

원자로냉각재계통 중간배관과 동적거동 구속장치와의 접촉으로 인한 배관 건전성 평가

양준석, 김범년* · 오상권, 오창훈** · 이대희***

Evaluation of Structural Integrity of Crossover Leg Piping System with Dynamic Whip Restraints

J.S. Yang, B.N. Kim, K.W. Lee, S.K. Oh, D.H. Lee

Key Words: Reactor Coolant System (RCS), Crossover Leg, Pipe Whip Restraints (PWR)

Abstract

Interference between the crossover leg of the reactor coolant system (RCS) and the pipe whip restraints (PWR) has brought a degradation issue of the integrity of the Reactor Coolant System in Westinghouse type nuclear power plants (NPPs) of Korea. According to the gap inspection carried out during planned overhaul (Year 2000), interference between the crossover leg and the PWR was found in each RCS loop. This plant has had the high vibration problem on the RC pump 'B'. The reason for the high vibration in the RC pump 'B' had been massively surveyed and it was found that the crossover leg of RCS contacted with the PWR in hot condition. Since the contact between the crossover leg and the PWR changes the dynamic characteristics of the piping system for the RCS, this is considered as one reason for the high vibration. And a possibility of overstress on the crossover leg due to the contact with the PWR should be evaluated. Through performing RCS integrity analyses, subsequent actions were initiated to increase the gap between those parts. As the results of the appropriate separation between two parts, it was reported that there was no unusual noise or vibration during plant heat-up. In this paper, the evaluations for the gap between the crossover leg and the PWR and the structural integrity due to loop binding is described.

1장 서론

미국 10 CFR Part 50 Appendix A GDC(General Design Criteria) 4나 Standard Review Plan 3.6.2¹⁾에서는 안전성에 중요한 구조물, 계통 및 기기들이 가상배관파손사고에 적용할 수 있도록 설계될 것을 요구하고 있다. 이에 따라 원자로냉각재계통 (Reactor Coolant System : RCS) 배관은 배관파손이 비록 매우 비현실적인 것으로 간주되더라도 기기, 배관, 격납건물 및 지지대들이

이 가상사고에 의해서 발생하는 하중을 적절히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 원자로냉각재계통 특정 위치에 설치되는 배관 휨 구속장치 (Pipe Whip Restraint : PWR)는 가상배관파손사고 시 절단된 배관의 동적거동을 제한시킴으로써 배관파손 시 배관의 휨 거동 (Whipping Motion)으로 인한 주위기기의 손상을 방지하고, 배관의 개구면적으로 부터 방출되는 유체가 기화함으로써 인한 격납건물의 과압 및 누설을 방지하기 위해 설치된다. 이와같은 설계요건에 따라 설치된 배관 휨 구속 장치는 원자력발전소 정상운전상태 시 열팽창에 의해 배관과 간섭이 발생하지 않도록 배관과 배관 휨 구속장치 사이에는 적절한 유격이 유지되도록 하여야 한다. 특히 원자력발전소 고온기능시험 (Hot Function Test : HFT) 기

* 한국전력공사 전력연구원

** 한국수력원자력(주) 고리원자력

*** 한국전력기술(주) 원자로설계개발단

간중에 요구되는 유격을 유지하기 위해 끼움판(Shim Plate)을 원자로냉각재계통 중간배관(Crossover Leg)과 배관 휩 구속 장치 사이에 설치하고, 설계요건에서 요구하고 있는 유격을 맞추기 위해 정밀 조정하는 작업이 수행된다.

최근에 들어서 미국을 비롯한 여러나라의 원자력발전소에서 원자로냉각재계통 중간배관과 배관 휩 구속 장치 사이의 예상치 못했던 간섭¹²⁾이 발생하였으며, 국내의 경우 웨스팅하우스사가 공급한 가동년수가 15~20년된, 2~3 loop, 650/950 MWe 가압경수로형 원자력발전소에서도 발생되었다. 웨스팅하우스형 국내 원자력발전소 계획예방정비기간중에 측정된 원자로냉각재계통 중간배관과 배관 휩 구속장치 사이의 유격점검 결과에 따르면 원자로냉각재계통 모든 루프(Loop)에서 중간배관과 배관 휩 구속장치가 미세 접촉하고 있는 것으로 나타났다. 원자로냉각재계통 중간배관과 배관 휩 구속장치가 서로 접촉되어 있으면 원자로냉각재계통의 동특성이 크게 달라지고, 원자로냉각재펌프의 진동을 변화시키는 원인이 될 뿐만 아니라, 원자로냉각재계통 초기설계 당시 고려하지 않았던 중간배관의 응력과 피로에 상당한 영향을 줄 수 있다. 따라서 원자력발전소 고온상태에서 중간배관과 배관 휩 구속장치가 접촉되어 있는 경우 중간배관의 열팽창을 구속함으로써 발생하는 중간배관에서의 과도응력으로 인한 중간배관의 건전성 평가가 필요하다. 또한 중간배관과 배관 휩 구속장치사이의 적절한 유격을 결정하기 위해서 가상배관파단해석이 요구되며, 이를 바탕으로 중간배관과 배관 휩 구속장치사이의 허용 가능한 유격을 유지하기 위한 조치가 요구된다.

본 논문에서는 원자로냉각재계통 중간배관과 배관 휩 구속장치사이의 접촉으로 인한 중간배관의 건전성평가와 두 구조물 사이의 유격 조정을 위한 평가를 수행하여 중간배관과 배관 휩 구속장치가 접촉하여 운전되었어도 중간배관에 대한 건전성이 유지되는가와 중간배관과 배관 휩 구속장치사이의 적절한 유격을 결정하고자 하였다.

2장 중간배관과 배관 휩 구속장치

2.1 개요

원자로냉각재계통 중간배관과 배관 휩 구속

장치의 개략적인 형상을 그림 1에 보이고 있다. 중간배관은 증기발생기와 원자로냉각재펌프를 연결하는 배관으로서(내경 : 787.4 mm, 31 in) 스테인레스강이며 재질은 SA-351 CF8A이다. 배관 휩 구속장치는 그림 1에 나타난 바와 같이 가상배관파단시 중간배관의 수평방향 변위를 제한하기 위하여 각각의 엘보우에 설치되는 2개의 쓰러스트 블록과 수직방향의 지나친 변위를 방지하기 위한 구속 장치로 구성된다. 정상운전상태에서 쓰러스트 블록은 중간배관의 표면과 유격이 존재하지 않는 상태에서 접촉하지 않도록(zero clearance) 끼움판(Shim Plate)이 설치된다. 이것은 정상운전시 중간배관에 하중이 작용되지 않는 상태로, 냉각재상실사고(LOCA)등과 같은 사고조건 발생하에서 중간배관의 파단부 변위와 파단부 개구면적을 허용한계 이하로 유지하기 위함이다.

2.2 유격측정

국내 웨스팅하우스형 원전 원자로냉각재펌프 이상 진동 현상에 대한 근본 원인을 규명하기 위해서 다각적인 분석을 시도하였는데, 이에 대한 원인중의 하나로써 원자로냉각재계통 중간배관과 배관 휩 구속장치가 서로 접촉되고 있음을 발전소 기동 중 확인하였다. 중간배관에 대한 온도와 열팽창 변위는 그림 1에서 보여준 바와 같이 중간배관과 원자로냉각재펌프 및 증기발생기 측면의 배관 휩 구속장치사이에서 설치된 끼움판의 8개 위치에서 측정되었다. 측정시간은 발전소 기동중 약 40분 간격으로 텔리스코프와 필러게이지(filler gauge)를 사용하였으며, 발전소 고온대기(292℃, 157kg/cm²)상태까지 측정되었다. 측정결과 발전소가 가열됨에 따라 270~275℃ 부근에서 모든 중간배관 엘보우가 배관 휩 구속장치와 서로 접촉됨을 확인하였다. 그러므로 원자로냉각재펌프 이상 진동 발생의 근본 원인은 중간배관과 배관 지지구조물 사이의 접촉으로 인하여 배관 휩 구속장치가 중간배관의 열팽창을 구속함에 따라 원자로냉각재계통 배관계의 동특성이 달라지는 것에 기인하는 것으로 추정되었다.

3장 중간배관 건전성평가

3.1 목적

중간배관이 정상운전 시 배관 휨 구속장치와 접촉으로 인하여 발생하는 중간배관에서의 과도응력 상태를 평가하기 위한 것이므로 기존의 정상운전하중 자료와 중간배관이 배관 휨 구속장치와 접촉하는 경우의 응력해석 결과를 통하여 ASME Code^[3]에 따라 중간배관의 건전성을 확인하는데 그 목적이 있다.

3.2 평가방법론

중간배관이 정상운전 시 배관 휨 구속장치와 접촉으로 인하여 발생하는 과도응력 상태는 중간배관이 배관 휨 구속장치와 접촉하지 않는 경우 중간배관에 발생하는 정상상태의 응력에 중간배관이 배관 휨 구속장치와 접촉함으로써 발생하는 응력을 중첩시킴으로써 평가가 가능하다. 따라서 본 논문에서는 중간배관이 배관 휨 구속장치와 접촉하여 발생하는 응력이 중간배관의 열팽창을 구속함으로써 발생하는 2차응력(Secondary Stress) 이므로 참고문서^[4]에서 주어진 조건에 따른 하중을 바탕으로 ASME Sec. III NB-3650에서 명시한 Level A&B 조건에서의 하중과 중간배관이 배관 휨 구속장치와 접촉함으로써 발생하는 부가하중을 중첩시켜 응력평가를 수행하였다. 중간배관이 배관 휨 구속장치와 접촉함으로써 발생하는 부가적인 하중을 얻기 위하여 중간배관에 대한 해석 모델 작성 후 원자력발전소 계획예방정비기간중에 측정된 온도에 따른 중간배관과 배관 휨 구속장치와의 유격 측정자료를 바탕으로 변위해석을 수행하였다.

3.3 해석모델

중간배관에 대한 변위해석을 수행하기 위하여 중간배관에 대한 해석 모델을 작성하였고, 해석 코드로는 ANSYS^[5]를 사용하였으며 이를 그림 2에 도시하였다. 해석모델에서 좌표축은 원자로냉각재 중간배관의 수평배관 축을 X 방향, 수직방향을 Y 방향 그리고 Z 방향은 X-Y 평면에 수직방향(반시계방향)으로 설정하였다.

3.4 변위해석

2.2절에서 언급한 바와 같이 원자로냉각계통 중간배관과 배관 휨 구속 장치가 약 270~275℃

에서 접촉하여 발전소 고온대기 상태인 292℃까지 배관 휨 구속 장치 방향으로 약 1mm의 중간배관에 대한 열팽창을 구속하고 있는 것으로 예측, 평가되었다. 따라서 본 논문에서는 중간배관이 원자로냉각재 펌프 하부 배관 휨 구속장치와 접촉하여 약 1mm의 변위를 구속한 영향을 평가하기 위하여 중간배관 해석 모델에서 증기발생기 출구 노즐부와 원자로냉각재 펌프 입구노즐부의 변위와 회전을 구속하고 중간배관과 원자로냉각재 펌프 하부 배관 휨 구속장치 접촉부에서 1mm의 변위를 주어 해석하였다.

3.5 응력 및 피로영향 평가

그림 3에서는 중간배관 각 용접부의 위치를 도시하고 있다. 3.3절에서 언급한 바와 같이 중간배관이 정상운전상태에서 배관 휨 구속장치와 접촉된 상태로 운전되었기 때문에 중간배관 각 용접부에서의 응력평가는 참고문서^[4]에서 주어진 Level A&B 조건에서 하중에 중간배관이 배관 휨 구속 장치와 접촉하여 발생한 하중을 중첩시켜 ASME Sec. III NB-3650에서 주어진 설계식에 의하여 응력을 구하고 이를 허용한계와 비교함으로써 가능하다. 그림 3에서 제시된 중간배관 각 용접부에서의 중첩된 응력과 ASME Sec. III NB-3653, NB-3654에서 주어진 허용한계를 표 1에 나타내었다. 또한 중간배관의 응력상태 변화로 인한 피로효과도 검토되어 표 1에 그 결과를 보이고 있다. 표 1에서 나타난 바와 같이 중간배관이 배관 휨 구속장치와 접촉하여 중간배관에 미치는 피로영향은 매우 미미할 것으로 평가되었다. 그러므로 중간배관이 배관 휨 구속장치와 접촉함으로써 발생하는 과도응력과 피로영향을 ASME Sec. III NB-3650 Service Level A&B 조건에 따라 평가한 결과 1974년 ASME Sec. III NB-3650의 허용한계치를 만족하는 것으로 나타났다. 그러므로 중간배관이 배관 휨 구속장치와 접촉하여 운전이 되었어도 중간배관의 건전성에는 이상이 없는 것으로 나타났다.

4장 중간배관 엘보우와 배관 휨 구속장치 적정 유격 평가

앞 절에서 언급했듯이, 원자로냉각계통 중간배관이 배관 휨 구속장치와 접촉함으로써 중간

배관에 과도응력이 발생할 가능성을 배제할 수 없으며, 원자로냉각재펌프 입구 노즐 아랫부분이 구속됨으로 인하여 원자로냉각재계통의 동특성이 달라져 원자로냉각재펌프의 진동에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 중간배관 엘보우와 배관 휨 구속 장치사이의 적정 유격을 유지하기 위한 평가가 수행되었다. 중간배관 엘보우와 배관 휨 구속 장치와의 적정 유격을 결정하기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족하는 유격을 선택하여야 한다.

첫째, 정상운전상태 뿐만 아니라 지진발생시에도 접촉하지 않아야 한다.

둘째, 파단된 배관의 휨(Whip) 거동(Motion)으로 인한 주위 기기의 손상 방지가 이루어져야 한다

셋째, 파단된 배관의 개구면적(Opening Area)으로부터 유체가 기화함으로써 인한 격납건물의 과압 및 누설이 방지되어야 한다.

넷째, 중간배관이 절단 시 쿨다운중(Blowdown Force)로 인한 중간배관의 소성힌지(Plastic Hinge) 요건을 만족하여야 한다.

다섯째, 중간배관이 배관 휨 구속장치와 충돌시 충돌하중으로 인한 배관 휨 구속장치의 기능이 유지되어야 한다.

4.1 동적해석 모델

원자로냉각재계통의 배관파단 해석을 위한 가상배관파단위치, 파단형태와 파단시 개구면적에 대한 요건은 표2^[6]에 나타내었다. 표 2에서 주어진 조건에 따른 해석을 수행하기 위하여 중간배관에 대한 동적해석 모델을 그림 4와 같이 작성하였으며, 파단 위치에 따른 경계조건을 변화시켜 해석을 수행하였다. 해석모델에서 좌표축은 중간배관의 수평배관 축을 X 방향, 수직방향을 Y방향 그리고 Z방향은 X-Y 평면에 수직방향(반시계방향)으로 설정하였다.

4.2 중간배관 파손시 작용하중

가상배관파단 시 파단배관에 작용하는 추력은 다음과 같이 계산된다.

$$F_{\text{Applied}} = 1.2 \times P \times A_{\text{Inside}}$$

여기서, P는 원자로냉각재계통 운전온도에서

의 포화압력이고 A_{Inside} 는 중간배관의 유동단면적이다. U.S NRC S.R.P 3.6.2에 따라 0.001초의 상승시간(rise time)을 적용하여 본 해석에 사용된 동적하중은 0.001초의 상승시간을 가지고 0.001초 후에는 일정한 하중 F_{Applied} 가 작용하는 것으로 가정하였다

4.2 파단배관 변위에 대한 결과 및 검토

중간배관에 대한 파단해석은 표 2에서 제시된 바와 같이 세가지 경우에 대하여 수행하였다. 해석결과 고온상태에서 증기발생기 측에 2mm 와 원자로냉각재펌프 측에 4mm 유격이 있는 경우 파단배관의 파단부분에서의 최대변위를 표 3에 제시하였다. 표 3에 제시된 바와같이 파단해석 결과 중간배관 파단부분 변위로 인한 주위 안전성 관련기기와의 충돌은 없으므로 배관 휨 구속 장치의 설계 요건을 만족하는 것으로 나타났다.

4.3 파손 배관 개구면적에 대한 결과 및 검토

표 2에서와 같이 원자로냉각재펌프 노즐파단, 증기발생기 노즐 파단 그리고 중간배관의 파단의 경우 모두 파단 배관의 허용 파단개구면적은 배관의 유동단면적 크기이므로 양단 파단의 경우 파단 배관 한쪽에서의 허용 파단개구면적은 배관 단면적의 50%가 된다. 따라서 중간배관 파단 배관 한쪽에서의 허용 파단개구면적은 다음과 같이 계산 되었다.

$$A_{\text{allowable}} = 0.5 \times A_{\text{inside}}$$

발전소 고온상태에서 증기발생기 측에 2mm 유격과 원자로냉각재펌프 측에 4mm 인 경우 파단배관 부분에서의 최대 파단개구면적을 표 4에 보이고 있다. 표 4에서와 같이 파단배관 부위에서 최대 파단개구면적은 허용 파단개구면적 보다 작으므로 배관 휨 구속장치의 설계요건을 만족하는 것으로 나타났다.

4.4 중간배관에서의 소성 힌지 모멘트 평가

원자로냉각재계통 주배관에 대한 설계요건중의 하나로써 절단된 원자로냉각재계통 주배관의 변위와 회전을 제한시킴으로써 노즐하중을 감소시키고 하중방향을 예측 가능하게 하는 것 이외에 소성 힌지 기구의 형성을 제한시켜야 하는 설

계요건을 만족하여야 한다. 가상 배관과단으로 인하여 중간배관에 발생하는 모멘트가 소성 힌지 형성 모멘트 요건을 만족하는가를 평가하기 위하여 중간배관 각 위치에서 발생하는 모멘트를 구하여, 이를 참고문서¹⁷⁾에서 주어진 손상조건에서의 중간배관에 대한 최대 설계모멘트와 비교하였다. 표 5에서는 원자로냉각재펌프 노즐과단, 증기발생기 노즐과단 그리고 중간배관 중간 파단의 경우 최대모멘트가 발생하는 부위에서의 모멘트와 최대설계 모멘트를 보이고 있다. 표 5에서와 같이 취출하중으로 인한 중간배관에서의 최대모멘트가 손상조건에서의 최대설계모멘트보다 작으므로 배관 설계 요건을 만족하는 것으로 나타났다.

4.5 배관 휨 구속 장치 응력 평가

가상 배관과단으로 인하여 배관이 PWR과 충돌함으로써 발생하는 배관 휨 구속장치에서의 응력을 평가하기 위하여 배관 휨 구속장치에서의 충돌 시 발생하는 응력을 구하여, 이를 ASME Sec. III Appendix F F-1331.1 Level D Service Limit와 비교하였다. 증기발생기 노즐과단, 원자로냉각재펌프 노즐과단 그리고 중간배관 중간 파단의 경우 최대응력이 발생하는 부위에서의 응력강도(Stress Intensity)를 허용응력과 비교하여 표 6에 보였다. 표 6에서와 같이 중간배관이 배관 휨 구속 장치와의 충돌로 인한 배관 휨 구속장치에서의 최대응력이 ASME Code 요건(3.6Sm)보다 작으므로 배관 휨 구속장치 설계 요건을 만족하는 것으로 나타났다.

5장 결론

본 논문에서는 원자로냉각재계통과 배관 휨 구속장치가 접촉한 상태로 운전된 웨스팅하우스형 원전 원자로냉각재계통 중간배관에 대한 건전성과 유격을 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 가동중인 원전의 주요기기 및 배관 건전성 평가시 경계조건을 보수적으로 가정하여 해석하는 방법인 간략화된 한계해석법(Bounding Analysis Method)을 본 논문에서 제시하였다.

둘째, 간략화된 중간배관에 대한 변위해석 및 부가하중법을 적용하여 평가한 결과 중간배관에 대한 건전성이 유지됨을 확인하였다.

셋째, 간략화된 중간배관에 대해서 가상배관과단을 고려한 비선형 동적해석을 수행하여 배관과 배관 휨 구속장치 설계요건을 만족시키는 적정 유격을 결정하였다.

넷째, 결정된 적정 유격을 유지시키기 위해 중간배관과 배관 휨 구속장치사이에 끼움판을 가공하여 재설치하였으며, 발전소 기동 시 배관과 배관 휨 구속장치사이에 적정 유격이 유지되고 있음을 확인하였다.

다섯째, 중간배관과 배관 휨 구속장치사이에 적정 유격 유지 결과 원자로냉각재펌프에서의 이상 진동이 발생하지 않음을 확인함으로써 원자로냉각재펌프 이상진동의 원인이 원자로냉각재계통 중간배관과 배관 휨 구속장치와의 접촉에 의한 것임이 확인되었다.

참고문헌

- (1) USNRC, Standard Review Plan 3.6.2, 1987, "Determination of Rupture Location and Dynamic Effects Associated with the Postulated Pipe Rupture of Piping".
- (2) USNRC, Information Notice 92-86, December 24, 1992, "Unexpected Restriction to Thermal Growth of Reactor Coolant Piping".
- (3) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Class 1 components, Division 1, Section NB, 1974 Edition.
- (4) WCAP-14974, Westinghouse Electric Corps, Stress Distribution for Use in Flaw Evaluations for the Reactor Coolant Loop Piping Welds of Kori Units 1&2, Sep. 1977
- (5) ANSYS Computer Program, Users Manual, 2000, developed by ANSYS, Inc.
- (6) System Design Criteria for Kori 2, "Protection Criteria Against Dynamic Effects Resulting From Pipe Rupture".
- (7) NSSS Piping/Support Design and Analysis Interface Guidelines for Kori 2.

표 1 중간배관 용접부에서 응력 및 피로영향 평가 결과

	용접부 위치					
	1	2	3	4	5	6
최대 응력 (MPa)	309.8	270.1	205.4	184.7	319.6	388.2
허용 응력 (MPa)	409.5	409.5	409.5	409.5	409.5	409.5
교변응력강도계수(MPa)	186.9	167.1	134.8	125.0	191.8	226.2
피로계수(Fatigue Usage Factor)	0.0006	0.0004	0.0001	0.0004	0.0006	0.0015

표 2 중간배관 냉각재상실사고 시 가상 배관파단 위치

가상 배관 파단 위치	파단형태	허용 파단개구면적
1. 증기발생기 출구노즐	양단순간파단	중간배관의 유동 단면적
2. 원자로냉각재 입구 노즐	양단순간파단	중간배관의 유동 단면적
3. 중간배관 용접부 위치	양단순간파단	중간배관의 유동 단면적

표 3 가상 배관파단 시 최대변위 (증기발생기 측 2mm, 원자로냉각재펌프 측 4mm)

가상 파단 배관	각 방향에서의 변위			PWR 설계요건	
	X방향(mm)	Y방향(mm)	Z방향(mm)		
1. 증기발생기 출구노즐	68.02	-13.21	57.02	만족	
2. 원자로냉각재 입구 노즐	8.74	-11.57	0.39	만족	
3. 중간배관	원자로냉각재펌프 측	7.83	-10.78	0.00	만족
	증기발생기 측	12.24	-31.06	1.06	만족

표 4 가상 배관파단 시 파단개구면적 비교 결과 (증기발생기 측 2mm, 원자로냉각재펌프 측 4mm)

가상 파단 배관	최대 파단 개구면적 (mm ²)	허용 파단 개구면적 (mm ²)	
1. 증기발생기 출구노즐	165160.0	243225.3	
2. 원자로냉각재 입구 노즐	28064.5	243225.3	
중간배관	원자로냉각재펌프 측	26645.1	243225.3
	증기발생기 측	59741.8	243225.3

표 5 가상 배관 파단 시 소성 한지 모멘트 평가 (증기발생기 측 2mm, 원자로냉각재펌프 측 4mm)

가상 배관 파단		최대설계모멘트 (KN-m)	허용 모멘트 (KN-m)
원자로냉각재펌프 입구 노즐		4914.8	14529.8
증기발생기 노즐	엘보우	14258.7	14529.8
	수평배관	11456.1	12665.6
중간배관	원자로냉각재펌프 측	10100.8	14529.8
	증기발생기 측	5479.7	14529.8

표 6 가상 배관파단 시 배관 휨 구속장치에서의 응력평가 결과
(증기발생기 측 2mm, 원자로냉각재펌프 측 4mm)

가상 배관 파단	배관 휨 구속 장치 (PWR)		최대응력강도 (MPa)	허용응력강도 (MPa)
원자로냉각재펌프 (RCP) 노즐	원자로냉각재펌프 측 수평배관 구속	수평방향 PWR	-	479.0
		수직 방향 PWR	261.9	
	증기발생기 측 수평배관 구속	수평 방향 PWR	-	
		수직 방향 PWR	-	
	수직배관 구속		-	
증기발생기 (SG) 노즐	원자로냉각재펌프 측 수평배관 구속	수평방향 PWR	31.3	479.0
		수직방향 PWR	-	
	증기발생기 측 수평배관 구속	수평방향 PWR	-	
		수직방향 PWR	142.7	
	수직배관 구속		320.7	
중간배관	원자로냉각재펌프 측 수평배관 구속	수평방향 PWR	77.7	479.0
		수직방향 PWR	-	
	증기발생기 측 수평배관 구속	수평방향 PWR	192.3	
		수직방향 PWR	27.6	
	수직배관 구속		-	

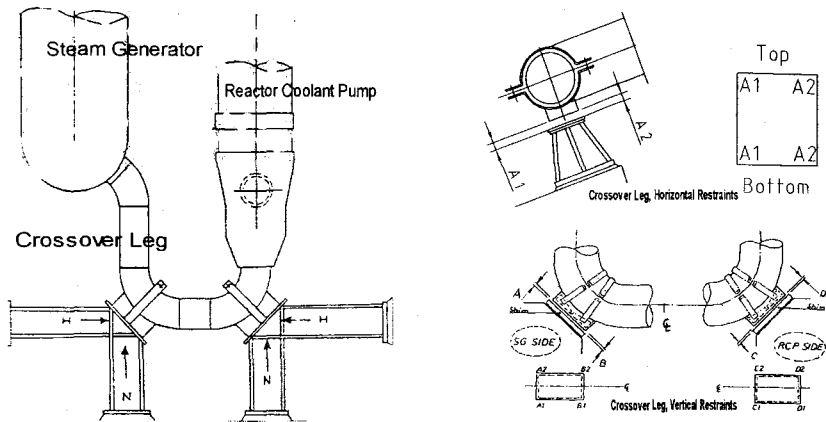


그림 1 중간배관과 배관 휨 구속 장치 개략도

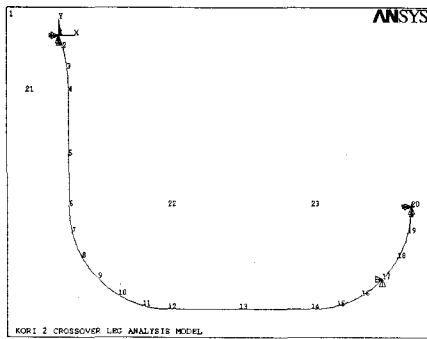


그림 2 중간배관 정적 구조해석 모델

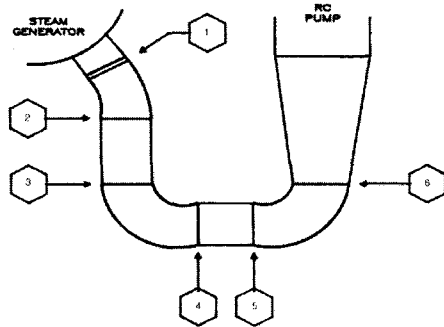


그림 3 중간배관 용접부 위치

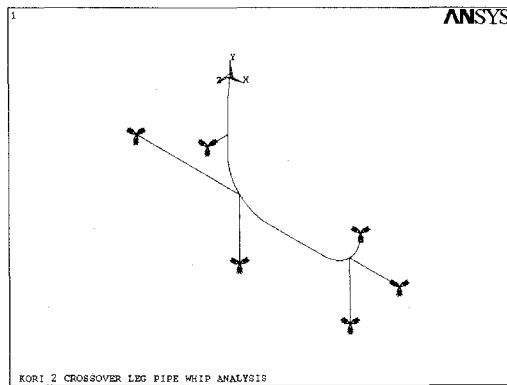


그림 4 중간배관 동적 구조해석 모델