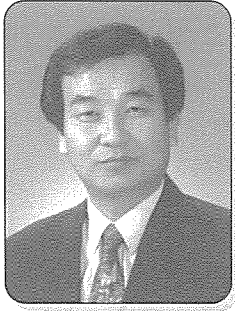


고온고압배관의 손상평가 및 실제 사례



한국전력공사 전력연구원
발전기계그룹 수명평가팀
팀장 하정수/공학박사
전화 : (042)865-5220

High pressure steam pipe in power plants is subjected to service conditions under which creep processes take place limiting the component's lifetime. To ensure a safe and economic operation it is necessary to get accurate information about the lifetime situation of single components as well as of the whole system. Careful evaluation is combined with FEM analysis, NDT, microstructure evaluation. Especially, 14MoV63 steel is used as material for main steam pipe for 30 years old power plants. In service inspections have shown an increasing number of cracks and creep cavities beside stress concentration parts. A detailed analysis came to the conclusion that lifetime has been consumed to a high degree, 80% level.

1. 서론

국내에서 장기간 (운전시간 10만 시간, 수명 15년 이상) 운전되고 있는 발전 및 열공급용 설비가 전체 설비의 60% 이상을 상회하고 있어 이러한 노후 취약설비에 대한 특별한 수명관리가 더욱 요구되고 있는 실정이다.

고온고압의 배관은 물을 증기로 변환하는 보일러로부터 최종적으로 전기를 생산하기 위한 터빈으로 또는 열을 공급하기 위한 설비로 고온 고압의 증기를 전달하는 중요한 설비이다. 주요 배관 중에서 주증기관은 가장 핵심의 배관으로서 200MW급 발전소의 경우

300m 이상의 길이와 외경 500mm, 두께 50mm 로서 540의 고온과 170kg/cm²의 고압의 증기를 이동시켜 주고 있어 재질열화가 우려되는 설비이다.

고온고압의 주요 배관은 용접으로 설치되어서 상대적으로 취약한 용접부 주변에서 수명이 소진되고 있으므로 용접부에 대한 특별한 관심이 요구되고 있다. 또한 많은 지지장치로 지지되고 있는 특성상 지지장치의 열화로 인하여 배관의 구속조건 및 진동 현상이 발생되어 열화를 가속시키므로 이에 대한 특별한 진단과 해석이 필요하게 된다.

30여년 전에 제작된 국내 설비 중 용접성이 취약한 DIN 14MoV63(0.5Cr0.5Mo0.25V) 강을 사용하고 있는데 최근들어 누설 사고 등이 급증하고 있는 형편이다. 한편 세계적으로도 장기간 사용함에 따라 빈번히 크리프 파손이 일어나는 사고가 발생한 사례가 있다.

따라서 본 고에서는 14MoV63 강을 사용하는 주증기관 손상을 평가하기 위하여 구조해석을 실시하고 이의 결과와 함께 금속 조직 검사 등을 통하여 수명을 평가한 사례에 대하여 기술하고자 한다.

Table 1 : Chemical composition of the 14MoV63 steel

Ni	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mol	V
bal.	0.1~0.18	0.01~0.35	0.4~0.7	0.35	0.035	2.0~2.5	0.9~1.2	0.22~0.32

2. 배관 재질의 특성

본 고의 주요 대상인 주증기관의 재질은 Table 1과 같다. 독일 DIN 규격으로서 주요 재질은 0.5Cr0.5Mo0.25V으로서 1935년 영국에서 개발되어 1954년 독일에서 과열증기의 배관재로 사용하기 시작하였다. Cr 함량이 동급의 타 재질에 비해 적게 함유된 반면 V를 0.35% 함유시켜 고온에서 강도를 높인 것이 특징이다.

그러나 용접조건이 매우 까다로와 용접절차와 열처리 과정에 세심한 주의가 요구되고 있으며 용접시 균열발생으로 시공초기에도 신뢰도가 떨어지고 있어 현재는 단종된 상태이다. 국내에서는 I 화력, Y 화력, H 화력의 3개 발전소에서 사용되고 있다. 최근 발전소 전체 수명평가를 종합적으로 실시한 I, Y 화력 발전소에서는 수명에 문제가 발생하고 있어 특별한 수명관리가 요구되고 있다.

3. 배관 손상평가 기술

배관의 손상을 정확히 평가하기 위하여는 배관해석을 통하여 취약부위를 선정하고 배관에서 응력이 집중하는 Y-piece, T-piece, Elbow, Joint 부위에서 설계 하중을 초과하는지 여부를 검토하여야 한다. 응력 해석법으로 선정된 취약부위 및 수명소비가 많을 것으로 예상되는 용접부위를 포함하여 진단 범위를 결정하여 이에 대한 균열 발생여부를 초음파검사, 자분탐상검사등의 비파괴 진단방법등으로 정밀진단하여야 한다. 또한 금속 미세조직의 열화를 평가하기 위한 방법으로서 레프리카를 채취하여야 한다.

3.1. 배관 응력해석 기법

장기간 사용한 화력발전소에서는 배관의 손상 상태를 정확히 평가하기 위하여는 배관계의 구조해석을 통한 최대응력과 변형량의 계산이 요구된다. 배관계의 응력 및 변형은 배관온도의 증가에 따른 열팽창과 배관 지지장치로 인한 구속조건 및 각종 진동 등의 원인에 기인한다. 배관 해석은 일반적으로 ANSYS와 ADL Pipe 등과 같은 범용 프로그램중에서 본 논문에서는 Pipeplus를 사용하였다.

3.1.1. 배관 모델링 및 각 행거 하중분석

Fig. 1은 각 행거 하중 및 배관응력을 계산하기 위한 모델링을 나타낸다. 각 배관라인은 I 화력에서 제공한 배관 및 행거도면을 바탕으로 모델링 되었으며, 각 행거는 미지의 하중(unknown load)으로 입력하고 설계온도와 압력하에서 각 행거에 미치는 하중을 계산하였다. Table 2는 프로그램에 의해 계산된 각 행거 하중(해석치)과 제작사에서 제공된 행거하중(설계치)

을 비교한 것이다.

Table 3에서 알 수 있듯이 S3, S6, S7 행거들은 각 설계하중이 운전시 지지하중보다 다르게 설계되어 있어 실제로 운전시 하중을 전혀 지지하지 못하는 것으로 나타난다. 이것은 기동시 설계하중에 도달하여야만 행거가 정상적으로 스프링이 작동하여 설계변위를 나타내나, 계산상 이러한 행거들은 전혀 지침이 작동하지 않는 것으로 계산되며, 실제로 불임 1의 건설후 '90년 1월에 측정된 지침측정치와 2000년 2월에 측정된 지침측정치에서 S3, S6, S7 행거들이 10년 이상 행거지침이 움직이지 않는 것으로 기록되어 있다.

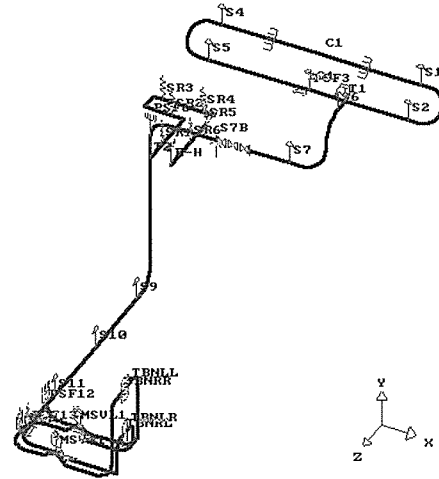


Fig. 1 주중기관 모델링 (배관및지지장치)

3.1.2. 해석하중을 이용한 배관응력해석 결과

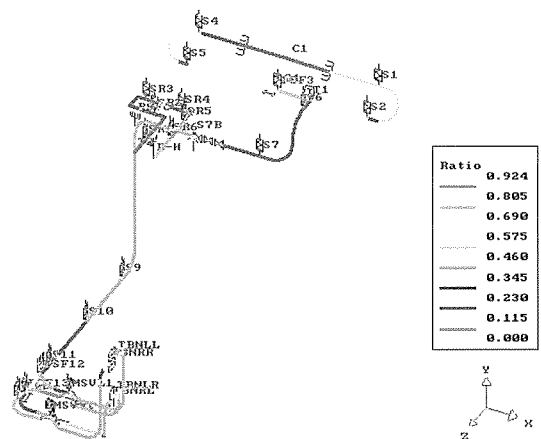


Fig. 2 해석하중 입력시 배관 응력해석 결과

본 결과는 해석값을 각 행거하중으로 입력하였을때의 응력해석 결과이다. 해석하중은 배관 모델링 후 운

전조건하에서 컴퓨터가 계산한 최적하중으로 각 행거에 작용하는 반력을 나타내며, Fig. 2는 이러한 조건하에서 배관허용응력 대비 응력상태를 나타낸다. 최대응력은 HP By-pass 배관일부와 터빈 MSV입구측에서 허용응력의 92% 수준으로 나타나며, 보일러측 T-piece 부근에서 60~80% 정도의 응력을 제외하고는 다른 배관에서는 35~65% 정도의 응력상태를 나타내고 있다.

3.1.3 설계하중을 이용한 배관응력해석 결과

본 해석은 제작사에서 설계한 행거하중으로 응력 해석한 결과이다. Fig. 3은 이러한 조건하에서의 초기 운전당시 당시 배관허용응력대비 응력상태를 나타낸다. 최대응력은 주증기관과 HP Bypass 배관 연결부와 Bypass배관 일부에서 허용응력대비 107%의 응력상태를 나타내고 있다. 이러한 응력상태는 일반적으로 배관설계시 허용응력의 65~75% 정도의 응력상태를 유지하도록 설계되어야 하나, 주증기관과 연결된 HP bypass 배관설계시 허용응력보다 20% 높게 설계되어 주증기관 연결부인 T-piece 주위에 응력을 증가시키고 있다.

Table 2는 각 행거위치의 응력값을 나타내고 있다. 최대응력 위치는 보일러 상부 T-piece와 HP By-pass, By-pass 배관 일부에서 발생되고 있다.

T-piece부 주위의 주증기관 용접부에 잦은 균열을 발생시키는 것으로 판단된다.

Table 2 각 행거 및 T-piece부의 응력해석 결과

Hanger No.	Hanger Type	Stress(KPa)	Allowable Stress(KPa)
S1	CSH	97,450	187,712
S2	"	52,060	
S3	"	135,426	
S3-bis	Linestop	128,005	
S4	CSH	114,533	
S5	"	60,072	
T-piece1	Tee	159,268	
S6	"	63,775	
S7	"	70,614	
PSF8	Rigid	91,343	
S9	CSH	96,735	
S10	"	61,544	
S11	"	62,337	
PSF12	Rigid	108,149	
PSF13	VSH	61,034	
S13-bis	Linestop	59,104	
T-piece2	Tee	195,534	
SR1	VSH	201,987	
SR2	"	141,521	
SR3	"	159,326	
SR4	"	85,369	
SR5	"	219,438	
SR6	"	167,062	

* CSH : Constant spring hanger,
** VSH : Variable spring hanger

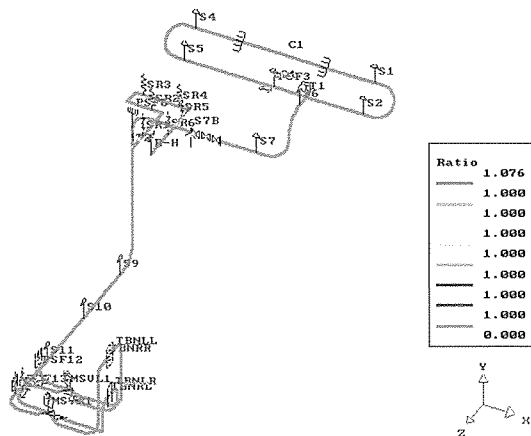


Fig. 3 설계하중 입력시 배관응력 해석결과

Fig. 4는 정상운전시 열팽창에 의한 변위해석결과를 나타낸다. 3차원 및 각 2차원 변위상태를 나타낸다. 터빈측의 배관변위는 매우 적으며 보일러 상부 곡관부와 수직배관 및 HP By-pass배관부에서 큰 변위를 나타내고 있다. 이러한 HP-Bypass 배관의 과도 변위는 주증기관과의 T-piece에 큰 응력을 야기시켜

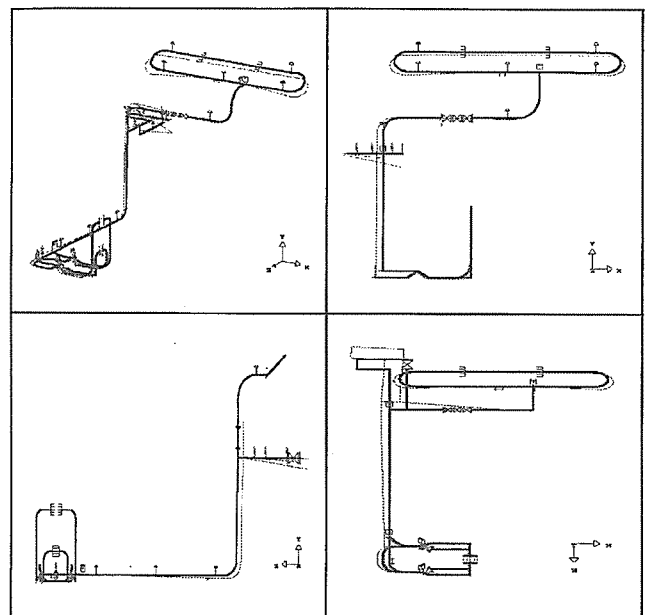


Fig. 4 설계하중시 배관변위해석 결과 (3차원 및 각 2차원 변위상태)

3.2. 배관 손상진단

3.2.1 비파괴 결함진단

주증기관의 결함 발생여부와 수명진단을 위하여는 다음과 같은 비파괴적 수명평가법을 사용하였다. 육안검사, 자분탐상검사, 초음파탐상검사, 초음파두께측정 등을 실시하였다. 주요 균열의 발생부위는 상기에서의 응력집중부와 거의 동일한 부위에서 발생하였는데 열전대 설치 용접부, T-Piece 부, HP-Bypass 연결부, Y-Piece 붕에서 길이 5~400 mm, 깊이 2~6mm 로서 연마로 제거를 하거나 일부는 재용접을 실시하였다. 결함의 대표적인 사례는 Fig. 5와 같다. 두께를 측정 한 결과는 36~41.2mm 로서 설계두께 35mm 이상으로서 양호한 상태이다.



Fig. 5 보조배관 연결부에서의 균열 발생

3.2.2 조직열화 평가

주증기관에서 국부적으로 응력이 높은 취약 용접부에서 금속조직 복제를 채취하였다. 레프리카를 채취하기 위하여 에머리 페이퍼를 이용하여 표면을 연마한 후 다이아몬드 페이스트를 문혀 미세 연마를 시행하였다. 마지막으로 Nital 2% 용액으로 부식시켜 레프리카를 채취하였다.

크리프 기공은 금속을 고온에서 장시간 사용할 때, 응력을 버티지 못하고 금속조직의 입계가 찢겨져 홀(hole)이 생기는 형상으로, 계속 사용하면 홀과 홀이 연결되어 균열로 발전되어 파손에 이르게 된다. 크리프 기공은 모재에 비하여 취약한 용접부에 먼저 발생되며, 용접부 보다 연성이 강한 모재에는 재질의 수명이 70%이상 소진한 후에 나타나는 것이 일반적이다. Y화력과 I화력 모두 현재 진단 부위인 용접부와

용접부 주위의 모재부에서 다량의 크리프 기공이 Fig. 6과 Fig. 7에서와 같이 관찰되고 있다.

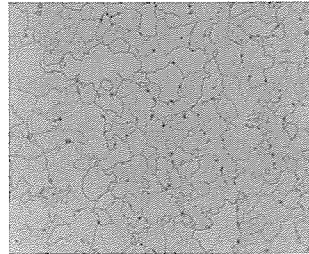


Fig. 6 BR-4부의 모재부 크리프 기공

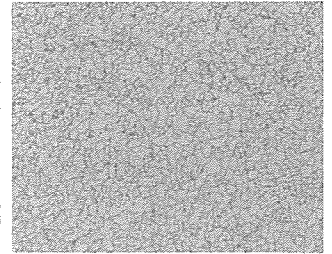


Fig. 7 C-2부의 모재부 크리프 기공

3.2.3 용접부에서 Type IV 균열발생

용접부에 발생하는 균열은 Fig. 8과 같이 균열 발생부위에 따라 Type I, II, III, IV으로 나눌수 있음. 여기에서 용접부에서 발생되거나 용접부에서 발생되어 열영향부로 성장한 Type I, II 균열은 주로 용접시에 발생된 용접결함이며, 용접부와 열영향부 사이의 용융선에 인접하여 발생된 Type III 균열은 열처리후 발생하는 재열균열로 주로 용접초기에 발생하는 균열이다.

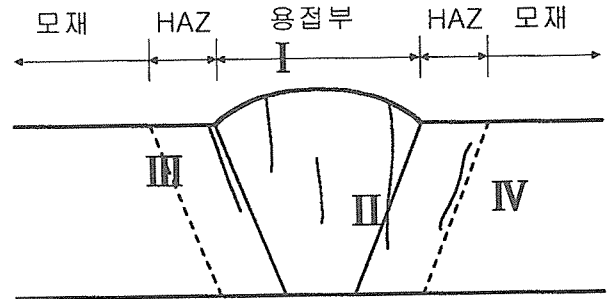


Fig. 8 용접부에 발생하는 균열의 종류

발생된 결함의 대부분은 용접부와 모재 사이에 발생된 Type IV 균열로(Fig. 9 참조), 이 균열은 장기 사용시 크리프에 의한 재질열화로 수명말기에 발생하는 결함이다. Type IV 균열은 균열제거 또는 용접에 의해 정비된 경우에도 재질 내부에 남아있는 기공을 완전히 제거하기 어려우므로, 단 기간 안에 재질 내부에 남아있는 크리프 기공이 성장하여 표면으로 성장하여 파손에 이르게 된다. 따라서 EPRI(미국 전력연구소) 등의 외국 전력사에도 Type IV 균열발생시 용접에 의한 정비는 단기적인 정비대책으로 시행

하고 있으며, 장기적으로는 단관 또는 전체 교체 등을 추천하고 있다.

3.3 주증기관 손상해석 및 수명평가

3.3.1 손상원인 분석

본 주증기관 1970년대 말에 준공되어 1982년부터 부분적으로 균열이 발생되어 HP By-pass와의 연결부(T-piece)주위는 최대 3회까지 용접보수 되었다. 이러한 현상은 수직배관 전체와 터빈입구부 T-piece에서 발생되고 있으며, 대부분 용접부에 균열이 발생되어 나타나고 있다. 이러한 손상의 원인은 크게 분류하면 다음과 같다.

첫째, Table 2에서 알 수 있듯이 이미 설계상태에서 주증기관 T-piece부, HP by-pass Joint, Y-piece에서 허용응력에 근접하는 높은 응력이 발생되어 재질열화를 가속시켜 크리프 수명소진율이 80 이상으로 소진된 것으로 판단된다.

둘째, Fig. 3에서 알 수 있듯이 설계상태의 자료를 입력하여 응력을 계산한 결과, HP By-pass배관에는 허용응력을 초과하는 응력상태(107%)를 나타내며, Fig. 4에서처럼 기동시 과도변위가 발생되어 역으로 배관진동이 응력집중부인 T-piece부 용접부에 영향을 미쳐 시스템 굽힘응력(bending stress)을 야기시키는 것으로 판단된다.

셋째, 일부 지지장치인 행거는 10년이상 행거지침이 전혀 이동되지 않아 변위 이동량이 없고 Rigid화되어 행거의 이동량만큼 추가적인 전단응력을 발생시켜 T-piece 용접부의 Type IV 균열 발생을 촉진시킨 것으로 판단된다.

3.3.2 종합 수명평가

I 화력과 Y 화력 주증기관에 대하여 배관의 응력 해석과 비파괴 결함탐지, 금속조직복제시험 등을 종합적으로 수행하여 수명을 평가한 결과 응력집중부에서 결함이 많이 발생하였으며, 재질열화에 의하여 크리프 기공이 연결되어 표면과 내부에서 기공이 다수가 발생되고 있으며, 모재에서도 많은 크리프 기공이 관찰되고, 일부는 TypeIV 균열로 발전하고 있으므로 전체적으로 배관의 수명이 80% 이상 소진된 것으로 판단된다. 따라서 본 주증기관은 향후 2년 이내에 교체하는 것이 바람직하다고 판단된다.

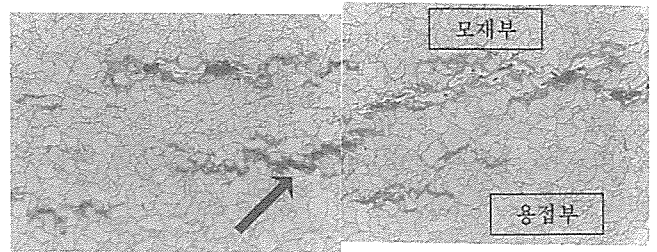


Fig. 9 모재부에서 크리프 기공이 균열로 연결되어 성장한 형상

4. 결론

14MoV63 강을 사용하는 30여년간 사용한 노후화된 주증기관을 손상해석을 실시하고 수명진단을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. I 화력 주증기관의 응력을 해석한 결과 T-piece 부, Y-piece에서 허용응력에 근접하는 높은 응력이 발생하였으며 HP by-pass Joint에서는 허용응력을 107%까지 초과하고 있음을 알 수 있었다.

나. 금속의 미세조직을 분석하기 위하여 일부 취약부위 중 용접부 주변에서 레프리카를 채취하였는데 용접부는 물론하고 모재부에서도 크리프 기공이 발생되고 있음을 확인하였다.

다. 일부의 기공은 성장하여 TypeIV 균열로 발전하고 있으므로 전체적으로 배관의 수명이 80% 이상 소진된 것으로 판단된다

▶ 참고문헌 ◀

- (1) R. Viswanathan, "Damage Mechanisms and life Assessment of high temperature Components" ASM,, 1989
- (2) G.A. Webster "High Temperature Component Life Assessment" Chapman & Hall, 1993
- (3) EPRI Report NP-5881-LD, "Assessment of Remedies for Degraded Pippings", 1988.
- (4) B.K. Haarmann, "Retrofitting of Old Steamline Components by P91", 1992.