

화력발전소 발전기 냉각용 수소배관계 과도진동 개선 Reduction of Transient Vibration on H₂ Piping System for Generator Cooling in a Power Plant

양경현[†](한전전력연구원)·김성휘^{*}·조철환^{**}·배춘희^{***}(한전전력연구원)

Kyeong-Hyeon Yang, Sung-Hwi Kim, Chul-Whan Cho, Chun-Hee Bae

Key Words : H₂ Piping System(수소배관계), Transient Vibration(과도 진동), Dynamic Characteristics(동특성), Natural Vibration Mode(고유진동형), Resonance Range(공진영역)

ABSTRACT

There was the transient vibration on H₂ piping system for cooling the generator in a power plant. We found it was resulted from resonance between the natural vibration of the piping system and exciting force from the turbine rotor by measurement and simulation test. We verified it would be changed the mode shape of the piping system by several simulation test for the structural modification of the piping system. Therefore we concluded that the change of natural vibration mode depends on deeply changing effective length of pipe and reducing supports.

1. 서론

대형 화력발전소의 발전기 내부는 지속적이며, 장기간 동안 가동하기 때문에 내부에서 높은 열을 발생한다. 이를 냉각시키기 위하여 일반적으로 수소를 사용하고 있다. 수소는 고열용량을 가지고 있어서 효과적으로 초과된 열을 제거할 수 있고, 매우 낮은 점도를 가지고 있어 냉각상태를 잘 유지할 수 있기 때문이다. 그러나 반면에 수소는 습도가 높지 않게 유지되는 것이 중요한데 그렇지 못할 때 수소의 점도가 증가되어 초과된 열을 빼앗는 능력이 저하되며, 습기는 회전축의 밀폐기능을 저하시켜 폭발성 수소의 누설원인이 되기도 하기 때문이다. 또한 고전압 고전류 발전기에서 전기가 습기를 타고 방전될 가능성이 커져 대형사고의 우려를 가지게 된다. 이렇게 중요한 부분을 차지하고 있는 수소를 지속적으로 이송시켜 주는 것은 매우 중요한 일일 것이다.

본 논문에서는 발전기의 냉각을 위해 매우 중요한 역할을 하는 수소 공급 배관에서 과도한 진동과 특정부위의 균열현상이 발생하는 문제를 접하고 이에 대한 해결을 위해 수행된 내용을 기술한 것이다. 대상 발전소는 계속적으로 가동을 해야하는 상황이기 때문에 정지상태에서 배관계의 동특성을

측정할 수 없어 최대한 현장의 조건을 반영하여 유한요소 모델을 생성한 후, 이를 적용하여 과도진동의 원인분석과 더불어 동적 고유특성을 변경시켜가면서 개선을 위한 최적결과를 도출하게 되었다.

2. 진동현상의 개요

2.1 시스템의 개요

문제의 발생부위는 화력발전소내 발전기 하부에 설치되어 있는 수소 공급배관이다(Fig. 1).

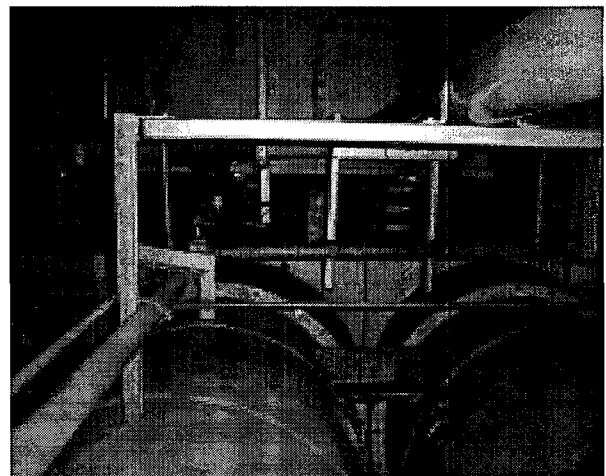


Fig. 1 Supply Piping System of H₂ Gas

[†] 한전 전력연구원
E-mail : yangkh@kepri.re.kr
Tel : (042)855-5324, Fax : (042)855-5314

^{*} 한전 전력연구원

배관의 재질은 SA-106B이며, 규격은 2"의 주 공급라인과 1/2"의 분기배관으로 설치되어 있다. 하부의 수소 저장소에서 주배관(2")을 통해 수소가 공급되고, 주 배관에서 분기된 배관계의 상부는 발전기의 하부로 연결되는 용접접합부로 구성되어 있다.

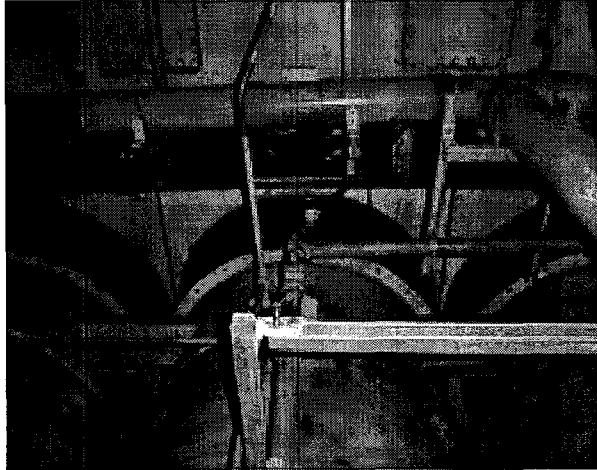


Fig. 2 Enlargement of Piping under the Generator

Fig. 2에서 황색 배관중 직경이 작아보이는 것이 1/2" 분기배관으로 발전기 하부로 연결되는 지점에서 고진동의 영향으로 균열이 발생하여 용접보강을 실시하고, 배관 하부를 목재로 지지한 흔적을 볼 수 있다. 과도진동의 영향으로 시스템이 매우 불안정한 상태로 유지되고 있었고, 손상되었던 배관의 흔적을 살펴보면 균열방향이 지면에 수직인 방향으로 영향을 미친 것임을 확인할 수 있었기 때문에 과도진동의 영향이 주로 상하방향으로 크게 작용한 것으로 예상할 수 있었다.

2.2 진동의 측정과 성분분석

수소 공급배관계의 진동 특성을 살펴보기 위해 측정을 실시한 결과 주요 진동성분은 터빈과 발전기의 회전에 의하여 가진되는 주파수인 60Hz로 나타났다. 진폭의 크기는 위치별, 방향별로 다소 변화가 있었지만 이전 균열 발생부위 주변에서 지면과 수직인 방향으로 약 1mm-peak 이상의 진폭이 나타나는 과도현상이 나타나고 있었다. 지면과 평행하고, 발전기 축 길이방향의 직각 방향으로도 다소 진동의 현상이 높게 나타나고 있었는데 지면과 수직인 방향에 비해 약 55%정도 내외의 진폭이 나타나고 있었다.

진동측정 결과를 살펴볼 때 배관에서 나타나는 특성주파수는 터빈-발전기에서 전달되는 60Hz 성분으로 분명하게 큰 진폭을 나타내고 있지만, 사실상 터빈-발전기에서 발생되는 진동상태는 일반 발전소의 상태와 비교할 때 정상적인 상태였기 때문에 수소 배관계의 동적 고유특성이 가진주파수에 근접한 것으로 판단되었다.

3. 배관계의 유한요소 해석과 고찰

발전기 냉각용 수소 배관계는 내부 사용유체가 수소가스이고, 사용압력이 높게 양은 상태로 유지되고 있어 배관계의 진동 특성을 볼 때 배관 내부에서 유체의 특성으로 야기되는 문제와는 관련이 없어 보인다. 따라서 과도한 진동의 원인은 터빈-발전기로부터 전달되는 가진력으로부터 배관계가 매우 크게 증폭되어 나타나는 공진의 결과라고 가정하였다. 그러나 이를 증명하기 위해서는 현장에서 가진력의 영향이 적은 상태가 필요하지만 실제로 터빈-발전기 설비를 정지시키는 일은 매우 드물기 때문에 실제적으로 고유진동수 측정을 위한 현장시험은 제외시킬 수밖에 없었다. 따라서 현상을 파악하는 방법으로 유한요소 모델 생성을 통한 배관계의 동적 고유특성을 추적 분석하기로 하였다.

3.1 좌표계 설정

발전기 냉각용 수소배관계의 유한요소 모델 생성의 기준과, 방향별 표현의 편리성을 위해 아래와 같이 좌표계를 정하였다. 터빈-발전기의 축 길이방향을 X 방향으로, 지면과 평행하면서 X와 수직인 방향을 Z방향으로, 지면과 X방향 및 Z방향에 각각 수직인 방향을 Y방향으로 설정하였다.

3.2 배관계의 모델링

현장의 배관설치 및 구속상태를 적용하여 Fig. 3과 같이 유한요소 모델을 생성하였다. 발전기 하부의 수소 주입부와 같이 용접에 의한 접합부, X방향으로 긴 경로를 가지는 배관 사이에서 U볼트 체결과 독립지지된 부분, 주 공급배관에 대한 벽면 고정 등 각 배관계의 설치상태에 따른 구속조건을 적용하였다.

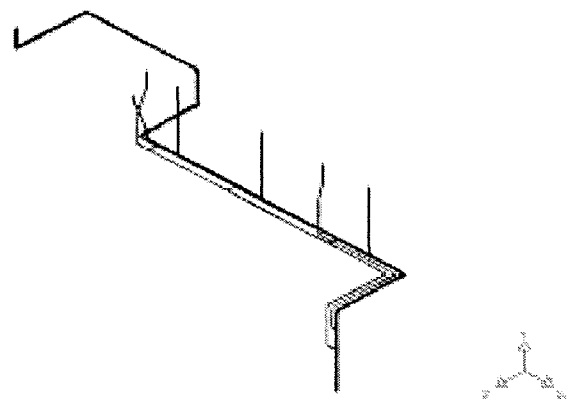


Fig. 3 A Model for H₂ gas piping system

3.3 동적특성 해석과 고찰

배관계의 유한요소 모델을 통한 동적 고유특성을 살펴본 결과 여러 가지 진동형 가운데 60.5Hz 상태에서 Y방향으로

거동하는 현상을 확인할 수 있었다(Fig. 4). 이 결과는 현장에서 측정을 실시하였을 때 전체적으로 높은 진동상태에서도 특히 Y방향으로 60Hz성분의 진폭이 매우 크게 나타났던 점에서 배관의 고유진동수가 터빈-발전기에서 전달되는 가진력과 거의 일치하고 있기 때문에 발생한 공진현상임을 확인시켜 주는 것이다.

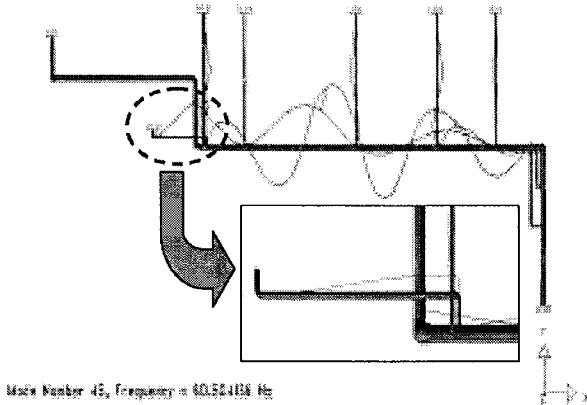


Fig. 4 Mode Shape at 60.5Hz

Fig. 4의 확대부위 그림에서 나타난 것처럼 공진현상에 의한 진동형이 나타난다면 주 공급배관(2"배관)에서 -X방향으로 분기되는 배관(1/2")이 상대적으로 취약한 구조여서 과도한 진동의 영향을 받게되면 실제 현장에서와 같이 균열이 발생할 가능성이 매우 커 보인다.

현장 측정의 결과중 Y방향을 제외한 Z방향에서도 60Hz의 주파수에서 진폭이 다소 높게 측정되었던 점을 고려하여 주변의 다른 진동형이 나타나고 있는지를 검토하였다. 그 결과 Fig. 5와 6에서와 같이 57.45Hz와 62.4Hz의 고유진동수를 지닌 진동형이 Z방향으로 거동하는 모습을 확인하였다.

이 결과로부터 배관계는 동적 고유특성이 가진력에 거의 일치하거나 근접하고 있어 공진의 영향권에 있기 때문에 측정당시 일정 위치에서 Y와 Z방향으로 동일 특성주파수를 가진 과도 진동이 발생되었다고 정리할 수 있다.

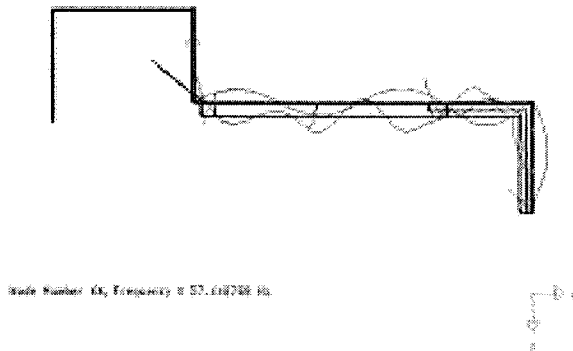


Fig. 5 Mode Shape at 57.45Hz

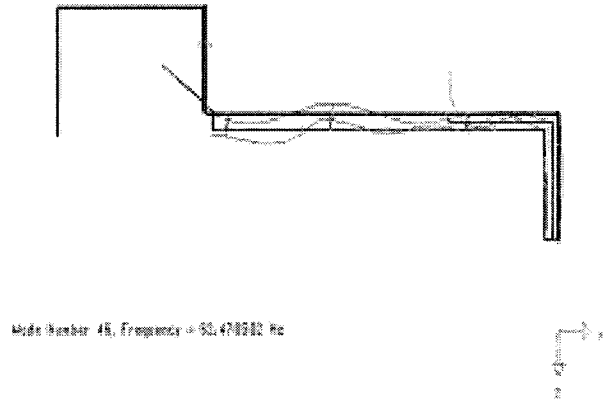


Fig. 6 Mode Shape at 62.4Hz

4. 배관계의 개선

배관계의 과도 진동현상을 없애기 위한 개선작업은 현장의 조건에 종속적으로 만족시켜야 하는 상태였다. 즉, 이상적인 해석을 전제로 곧바로 실행에 옮기기에는 현장의 여건이 매우 열악하기 때문에 배관계의 지지점 변경, 배관계의 형상이나 길이의 변화, 적용시기 등을 현장의 조건과 반복적으로 비교검토하면서 실행해야 했다. 따라서 현장의 조건을 최대한 반영하면서 개선 모델을 설정한 후 최적의 결과도출될 때까지 계속 수정과정을 반복하였다.

4.1 배관계 지지점의 단순화와 고찰

문제가 발생하였던 배관계의 모델은 적용되던 지지점이 다소 복잡하고, 설치위치가 많아서 약간의 지지점 변경이나 추가로는 고유진동수가 크게 변화하지 않고 변경 가능범위도 매우 적었다. 따라서 모델을 단순화하면서 접근이 용이하도록 지지점을 최소화 시키는 작업을 먼저 실시하였다.

배관계의 지지점을 최소화한 결과 전체적인 고유진동수에 따른 진동형이 20Hz이하에서 상당히 많이 나타나고 있었으며, 그 이상의 고유진동수에서는 변화폭이 매우 크게 나타났다. 따라서, 고유진동수를 변경시키기 위한 변경가능 범위도 증가하였다.

지지점을 최소화한 상태에서 고유 동특성을 검토한 결과 터빈-발전기의 회전주파수(60Hz)와 발전기 자체의 전기적인 가진요소(120Hz)와 근접하는 진동형은 나타나지 않았다. 그러나, Fig. 7, 8과 같이 30Hz에 근접한 고유진동수별 진동형이 나타나고 있었다. 사실상 현장의 조건을 고려할 때 문제의 모델을 60Hz 주변에서 진동형이 나타나지 않도록 개선하는 것이 가장 중요한 문제이겠지만, 실제 발전기의 하부에는 다수의 회전체, 상분리 모션 등으로 인해 여러 가지 가진력 요소가 존재하고 있어 30Hz, 60Hz, 120Hz 등 주요설비의 가진요소와 간섭 여부를 확인하는 것도 매우 중요한 일이다. 따라서 60Hz와 120Hz와의 공진가능성이 없는 양호한

상태를 유지하면서 Fig. 7, 8에 나타난 현상이 나타나지 않는 효과가 있음을 알 수 있었다. 도록 해결방안을 검토하여야 했다.

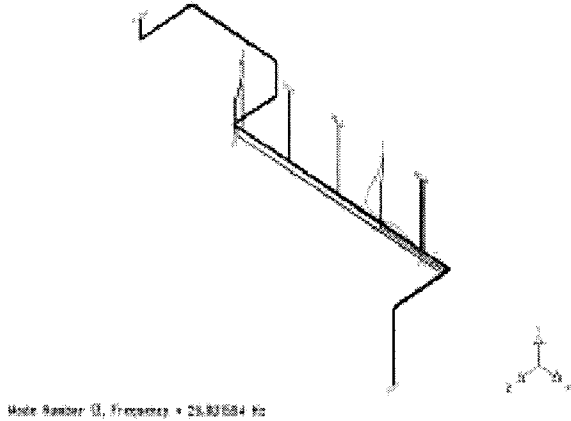


Fig. 7 Mode Shape(at 29.8Hz) of the 1st Revised Model

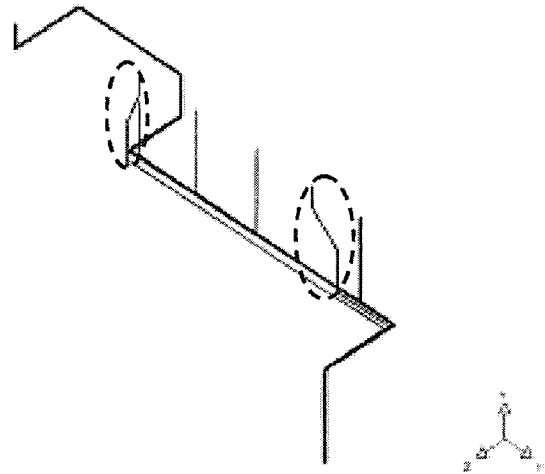


Fig. 9 2nd Revised Piping System Model

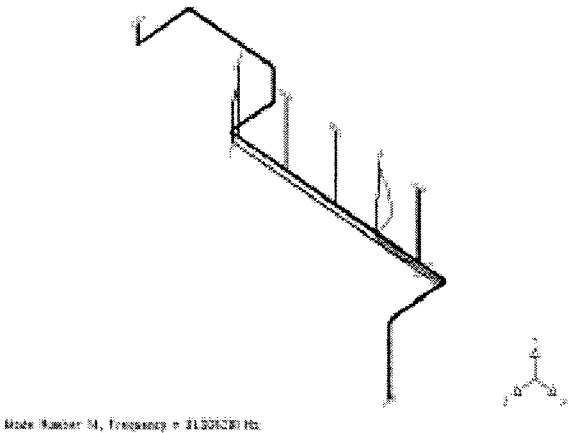


Fig. 8 Mode Shape(at 31.3Hz) of the 1st Revised Model

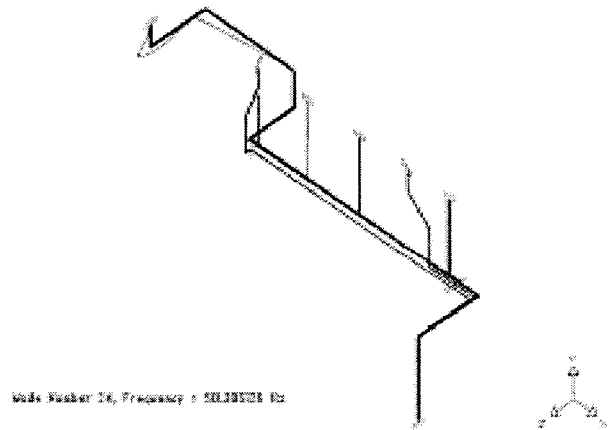


Fig. 10 Mode Shape(at 50.4Hz) of the 2nd Revised Model

4.2 배관의 유효길이 변경과 고찰

Fig. 7, 8에서 나타난 고유진동수를 변화시키기 위해서는 지지점간 배관의 유효길이를 변화시키는 방법으로 접근하기로 하였다. Fig. 9에 나타난 점선부위가 이전의 모델과 바뀐 부분이다. 변경전과 비교하면 발전기에 연결되는 상부의 완전고정점으로부터 다음 지지점까지의 길이에 변화를 준 것이다. 이렇게 변경한 상태에서 배관계의 동적 고유특성을 분석한 결과를 살펴보면 이전 모델에서 나타났던 30Hz 주변의 고유진동수가 25Hz이하로 변경되었으며, 60Hz, 120Hz의 주변에서도 고유진동수는 발견되지 않았다. 참고로 최종 개선된 모델에서 60Hz에 가장 근접한 고유진동수와 진동형을 살펴보면 Fig. 10, 11과 같이 50.4Hz와 73.9Hz에서 동적 고유특성이 나타나는 것을 알 수 있다.

결국 이와 같이 지지점간의 거리를 변화시키게 되면 전체 시스템에는 영향이 적으면서 국부적으로 고유진동수가 변화

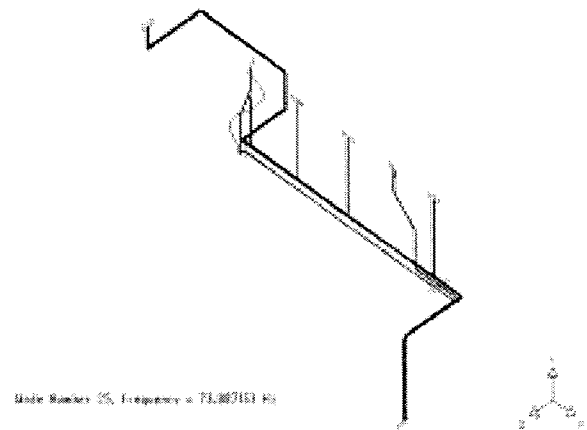


Fig. 11 Mode Shape(at 73.9Hz) of the 1st Revised Model

4. 결론

유한요소 모델을 생성하고 해석을 수행하여 과도진동의 원인을 분석하였고, 이것이 공진에 의한 현상이었음을 확인하였다. 또한, 배관계의 개선을 위하여 현장의 조건에 맞추어 배관의 지지점을 최소화 하였고, 지지점간의 유효길이를 변화시켜 배관계 전체의 동적 특성을 유지하면서 국부적으로 문제발생의 소지가 있는 부분에서도 최상의 상태가 될 수 있는 결과를 얻게 되었다.

소형 배관계에서는 고유진동수를 공진영역으로부터 벗어나도록 하기 위해서 구속방법의 변화, 지지점의 변경, 배관 경로 및 형상의 변경 등의 방법 등을 활용하게 된다. 그러나, 본 논문의 경우와 같이 설치 현장의 조건이 열악할 경우 배관계에 대한 큰 변경작업이나 지지점을 다수 추가하는 방식은 좋은 결과를 가져오기 매우 어렵다. 따라서, 최적의 결과를 도출하기 위해 지지점의 개소를 최소화하여 고유진동수의 크기가 커질수록 변화폭이 커지도록 해줌으로써 고유진동수의 변경을 위한 문제 접근이 용이하도록 하고, 국부적으로 공진 범위내에 존재하고 있는 배관의 고유진동수 문제는 해당 범위의 지지점 사이에서 배관에 대한 유효길이를 변화시키는 방법이 매우 효과적이었다.

참 고 문 헌

- (1) EPRI, 1988, Piping System Damping Evaluation, EPRI, California.
- (2) Morgann, K. S, 1986, Calculator Programs for Pipe Stress Engineering, John Wiley & Sons, New York
- (3) Stijgeren, E. V., 1985, Recent Advances in Pipe Support Design, ASME
- (4) Algor Inc., 1999, DOCUTECH, Algor Inc., Pittsburgh
- (5) Algor Inc., 1993, PipePlus Reference Manual, Algor Inc., Pittsburgh