

## 회전체의 건전성 평가를 위한 구조물의 진단사례

### A Diagnosis Case of Structure to Assess Rotor System

양경현\* · 조철환\* · 배춘희\*, 이성호\*, 김성휘\*

Yang Kyeong-Hyeon, Cho Chul-Hwan, Bae Chun-Hee, Lee Sung-Ho, Kim Sung-Hwi

**Key Words** : Casing(케이싱), Fatigue Striation(피로 줄무늬), Elongated Fracture(연성 파괴), Brittle Fracture(취성 파괴), High Cycle Fatigue(고주기 피로), Fastening Force(체결력), Vibration(진동), Frequency analysis(주파수 분석)

#### ABSTRACT

In this paper, we analyzed the characteristic of the broken section for bolts fastening the generator casing, and according to the frequency analysis, we grasped the characteristic of the excited force, traced the path of the exciting source so that we examined a factor of transient vibration of the generator casing. Even if it appears transient vibration again, we applied spring washer and more tensile bolt to the casing to minimize the fracture. By solving troubles of the generator rotor, we reduced the vibration amplitude to the normal condition. So we obtain much more the reliability of the generator.

#### 1. 서론

대형 플랜트에서 사용되는 회전체에서 진동에 대한 관점은 매우 중요하면서 기본적으로 거론된다. 그러나 회전체의 진동상태가 국제규격 혹은 국내 산업규격의 범위내에 있다고 하더라도 회전체의 부속 구조물에서 과도한 현상을 보인다면 시스템의 건전성을 의심할 수 있다. 따라서 대형 회전체가 규정보위내의 진동현상을 보일지라도 부속 구조물이 과도한 진동현상을 나타내고 있을 때 이에 대한 건전성 평가를 위해 정확한 원인규명 절차를 거쳐 진동저감을 실시하는 것은 매우 중요하다.

본 논문에서는 발전소의 중요회전체 기기인 발전기와 그 부속 구조물에서 발생한 사례를 소개하고자 한다. 외부로부터 발전기를 보호하기 위한 케이싱의 일정부위에서 약간 과도한 진동이 발생하고 있을 때 상·하부 케이싱 결합용 체결볼트가 특정위치에서 파단되기 시작하여 계속적으로 일정 시간이 지나면서 파손된 위치가 확산되고 있었다. 이에 대하여 발전기 시스템의 건전성 유무를 판단하기 위해 볼트 파단면의 미시적인 특성을 관찰하여 재질측면의 검토단계와

볼트체결부에 대한 파손재발을 방지하기 위해 체결방법을 실험적으로 개선하고, 회전체에서 발생하는 진동의 전달경로를 추적하여 고정체에 미치는 영향을 최소화하여 발전기 시스템의 건전성을 확보하였던 내용을 기술하고자 한다.

#### 2. 손상 메카니즘

##### 2.1 대상 구조물의 개요

발전기는 터빈의 기계적 회전력을 전달받아 전기를 생산하는 설비로서 전기를 생산하는 회전자, 코일다발의 고정자, 회전자를 회전시키는 rotor, 및 casing으로 구성되어 있다. 이 중에서 casing은 발전기의 주요 설비를 보호하고, 고정자를 지지하는 역할을 하며, 또한 상부와 하부 casing은 볼트에 의해 체결되어지고, 하부 casing은 기초에 고정지지 된다(Fig. 1).

Casing의 진동은 회전자와 고정자간의 전기적 작용으로 발생한 힘이 casing에 전달되어 나타난다. 그러나 진동이 그대로 전달되면 상당한 진동을 유발하게 되므로, casing과 고정자의 연결부위에 스프링 등을 사용하여 회전체의 진동에 대한 완충작용을 할 수 있도록 구성되어 있다.

\* 한전 전력연구원

E-mail : yangkh@kepri.re.kr

Tel : (042) 865-5324, Fax : (042) 865-5314



Fig. 1 The side of Generator Casing

### 2.2 문제점 발생현황

발전기의 상·하부 케이싱을 조립할 때 체결하는 볼트 일부가 파손되는 현상이 발견되고 있었다. 볼트의 최초 손상은 Fig. 2의 M, N, O 위치에서 발견되었고, 3개의 볼트를 교체한 후 약 11개월후 L의 위치, 다시 6개월 후에 K의 위치에서 볼트가 파손되었다.

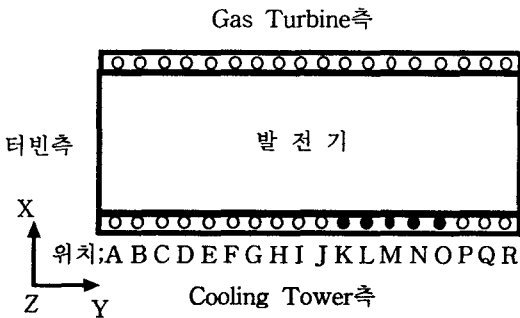


Fig. 2 Casing Bolts' Position

### 2.3 손상단면의 미세구조 관찰

일반적으로 발전기의 케이싱 볼트 부위는 쉽게 파

손현상이 일어나지 않기 때문에 발전기 건전성 파악의 정밀성을 기하기 위하여 볼트 손상부위의 외관과 파단면을 관찰하였다.

Fig. 3을 보면 파단된 볼트들의 길이가 거의 일치하고 있음을 보여주고 있고, 또한 그 길이는 상·하부 casing의 볼트체결부 두께와 같았다. 결합부위의 두께와 볼트의 길이가 일치한다는 점에서 너트 체결부에서 응력이 작용되었던 것으로 판단된다.

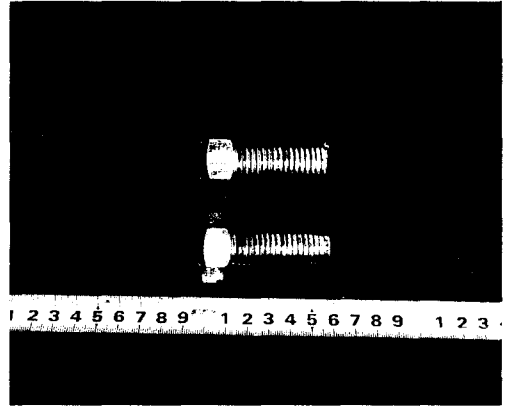


Fig. 3 Broken bolts

Fig. 4는 손상된 볼트의 손상면을 보여주고 있는 모습으로 파단된 단면이 두가지 형태로 나타나 있는 것을 알 수 있다.

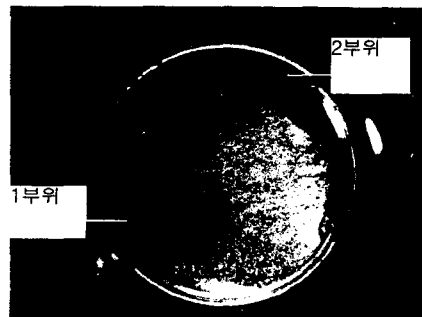


Fig. 4 Surface of a broken bolt

Fig. 4의 1부위를 확대한 Fig. 5를 보면 전형적인 피로 파면이다. 피로는 보통 저사이클피로와 고사이클피로로 크게 나누어 분류할 수 있으며, 일반적으로 저주기 피로는 항복응력 이상의 저사이클상태에서, 고주기 피로는 항복응력 이하의 고사이클상태에서 주로 파손되는 경향을 보인다. casing 체결용 볼트의 파손으로 교체하였던 시점을 고려할 때 고주기 피로(진동)에 의한 손상으로 판단된다.



Fig. 5 Enlarged photograph of Part 1 in Fig. 4



Fig. 7 Surface of a broken bolt

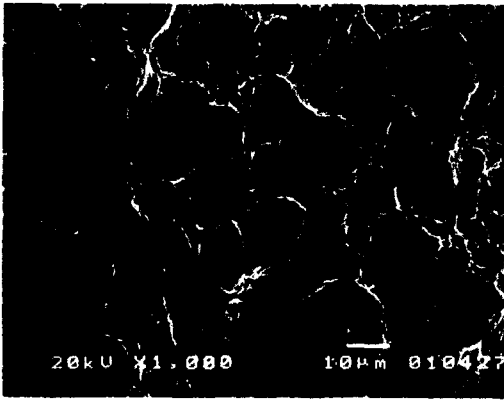


Fig. 6 Enlarged photograph of Part 2 in Fig. 4

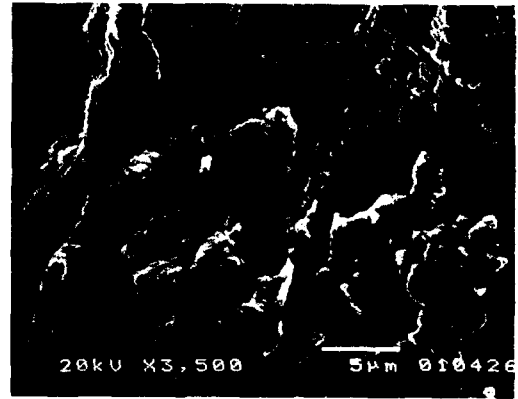


Fig. 8 Enlarged photograph of Part 1 in Fig. 7



Fig. 9 Enlarged photograph of Part 2 in Fig. 7

Fig. 4의 2부위를 확대한 Fig. 6을 보면 연성파면의 형태를 보이고 있다. 파면의 특성상 재질이나 공정상의 문제점은 없는 것으로 보인다. 따라서 Fig. 5와 Fig. 6을 관찰한 결과는 고주기 피로현상이 장시간 진행되어진 파면에서 어느시점에 볼트의 강도가 약해질때 연성파괴된 것으로 판단되었다.

또다른 손상볼트와 파면분석을 통해 손상과정을 비교해 보았다.

Fig. 7에서도 파단부위가 두 가지 형태로 구분되어 지고 있다. Fig. 7의 1부위를 확대한 사진인 Fig. 8에서는 피로 줄무늬(fatigue striation)를 나타내는 피로 파면이 잘 나타나 있다. 그리고 Fig. 7의 2부위를 확대한 사진인 Fig. 9에서는 취성파괴 형태가 나타나고 있다. 이 볼트는 고주기의 피로현상이 장시간 진행되다가 갑작스런 충격으로 인해 취성파괴된 것으로 판단된다.

앞에서 관찰하였던 사항을 정리하면 손상된 볼트들은 체결력에 의한 과도응력의 확률보다는 일반적인 볼트의 체결응력하에서 고주기의 피로에 의해 손상이 진행되었으며, 볼트의 강도가 상당히 약해진 상태에서 파단에 이른 것으로 판단하였다.

## 2.4 진동으로 인한 영향분석

일반적으로 발전기가 운전되는 상황에서는 일정한 진동이 casing에 전달된다. 하지만 현재의 진동상태는 정상상태에 비하여 상당히 높은 상태였다. 또한 발전기의 casing에서 높은 진동이 발생할 수 있는 가능성은 회전체의 진동 자체보다는 casing과 회전체와의 관계에서 원인을 살펴보는 것이 우선이었다. 따라서, casing의 진동을 측정하여 주파수분석을 통한 가진력 특성을 파악하고, 이것이 볼트체결부에 미치는 영향을 고찰하였으며, 가진력의 경로와 원인을 파악하였다.

### 2.4.1 진동특성 분석

진동의 측정은 일정간격으로 배치되어 있는 볼트의 위치마다 방향별로 실시하였다. Fig. 2는 발전기 casing을 위에서 내려다본 그림이고, 측정위치와 측정방향도 함께 표시하고 있다.

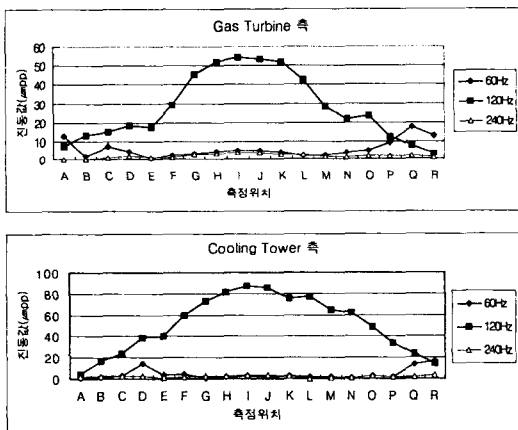


Fig. 10 Measurement result

측정결과를 방향별로 볼 때 Y와 Z의 방향에 비해 X방향의 진동이 매우 크게 나타나고 있었다. Fig. 10은 세가지 방향 중 가장 큰 진동값을 보이는 X방향을 Gas Turbine측과 Cooling Tower측으로 나누어 측정된 결과를 나타내고 있다. 전체의 진동성분중 대부분이 120Hz 성분이며, Casing의 중앙부에서 진동상태가 가장 높았고, 중앙에서 가장자리로 갈수록 진동상태가 낮아지고 있다. 그리고 파손이 발생한 Cooling Tower측이 Gas Turbine측보다 전체적으로 진동의 수준이 높게 나타나고 있다.

보통 발전기에서 발생되는 주요 진동주파수는 60Hz와 120Hz이다. 이것은 축계의 회전속도와 관련되는 60Hz 성분의 진동과 전기적인 요소로 발생하는

120Hz 성분의 진동이다. 위의 결과를 보면 120Hz 성분이 주로 나타나고 있는데, 이것은 발전기 내부에서 발생한 가진력이 casing에 전달되어 나타나고 있는 것이다.

따라서, 이러한 상태가 내부의 과도한 거동으로 인하여 casing에 전달된 것인지 혹은 casing과의 진동측면에서 증폭관계(공진)에 있는지 살펴볼 필요성이 있다.

### 2.4.2 고유진동수특성 분석

발전기 내부의 가진력과 casing과의 상관관계 여부를 살펴보기 위해 다음과 같이 casing의 고유진동수를 측정분석하였다.

측정은 casing 상부의 원주방향을 따라서 수직방향으로 실시하였다.

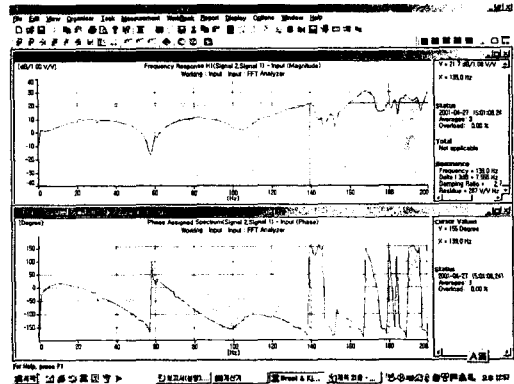


Fig. 11 Natural Frequency on upper casing of #I & J position

Fig. 11은 특히 진동이 높았던 부분인 I와 J의 사이에서 상부casing의 고유진동수를 측정된 결과이다. 그림에서 보면 고유진동수는 139, 168, 181Hz로 나타나고 있다. 그중 가진주파수와 가장 근접한 139Hz 성분은 120Hz를 기준으로 15.8% 정도의 여유가 있어 충분한 여유가 있는 것은 아니지만 공진의 영향은 적어 보인다. 공진에 대한 여유율은 식(1)로부터 구하였다.

$$\text{공진여유율} = \frac{\text{가진주파수} - \text{고유진동수}}{\text{가진주파수}} \times 100 \quad (1)$$

결국 내부의 가진력과 casing과의 공진에 의하여 진동이 증폭된 것은 아니라는 사실을 확인하였다.

### 2.4.3 발전기 내부의 가진력 분석

발전기 casing은 내부의 전기적인 문제 때문에 가진력이 커지더라도 진동 전달이 최소화 될 수 있도록

스프링과 같은 완충장치가 갖추어져 있어 casing에 전달되는 진동의 영향이 적게 된다. 그러나 발전기 내부에서 과도하게 가진력이 발생하게 되면 casing으로 전달되는 진동의 수준이 높아지는 것은 당연하다.

일반적으로 발전기 내부가 건전한 상태라면 정상운전 중에 casing으로 전달되는 진동값은 50 $\mu$ m 이하 정도이다. 따라서 발전기 내부에서 어떠한 구조적 결함으로 매우 큰 가진력이 발생하면 casing에도 상당한 크기의 진동이 발생하게 되므로 발전기 내부는 전자기적 부속기기 요소에 확실한 문제가 확실하게 발생된 상태라고 판단하였다.

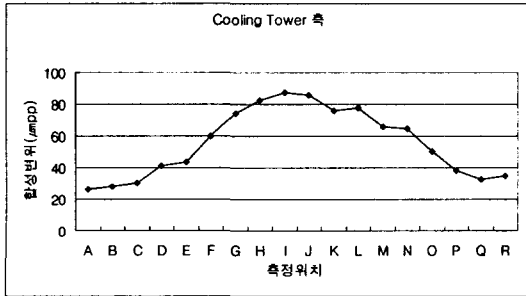


Fig. 12 Composition chart of 120Hz component over all directions

Fig. 12는 120Hz의 가진주파수 성분에 대하여 모든 방향을 합성한 거동의 크기를 나타낸 것이다. X방향만으로는 거동과 비교해 보았을 때 중앙부위에서 우측이 좌측보다 전체적으로 높은 진동값(50 $\mu$ m 이상)을 나타내고 있다. 이러한 점에서 볼 때 내부에서 상당한 가진력을 발생시키는 부위가 중앙부보다는 우측으로 편중되어 있고, 발전기 내부에서 문제가 발생하였다면 그 부위 또한 우측부위에서 발생하였다고 판단할 수 있다. 또한 볼트의 파손 위치에서 볼 때 X방향만으로 가해진 진동보다는 동시에 다른 두가지 방향에서 복합적으로 가진력이 전달되었던 위치가 볼트의 피로응력에 영향을 주었던 것으로 판단된다.

### 2.5 발전기 내부의 건전성 평가

볼트 손상면의 미세구조 관찰의 결과 과도한 체결력이 작용한 것은 아니었고, 진동측면의 분석결과 casing에서 나타난 높은 진동은 공진현상이 아닌 내부의 가진력에 의한 결과라는 사실을 얻었다.

따라서, 볼트 손상의 원인은 발전기 내부에서 발생한 과도한 가진력이 casing에 여러방향으로 가진력을 전달되었고, 하부 casing 부위에 위치한 너트 체결부

위에서 고주기의 피로현상이 누적되었고, 이런 상태로 일정시간이 경과한 후에 파손된 것으로 정리할 수 있었다.

## 3. 문제해결 과정

### 3.1 볼트 체결방법의 개선

발전기의 내부는 물리적으로 문제발생의 요소가 다수 존재한다. 진동이 정상상태로 감소하게 되면 이전처럼 casing의 진동상태가 호전되어 볼트의 손상을 최소화 할 수 있겠지만, 현장의 조건이 회전체 진동에 운전과 정지의 기준을 두고 있기 때문에 되도록 발전기 내부의 문제점들을 다음 정비공사기간까지는 미룰 수 밖에 없었다. 또한 차후에 정상적인 발전기 가동상태에서 내부의 이상으로 진동이 상승하게 될 경우에도 볼트의 문제가 재발되는 것을 최소화 하기 위하여 체결방법에 실험적 접근을 시도하기로 하였다.

볼트의 규격, 재질, 체결력 등의 측면에서 다음과 같이 고려하였다. Casing의 볼트 삽입부분은 직경이 한정되어 있어 규격을 바꿀수 없었기 때문에 볼트의 재질에 있어서 현재보다 고주기의 피로에 유리한 고장력 재질을 채택하기로 하였다. 볼트의 파손상태에서 보았듯이 파손부위의 나사산이 마모되었던 것처럼 볼트와 너트의 체결력에 한계 때문에 발생할 수 있는 문제를 방지하기 위해 스프링 와셔를 사용하기로 결정하였다. 각 위치별로 볼트와 너트사이에 스프링 와셔를 각 1개씩 2개를 한조로 파손되어 볼트 조립이 필요한 곳에 적용하였다. 다. 스프링 와셔를 사용하여 체결력 증대 뿐만 아니라 감쇠력을 약간 증대시키는 효과로 운동에너지를 다소나마 흡수해 줄 수 있을 것으로 기대하였다.

위와 같이 개선한 후 수개월 가량 계속적으로 살펴본 결과 손상을 입거나 볼트가 풀리는 현상은 발견되지 않았다. 하지만 체결력 개선을 하지 않은 기존의 체결부위에서 파손이 발생하였다. 이때마다 손상된 곳은 개선된 체결방법을 적용하였다.

### 3.2 발전기 내부의 문제점 교정

체결방법이 개선되었던 볼트부위에서는 파손의 징후가 발견되지 않았지만 기존의 부위는 파손이 일어났었기 때문에 결국 가진력의 원인은 밝히는 것이 가장 중요하였다. 따라서 정비공사기간동안 문제의 발전기들을 분해하여 내부상태를 확인해 보았다. 그 결과

Fig. 13과 같이 회전자의 코일다발의 사이사이를 일정한 간격으로 띄워주고 있어야 할 space block 일부가 고정되어 있던 지점에서 파손 및 이탈되어 코일의 냉각공기 통로를 막고 있었다. 그 위치는 Fig. 2에서 L과 N의 사이였다. 이렇게 되면 높은 전류가 흐르는 코일은 항상 열이 발생하게 되는데 냉각이 되지 않아 국부적으로 온도가 상승하여 코일다발 자체가 이완되고, 따라서 동적인 특성이 바뀌게 된다. 즉, 회전에 의한 관성모멘트 증가에 의한 가진력을 발생하게 된 것이다.



Fig. 13 Generator Rotor

위와 같이 문제 발생의 근본원인을 추적하여 제거하였기 때문에 진동의 상당한 저감이 기대되었다.

### 3.3 문제점 교정 결과

발전기가 정상적으로 가동된 후 진동의 변화를 확인하기 위해 이전에 진동이 가장 높았던 부위의 X방향에 대하여 I와 J의 사이에서 진동을 측정하였다. 개선 전·후의 값은 주파수별로 분석하지 않고 전체진동에 대한 값을 취득하였다.

결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Comparison of Vibration Amplitude

< Unit :  $\mu\text{mpps}$  >

구분	개선전	개선후
Cooling Tower 측	94	36
Gas Turbine 측	64	36

개선후의 결과는 일반적으로 건전한 발전기 casing

의 진동상태 수준(50 $\mu\text{m}$ 이하)으로 낮아졌다. 따라서 과도한 진동의 영향으로 발생하였던 볼트파손의 재발은 없을 것으로 보인다.

## 4. 결론

본 논문에서는 복합화력발전소의 발전기 casing 체결용 볼트가 지속적인 파손이 발생하고 있어, 이에 정확한 원인규명을 통한 발전기 자체의 건정성 평가와 더불어 문제해결 과정을 기술하였으며, 결론은 아래와 같다.

- (1) 발전기와 같이 회전체가 구조물에 미치는 영향이 클 경우 회전체 자체의 강제진동의 수준이 상당히 높을 때는 구조물에 손상을 가져올 수 있다.
- (4) 발전기 내부에서 발생한 과도한 가진력이 일정방향보다 복합적인 방향에서 힘의 변화가 발생하는 위치에서부터 볼트의 손상이 시작되었다는 점을 살펴볼 때 방향별 진동발생에 대한 분석이 건전성 평가에 중요하다.
- (3) 짧은 주기로 낮은 응력범위에서 반복하중이 작동되는 고주기 피로의 가능성이 있는 부품에 있어서는 고장력의 재료가 유리하였다.
- (4) 스프링 와셔의 효과는 가진력의 영향이 다른 두 면을 결합시키는 볼트의 체결력을 증대시켜 진동에 의한 파손의 현상을 방지할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) ASM Handbook Committee, 1975, "Ductile-to-Brittle Fracture Transition", Failure Analysis and Prevention, pp.44-56
- (2) 최병학, 1996, "피로 손상", 금속손상유형, pp.31~61
- (3) R. B. Randall, B. Tech. B. A., 1987, "Transient Analysis", Frequency Analysis, pp.185-210
- (4) Cyril M. Harris, 1987, "Experimental Modal Analysis", Shock Vibration, pp.21-1~34