

화력발전소 고온 증기배관 실시간 변위감시 시스템 개발

현중섭[#], 이영신^{*}

Development of On-line Displacement Monitoring System for High Temperature Steam Pipe of Fossil Power Plant

Jung Seob Hyun[#], Young Shin Lee^{*}

ABSTRACT

Most domestic fossil power plants have exceeded 100,000 hours of operation with the severe operating condition. Among the critical components of fossil power plant, high temperature steam pipe systems have had a many problems and damage from unstable displacement behavior because of frequent start up and shut down. In order to prevent the serious damage and failure of the critical pipe system in fossil power plants, 3-dimensional displacement measurement system was developed for the on-line monitoring. Displacement measurement system was developed with a use of a LVDT type sensor and two rotary encoder type sensors. This system was installed and operated on the real power plant successfully.

Key Words : On-line monitoring system(실시간감시시스템), LVDT(변위측정자기센서), Piping support(배관지지장치), High Temperature Steam Pipe(고온증기배관), Fossil Power Plant(화력발전소)

1. 서론

최근 국내 발전산업의 급격한 환경변화는 화력 발전소의 운영조건을 더욱 가혹화 하고 있어, 화력 발전소의 배관, 보일러, 터빈설비들은 잦은 기동, 정지 및 부하변동 등으로 인해 다양한 손상을 받고 있다. 실제로, 20 년 이상 장기간 사용한 발전설비의 정밀 수명진단 결과에서도 주증기관(main steam pipe), 고온재열증기관(hot reheat pipe) 등 400 °C 이상의 고온 증기배관에서 지지장치(support)의 이상작동 및 절손 등으로 배관 열팽창이 정상적으로 팽창되지 못해 장시간 인근 구조물과의 간섭이나

구속으로 인해 배관의 파열 등 손상사태가 급증하고 있다.¹⁻² 현재 운전중 배관에 설치된 지지장치는 배관의 자중과 열팽창하중을 지지하면서 스프링 작동으로 수직방향의 변위를 지지하는 다수의 수직지지장치(hanger)가 설치되어 있다. 그러나, 이러한 지지장치들은 수직방향으로만 변위가 측정되며, 장기 운전으로 인한 이물질 또는 하중변화로 인해 내부 스프링이 고착(stick) 또는 절손될 경우, 배관은 3 차원 방향으로 설계범위를 초과하는 과도한 변위를 발생시켜 구조물과 간섭 또는 구속이 발생, 배관 균열 등 운전정지를 유발시키는 심각한 손상이 발생되고 있다. 따라서, 화력발전소 운

접수일: 2004 년 8 월 11 일; 게재승인일: 2005 년 4 월 15 일

교신지자: 한국전력공사 전력연구원 발전연구실

E-mail jshyun@kepri.re.kr Tel. (042)865-5332

* 충남대학교 기계설계공학과

전중 고온배관의 실시간 3 차원 변위를 측정 및 감시하여 사전에 배관 손상을 예방할 수 있는 실시간 변위감시 시스템 개발이 매우 필요한 실정이다.³

본 연구에서는 화력발전소 고온 증기배관의 운전중 실시간 변위감시시스템을 개발하고자 배관의 3 축 방향 변위를 실시간으로 측정할 수 있는 변위 측정장치, 측정장치로부터 취득된 데이터를 발전소 중앙제어실로 전송하여 원격으로 실시간 데이터를 감시할 수 있는 데이터 측정/감시 시스템을 개발하였으며, 실제로 “P”화력발전소 고온 증기배관 3 개소에 설치하여 취득된 측정결과와 초기 건설시 설계값 및 상용 배관해석 프로그램인 PipePlus 를 이용한 해석결과와 비교함으로써 배관변위 감시시스템의 유효성 및 적용 기틀을 마련하고자 한다.

2. 배관변위 측정장치 개발

2.1 이론적 배경

고온증기배관의 운전중 공간상의 3 차원적 변위를 측정하기 위해서는 Fig. 1 과 같이 구면좌표계를 사용하여 한 고정점과 다른 이동점에 대한 거리와 각도를 측정하여 직교좌표계로 변환하여야 한다.

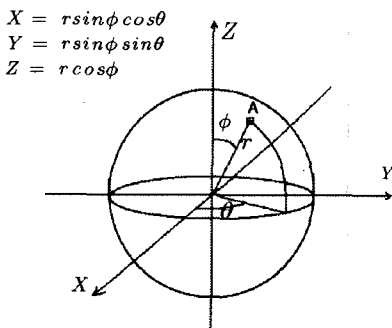


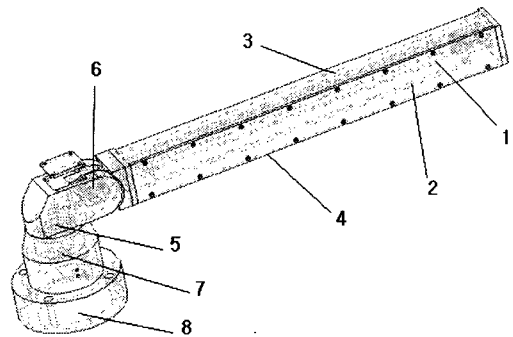
Fig. 1 3-dimensional spherical coordinates

따라서, 공간상의 한 점에 대해 두각과 거리를 측정하면 직교좌표로서 3 차원 변위를 측정할 수 있으며, 1 개의 LVDT 는 공간까지의 거리 r 을 측정하고 2 개의 Encoder 는 2 개의 각도 θ , ϕ 를 측정한다. 공간상의 한 점은 배관이며, 고정점으로부터 배관까지의 거리 r 은 LVDT 가 연결되어 변위발생시 LVDT 내의 rod 이동에 따라 LVDT 내부 자기장

의 변화를 전기적 신호로 변환하여 배관까지의 거리를 측정하며, Encoder 는 접촉부의 각도를 검출하기 위해 회전으로 인해 내부 디스크에 새겨진 눈금을 센서가 읽는 형태로 각도를 검출한다.

2.2 배관변위 측정장치 제작

고온배관의 운전중 3 차원 변위를 측정하기 위해서 LVDT, Encoder, Bearing 등 주요부품을 이용하여 Fig. 2 와 같은 3 차원 변위 측정장치를 설계하고 실제 제작하였다.



번호	명칭	기능
1	LVDT rod	고정점부터 동점까지의 거리측정
2	LVDT guide	외부환경으로부터 LVDT 보호
3	LVDT body	LVDT rod 의 이동시 자력발생
4	Guide support	LVDT guide 경로지지 및 보호
5	Bearing	마찰력 최소화 및 각도측정점 제공
6	Encoder 1	고정면으로부터 LVDT 의 각도측정
7	Encoder 2	고정면상의 회전각 측정
8	Fixture	벽면고정을 통한 강성유지

Fig. 2 3-dimensional displacement measuring device

변위 측정장치의 구성품은 배관접촉부와외의 거리 측정을 위한 LVDT rod, rod 이동에 따른 자력을 발생시키는 LVDT body, 회전으로 인한 마찰력과 각도의 측정점을 제공하는 Bearing, 고정점으로부터 360° 범위내에서 2 개의 회전각을 측정하는 2 개의 Encoder 와 배관 인근에 I-Beam 등 구조물에 고정시켜 측정장치의 강성을 유지시키는 Fixture 로 이루어져 있으며, 재질은 중량감소를 위해 알

루미늄합금으로 제작하였다. 장치의 크기는 Fixture 중심으로부터 LVDT rod 끝단까지 820 mm 이며, LVDT body 는 74x74 mm 이다.

배관변위 측정지점과 연결되는 장치의 끝단에는 3 차원 공간으로 자유롭게 이동될 수 있도록 유니버설조인트를 설치하였다. 유니버설 조인트에 의해 접촉부는 모멘트 Free 가 되고 접촉부는 3 차원 공간상의 한 점으로 이동할 때 구면좌표계에 의해 3 차원 변위가 계산된다.

3 차원 변위측정장치의 정확성을 확인하기 위해 별도로 3 축 변위 실측장치를 제작하여 변위측정장치의 정확성을 평가하였다. 3 차원 변위측정장치 상단에 설치된 유니버설조인트를 실측장치에 연결하고 실측장치에 임의의 변위를 설정하여 이동시키면 실측장치의 각 3 축 방향으로 미끄럼베어링을 통해 발생하는 변위를 디지털 버니어캘리퍼스와 구조가 동일한 Linear scale 을 부착하여 디지털 신호로 0.01 mm 까지 변위를 측정되도록 하였다. 따라서, Table 1 과 같이 임의로 4 점의 위치를 부여하고 데이터를 측정하였으며, 그 결과 오차범위가 -0.09 ~ +0.15 %로서 변위측정장치의 정밀도를 평가할 수 있었다.

Table 1 Comparison of true and measured values

구분	참값(mm)			측정값(mm)		
	x	y	z	x	y	Z
위치 1	300	300	300	300.12	300.40	300.39
위치 2	400	400	400	400.09	400.22	400.23
위치 3	250	350	300	249.87	350.16	300.28
위치 4	200	300	400	199.82	300.44	400.15

3. 변위데이터 측정/감시시스템 개발

배관변위 데이터 측정시스템은 3 차원 배관변위 측정장치로부터 얻어진 3 차원 변위 데이터를 발전소 중앙제어실까지 전송하는 시스템이다. 시스템은 각 3 개의 장치로부터 얻어진 아날로그 신호를 디지털 신호로 전환하여 중앙제어실에 설치된 local server 까지 통신케이블을 통해 데이터의 손실없이 전달되도록 구성하여야 하며, 운전원이 편리하게

감시할 수 있도록 프로그램을 개발 하였다.^{4,5}

3.1 데이터 전송방식

배관변위 측정장치로부터 얻어진 신호는 아나로그 신호로서 2 개의 Encoder 에서 Digital Output 20 bit 와 LVDT 에서 Analog Output 1CH (0~10V)이 출력되며, 이러한 A/D 변환된 디지털 신호를 중앙 제어실의 local server 까지 전송하여야 한다. 전송 방법은 TCP/IP 방식, RS232 & RS 485 방식, 고주파 영역대 라디오 전송방법 등이 있지만 라디오 전송 방법인 경우, 장기간 사용시 열악한 가동환경과 내구성, 신뢰성측면에서 적용하기에는 어렵다. 또한, 데이터의 소멸 및 노이즈(noise)를 방지하기 위해서는 측정기에 AD converter 와 terminal 을 통해 연결 및 증폭하여 데이터를 전송해야 한다.

따라서, 본 연구에서는 변위 측정 장치 간 또는 변위 측정 장치와 콘트롤 PC 간의 데이터 전송은 RS-485 시리얼 통신 방식으로 DC ± 24 V 를 사용하였다.

3.2 변위측정/감시 프로그램

발전소 운전중 고온 증기배관의 거동을 측정, 감시를 위해 전용프로그램을 개발 하였다. Program tool 은 NI 사에서 개발된 LabVIEW 를 이용하였으며, 모니터링 화면은 control 과 monitor part 로 나누어 구성하였다.

프로그램의 control part 는 Fig. 3 과 같이 상단에는 배관에 설치된 system 1, 2, 3 총 3 개의 장치로부터 x, y, z 방향의 변위가 실시간으로 그래프로 나타나며, 하단에는 배관 가동전 초기위치값(initial position)과 각 방향의 설계 또는 해석변위값(limit position)을 입력하여 운전시 각 방향의 측정변위가 설계변위를 초과할 경우 현재의 녹색부분이 적색으로 변하여 알람을 나타낼 수 있다. 또한, 측정되는 데이터는 실시간으로 시간(hour)과 초(sec) 간격으로 데이터를 저장할 수 있으며, 초기설정후 측정시작 버튼을 누름과 동시에 측정이 시작되도록 구성하였다.

프로그램의 monitor part 는 Fig. 8 과 같이 보일러에서 터빈까지 고온배관의 정지중(cold state) 및 운전중(hot state)형상과 변위측정장치가 설치된 위치를 나타내며, 각 위치의 운전중 x, y, z 변위의 벡터합을 실시간으로 나타내 준다.

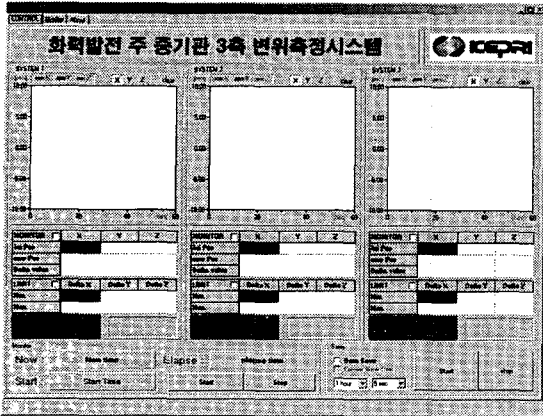


Fig. 3 Displacement monitoring program(control part)

4. 배관변위 측정장치의 설치

4.1 설치위치 선정

배관변위 측정장치의 설치위치는 고온증기배관이 이상거동시 원인분석을 용이하게 하기 위해 Fig. 7 과 같이 증기배관중 주증기관의 보일러 상부(MS-2), 중간지점(MS-12), 터빈입구부(MS-23) 총 3 개소의 수직지지장치(hanger) 위치에 설치하였다. 각 측정위치에서 배관에 연결부분은 측정장치를 배관 표면에 직접 연결할 경우, 장기운전시 배관과의 용접부의 손상으로 배관 모재에 미치는 영향이 클 수 있으므로 Fig. 4 와 같이 수직지지장치와 연결하기 위한 배관 수평지지대(support) 부위에 설치하였다. 배관 지지대 부위는 배관과 수직지지장치를 연결하기 위해 수평구조물로서 배관과 완전 고정되어 배관의 열팽창 변위 발생시 수평지지대도 동일하게 변위가 발생된다. 따라서, 배관변위 측정장치는 I-beam 형태의 지지대 중심에 고온 그립(grip)을 이용하여 연결하였다.

4.2 측정장치 설치

측정장치와 배관 지지대와의 연결하기 위해서는 3 개의 부품이 필요하다. 왜냐하면 화력발전소 주증기관의 내부증기온도가 540 °C 정도임을 감안할 때, 내열성과 강성, 내부식성 등을 만족하여야 하며, 이러한 조건을 만족하기 위해서는 측정장치를 지지대에 고정하기 위한 고온 그립, 배관으로부터 측정장치에 열전달을 차단하기 위한 방열 KIT, 변위측정장치의 끝단을 공간상에 회전을 원활하게

하기 위한 유니버설조인트가 설치되어야 한다.

따라서, 고온그립은 Cr 도금 및 열처리를 하였고 방열 KIT 는 알루미늄 방열판과 pyrex 유리로 가공된 연결봉을 이용하여 제작됨으로써 배관내부의 열을 충분히 방출 및 차단시켜 장치로의 열전달을 최소화하였으며, 유니버설조인트는 고온용 하우징과 베어링을 이용하여 공간으로 회전시 3 축으로의 모멘트를 발생치 않도록 설계하였다. Fig. 5 는 터빈입구부 MS-23 지지장치 부위에 설치완료된 배관변위 측정장치의 모습을 나타낸다.

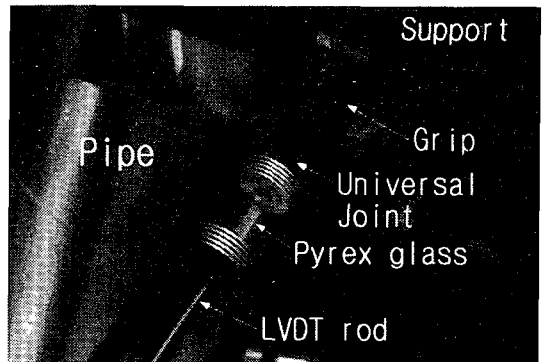


Fig. 4 Universal joint type grip

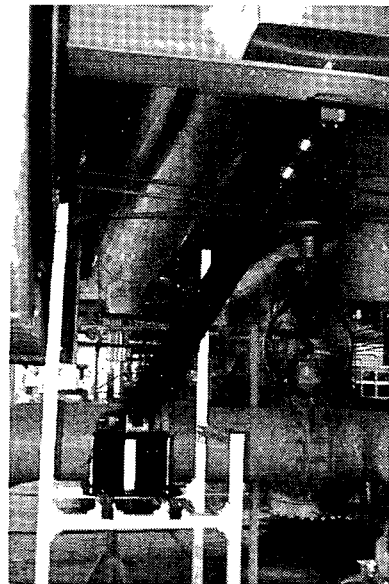


Fig. 5 Installation of displacement measuring device

5. 배관변위감시시스템의 적용

5.1 증기배관의 표준선도

화력발전소의 운전모드는 설비의 유지보수를 위해 예방정비기간(overhaul)후 기동하는 냉간기동(cold start-up), 전력수요에 따라 주말정지등의 기간 후 기동하는 온간기동(warm start-up) 방식이 대표적이며, Fig. 6 은 국내 500MW 급 “P”화력발전소의 냉간기동시 주증기관의 각 기동시간에 따른 증기온도 및 압력곡선을 나타낸다. 최대출력시 주증기관의 온도는 540 ℃, 압력은 16.57 MPa 이며, 증기온도 300 ℃와 증기압력 5.88 MPa 까지는 보일러 기동후 완만한 기율기를 유지하다가 터빈 회전후 급격한 온도와 압력상승과 함께 출력이 증가된다.

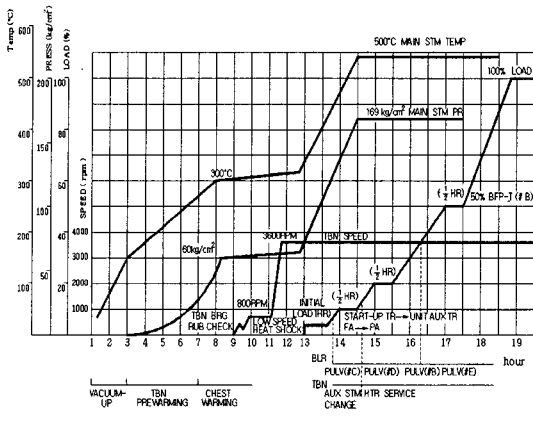


Fig. 6 Cold start-up schedule of the operating

5.2 측정지점의 3 축변위 해석

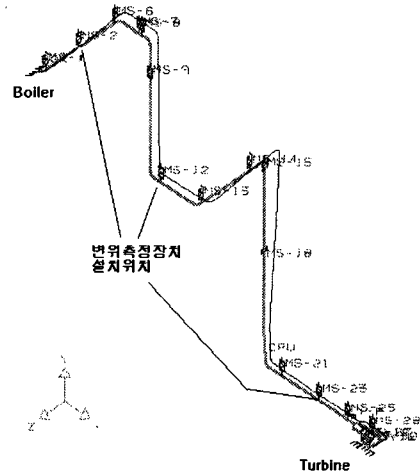
3 개소 측정지점에서의 배관변위감시시스템의 유효성을 평가하기 위하여 배관전용 해석 프로그램인 Pipeplus⁶를 이용하여 Fig. 7 과 같이 배관을 3 차원 모델링하고 변위해석을 수행하였다. 배관 모델링은 배관 및 지지장치 도면에 근거하여 모델링 되었으며, 배관형상(OD 635 x 90.6 t)과 재질(SA335 P22) 데이터는 설계자료로 입력되었다.

보일러출구에서의 배관시작점과 터빈입구부인 배관 끝점은 배관 설계시 설계변위를 경계조건으로 입력하고 배관내 설계 증기온도 및 압력을 부여하였다. 배관 자중 및 열팽창하중을 지지하는 수직지지장치(hanger)는 총 32 개이며, 각 지지장치의 하중은 설계하중을 입력하였다. 배관변위 해석결과,

냉간기동 표준선도로부터 최대출력(100 % Load)인 540 ℃, 16.57 MPa 하에서 각 측정장치 설치부위의 배관변위는 Table 2 와 같이 계산되었다.

5.3 측정지점의 3 축변위 측정결과

Fig. 8 은 최대출력시(500MW) “P”화력발전소 주증기관 3 개소에 설치된 변위감시 프로그램의 monitor part 화면 모습을 나타내며, 각 수치는 운전 중 설치개소 3 개소의 실시간 x, y, z 변위의 벡터합을 나타내고 있다. Fig. 9 는 설치초기부터 최대출력에 이르기까지 시간에 따른 3 개소의 3 축 변위 및 벡터합(L)의 측정결과를 나타낸다.



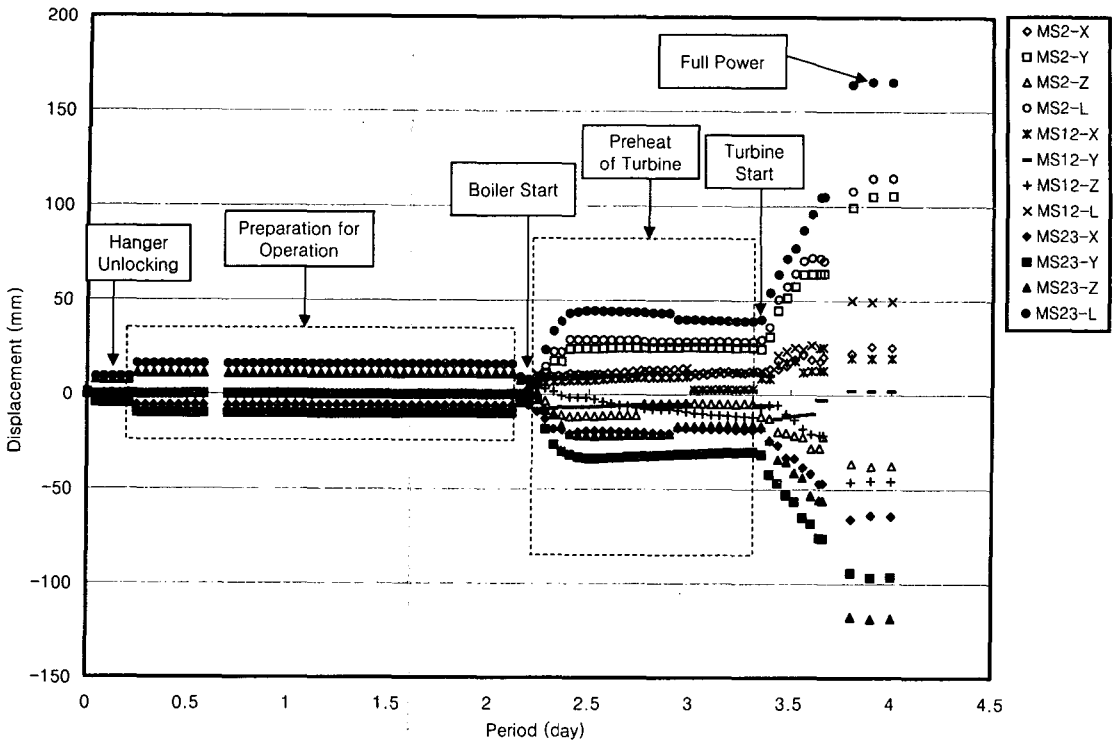


Fig. 9 3-dimensional displacement data of measuring devices

Fig. 9 를 통해 발전소 기동전부터 최대 출력에 이르기까지 배관 변위의 변화모습을 분석할 수 있었다. 발전소 정지상태에서 장치를 설치후, 운전전 수직지지장치(hanger)의 잠금(locking)을 해제하고 예열 등으로 인해 재가동을 준비하는 동안에도 변위가 발생되었으나, 이 시기에는 배관내 증기유동이 없이 보일러, 터빈측에서의 일부 열원에 의해 보일러측 MS-2 부위와 터빈측 MS-23 에는 작은 변위가 발생되고 중간부위인 MS-12 부위의 경우 변위가 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 또한, 보일러 기동과 함께 배관내 증기는 직접 터빈으로 유입되지 않고 바이패스(bypass)되므로 보일러 기동후에도 변위가 크게 증가하지 않으며, 터빈기동을 위한 예열작업후 터빈 기동후 최대출력까지 변위가 급격히 증가하는 경향을 나타내었다.

5.4 측정과 해석결과와의 비교

Fig. 9 와 같이 고온배관 3 개소에서 실시간으로

측정되는 데이터의 유효성을 평가하기 위해 제작사에서 초기 설계시 계산된 설계값, 배관해석 프로그램을 통해 최대출력에서 설계조건을 입력하여 해석된 데이터와 측정된 데이터를 Table 2 와 같이 비교하였다.

Table 2 에서 각 측정위치에서의 측정값, 설계값, 해석값은 양(+)-방향 및 음(-)-방향 측면에서는 각 수치들이 전 방향에서 일치하고 있으므로, 현재 배관계의 거동은 설계된 배관방향과 유사하게 열팽창 변위가 발생되고 있음을 알 수 있다. 그러나, 설계값과 해석값은 각 방향에서 거의 그 값이 거의 일치하고 있으나, 측정값은 각 방향의 수치가 설계 또는 해석값에 비해 MS-2 의 경우 최대 약 23 %, MS-12 의 경우 최대 약 30 %, MS-23 의 경우 최대 약 10 %의 오차가 발생되고 있다. 이러한 원인은 첫째, 양 끝단의 경계조건인 보일러출구 헤더 및 터빈입구에서의 운전시 열팽창 변위가 보일러 및 터빈 내부 열전달 및 열팽창이 설계변위에

도달되지 않아 발생한 원인으로 판단되며, 또한, 보일러 출구에 인접한 MS-2 와 터빈입구에 인접한 MS-23 의 변위오차 보다 배관 중간부인 MS-12 의 변위오차가 큰 것은 양 끝단에서의 열팽창변위의 오차로 인해 중간부에서 오차가 더 커진 것을 의미하고 있다.

결론적으로 각 측정값들이 3 축 변위의 어느 한 축으로도 설계값이나 해석값을 초과하지 않고 유사하게 나타남으로써 배관 변위가 정상적으로 발생되고 있음을 분석하였으며, 측정값이 설계 또는 해석값과 비교할 때 최대 측정오차가 $\pm 30\%$ 내에 있어 정량적 정확성을 가지며, 변위 방향이 일치하여 정성적인 경향이 일치하고 있으므로 본 배관변위측정시스템을 통해 실시간 배관 거동감시가 유효함을 확인할 수 있었다.

Table 2 Comparison of measuring, Designing and analyzing data (Unit : mm)

위치	분류	X	Y	Z	L
MS-2	측정값	22.6	106.8	-36.6	115.2
	설계값	27	110	-45	121.8
	해석값	28.9	112.6	-47.2	125.5
MS-12	측정값	13.3	2.8	-50.4	52.2
	설계값	18	3.5	-58	60.7
	해석값	18.9	3.8	-57.4	60.5
MS-23	측정값	-62.3	-98.3	-119.2	166.6
	설계값	-65	-105	125	175.7
	해석값	-64.3	-102.4	-130.1	177.6

6. 결론

화력발전소의 주요 배관은 구조상 3 차원적인 기하학적 형상을 가지고 있으며, 고온고압에서 운전되어 다양한 3 축 변위를 발생시키므로 초기 건설시 설계오류가 있거나, 장기간 운전시 과도한 변위에 의해 다양한 손상이 증가되고 있다. 따라서 본 논문에서는 고온고압의 주요배관의 3 차원 변위를 실시간으로 측정, 감시할 수 있는 시스템을 개발하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 배관의 3 차원 열팽창 변위를 측정하기 위하여 거리와 각도를 측정할 수 있는 LVDT, Encoder, 유니버설조인트를 이용하여 측정장치를 개발하

였다.

- (2) 측정장치로부터 취득된 데이터를 RS-485 시리얼 통신 방식을 이용하여 실시간으로 데이터를 측정하고 LabVIEW 프로그램을 이용하여 원격으로 3 축변위를 실시간 감시할 수 있는 프로그램을 개발하였다.
- (3) 변위측정장치로부터 취득된 실제 운전중 배관의 3 차원 데이터에 대한 평가를 위해 초기 설계시 배관 변위설계값, 배관해석 프로그램을 이용하여 설계조건을 입력한 해석값과 비교한 결과, 3 차원 각 데이터가 정량적, 정성적 경향이 일치함을 확인하여 실시간 배관감시가 유효함을 확인할 수 있었다.
- (4) 향후 본 시스템은 국내 여러 발전소 및 열병합, 석유화학 등 고온고압 배관에 확대 적용할 경우 주요 배관의 안정적 운전에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Ha, J. S. and Song, G. W., "A Study on the Life Extension Technology in the Fossil Power Plants," Technical Report, TR.97GS06.S2001.046, Korea Electric Power Research Institute, 2000
2. King, J. P., "Current Experience in Typical Problems and Failures with Boiler Piping Components and Supports," PVP-Vol. 376, Component Analysis and Evaluation, Aging and Maintenance, Pipe Supports, ASME, pp. 161-168, 1998
3. Flaman, M. T. and Mills, B. E., "Development of a Strain Gauge Based On-line Structural Integrity Monitoring System for Fossil-Fuelled G.S.," CEA Project No. 726 G 627, Ontario Hydro Research Division, USA, 1992
4. Hahn, B., Weber, J. and Nerger, D., "In-service Condition Monitoring of Piping Systems in Power Plants Requirements and Advanced Techniques," OMMI, Vol. 1, Issue 1, pp. 1-13, 2002
5. Takahashi, Y., "Trend of Operating Data Monitoring and Fatigue Evaluation System for BWR in Japan," SMIRT-12K. Kussmaul, North-Holland, pp. 265-270, 1993
6. Algor[R] PipePak, PipePlus Version 7.02, 2000
7. ASME Code for Power Piping, B31.1, 1998