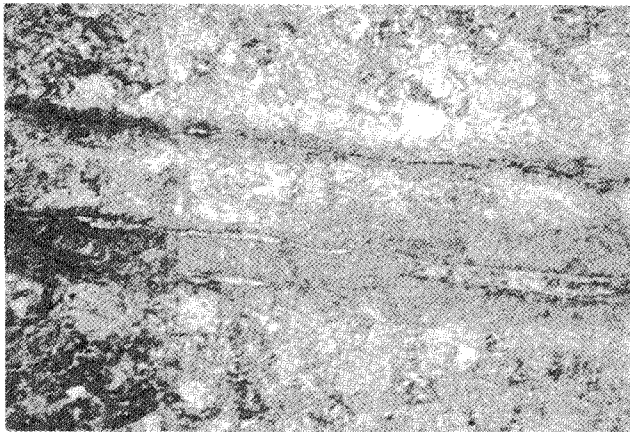
[그림 14] Hole 주변 확대(X500)



[그림 15] Hole 주변부 확대 II

- 미세조직 관찰

최종단 회전익의 기본 미세구조는 템퍼드 마르텐사이트 구조이다. 홀 주변을 포함하여 템퍼드 마르텐사이트를 관찰 할 수 있었다. 그러나 회전익의 길이방향으로 길게 나열된 조직들을 관찰 할 수 있었다. 이는 단조와 같은 가공의 영향으로 판단된다. 이러한 나열조직은 균열전진방향과 수직으로 나열되어 있으며, 이 조직과 균열전진과의 상관관계를 알기는 어렵다.



[그림 16] X100 나열조직

4.3 분석 요약

- 최종단 회전익은 템퍼드 마르텐사이트 조직이었으며, 단조와 같은 가공에 의한 것으로 판단되는 회전익 길이방향의 나열조직을 관찰할 수 있었으나, 이와 균열 전파(혹은 시작)과의 상관관계를 알 수는 없었다. 그러나, Tie Wire Hole의 표면을 관찰한 결과 균열전진방향과 동일한 방향으로의 표면결함들을 발견할 수 있었으며, 여기에서 균열이 시작된 것으로 판단된다.
- 균열의 전파 (혹은 시작) 메카니즘은 전형적인 고주기피로(High Cycle Fatigue)로서, 부식분위기

에서의 부식피로라고 할 수 있으며, 회전익의 Hole과 Tie Wire와의 상대적인 강한 진동에 의한 것으로 판단된다. 이러한 주기적인 강한 진동의 원인은 운전이력 및 최종단 회전익의 설계자료로서 판단이 가능할 것으로 보인다.

5. 운전이력 분석 및 최종단 회전익 설계요약

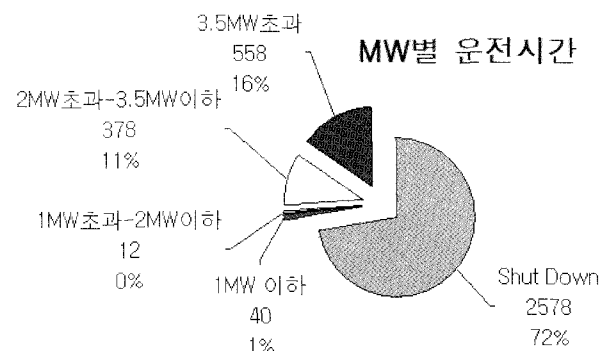
5.1 운전이력

- Total Calendar Hours : 3,566 Hours
- 정지 시간 : 2,578 Hours
- 총 운전 시간 : 988 Hours
- 출력 11.1% 이하 (3.5MW) 운전시간 : 430 Hours (12.1%)

5.2 비정상 운전 요약

- 저 출력 운전 (Low Load Operation)

저 출력 운전 시간에 대한 누계는 다음 표와 같음.

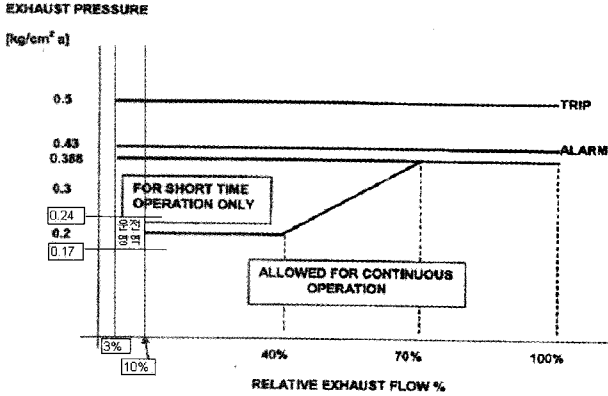


[그림 17] 저 출력 운전시간 (출력 3.5MW 이하)

- 저 출력(Low Load) 운전 중 저 진공 (Low Vacuum) 운전

○ Allowable Pressure at Turbine Exhaust by SIEMENS

70% 이상의 부하에서는 Max 0.388kg/cm²a까지 허용되나, 부하를 70% → 40%로 낮추면 장기간 연속 운전 허용 압력구간은 0.2kg/cm²a까지 떨어진다. 부하를 10%, 3%까지 낮추었을 때는 아래의 예(Limit Values for Low Load Operation)에서 보듯이 더 엄격하게 관리되고 있고, “FOR SHORT TIME OPERATION ONLY”에서 SHORT TIME의 명확한 정의는 되지 않았지만 0.20~0.24kg/cm²a는 짧은 시간 동안만 운전이 허용된 영역(for short time operation only)이다.



[그림 18] Allowable Pressure at Turbine Exhaust

- 터빈 배기온도(Turbine exhaust temperature)
터빈 배기온도(Turbine exhaust temperature)는 10~12MW로 운전 중인 기간은 60℃정도로 안정적이거나, 출력을 1MW로 낮춘 이후부터는 65~80℃로 변화(Hood spray system 작동)가 있었지만 경보(Alarm: exh. temp. max permanently 85℃ & for 1 hour max, 85~105℃) 이내의 범위였다.
- 터빈 배기압력(Turbine exhaust pressure)
터빈 배기압력(Turbine exhaust pressure)은 10~12MW로 운전 중인 기간은 -0.787~-0.812 kg/cm² 범위이고, 출력을 1MW로 낮춘 이후부터는 0.759~-0.827kg/cm² 정도로 다소 변화되었다.

70% 부하 이상에서는 정상 범위이지만 40% 부하 이하에서는 -0.8kg/cm²가 단시간 동안만 운전이 허용된 영역(for short time operation only)과 장기간 운전 허용영역(allowable for continuous operation)의 경계이므로 경계를 넘나들며 운전되었음을 알 수 있다.

○ 터빈 트립(Trip) 5시간 전(前) 배기압력 추이 분석

터빈 트립(Trip) 약 5시간 전 약 1MW로 운전되었고, 이 기간 중 배기압력(Exhaust Press.)은 269min 동안은 장기간 운전허용영역(allowable for continuous operation)에서 운전되었지만, 89min 동안은 짧은시간 동안만 운전이 허용된 영역(for short time operation only)에서 운전됨.

[표 2] 허용 출력별 운전시간

Exhaust Press. (kg/cm² a)	Operating Hours (min)	Remarks
0.17~0.20	269 min	allowable for continuous operation (장기간 운전허용영역)
0.20~0.24	89 min	for short time operation only (단시간 운전허용영역)
Total	358 min	

동기 발전기 능력곡선에 대한 기술



**한전전력연구원
수화력발전연구소 I&C 그룹
그룹장/공학박사 임익헌
Tel : (042)865-5390**

정되어 있다. 여기서는 주로 전기적 현상에 의해서 발생하는 열로 인한 발전기의 능력한계를 설명하려고 한다. 고정자 전류에 의한 한계, 계자전류에 의한 한계, 과도한 진상운전으로 인한 누설자속에 의한 고정자 단부과 열에 기인하는 한계, 발전기 정태안정 한계 등을 고려해서 발전기의 능력곡선 내에서 안정되게 운전되어야 한다. 따라서 이와 관련된 여러 가지 기술적 사항들을 기술하고자 한다.

1.1 동기 발전기와 능력곡선

동기발전기는 자신이 출력할 수 있는 능력 한계가 설

1.1.1 발전기 수소가스압력 변화에 의한 특성

수소가스압력을 0.5psig^{주1)} (0.035kg/cm² · g)에서