대형 증기터빈 물유입에 의한 손상메커니즘 분석과 원상복구특성 연구

Study on Damage Mechanism Analysis and Recovery Characteristic of the Large Scale Steam Turbine Cased by Water Induction

김두영 · 박광하 · 이봉희

D. Y. Kim, G. H. Park and B. H. Lee

(접수일 : 2011년 03월 22일, 수정일 : 2011년 05월 23일, 채택확정 : 2011년 06월 02일)

Key Words : Steam Turbine(증기터빈), Rotor(로터), Casing(케이싱), Water Induction(물유입), Blade(동익), Heat Lathe(열선반), Stress Relieving(응력 제거), Hot Spotting(곡직작업)

Abstract : In this study, the damage mechanism of large scale steam turbine due to water induction was analyzed and recovery characteristics were reviewed. A turbine consists of the rotating rotor and the stationary casing, and the clearance between them is very small for the efficiency enhancement. If water induction, while relatively cold steam or water is introduced into turbine, occurs, the considerable humping is caused at the casing near the initial water induction point and that induces the rubbing between rotor and casing. Finally, it leads to the catastrophic failure. Bowed rotor has the different characteristics in the recovery depending on damage degree. The elastic deformation due to light rubbing is recovered by turning the rotor with 3 rpm under normal operation condition, but most plastic deformation due to rubbing deforms the local microstructure and that results in permanent deformation which could not be recovered under normal operation condition. Bowed rotor has diverse characteristics depending on the recovery method, and the method is empirical and needs the cutting edge technology. Careful recovery treatment of the rotor will eliminate the risks and secure the high quality rotor similar to new rotor. If any critical error is made during the recovery, the rotor would not be recovered permanently and it should be scrapped.

1. 서 론

국내 총 전기생산량의 32.06%를 차지하는 석탄화력발전소는 효율과 환경측면을 고려하여 갈수록 고온·고압화, 대형화 추세에 있으며, 2011년 3월 현재 설비용량 500MW이상 초임계압(증기압력 246kgf/cm^2 , 증기온도 541°C 이상) 대형 증기터빈이 총 42대가 운전되고 있다. 이러한 대형 증기터빈은 회전체인 “로터(rotor)”와 고정체인 “케이싱(casing)”으로 구성되어 있으며 로터는 여러 개의 축(고중압축, 저압축 2개)이 하나로 결합되어 3600rpm으로 고속회전을 하면서 전기를 발생시키는 발전기를 구동하고 있다. 효

율을 극대화하기 위하여 로터와 케이싱 사이에는 아주 미세한 간극을 유지하고 있으며, 만일 이 터빈이 어떠한 원인으로 인하여 변형이 생기거나 아주 높은 진동의 발생으로 로터와 케이싱간 마찰이 발생되면 설비는 파손되고 설비피해 뿐아니라 인명피해라는 대형사고로 이어지게 되며, 이로 인한 계통전력공급에 막대한 지장을 초래하게 된다. 로터나 케이싱의 변형을 초래하는 요소 중 가장 심각한 것은 고온으로 운전되는 터빈에 물이나 상대적으로 차가운 증기가 유입되어 심한 온도차를 유발하는 것이며 이를 터빈물유입(turbine water induction)이라한다. 이는 발전설비 제어기술이 낙후되어 있던 과거에만 발생하는 것이 아니라 첨단 중양제어시설을 갖춘 최근에도 가끔 발생하고 있다. 하지만 손상메커니즘과 원상복구(자연 또는 강제)특성에 대한 명확한 자료가 없어서 경험적 기술과 노하우를 가진 해외 제작사에

김두영(교신저자) : 한전 전력연구원 엔지니어링센터
E-mail : dykim@kepeco.co.kr, Tel : 042-865-7540
박광하, 이봉희 : 한전 전력연구원 엔지니어링센터

의존을 할 수 밖에 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 최근에 발생한 국내 대형증기터빈의 물유입에 의한 손상메커니즘을 분석하고, 실제 발전소 현장에서의 경험을 근거로 원상복구특성을 고찰하여 전파함으로써 국내에서 운전중인 400기가 넘는 중·대형 증기터빈에서 발생 가능한 동일 대형사고를 미연에 방지하고, 손상발생시 원상복구기술에 대한 국내기술 자립을 도모하고자 하였다.

2. 설비개요 및 손상사례

2.1 설비개요

손상이 발생한 설비는 500MW급 대형 석탄화력의 고·중압 증기터빈의 회전체인 로터와 고정체인 케이싱이며, 2001년 상업운전을 시작한 이래 약 10년간 운전된 국내에서 몇 대 안되는 웨스팅하우스(Westinghouse)에서 제작된 설비로서 구성은 Fig. 1과 같이 고·중압 터빈 1개, 저압터빈 2개로 구성되어 있으며 주요규격은 Table 1과 같다.

Fig. 1 500MW steam turbine lay out

Table 1 Specification of the steam turbine

Item	Unit	Spec
Rated output	MW	500
Turbine speed	rpm	3600
No. of high pressure turbine stage	Stage	11
No. of inter pressure turbine stage	Stage	7
No. of low pressure turbine stage	Stage	6×4
Main steam pressure	kg/cm ²	246
Main steam temperature	℃	541
Reheat steam pressure	kg/cm ²	40
Reheat steam temperature	℃	541
Manufacture	-	WH

고·중압 터빈로터는 원제작사인 웨스팅하우스의 설계를 바탕으로 국내 현대중공업에서 제작한 중심공이 없는 형식으로 국내에 보급되어 있는 GE사 제품에 비해 중량이 무거우며 고·중압터빈 로터의 재질은 크롬-몰리브덴-바나듐(10325AB Rev.L 1%CrMoV)합금강이고 화학적 성분조성은 Table 2와 같다.

Table 2 Chemical composition of the turbine rotor

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
Weight (%)	0.27 ~0.34	0.20 ~0.35	0.70 ~1.00	.012 ↓	.012 ↓	.15 ↓	.50 ↓
Elements	Cr	Mo	V	Sn	Al	Sb	As
Weight (%)	1.05 ~1.35	1.00 ~1.30	0.21 ~0.29	.015 ↓	.010 ↓	.001 ↓	.020 ↓

Fig. 2 Turning gear of the turbine

대형 증기터빈의 로터를 최초 기동 또는 정상운전 중 어떠한 원인으로 정지해야할 경우에는 반드시 일정시간동안 저속(약 3rpm)회전을 시켜서 열분포를 고르게 하여야 고온에서 운전되던 로터의 손상과 변형을 방지할 수 있으며 모터에 의한 구동장치가 고장이 발생되었을 때에는 별도의 장비(유압모터)나 사람의 힘을 이용하도록 Fig. 2에서 보는 바와 저압터빈과 발전기 사이에 터닝기어장치(turning gear)가 구성되어 있다.¹⁾

2.2 손상사례

2.2.1 터빈 정상운전중 급정지

2010년 11월 500MW급의 대형터빈이 정상운전중 주증기 및 재열증기의 온도제어 시스템에 문제가 발생하여 터빈으로 유입되는 주증기 온도가 540℃→330℃로 변화되고 재열증기 온도가 540℃→210℃로 떨어졌다. 또한, 터빈 상하부의 상당량의 온도차이가 (alarm; 41.67℃, trip; 55.6℃) 발생하고, 1번 베어링

진동이 Fig. 3과 같이 96→127→254 μ mPp(peak to peak)로 순식간에 증가되면서(alarm: 127 μ mPp, trip: 254 μ mPp) 터빈은 급정지(emergency stop trip)에 이르게 되었다.

터빈이 정지된 후 감속시 임계속도부근인 1300rpm에서 진동값은 1번 베어링이 1003 μ mPp, 2번 베어링이 426 μ mPp로 아주 높게 나타났으며, 0rpm까지 도달하는 시간은 정상 정지시(120분 소요)와는 다르게 Fig. 4에서 보는 바와 같이 36분이 소요되었으며, 로터의 변형방지를 위해 설치되어 있는 터닝기어는 고착되어 운전이 불가능한 상태가 되었다.

Fig. 3 Vibration plot of the turbine

Fig. 4 Speed down time after turbine stop

이것은 전형적인 물유입에 의한 로터 굽힘 현상이며 이로 인하여 이 터빈은 28일간이나 발전을 하지 못하는 극한상황에 이르게 되었다.

2.2.2 분해점검 결과

터빈이 급정지된 후 24시간 동안 터닝기어를 운전하여 굽혀진 로터를 펴는 시도를 하였으나 원상복구의 판단기준으로 삼고 있는 로터의 편심 지시값이 (Rotor Eccentricity) 0.167mm이하로 내려가지(정상

치 0.076mm이내) 않았고, 승속(Speed-up)을 시도한 결과 1차 임계속도 부근에서 230 μ m까지 진동이 상승하여 고중압 터빈이 영구변형 된 것으로 판단하고 확인을 위한 분해를 시행하였다. 분해결과 고중압 터빈의 로터는 Fig. 5와 같이 고압터빈 1~3단이 150~270°방향에서 집중적으로 접촉이 발생하여 블레이드의 테논(tenon)부위가 노출될 정도로 손상이 되어 3600rpm으로 계속운전이 될 경우 블레이드 커버(blade cover)가 탈락되어 대형사고가 발생할 수 있는 잠재위험을 안고 있었으며, Fig. 6과 같이 중압터빈 로터는 블레이드 커버에 원주방향으로 전체적인 마찰흔적이 확인되었다.

터빈 효율향상을 위하여 설치되어 있는 고중압 터빈 케이싱의 실링(seal ring)부위와 외부와의 차단을 위한 그랜드 실링(gland seal ring)등 모든 구성품이 고속접촉에 의하여 Fig. 7과 같이 심하게 손상되어 재사용이 불가능한 상태로 되어 있었다.²⁾

3. 터빈 물유입 손상메커니즘 분석

3.1 물유입 및 발생조건

3.1.1 물유입

증기터빈에 물이 유입되어 치명적인 손상을 주는 형태의 사고이며 실제로는 고온상태로 운전중인 터빈의 내부로 상대적으로 온도가 아주 낮은 증기(cold steam)가 갑자기 유입되는 것을 말한다. 물유입 위험

Fig. 5 Damage of high pressure rotor tenon

Fig. 6 Damage of inter pressure rotor shroud band

Fig. 7 Damage of HIP turbine casing seal strip

도 수준은 유입되는 물의 양보다는 입구 증기온도와 금속의 온도차이 정도에 따라 로터와 케이싱의 변형 정도가 다르고, 이는 고정체와 회전체간의 간극감소로 마찰에 의해 심각한 손상을 초래하게 된다.

3.1.2 물유입 발생조건

터빈에 물유입이 발생할 수 있는 조건은 다양하지만 주로 발생하는 대표적인 사례를 살펴보면 아래와 같다.

1) 추기계통 고장발생에 의한 역류

가장 빈도가 많은 사례이며 급수가열기 누설이 발생되거나 수위제어 불량으로 배수계통이 원활하지 않아 물이 역류하여 터빈에 직접적인 물이 접촉하여 손상정도가 아주 심각한 경우이다.

2) 주증기 계통 제어불량으로 고압터빈 물유입

보일러에서 공급되는 주증기계통의 수연비(급수량과 이에 합당하는 연료량과의 비)나 과열저감기의 분사수 제어불량으로 아주 낮은 온도의 증기가 터빈으로 갑자기 유입되는 경우이다.

3) 재열증기계통 제어불량으로 중압터빈 물유입

고압터빈에서 팽창된 증기는 압력과 온도가 저하되어 엔탈피가 떨어진 상태로 보일러에 있는 재열기로 보내져 온도를 주증기와 거의 같은 수준으로 올려 엔탈피를 높여주게 되는데 이 재열증기의 온도제어 난조로 저온의 증기가 중압터빈으로 유입되는 경우이다.

4) 이외에도 터빈의 배출장치(drain system)의 불량으로 증기가 응축된 물이 원활하게 배출되지 않고 고여지게 되어 터빈 케이싱이 수축하게 되는 현상과, 고온고압의 증기가 대기로 누출되지 않도록 하는 밀봉증기계통(seal steam system)의 온도제어불량에 의한 물유입 현상 등이 있다.³⁾

3.2 손상메커니즘 분석

3.2.1 로터 응력발생

위에서 소개한 물유입 조건이 발생하면 고온으로

운전중인 로터에 과도하게 낮은 온도의 증기나 물이 유입되어 상/하부의 온도차가 발생되며, 로터에서 발생하는 1℃의 온도차이는 로터에 약 3MPa의 열적 압축 또는 인장응력이 작용하며, 발생원리는 Fig. 8과 같다.⁴⁾

3.2.2 케이싱의 솟아오름과 마찰

케이싱은 상/하부 온도 차이에 의해 뒤틀림(distortion)이 발생하고, 이 변형은 물이 유입된 특정 부위의 패키징부분의 씰 스트립(seal strip)을 Fig. 9에서 보는바와 같이 낙타등 모양으로 솟아오르게 하여(humping) 케이싱과 로터는 서로 마찰(rubbing)하게 되며 이때 접촉부위는 순간적으로 1000~2000℃까지 온도가 상승하게 된다.

Fig. 8 Principle of rotor thermal distortion

Fig. 9 Casing humping and rubbing mechanism

3.2.3 탄성변형 또는 소성변형

국부적인 온도상승시간이 아주 경미하고 손상의 정도가 작은 경우에는 어느 정도 안정시간이 경과되고 적절한 조치가 취해지면 로터는 원래의 상태로 돌아오게 되며 이를 탄성변형이라 한다. 그러나 접촉마찰 시간이 계속되어 국부적인 온도가 급상승하게 되면 재료의 탄성한계를 넘어 항복응력을 초과하고, 결국 로터는 영구적인 소성변형의 구역으로 들어가게 된다.

3.3 물유입 대처방안

터빈에 물유입 현상이 감지되었을 때 가장 중요한 것이 초기대응이다. 발생초기에 얼마나 지체롭게 대처하느냐에 따라 손상의 범위가 결정이 된다.

첫째, 기동시 물유입에 대한 대처방안은 진동이 허락하는 한 서서히 감속하여 정지후 터닝기어를 계속 운전해 준다. 둘째, 정상운전 중 사고에 의한 물유입의 경우에는 진동의 문제만 없다면 정격속도로 계속운전하여야 로터에서 받은 응력이 서서히 제거되면서 원상으로 돌아오게 된다. 위의 두 가지의 경우라도 손상의 경중(輕重)을 떠나서 진동이 설정된 값을 초과하여 터빈이 급정지되면 고정체와 회전체는 이미 마찰이 발생되어 고온으로(약 1000~2000℃) 인한 로터의 변형이 시작된 것이라 보면 된다. 터빈의 속도가 0rpm까지 내려간 후에 터닝기어가 운전 가능한 상태이면 로터 편심이 기준치 이내로 들어올 때까지 터닝을 계속해주고, 만일 터닝기어가 고착되어 운전되지 않을 때는 강제적으로 로터를 회전하지 말고 베어링에 윤활유만 정상적으로 공급하면서 그 상태로 그대로 두면 된다. 이때 급한 마음에 유압잭 등의 장비를 이용하여 강제적으로 로터를 터닝하게 되면 고정체와 회전체가 완전히 밀착된 상태이므로 손상의 범위는 더욱 확대될 것이다.

4. 원상복구 특성 및 조치사례

4.1 탄성변형 로터의 원상복구 특성

앞장에서 간략하게 언급했듯이 탄성변형 구역에 있는 로터는 내부 마찰이 수반되지 않은 상태이며 증기온도의 차이로 인하여 굽힘이 발생한 것으로 정지된시간의 10배 이상 터닝운전을 하면 원상태로 복구되는 특성이 있다.⁵⁾ 만일 로터의 변형량이 많아 터빈이 정지된 후에도 터닝이 되지 않을 때는 강제로 터닝을 시도하지 않아야 하며, 터닝이 가능할 때까지 기다리면서 1시간 간격으로 터닝을 시도한다. 터닝은 가능한데 터닝기어장치 고장시에는 15~20분 간격으로 로터를 원주방향으로 180° 만큼 돌려주면 굽힘량이 많은 로터도 상온이 되면 거의 원상태로 복구되게 된다. 경험에 의하면 터닝기동전 최소 4시간 이상 터닝기어를 이용해 저속운전하면 터빈로터는 기동이 가능한 상태로 돌아오게 되는 특성이 있다.

4.2 소성변형 로터의 원상복구 특성

마찰에 의해 고온으로 소성변형된 로터는 상온까

지 내려간 상태에서도 자연현상으로 원상복구되지 않으며, Fig. 10에서 보듯이 마찰될 때와 물유입 되었을 때, 상온까지 내려갔을 때의 로터가 굽혀진 방향은 다르게 되는 특성이 있음을 알았다.⁶⁾

굽힘량에 따른 판단근거와 조치사항은 Table 3에서 보는 바와 같으며 아래의 조건중 하나라도 해당된다면 반드시 재료의 구조와 기계적인 조성을 수정해야 한다.

- 1) 재료의 템퍼링 온도를 초과한 경우
- 2) AC1과 AC3(변태점)을 초과한 경우
- 3) 오스테나이트화 온도에 근접 또는 초과된 경우

연구대상이 된 로터는 굽힘량이 공장기준으로 0.28mm가 되어 손상의 정도가 심각하고, 진동발생으로 인한 정상운전이 불가능하므로 열처리 등 수정이 필요하다는 판단을 내리게 되었다.

Fig. 10 Rubbing or water input

Table 3 Run-out judgement and action

Run-out(TIR)	GE Manual(GEK) standard	
	Judgement	Action
at 0.076mm	slightly bowed	-
at 0.18mm	definitely bowed	balancing
at 0.25mm	severely bowed	correction by machining

Fig. 11 Measured data of the rotor run-out at site

Fig. 12 Measured data of the rotor run-out at shop

분해후 현장에서 측정된 굽힘량(max 0.48mm)과 공장에서 측정된 값(max 0.28mm)에는 Fig.11와 12에서와 같이 현저한 차이를 보이는 특성이 있었으며 현장에서는 온도조건과 주변환경 영향으로 정확한 측정을 기대할 수 없었으며 공장에서 정밀하게 측정된 값이 더 낮게 나타나는 특성을 알 수 있었다.

4.3 원상복구 조치단계별 특성

4.3.1 응력제거 특성

철강을 변태점 이하의 적당한 온도로 가열유지하고 단조주조, 기계가공, 용접 등에서 생긴 잔류응력을 제거하는 공정을 응력제거 어닐링(stress relieving annealing)라 하며, 마찰된 로터부위는 정도와 응력이 크게 증가하여 이를 해소하기 위해서는 반드시 열처리가 필요하며, 대상 로터는 블레이드의 영향 등을 종합적으로 검토하여 열선반(heat lathe)에서 최대 가열 및 유지온도를 제작시 어닐링 온도보다 낮은 540℃로 결정하였다. 또한 최고 온도에서의 유지시간이 중요한데 이를 결정하는 요소는 로터 중심부까지의 거리이며, 보통 로터의 열전달속도는 25.4mm/hr의 특성이 있으며, 당해 로터는 직경이 Ø680mm인 중공축이 아닌 형식이라서 12시간으로 유지시간을 정하게 되었으며 실제 경험한 열처리 '시간-온도 곡선'이 Fig. 13이다.

Fig. 14는 로터 원상복구시 사용하였던 열선반의 모습이며, 우측은 열처리시 외부에서 열처리로 내부로 터의 변형량을 측정하기 위하여 설치한 지렛대식 측정장치이다. 이때 유의할 점은 측정부위를 열팽창 등 영향이 없는 곳을 선정하여야 하며, 열처리후 정도를 측정하여 건전성을 확인해야 한다.

Fig. 15는 1% CrMoV강의 열처리온도 및 유지시간에 따른 응력제거율을 보여주고 있으며 열처리 온도가 높고 유지시간이 길수록 응력제거가 많이 되는

특성이 있음을 알 수 있다.⁶⁾

Fig. 13 Stress relieving time vs temperature curve

Fig. 14 Heat lathe and measurement method of deformation

Fig. 15 Stress relieving during holding in temperature

Fig. 16 Deformation during heating and cooling

4.3.2 곡직작업 특성

곡직작업(hot spotting)은 열처리 후에도 로터 굽힘량이 규정치 이내로 돌아오지 않을 때 시행하는 대안이며, 굽힘이 가장 많은 로터의 부위를 국부가열한 후 굽랭시킴으로써 변형부분을 교정하는 방법이

다. 특성은 로터의 큰 반응감과 작업시간의 현격한 단축을 기대할 수 있지만 단점으로는 온도를 금속의 오스테나이트화 온도부근까지 올려야(950~980℃ for CrMoV강 로터)한다는 부담감이 있다. Fig. 16은 곡직작업의 원리를 보여준다.⁷⁾

로터 곡직작업은 고도의 스킬을 요구하는 경험적인 기술이며 산소 아세틸렌 토치의 사용은 작업자의 적절한 노즐의 사용과 토치 불꽃의 콘(cone)에서 모재와의 거리와 관련된 온도변화에 대한 적절한 지식을 요구한다. 다음은 기본적인 권고사항이다.

1) 불꽃의 발광부분을 금속에 직접 접촉되어 수행해야함(cone의 온도는 3000℃를 초과한다.)

2) 타는 불꽃의 부분은(glowing part) 모재로부터 약 3~4cm떨어져 있어야 하며 이때의 온도는 1500~2000℃사이에 있을 것이며, 그래서 로터의 표면온도는 1200℃를 넘는 곳은 없게 된다.

3) 토치를 이용한 최대 작업시간은 5분을 초과해서는 안된다.

4) 연속적인 나선형으로 돌리면서 약 5cm 직경의 원을 그려야 한다.

5) 만약 여러 곳에서의 작업이 요구된다면 연이은 내접원 사이에 최소 5cm 간격을 두고 행하는 것이 바람직하다. 같은 구역에서 두 열주기의 중첩은 균열을 유발할 수 있기 때문에 어떠한 원도 접선이나 교차되지 않도록 철저히 확인해야 한다. 만일 로터를 토치에 의한 곡직작업을 하게 되었다면 이로 인해 생기게 되는 응력을 제거하기 위하여 곡직작업 후에는 4.3.1에서 시행하였던 응력제거 열처리 작업을 반드시 시행하여야 한다. Fig. 17은 로터의 구역별 특성을 보여주고 있다.

4.3.3 새로운 중심잡기 특성

로터의 응력제거 작업과 곡직작업을 한 후에도 로터의 굽힘량이 기준값(0.25mm)이상이 되면 기계가공에 의한 새로운 중심잡기 공정으로 진행하게 된다. 새로운 중심잡기 원리는 Fig. 18와 같다. 본 연구의 해당 로터는 열처리만으로 0.06mm 이내로 원상복구되어 기계가공은 진행하지 않고 바로 공장진동교정(shop balancing)을 시행하였다.

4.3.4 공장진동교정 특성

곡직작업 후 최종 출하를 위하여 공장진동교정을 실시하였으며 고속발란싱시 특성은 아래와 같다.

1) 로터의 진동모드는 2가지가 있으며 단일축으로

서 1차 모드는 1690rpm, 2차 모드는 3300rpm 부근에 있었다. Fig. 19는 1,2차 임계속도의 로터 특성을 보여주고 있다.

2) 저널 베어링의 진동값은 승속 중 최대 33 μ mPp, 3600rpm에서 22 μ mPp로 아주 양호하였다.

3) 커플링의 진동값은 승속 및 3600rpm에서 117 μ mPp로 허용치인 45 μ mPp를 초과 하였으나, 외팔보형태로 회전한 상태라서 현장에서 저압터빈과 결합을 하면 진동감소가 될 것으로 예상을 하고 공장진동교정을 종료하였으며, 현장으로 이동하여 조립을 하였다.

4.3.5 시운전시 진동 특성

현장설치 후 시운전시 진동특성은 무부하에서 63 μ mPp이하로 양호하게 운전되다가 계통병입 직후 #1,2베어링진동은 37→105 μ mPp, 63→129 μ mPp까지 점진적으로 상승하는 현상이 발생하였다. 그 원인은 계통병입이 되면서 터빈으로의 증기 공급원이 재열증

Fig. 17 Effects of hot spotting

Fig. 18 Setting new center of gravity

Fig. 19 Rotor critical speed

기에서 주증기+재열증기로 바뀌었으며, 재열증기 온도가 주증기 온도보다 감소하기 시작하여 온도차가 최대 70℃까지 증가되고, 중압터빈 중간케이싱 상하 온도차가 최대 160℃까지 발생하였다. 또한 중압터빈 입구 케이싱 상하온도차는 최대 61℃까지 발생하여 이로 인한 케이싱의 비틀림 현상으로 고정체와 회전체의 마찰에 의하여 진동이 상승하였음을 알게 되었고 운전조건을 조절하여 온도차를 30℃ 이내로 감소시켰더니 진동은 16 μ mPp까지 현저하게 감소되었다. Fig. 20의 기동시에 취득한 것이며 큰원을 그리며 바깥방향으로 증가하였다가 돌아오는 전형적인 마찰의 진동변화 패턴⁸⁾을 보여준다.

Fig. 20 Polar plot at rotor rubbing

5. 결 론

국내에서 최근 발생한 대형 증기터빈의 물유입에 의한 손상메커니즘을 규명하여 동일한 사고를 미연에 방지하고, 실제 복구과정에서 경험한 손상형태에 따른 원상복구특성 분석을 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 손상메커니즘은 터빈에 물이 유입되면 터빈의 상/하 온도차이가 급격하게 발생하여 케이싱은 변형되고, 이로 인하여 로터와 케이싱은 마찰을 일으키고, 마찰된 부위는 순간적으로 온도(약 1000~2000℃)가 상승하여 로터는 탄성 또는 소성변형으로 진행하게 된다.

2) 터빈에 물유입이 감지되면 초기대응이 상당히 중요하며 어떠한 경우라도 터빈이 정지된 후에 베어링 윤활유는 정상적으로 공급되어야 하고, 강제터닝은 절대로 금지하여야 한다. 만일, 터닝은 가능하나 터닝기어장치가 고장시에는 15~20분 간격으로 로터를 180°씩 돌려 주어 굽힘을 최소화 한다.

3) 탄성변형된 로터는 정지된 시간의 10배 이상 터

닝운전을 하면 열처리 등 강제적인 조치를 하지 않고도 자연현상으로 원상복귀 되는 특성이 있다.

4) 소성변형된 로터는 손상의 정도가 작을 경우는 1차적으로 로터급속 변태점(600℃이하)로 열선반에서 응력제거 어닐링을 수행하고, 굽힘량이 많은 경우에는 2차적으로 로터를 국부가열하여 급랭시키는 곡직작업 방법으로 변형량을 교정한다.

5) 열처리 교정방법으로 변형량이 0.25mm 이하로 줄어들지 않으면 기계가공에 의해 새로운 중심잡기 공정을 진행해야 한다. 곡직작업과 기계가공을 한 후에는 작업공정에서 발생하는 응력을 제거하기 위하여 응력제거 공정을 반복수행 한다.

6) 로터의 굽힘량이 0.06mm 이하로 돌아오면 현장 조립후 시운전에 들어가게 되는데 이때 유의사항은 초기의 운전조건을 철저히 관리하여 터빈으로 유입되는 증기의 온도차이를 최소화하고, 진동감시장치를 이용하여 초기마찰 패턴을 감지하고 적절한 조치를 취하는 것이 중요하다.

참고 문헌

1. B. H. Moon, 2004, “신입발전기초 터빈 및 보조기”, 한국발전교육원, pp. 35.
2. Do Young Kim, 2011, “Technical Report”, KEPSCO-RI, Daejeon, pp. 1, 3-5, 8-31
3. EM2753, “Field Engineer’s Manual-Large Steam Turbine”, GE, pp. 1-3
4. Donald E. Bently, “Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics”, Bently, pp. 409-412
5. EM1536, “Field Engineer’s Manual-Large Steam Turbine Bowed Rotors”, GE, pp. 2-18
6. P. A. Coulon, 1995, “The straightening of turbine rotors : An Empirical Art”, Alstom, France, pp. 3-9
7. In Gong Hwang, 2002, “A Study on Repair Method of Deformation Turbine Rotor”, Korea East-West Power Co., LTD., Honam, pp. 6, 8-9
8. H. C. Ha and S. P. Choi, 1999, “Vibration Characteristics of Steam Turbine due to the Rubbing”, 한국동력기계공학회, 제3권, 제1호, pp. 5-7