

# Development of Turbine Rotor Bending Straightening Numerical Model using the High Frequency Heating Equipment

## 고주파 가열 장비를 활용한 터빈로터 휨 교정수식모델 개발

Junsu Park, Jungseob Hyun, Hyunku Park, Kwangha Park  
박준수, 현중섭, 박현구, 박광하

### Abstract

The turbine rotor, one of the main facilities in a power plant, it generates electricity while rotating at 3600 RPM. Because it rotates at high speed, it requires careful management because high vibration occurs even if it is deformed by only 0.1mm. However, bending occurs due to various causes during turbine operating. If turbine rotor bending occurs, the power plant must be stopped and repaired. In the past, straightening was carried out using a heating torch and furnace in the field. In case of straightening in this way, it is impossible to proceed systematically, so damage to the turbine rotor may occur and take long period for maintenance. Long maintenance period causes excessive cost, so it is necessary to straighten the rotor by minimizing damage to the rotor in a short period of time. To solve this problem, we developed a turbine rotor straightening equipment using high-frequency induction heating equipment. A straightening was validated for 500MW HIP rotor, and the optimal parameters for straightening were selected. In addition, based on the experimental results, finite element analysis was performed to build a database. Using the database, a straightening amount prediction model available for rotor straightening was developed. Using the developed straightening equipment and straightening prediction model, it is possible to straightening the rotor with minimized damage to the rotor in a short period of time.

*Keywords: Steam Turbine, HIP Rotor Bending, Straightening, High Frequency Heating, Finite Element Method*

### I. Introduction

생활 수준의 증가로 인해 에너지의 사용량이 증가함에 따라 화력 발전소 설비의 신뢰성이 더욱 중요시 되고 있다. 발전소는 화석연료를 활용 보일러에서 생성된 증기를 이용하여 터빈을 회전시켜 전기를 생산한다. 대표적인 주요 설비 중 하나인 터빈은 더욱 세밀한 관리가 필요하다. 3600RPM으로 회전을 하기 때문에 미세한 변형에도 고진동이 발생할 수 있다 [1]. 발전소의 경우 0.1mm의 변형에도 설비를 정지시키고, 교정작업을 진행 후 운전을 한다. 로터가 휘어지는 가장 대표적인 이유는 러빙현상이다. 발전소가 운전 중 수분이 유입되면 케이싱 내부의 온도 편차로 인해 케이싱 변형이 발생하게 된다. 이 변형으로 좁은 간극으로 유지되고 있는 Packing부분의 씰 스트립(Seal Strip)의 특정부위가 솟아 오르게 되고, 증기터빈 로터와 마찰하게 된다. 로터의 표면은 마찰열로 인해 순간적으로 온도가 상승하게 된다 [2]. 상승된 온도로 인해 로터의 열응력이 발생하게 되고, 로터는 영구적으로 휘어지게 된다. 로터의 구성형태와 패키징의 위치등에 대해서 Fig.1에 명시하였다.

표준화력 500MW 고중압 로터의 경우 직경이  $\phi 700$  이상, 길이 7m가량이다. 대형의 구조물인 로터를 교정하기 위한 방법은

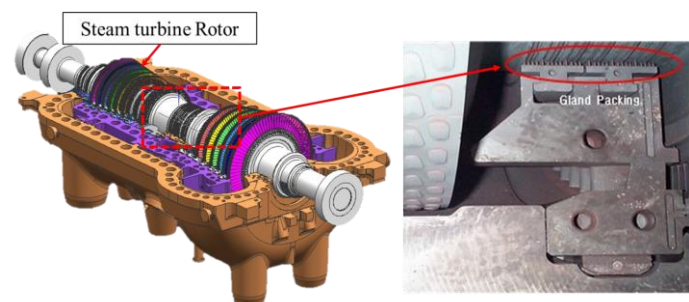


Fig.1. HIP turbine rotor

다양하다 [3, 4]. 산소토치를 활용하여 로터표면을 가열하여 교정하는 방법, 열선반을 활용하여 로터를 가열하여 교정하는 방법이 있다. 토치를 활용하여 교정하는 방법은 인위적으로 로터의 표면을 가열하여 로터를 재변형하는 방법이다. 하지만, 단점으로

### Article Information

Manuscript Received July 28, 2020, Accepted September 29, 2020, Published online June 30, 2021

The Authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Junsu Park (chany1714@kepco.co.kr)

ORCID: 0000-0003-3630-501X (Junsu Park); ORCID: 0000-0002-6629-2582 (Jungseob Hyun); ORCID: 0000-0002-1424-9726 (Hyunku Park); ORCID: 0000-0002-1921-0134 (Kwangha Park);



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepco.co.kr>.

가열범위의 조절 및 로터표면의 온도제어를 할 수 없기 때문에 정량적인 교정이 불가능하다. 가열을 잘 못 할 경우 로터의 손상을 발생시킬 수 있다. 그렇기 때문에 위급한 순간에 현장작업자들에 의해 사용되는 교정법이다 [5, 6]. 열선반을 활용하여 로터를 활용하여 교정하는 방법을 진행할 경우 온도제어 등이 가능하기 때문에 현재 사용되는 가장 대표적인 방법이다. 기존의 연구자들은 열선반을 활용하여 교정하는 절차등에 대해서 연구하였다 [7]. 하지만 열선반을 활용할 경우 로터 전체를 가열하게 되면 불필요한 부위에 가열을 하게 된다. 또한 상하부 온도차이를 발생시켜야만 변형이 가능하기 때문에 열선반의 문을 일부만 열어서 온도편차를 발생시킨다. 문을 열어서 발생하는 온도편차에 대한 제어가 불가능하기 때문에 로터 교정절차를 정하기 어렵다. 실제 교정을 했던 사례의 경우 일부 교정이 되었지만, 교정한 로터를 활용하여 운전한 결과 다시 로터벤딩이 발생하는 사례도 있다. 마지막으로 기계적으로 교정하는 방법이 있다. 하지만, 고중량의 소재이기 때문에 기계적인 하중을 가하는 프레스 장비를 활용하였을 때는 대형의 설비가 필요하다. 또한 기계적인 하중으로는 로터에 균열을 발생시킬 수 있다.

따라서 본 연구자는 이러한 문제점을 해결하기 위해 로터 및 고중량 회전체를 교정하기 위한 전용 장비를 개발하였다. 열응력에 의해서 벤딩이 발생하였기 때문에 열응력을 인위적으로 가해서 교정을 할 수 있는 장비이다. 열을 가하는 방식은 고주파 가열기이다. 소재에 국부적인 부위에만 가열을 하여 순간적으로 열응력을 발생시키고, 냉각에 의한 잔류응력에 의해 교정이 되는 원리이다. 개발된 장비에 대해서 실제 표준500MW HIP로터를 활용하여 교정 테스트를 진행하였고, 유한요소해석을 활용하여 다양한 조건에 대해 분석하였다. 최종적으로 나온 데이터 베이스를 활용하여 최적으로 교정할 수 있는 교정량 예측 수식을 개발하였다.

## II. 교정 장치 개발 및 장치 성능 테스트

### A. 교정 메커니즘

고중량의 로터를 교정하기 위해서는 열응력을 활용해야한다. 로터를 국부적으로 가열을 하게 되면열팽창에 의해 가열부위로 상승하게 되지만 압축잔류응력이 발생하게 된다. 이때 상승하는 현상을 본 논문에서 heat up이라고 명칭하였다. 이렇게 heat up이 발생하게 되고 소재가 냉각되면 발생한 압축잔류응력에 의해 아래방향으로 휘게 된다. 이러한 현상에 대해 Fig. 2에 모식도와 유한요소해석 결과를 명시하였다. 교정을 하기 위해서는 벤딩이 발생한 반대쪽부위에 대해 가열을 하면 동일한 원리로 교정이 될 것이라 판단하였다.

### B. 교정 장치 개발

앞절에서 설명한 바와 같이 국부적인 가열을 통해 교정이 가능하다. 하지만, 국부적으로 가열을 하는 설비가 필요하다. 가열을 하기 위해서는 토치를 통한 직접가열, 레이저 가열등 다양한 방법이 있지만 본 연구자가 선택한 방법은 전자기유도가열장치를 활용하였다. 전자기 유도가열장치는 주파수 범위에 따라 구분된다. 저주파의 경우 500Hz이하, 고주파의 경우 500Hz ~ 100kHz 범위이다. 고주파의 경우 전류침투 깊이를 낮게 만들고 소재의 표면온도를 빠른시간에 가열할 수 있다. 고주파 가열장비를 활용하면 소재 표면온도 제어 및 가열깊이를 제어가 가능하다. 개발된 장비에 대해 Fig. 3에서 명시하였다. 로터를 거치할 수 있는 선반과 소재를

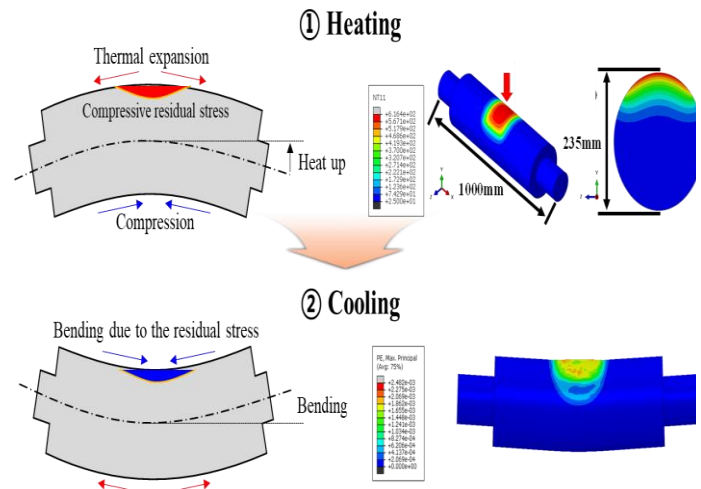


Fig.2. Mechanism by which rotor bending occurs

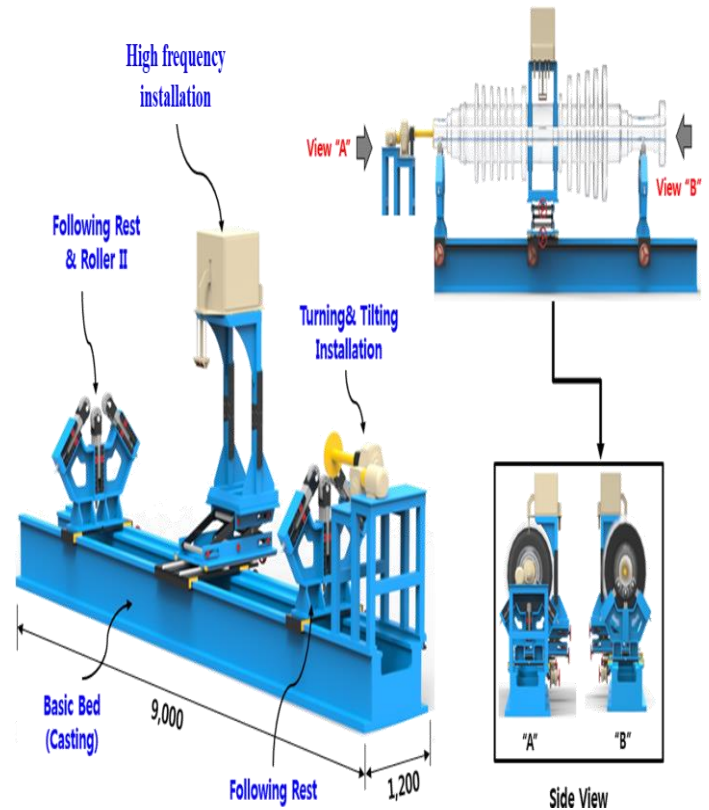


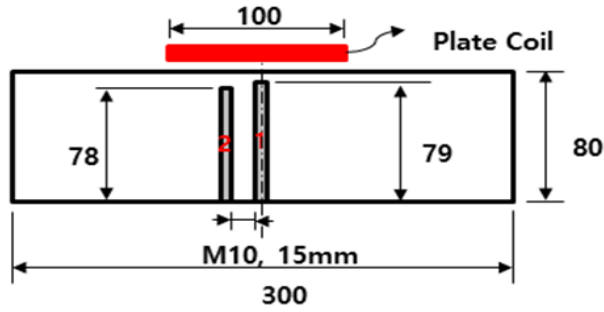
Fig.3. Turbine Rotor Straightening equipment

가열하기 위한 고주파 가열장비, 그리고 로터를 회전할 수 있는 모터로 구성되어 있다.

### C. 장치 검증 테스트

개발된 장비에 대해서 강중별로 가열을 하였을 때 소재의 승속 시간 및 온도 변화량에 대해 분석하였다. 테스트를 하기 위해 온도를 측정할 수 있는 시편을 제작하였다. 제작된 시편 및 가열하는 모습에 대해서 Fig. 4에 명시하였다. 소재의 아래부분에 구멍을 뚫어 TC(Thermal Couple)을 이용해서 온도측정을 하였다.

(a) Specimen



(b) High frequency heating

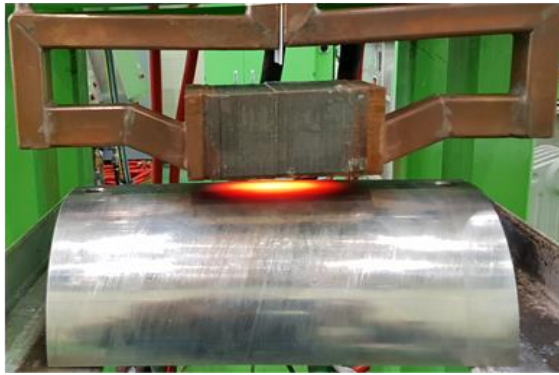


Fig.4. High-frequency heating and temperature measurement test

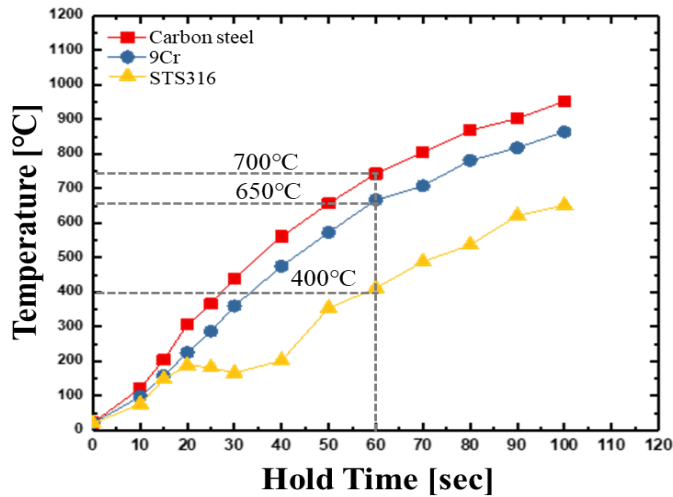


Fig.5. Material temperature according to heating time by steel type

강종 별로 고주파 가열을 하였을 경우 온도의 승속이 다르다. 현재 개발하는 장비의 경우 HIP 터빈 로터 및 펌프샤프트에 활용 할 예정이다. 따라서 일반탄소강, 1.25Cr강, STS316소재에 대해서 가열시간에 따른 온도 변화를 측정하였다. 측정된 데이터에 대해 Fig. 5에 명시하였다. 시편의 크기가 작기 때문에 1.25Cr강의 경우 60초 가열을 하였을 때 700°C에 도달하는 것을 확인하였다. 표면 온도만 국부적으로 가열하여 손상을 최소화 하기에는 적합하다고 판단하였다.

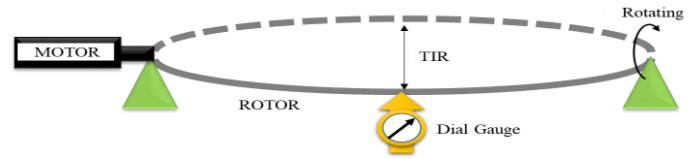


Fig.6. TIR measurement

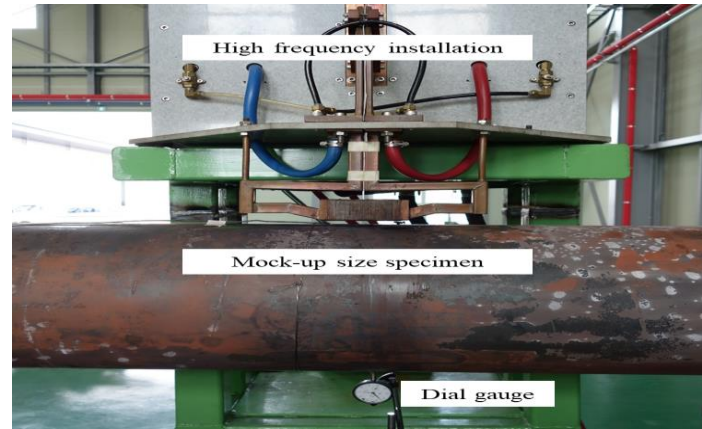


Fig.7. Mock-up size straightening test

TABLE 1  
Chemical composition (%) of 1.25Cr

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.05 ~0.15	0.5 ~1.0	0.30 ~0.60	0.03	0.03	1.00 ~1.50	0.44 ~0.65

TABLE 2  
Mechanical property of 1.25Cr

Yield strength	Tensile strength	Hardness
Min 205 MPa	Min 415 MPa	Max 207 HB

### III. Mock-up 시편 및 HIP 로터 교정 테스트

#### A. 벤딩량 측정방법(TIR, Total Indicated Record)

로터의 벤딩량의 경우 Dial Gauge를 활용해서 TIR(Total Indicated Record)값을 분석한다. TIR을 측정하는 방법에 대해서 Fig. 6에 명시하였다. 봉 형태의 구조물이기 때문에 아랫쪽에 다이얼게이지를 설치하고 소재를 회전시키면서 변화량을 측정하게 된다. 측정된 값은 실제 발생한 벤딩값의 2배를 나타내게 된다. 현장에서는 이러한 값을 TIR이라고 명칭하고 TIR 값기준으로 교정을 한다. 따라서 본연구자도 TIR값 기준으로 교정하는 테스트를 진행하였다. 이후 TIR값을 벤딩량으로 명칭하였다.

#### B. Mock-up 시편 교정테스트

실제 현장에서 사용되는 HIP 로터 교정테스트를 진행하기 전 실제로터의 1/2 Scale 형태의 시편을 제작하였다. 사이즈는  $\phi 360 \times 3440L$  이다. 표준 500MW로터에서 사용되는 재료는 1.25Cr강의 재료를 사용한다. 1.25Cr강의 성분함유량에 관해 Table 1에 기계적

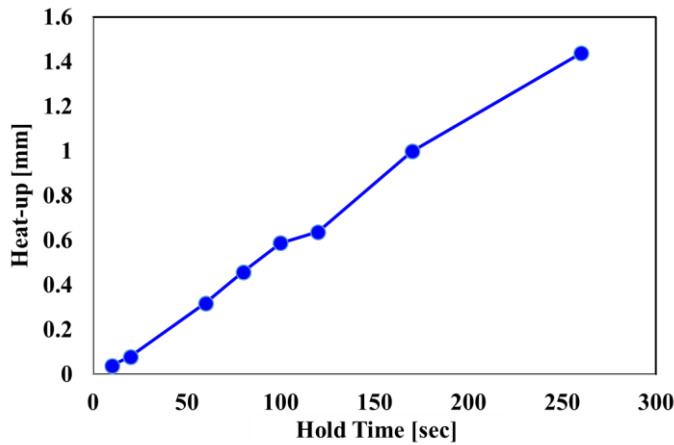


Fig.8. Heat-up change according to heating time

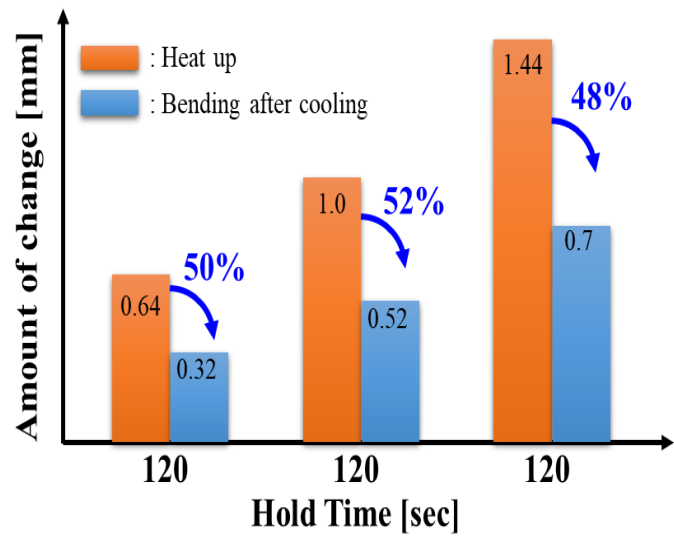


Fig.9. Bending amount change according to heat-up

인 물성에 관해 Table 2에 명시하였다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 고주파 가열 후 열팽창에 의해 상승하게 되고(Heat up) 냉각이 되면서 잔류응력에 의해 벤딩이 발생하게 된다. 따라서 고주파 가열시간에 따른 Heat-up량의 변화에 대해 먼저 분석하였다. 하는 형태에 대해 Fig. 7에 명시하였다. 실험결과 일정하게 온도가 상승하기 때문에 Heat-up량의 변화는 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. 실험에서 측정된 가열시간에 따른 Heat-up량의 변화에 대해 Fig. 8에 가열에 따라 변화하는 Heat-up량에 대해서는 그림에서 나타난 바와 같이 Dial Gauge를 활용하여서 측정하였다.

가열된 소재를 냉각함에 따라서 변화되는 벤딩량을 분석하기 위해 가열시간 변화에 따라 발생하는 Heat-up량과 냉각 후 최종적인 벤딩량을 분석하였다. 분석한 내용에 대해 Fig. 9에 명시하였다. 실험결과에서 보듯이 대량 Heat-up량 대비 48 ~ 52% 변화하는 것을 알 수 있다. 비슷한 비율로 변화하는 이유는 형상에 대한 영향이라 판단하였다. 시편의 길이, 직경 등이 변화하면 벤딩되는 비율이 변화하는 것이라고 판단하였다. 이러한 결과를 바탕으로 실제 HIP로터에 대해서 교정테스트를 진행하였다.

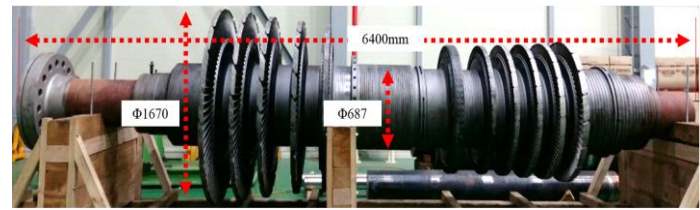


Fig.10. 500MW HIP Rotor

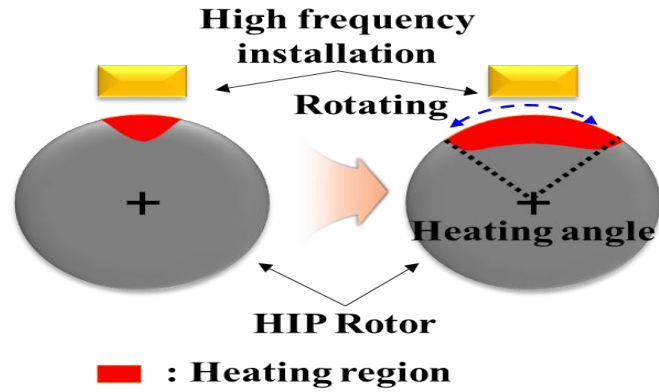


Fig.11. Change of heating angle

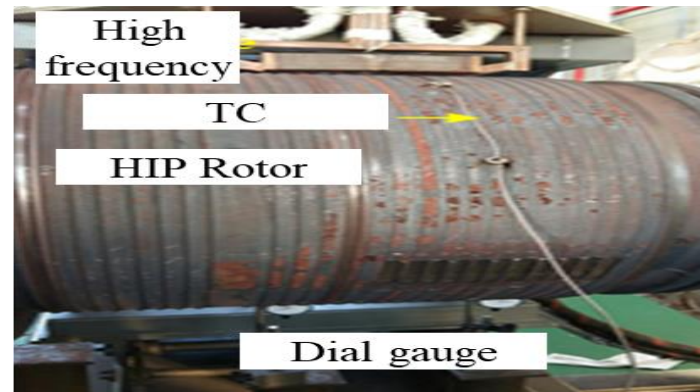


Fig.12. 500MW HIP Rotor Straightening test

### C. 표준화력 500MW HIP 로터 교정테스트

Mock-up size의 시편을 활용하여서 Bending 발생시키는 것에 대해 검증을 완료하였다. Bending을 발생할 수 있다면, 반대로 교정도 가능하다. 실제 발전소에서 적용하기 위해서는 HIP로터에 대해 교정테스트를 진행해야 한다. 본 연구자는 전력연구원에 전시되어 있는 HIP로터에 대해서 검증테스트를 진행하였다. 실험에 사용한 로터에 대해 Fig. 10에 명시하였다. 로터의 직경 및 길이에 대해 명시하였다.

Mock-up Size까지는 국부적인 부분만 가열하여도 원활하게 벤딩이 발생하였다. 하지만 HIP 로터의 경우 직경이 2배로 증가하였고, 길이 또한 증가하였다. 무게가 무거워졌기 때문에 국부적인 가열만을 통해서 변화하는 것은 한계가 있다고 판단하였다. 따라서 추가로 변수를 추가하였다. 로터를 회전하면서 가열을 진행하는 것

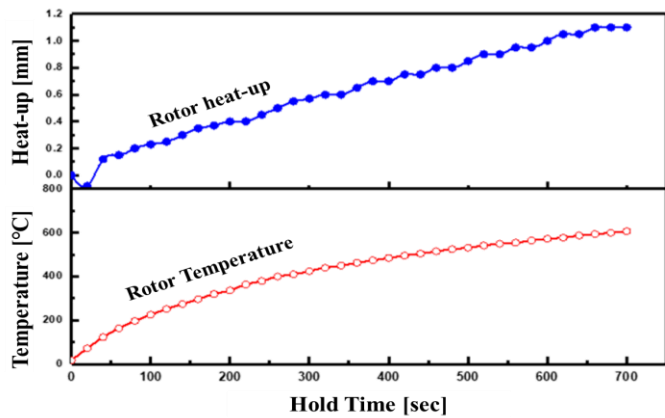


Fig.13. Test Result

이다. 회전각도를 조절하여 로터의 가열부위를 조정하고 또한 열에 의해 변형되는량을 조절하였다. 이와 같은 개념에 대해 Fig .11에 명시하였다.

1.25Cr 강의 경우 650도이상으로 상승할 경우 조직변화 및 손상이 발생할 수 있기 때문에 로터의 온도에 대해서도 측정하였다. Fig. 12에 실험을 준비한 모습에 대해서 명시하였다. Dial Gauge 를 통해 변화량을 측정하고, TC를 통해 온도를 측정하였다. 이와 같이 실험을 진행한 결과 가열각도(Heating angle)을 변화시켜 테스트를 한 결과 로터에서 Heat-up이 발생하였고, 냉각이 되면서 Bending이 발생하였다. 가열중 Heat-up 변화량과 온도변화량에 대해 Fig.13.에 명시하였다. 온도가 상승함에 따라 Heat-up도 증가하는 것을 알 수 있다.

최종적으로 Heat-up이 1.12mm 상승하였고, 벤딩량은 0.21mm 발생하였다. Mock-up size와는 다르게 Heat-up량 대비 19% 벤딩한것을 확인하였다.

D. 교정테스트 결과

사이즈별 교정테스트를 통해 본 연구자가 개발한 장비가 로터를 교정할 수 있다는 판단을 하였다. 또한, 가열을 통해 열팽창되는 량인 Heat-up량 대비 일정한 비율로 벤딩이 되는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 로터를 교정하기 위한 주요변수는 Heat-up량, 가열각도, 가열시간이라고 판단하였다. 이러한 변수에 대해 다양한 Case의 데이터를 구축하면 교정량을 예측할 수 있는 모델을 개발할 수 있다고 판단하였다. 따라서 상용유한요소해석 프로그램을 활용하여 FEM 해석 모델을 개발하여 다양한 Case에 대해 해석을 진행하였다 [8]. 해석한 결과에 대해 다음절에 설명하였다.

IV. 유한요소해석 및 교정량 예측모델 개발

A. 유한요소해석 경계조건 및 1.25Cr 물성치

Fig.14.는 로터 교정 해석의 열-기계적 경계조건을 나타내었다 [9]. 로터 모델링은 실제 로터와 동일하게설계하였다. 로터 교정에 대표적으로 사용되는 열응력 해석이다. 로터에 발생하는 열전달에 대한 지배방정식인 열전도 방정식은 다음과 같다.

$$(KT,i),i=pc \frac{\partial T}{\partial t}$$

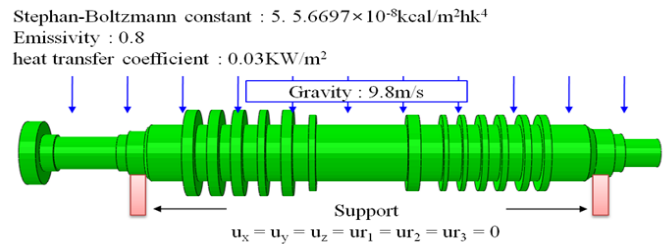


Fig.14. Finite element analysis Boundary conditions

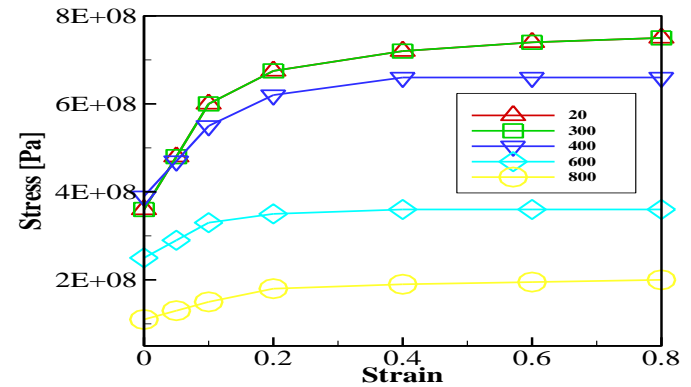


Fig.15. Material temperature according to heating time by steel type

TABLE 3  
Material property of 1.25Cr

Temperature	Young's Modulus	Expansion	Conductivity
25	204 GPa	11.5 10 <sup>-6</sup> / °C	41 W/m°C
100	200 GPa	12.1 10 <sup>-6</sup> / °C	40.6 W/m°C
200	193 GPa	12.7 10 <sup>-6</sup> / °C	40.1 W/m°C
300	186 GPa	13.3 10 <sup>-6</sup> / °C	38.7 W/m°C
400	179 GPa	13.8 10 <sup>-6</sup> / °C	36.8 W/m°C
500	169 GPa	14.4 10 <sup>-6</sup> / °C	34.8 W/m°C
600	157 GPa	14.8 10 <sup>-6</sup> / °C	32.8 W/m°C
700	142 GPa	15.1 10 <sup>-6</sup> / °C	29.1 W/m°C

식의 K, ρ, c는 로터의 열전도도, 밀도, 비열이다. T는 로터의 표면온도 있고, t는 열전달이 되는 시간이다. 로터 교정의 경우에는 접촉 열전달이 아닌 대류와 열복사에 의해서 열전달이 발생한다. 복사와 대류 대한 수식은 다음과 같다.

$$q(t) = h_a(T - T_a) + \sigma \epsilon(T^4 - T_a^4)$$

여기서 h<sub>a</sub>는 대류 열전달 계수이고, T<sub>a</sub>는 로터 주위의 온도이다. 그리고 ε는 방사율이다. σ는 일반적으로 복사열전달에서 사용되는 스테판 볼츠만 상수이며 값은 5.6697×10<sup>-8</sup>kcal/m²k<sup>4</sup> 이다. 대류열전달 계수의 경우에는 일반적인 자연 열전달 계수인 0.03KW/m² 사용하였다.

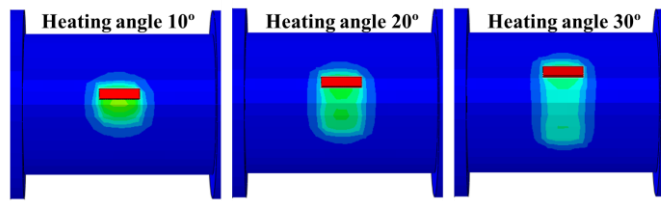


Fig.16. Finite Element analysis of changing heating angle

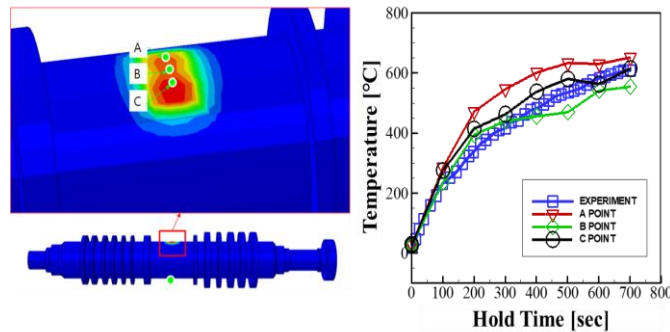


Fig.17. Data measurement point and temperature analysis data

TABLE 4  
Variations of parameters for FEM

Parameters	Parameter value change
Heating angle	20°, 25°, 30°
Heating time	100s, 200s, 300s, 400s, 500s, 600s, 700s, 800s

해석에 사용한 1.25Cr강의 유동응력에 대해 Fig. 15에 명시하였다. 또한 온도변화에 따른 탄성계수, 열팽창계수, 열전도도에 대해 TABLE 3 명시하였다.

B. 해석 CASE

앞절에서 설명한 바와 같이 로터를 교정하기 위한 대표적인 변수는 다음과 같다.

$$\text{Straightening} = f(\text{Heating angle}, \text{Heating time}, \text{Rotor Size}, \text{Heat-up}..)$$

현재 적용하려고 하는 HIP Rotor의 경우 사이즈의 변화가 없기 때문에 가열각도와 가열시간의 변화에 따른 해석을 수행하였다. 가열각도의 변화는 실제 실험과 동일하게 로터를 회전시켜서 해석하였다. 주요 각도의 변화에 따라 온도가 변화한 결과에 대해 Fig. 16에 명시하였다. 해석을 수행한 Case는 각도의 변화를 3Case (20°, 25°, 30°), 가열시간의 변화를 8Case(100초 ~ 800초) 총 27Case에 대해 해석을 수행하였다. 해석 Case 조건에 대해 TABLE 3에 명시하였다.

C. 실험결과 비교 분석

앞절에서 제시한 해석Case를 수행하기 전 개발된 해석모델에 대한 신뢰성 검증 작업을 진행하였다. 신뢰성 검증은 해석에서 계

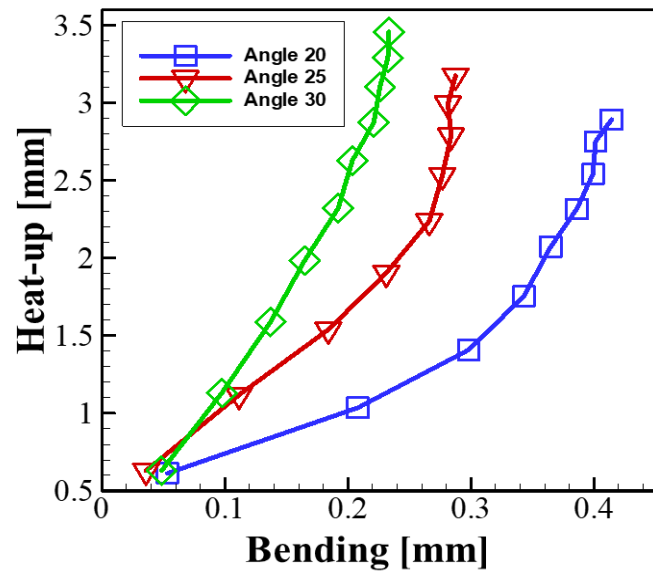


Fig.18. Result of Bending Finite element analysis

산한 온도와 실험에서 측정된 온도데이터를 비교하였다. 해석에서 측정된 위치와 해석결과 비교데이터에 대해 Fig.17에서 명시하였다. 데이터에서 알 수 있듯이 가열시간에 따라 변화하는 온도데이터가 유사하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 Heat-up대비 발생하는 벤딩량도 실험결과와 유사한 결과가 나타났다. 따라서 본 연구자가 개발한 FEM 모델은 신뢰성이 있다고 판단하였다.

D. 유한요소해석 결과 및 교정량 예측 모델 개발

27Case에 대해 유한요소해석을 수행한 결과 가열각도의 변화와 Heat-up량의 변화에 따라 뚜렷하게 벤딩량이 변화하는 것을 확인 하였다. 해석결과에 대해 Fig.18에 명시하였다. 가열각도를 작게 하였을 경우 소재온도가 빠르게 올라가기 때문에 Heat-up도 빠르게 발생하고, 벤딩량도 많이 교정되는 것을 알 수 있다. 넓은 범위를 가열할 경우 대류, 복사등에 의해 열손실이 발생하여 상승할 수 있는 Heat-up량이 제한되는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 가열각도별로 벤딩량을 교정할 수 있는 제한선이 있는 것을 확인 하였다. 벤딩량이 0.2mm이하의 경우 가열각도 30°, 0.3mm이하의 경우 가열각도 25°, 그 이상의 경우 가열각도 20°로 활용하면 된다.

해석결과 데이터를 바탕으로 최종으로 로터를 교정하기 위한 교정량 예측 모델을 개발 완료하였다. 개발된 모델은 다음과 같다. 개발된 모델에 대해 원하는 벤딩교정량과 가열각도를 입력하면, 도달해야하는 Heat-up량이 산출된다. 또한 이렇게 산출된 Heat-up량에 도달하기 위해 필요한 가열시간도 계산된다. 이렇게 개발된 모델을 활용하면 로터의 손상을 최소화 하면서 빠른시간에 교정이 가능할 것이라 판단한다.

$$\text{Heat-up} = (0.011(\text{Heating angle}) + 0.746)e^{(-0.405(\text{Heating angle})+16.82)(\text{Bending})}$$

$$\text{Heating time} = (-2.46(\text{Heating angle}) + 223.6)(\text{Heat-up})^2 + (-8.23(\text{Heating angle}) + 470.2)(\text{Heat-up}) + 3.359(\text{Heating angle}) - 0.768$$

## V. 결론

본 연구에서는 터빈로터 등 발전소의 회전체를 교정하기 고주파 유도가열장치를 통해 국부적인 가열을 하여 발생하는 열응력 및 잔류응력을 활용하여 교정하는 방법을 개발하였다.

개발된 장치를 검증하기 위해 Mock-up Size 및 실제 HIP 터빈로터를 활용하여 검증테스트를 진행하였다.

또한, 유한요소해석모델을 개발하여 로터를 교정하는데 주요 변수인 가열각도, 가열시간 변화에 따른 다양한 Case에 대해 해석을 수행하였다. 최종적으로 해석 데이터베이스를 활용하여 고주파 가열에 따른 교정량 예측모델까지 개발 완료하였다. 이러한 연구결과를 기반으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 고주파 로터교정장비를 통해 발전소의 고중량 회전체 구조물에 대해 교정이 가능하다는 것을 검증하였다.
- 2) 가열시간 / 가열각도 제어를 통해 로터를 교정할 수 있다.
- 3) 해석 및 실험을 통해 개발된 교정량 예측모델을 활용할 경우 로터의 가열부위를 최소화 하면서, 효율적으로 교정이 가능하다.
- 4) 향후 다양한 HIP 로터에 대해서 교정을 진행 후 데이터 베이스를 추가한다면, 다양한 사이즈, 강종에 대한 교정모델 개발이 가능하다고 판단하였다.  
이렇게 개발된 모델이 신뢰성 있는 발전소 운영에 도움을 줄 것이라 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Korea Southern Power Corporation, Korea East-West Power Corporation, Korea Western Power Corporation and Korea Midland Power Corporation under Grant R16GF06.

본 연구는 4개 발전사 협력과제(남부발전, 동서발전, 서부발전, 중부발전) 연구비에 의해 지원되었음

## REFERENCES

- [1] Ha, H.C. and Choi, S.P., "Vibration Characteristics of Steam Turbine due to the Rubbing," The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 97, No. 1, pp. 5-8, 1999
- [2] 김두영, 박광하, 이봉희, "대형 증기터빈 물유입에 의한 손상메커니즘 분석과 원상복구특성 연구", 한국동력기계공학회, 제15호, 제5호, pp. 22-29, 2011
- [3] P. A. Coulon, "The Straightening of Turbine Rotors : An Empirical Art", Alstom, France, 1995
- [4] G. Lanthorn, "Steam Turbine Supervisory Instrumentation Systems", EPRI, USA, Tech. Rep. ,3002001267 2013
- [5] 박광하, 이봉희, "필리핀 세부화력 2호기 증기터빈 손상 진단 보고서", 한국전력 전력연구원, 대전, 기술보고서, 2012
- [6] 김윤호, 조황기, 박민규, 박현구, 박광하, 손동우, "화염 가열을 이용한 로터 굽힘교정 공정에서의 열변형 해석", 대한기계학회 춘추학술대회, pp.3190-3193, 2017
- [7] 한상규, "증기터빈 고중압로터 열적변형 곡직실험을 통한 굽힘량 개선", M.S. Thesis, 기계시스템공학과, 충남대학교, 대전, 2019
- [8] ABAQUS Analysis User's Manual, Dassault System, USA, 2020
- [9] H. Dyja, P. Korczak, "The thermal-mechanical and microstructural model for the FEM simulation of hot plate rolling", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol92-93, pp. 463-467, 1999