

원자로 주 배관계의 진동 건전성 시험

*김 연환, 김 희수, 구 재량, 배 응채, 이 현(한전 전력연구원)

Verification Test for Primary Reactor Piping in Nuclear Power Plant

Yeon Whan Kim, Hee Su Kim, Jae Raeyang Koo, Yong Chae Bea, Hyun Lee

Key Words : vibration, piping, verification.

Abstract : The piping verification tests were performed in order to verify the structural integrity during initial operation of the reactor coolant systems and the primary heat transportation systems of nuclear power plants by KEPRI in Korea. The tests were conducted at full operating temperature and pressure. The objective is to evaluate the possibility of excessive load generating on piping, piping supports, and reactor structures etc. in the steady normal operation and expected pump transient conditions. As a result, the measured vibrations have been shown acceptable level according to ASME/ANSI OMa-Standard, Part 3.

1. 서론

배관계는 펌프나 밸브 등 각종 기기의 작동에 의하여 발생하는 유체 유발력 또는 기계력에 기 인하여 정상상태 진동 또는 과도진동이 발생하므로 일반 운전모드에서 경제성 수명을 만족하도록 배관계를 설계하는 것이 일반적이다. 시스템이 설계수명이상까지 진동에 견뎌내도록 해야 하기 때문에 재질의 피로 관점에서 정상운전의 진동이 허용치이내로 유지하는 것이 바람직하다.

경수로의 경우는 국제적으로 사용 전 검사기준이 선정되어 있으나 국내 원전에서는 상업운전을 위한 사용 전 진동 건전성 시험은 고리 3호기로부터 최초 시행되어 영광 1, 2호기까지는 웨스팅 하우스 및 벡텔사 등의 자문에 따라 시행하였다. 90년대 중반이후 영광 3호기부터는 순수하게 국내기술로 진동 건전성 시험을 시행하였으며 현재는 울진 3, 4호기뿐 아니라 최근 건설이 완료된 영광 5, 6까지 수행한 결과, 대부분 보수적인 허용치를 만족하였다.

캔두형은 캐나다가 독자적으로 개발함으로써 설계 및 안전 개념이 미국설계를 적용하는 경수로 원자로와 차이가 있으나, 원자력 안전기술원(KINS)에서 경수로 배관계에 적용하는 ASME 코

드를 캔두형에 대해서도 적용할 필요성을 제기함에 따라 월성 2호기부터는 사용 전 배관 건전성 평가를 수행하였다.

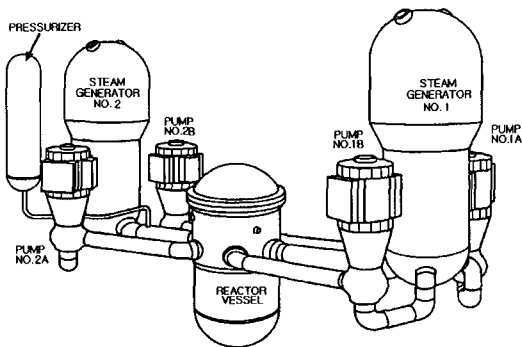
본 논문에서는 90년 이후 건설된 경수로(PWR)와 중수로(PHWR) 원자로 배관계에서 고온 기능 시험 중에 수행한 진동 건전성시험에 대하여 기술한다.

2. 배관 건전성 시험

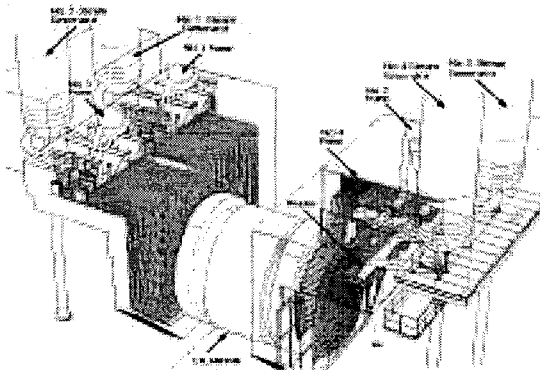
원자로 건물 내 배관의 경우는 방사능 누출의 가능성을 최소화하는 것이 배관설계에 있어서 중요한 목표이므로 안정성을 확보하기 위해 엄격한 코드요건을 따르게 되며 건설 중에 설계 및 건설의 타당성을 확인하기 위한 시험을 필요로 하게 된다. 따라서 새로 건설된 원자력발전소의 시운전 기간에 주요 배관들을 선정하여 진동건전성 평가를 수행하고 있다. 이 시험은 원자력발전소 배관계통의 가동 전 및 초기 시운전 진동시험에 관한 기준인 ASME/ANSI OMa Part 3에 따라 실시하고 있다. 이 기준에 따르면 시험대상 배관계통을 설정하고 이를 진동감시 군(VMG, Vibration Monitoring Group)으로 분류하여 진동조건에 따라 시험을 수행하도록 하고 있다. 허용진동의 판

정기준은 VMG-1의 경우 진동 변위로, VMG-2 & 3은 진동속도로 산정하여 평가한다.

본 시험의 주목적은 첫째로 정상운전조건에서 원자로 주 배관계통과 주요설비의 진동을 측정하여 진동의 특성을 확인하고, 둘째로 원자로 배관계의 기계적 건전성을 확보하는데 있다. 모든 시험은 정상운전 조건의 온도(경수로:565℃)와 압력(경수로:2205psig)조건에서 실시한다. 국내의 원자로 배관(그림 1참조)은 경수로 및 중수로 모두 탄소강 배관으로 되어있다.



(a) 1000MW급 경수로(PWR)



(b) 710MW급 캔두형 중수로(PHWR)

그림 1. 원자로 계통

2.1. 진동 평가 기준

원자로 계통 배관계는 VMG-1에 해당되는 배관계로서 진동변위를 사용하여 건전성을 평가한다. 본 계통의 평가 기준은 원자력발전소 ASME 보일러 및 압력용기 코드 및 ASME/ANSI OMA Part 3에서 기술하고 있으며 그림 2는 주로 적용되는 배관의 대표적인 거동모델로서 보수적인 진동변위의 제한치를 산정할 때 사용한다. 각 기기의 노출부위는 앵커 조건으로 가정하여 배관계는 단순보 거동을 하는 것으로 가정한다. 그림2의 모

델 1은 양단고정의 경우에 적용하며 모델 2는 한단 고정이고 한단 가이드인 경우에 적용된다. 그림 2를 적용한 보수적인 허용변위는 경수로가 203-508um, p-p이고, 캔두형 중수로가 170-450um, p-p이다.

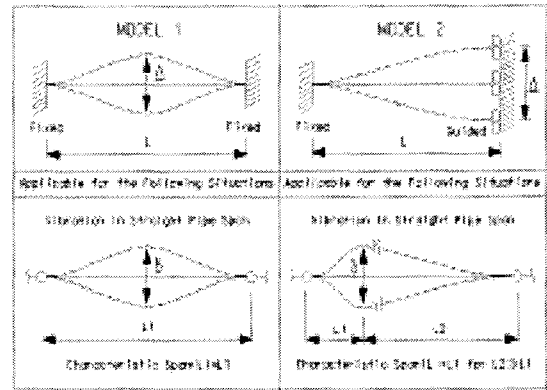


그림 2. 배관 길이(L)와 처짐 모델의 결정 기준

2.2. 진동 시험을 위한 구성 시스템

본 시험을 위하여 구성된 시스템은 그림 3과 같다. 원자로 대상 배관계에서 최대 진동이 예상되는 지점에 센서 설치용 블록을 고정시킨 후, 압전형 고온 가속도계 (VIBRO-METER Type CA-905)를 설치하여 배관의 축방향, 수평 또는 수직 방향의 진동을 측정하였다. 측정방향은 그림1에서 원자로에서 증기발생기 방향을 X방향 또는 반경 방향(Radial), 수직방향을 Y방향 그리고 원자로의 측면방향을 Z방향 또는 접선방향(Tangential)으로 정하여 측정 및 분석하였다.

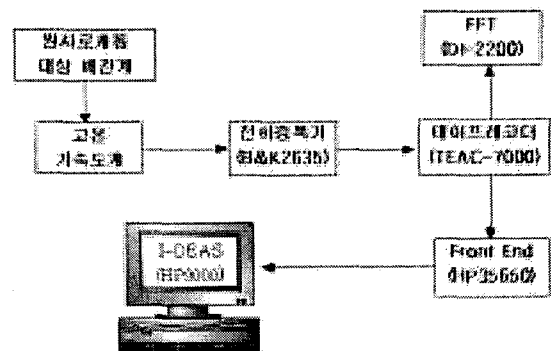


그림 3. 배관건전성 평가 구성 시스템

2.3. 분석 방법

진동시험에서 측정된 가속도 또는 속도신호는 21채널 테이프레코더에 저장된 후 실험실에서 HP 35650 front-end를 사용하여 A/D변환되어 HPIB(

hewlett packard interface bus)를 통하여 HP 9000-715/64 워크스테이션에서 정밀 평가한다. 초기 진동 신호는 시간 영역에서 High pass filter를 사용하여 2Hz이하의 주파수 성분을 제거하고 적분하여 변위 파형으로 변환시킨다. 변위 신호를 FFT(Fast Fourier Transform) 처리하여 주파수를 분석하며 FFT처리는 Hanning broad window, 75% overlap, 샘플링 주파수 1024Hz를 적용하였다.

3. 배관진동

원자로 배관계를 가진 하는 힘은 저주파수대의 광대역의 유체력과 증기발생기나 펌프의 굽힘진동 모드 그리고 회전체의 고주파 영역의 가진력을 생각할 수 있다. 이와 같은 가진력이 배관의 고유진동수와 접근하거나 설치조건이 잘못되어 과도한 기계력을 유발할 경우 그 현상이 곧바로 배관계에 나타난다. 냉각재 배관계는 자체의 고유진동수는 Hot-Leg나 Cold-Leg의 경우 50Hz(고유진동수 실험 100Hz)이후에 존재하며 중수로 열 전송계통 배관도 고유진동수가 대부분 50Hz이후에 존재하는 것으로 평가된다.

3.1. 경수로 냉각재 배관계 진동

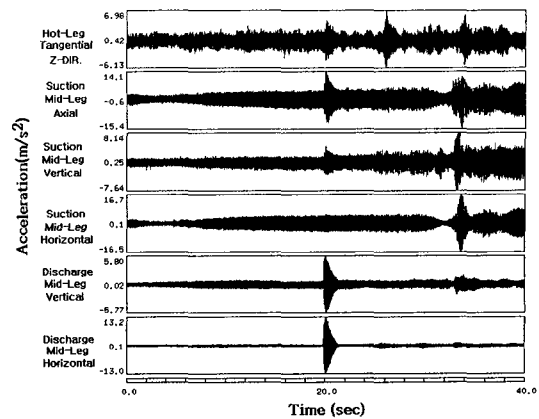
표 1은 냉각재 계통 배관에서 측정된 가속도 및 평가된 변위 레벨로서, 모든 배관 측정 지점에서 기계적 건전성을 만족하고 있음을 보여준다.

표 1. 1000MW급 경수로 냉각재 배관계에서 정상조건의 진동레벨

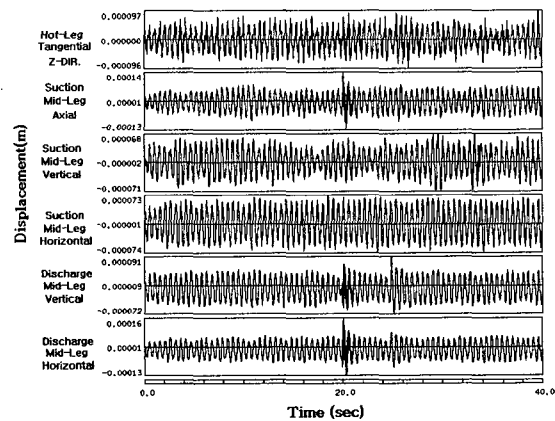
Condition	Unit	Hot-Leg	RCP Suction Mid-Leg		Discharge-Leg		
		Tangential	Axial	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Steady	m/s ² , o-p	5.2	11.2	6.6	12.0	3.4	4.2
	um, p-p	175	230	171	153	154	370
Transient	m/s ² , o-p	7.0	15.4	8.1	16.7	5.8	13.2
	um, p-p	193	270	139	147	153	290
Allowable	um, p-p	305	406	203	508	457	457

표 1에서 정상상태(Steady)의 경우는 냉각재 펌프 4대 운전 조건에서의 진동레벨로서 경수로로는 펌프 흡입 단의 배관부(RCP Suction Mid-Leg)에서 가속도 m 레벨이 크나 진동변위는 펌프의 출구 배관부(Discharge-Leg 또는 Cold-Leg)에서 큰 레벨을 보여준다.

표 1에서의 과도운전조건(Transient)은 대각 방향의 냉각재 루프가 운전될 때 다른 루프의 펌프를 기동하여 나타나는 진동레벨로서 그림 4와 같이 나타난다.



(a) 가속도



(b) 변위

그림 4. 냉각재 펌프기동 시 배관계 진동

전 출력 운전 조건에 비하여 펌프 기동 시에 나타나는 가속도 레벨은 Hot-Leg의 경우는 35% 정도 크며 흡입배관은 20-40%, 토출배관은 최대 3배까지 가속도의 증가를 보인다. 반면 변위는 Hot-Leg에서 증가하고 타 부위에서는 거의 동일한 진동레벨을 나타냈다. 각 운전모드에서 나타나는 진동의 현상은 펌프의 운전조건에 대하여 가속도 레벨은 변화하나 변위레벨은 거의 일정한 것으로 평가되어 배관계에 영향을 주는 가진력의 대부분이 고주파 영역에 있는 것으로 평가된다.

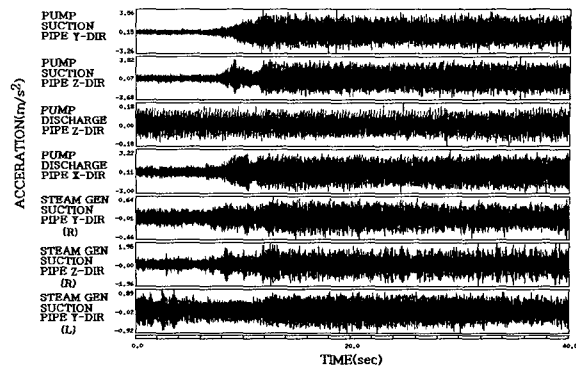
즉 표 2의 상태는 각종 배관에 연결된 기기가 특이한 기계력이 유발되지 않는 설계 및 설치상태에 있는 것으로 평가 할 수 있다. 2Hz이후에 주로 나타나는 배관에 나타나는 주파수로는 2.2Hz, 2.85Hz, 7.29Hz등의 구조물의 영향, 특히, 증기발생기에 특성이 있고, 19.9Hz, 59.4Hz, 79.2Hz 등 펌프의 영향으로 나타났다.

3.2 중수로 열전송 계통 배관계 진동

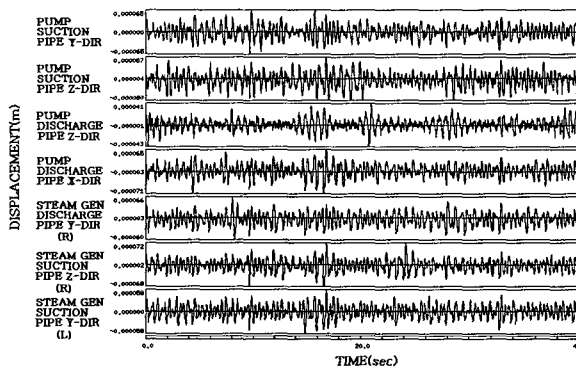
표 2는 캔두형 중수로 열 전송 계통 배관에서 측정된 가속도 및 평가된 변위 레벨로서, 모든 배관 측정 지점에서 기계적 건전성을 만족하고 있음을 보여준다.

그림 1(b)에서 보여지는 것처럼 중수로는 각각의 루프가 독립적으로 설계되어있다. 따라서, 각 루프의 펌프기동시의 진동을 측정하고 4대 운전 조건으로 시험을 수행하였다.

표 2에서 정상상태(Steady조건)의 경우는 열 전송 펌프 4대 운전 조건에서 루프의 각 배관 진동레벨로서 펌프 흡입 단의 배관부(HTP Suction Leg)에서 가속도 레벨이 크며 진동변위는 전체적으로 유사하나 펌프의 출구 배관부(Discharge Leg, 또는 Cold Leg)에서 크게 나타난다. 과도운전조건(Transient)은 열 전송펌프 3대 운전 조건에서 4번째 펌프를 기동하는 것으로 그 결과는 그림 5와 같다.



(a) 가속도



(b) 변위

그림 5. 열 전송 펌프기동 시 배관계 진동

2Hz이후에 배관에 나타나는 주파수로는 2.2Hz,

표 2. 710MW급 중수로 열 전송 배관계의 정상조건 진동레벨

Condition	Unit	Hot-Leg		HTP Suction-Leg		Cold-Leg	
		Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Radial	Tangential
Steady	m/s ² , o-p	1.0	2.3	4.1	3.9	3.7	0.2
	μm, p-p	109	99	108	106	118	82
Transient	m/s ² , o-p	0.9	2.0	3.6	3.8	3.2	0.2
	μm, p-p	126	140	130	107	136	84
Allowable	μm, p-p	319	174	222	440	293	293

전 출력 운전 조건에 비하여 펌프 기동 시에 나타나는 가속도 레벨은 5-15%, 감소현상을 보인다. 반면 변위레벨은 대부분 배관계에서 2-40% 증가하였다. 즉, 경수로 배관계와는 다른 경향으로서 펌프의 회전체 가진력의 영향이 상대적으로 작고 중수로 배관계의 경우 배관크기가 경수로에 비해 작고 펌프와 증기발생기의 이격 거리가 짧아 증기발생기나 펌프의 구조진동의 영향이 기계적 가진력으로 작용해 저주파수대의 영향이 상대적으로 크게 나타나는 것으로 볼 수 있다.

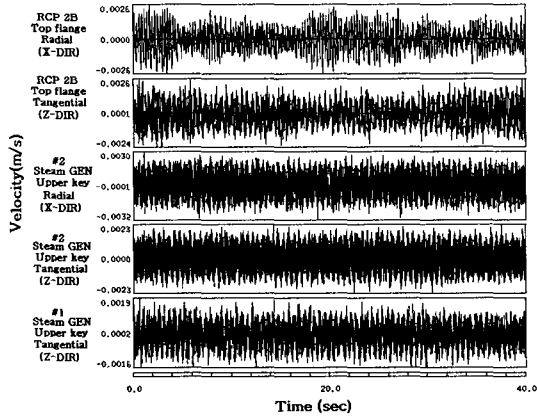
2.85Hz, 4.78Hz, 6.67Hz, 12.13Hz등의 펌프 또는 증기발생기 구조물의 영향이 있고, 29.9Hz, 59.7Hz, 149.5Hz 등 펌프 회전체의 영향이 나타났다.

4. 펌프 및 증기발생기 진동

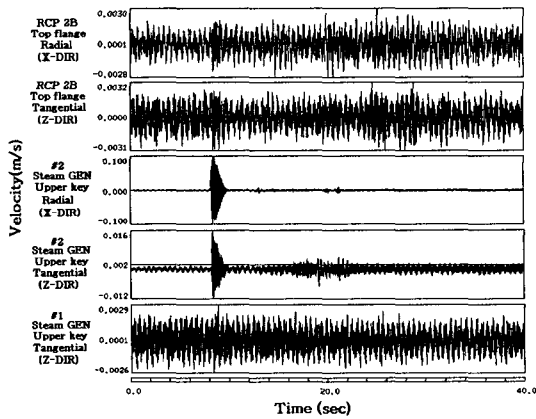
원자로 배관계를 가진 하는 주 가진력은 냉각재 펌프나 열 전송 펌프의 영향으로 볼 수 있다. 배관계의 건전성은 펌프나 증기발생기의 기계력으로부터 잘 격리되어 있느냐가 중요한 관건이 된다.

그림 6은 경수로 냉각재 계통에 설치된 냉각재

펌프 및 증기발생기 상단에서의 진동속도를 보여 준다. 냉각재펌프 상단의 진동은 정상상태에 비하여 기동상태의 진동레벨이 약 2배의 진동가속도를 나타내었으나 진동속도에서는 15-25% 증가되었다.



(a) 정상상태



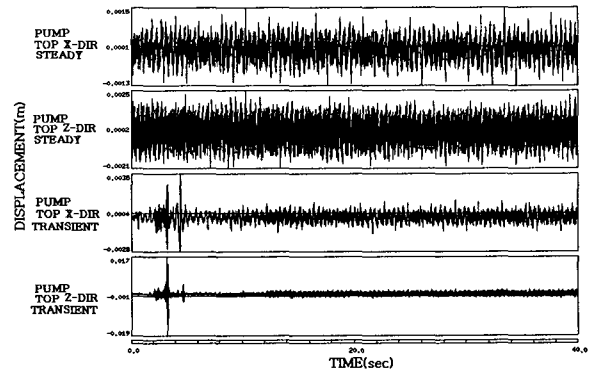
(b) 펌프기동조건

그림 6. 경수로 냉각재계통 기기의 상부 진동

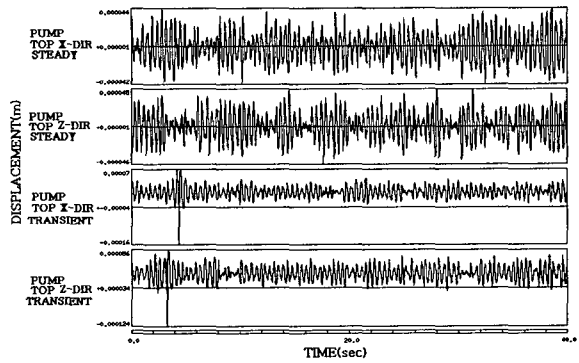
기동시의 경우 진동가속도는 하부가 상부에 비하여 3배정도 크나 증기발생기는 상부가 하부에 비하여 진동가속도가 5-20배정도 크게 나타나고 정상상태에 비하여 7-30배정도 크게 나타났다. 냉각재 펌프의 경우는 펌프 기동 시와 정상운전 시 모두 접선방향(Z-dir)진동 가속도가 반경방향(X-dir)보다 상대적으로 컸으나 정상상태의 진동속도의 경우는 반경방향이 커지는 경향을 보인다. 증기발생기는 반경방향이 접선방향에 비하여 컸으며 정상상태의 경우는 상대적으로 거의 유사한 진동레벨을 보였다.

그림 7은 캔두형 중수로 열 전송 펌프 정상운전 시 및 기동시의 상단의 진동추이를 보여준다.

중수로 열 전송펌프의 진동 경향은 경수로와 설치조건이 차이가 있다 열 전송펌프는 상부를 대형 스프링 행거로 지지하고 있으며 상부에 내진용 패드를 일정 갭(gap)으로 설치되어 하부의 거동이 상부에 비하여 상대적으로 작다. 그림 8에서 보면 기동 시 상부의 순간적인 접선방향 진동속도는 19cm/s, o-p로 반경방향에 비하여 5배 이상 크며 정상조건보다는 8배정도 크게 나타나나 정상상태의 진동변위는 100um, p-p이내의 레벨로 안정적인 진동특성을 보였다.



(a) 진동속도



(b) 변위

그림 7. 열전송펌프의 정상/기동시 배관계 진동

5. 결론

90년 이후 국내에는 경수로(PWR) 6기와 중수로(PHWR) 3기가 건설되었으며 각 발전소의 고온 기능시험기간 중 원자로 배관계통의 운전 적정성을 확인하는 시험을 수행해 왔다. 그 결과 국내에 건설된 원자력발전소의 원자로 배관계는 설계 및 설치상태가 양호하여 운전 신뢰성을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

참고문헌

- (1) 한전전력연구원, “배관과도진동연구”, KEPRI-93G-S10, 1996.
- (2) 이 현, 김 연환, “원자로 발전소 1차 계통 배관진전성 평가”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp318-321, 1995.
- (3) 김 연환, “중수로 원자로 열 전송 배관계통의 진동건전성평가”, 한국원자력학회 추계학술대회 논문집, 1999.
- (4) B.E.OLSEN, N.R SINGLETON, G.J.BOHM, “Determination of the Dynamic Characteristics of a Pressurizer Water Reactor Primary Loop, Westinghouse Electric Corporation, 2nd International conference on Pressure Vessel Technology, San Antonio, Texas, Oct, 1973.
- (5) ANSI/ASME OMa-1990, Part 3, Requirements for Preoperational and Initial Startup Vibration testing of Nuclear Power Plant Piping Systems.
- (6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Nuclear Power Plant Components Division 1 Subsection NB, 1995.