

《기술보고》

원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단해석

최택상 · 김태완 · 윤기석 · 성기광 · 전장환

한국원자력연구소

(1995. 9. 15 접수)

요 약

원자로냉각재계통 기기 설계를 위한 구조해석 분야는 크게 세가지로 구분할 수 있는데, 첫번째는 원자로냉각재계통내의 유체의 온도, 압력, 원자로냉각재계통 기기 및 유체의 자중 등을 고려하여 정적해석이 주가되는 정상운전해석, 두번째는 원자력발전소 수명내에 부지에 발생 가능한 지진을 고려하는 내진설계를 위한 지진해석, 세번째는 원자력발전소를 다른 플랜트보다 한층 안전하게 설계할 수 있도록 원자력발전소내의 모든 고에너지배관의 파단을 가상하는 가상배관파단해석으로 구분할 수 있다. 1986년 이전까지의 가압경수로발전소의 가상배관파단은 원자로냉각재주배관의 파단을 가상하여 동적구조해석을 수행함으로써, 극히 보수적인 결과를 얻었다. 그러나, 파괴역학의 발전은 파단전누설기법을 정립하였으며, 이에 따라 1987년 미국의 10 CFR Part 50 Appendix A GDC 4에서는 원자력발전소 내의 모든 고에너지배관에 파단전누설기법 적용을 허용함으로써, 이들 배관의 가상배관파단을 배제할 수 있도록 하였다. 한국형 표준원전인 울진원자력 3, 4호기의 참조발전소인 영광원자력 3, 4호기는 개정된 GDC 4를 적용한 최초의 가압경수로발전소로서, 원자로냉각재주배관과 12인치 이상의 일차측 분기관들의 가상배관파단을 배제하였다.

본 보고서에서는 영광원자력 3, 4호기의 참조발전소인 미국 PaloVerde발전소와 한국형 표준원전인 울진원자력 3, 4호기의 가상배관파단에 의한 원자로냉각재계통의 동적구조해석 결과를 서로 비교, 분석함으로써, 개정된 GDC 4의 영향을 평가함은 물론 향후 분기관 가상배관파단해석의 방향을 모색하는데 있다.

1. 서 론

원자로냉각재계통 기기 설계를 위한 구조해석 분야는 크게 세가지로 구분할 수 있는데, 첫번째는 원자로냉각재계통내의 유체의 온도, 압력, 원자로냉각재계통 기기 및 유체의 자중 등을 고려하여 정적해석이 주가되는 정상운전해석, 두번째는 원자력발전소 수명내에 부지에 발생 가능한 지진을 고려하는 내진설계를 위한 지진해석, 세번째는 원자력발전소를 다른 플랜트보다 한층 안전하게 설계할 수 있도록 원자력발전소내의 모든 고에너지배관, 즉 최고운전온도가 200°F 이상 또는 최고운전압력이 275 psig인 배관의 파단을 가상하는 가상배관파단해석으로 구분할 수 있다. 원자로냉각재계통 분기

관 가상배관파단해석(Reactor Coolant System Branch Line Pipe Break Analysis)이란 원자로, 증기발생기, 원자로냉각재펌프, 원자로냉각재주배관 등으로 구성된 원자로냉각재계통(그림 1)에 연결된 분기관이 파단된다고 가상할 때, 원자로냉각재계통 기기의 동적거동을 해석함으로써, 원자로냉각재계통 기기, 지지구조물, 분기관 등의 건전성을 평가하기 위한 설계자료를 생성하는 것이다. 가상배관파단에 의해 발생하는 하중은 ASME B&PV Code Section III [1]의 Service Level D하중에 해당되므로, 정상운전하중, 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake) 하중과 조합하여 기기의 건전성을 평가한다.

1986년 이전까지는 미국내의 원자력발전소는 10

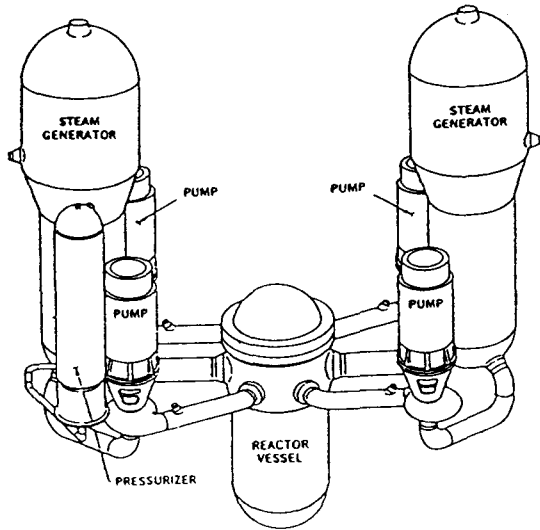


그림 1. 원자로냉각재계통 기기 배열

CFR Part 50 Appendix A GDC 4(General Design Criteria for Nuclear Power Plants)의 요구조건에 따라 원자로냉각재주배관(Reactor Coolant Main Loop Pipe) 및 분기관의 가상파단에 의한 동적영향을 평가하였다. 이 때 배관파단은 양단순간파단(Double Ended Guillotine Break)으로 가정하였다. 양단순간파단의 개념은 비상노심냉각계통, 격납건물, 기기의 환경평가 등의 설계기준으로 사용되었을 뿐만아니라, 원자로냉각재계통 기기, 지지구조물, 분기관 등의 구조적 동적영향을 평가하는데 적용하므로써 파단된 배관의 pipe whip 또는 파단된 단면을 통해 유출되는 가압된 유체의 제트로 부터 원자로냉각재계통 및 안전에 관련된 주변기기의 손상을 방지하기 위해 상당히 많은 보호장치가 필연적이었다. 이러한 보호장치에는 제트보호판(Jet Shield), 배관타격 구속장치(Pipe Whip Restraint) 등이 있는데, 이들은 오히려 원자로냉각재계통과 분기관의 열팽창/수축을 방해하여 높은 열응력을 유발시킬 수 있을 뿐만 아니라, 파손이 될 가능성이 가장 높은 용접부위의 운전중검사에 방해가 되어 검사요원의 방사선 피복을 증가시키는 요인이 되었다.

1980년대에 들어서, 통계학적 및 결정론적 파괴역학 연구가 발전함에 따라, 원자로냉각재주배관의 양단순간파단의 확률은 매우 낮으며, 결함이 양단순간파단을 발생시키는 임계길이까지 도달하기 전에 배관누설이 발생된다는 것이 미국 NRC(Nuclear Regulatory Com-

mittee)의 지원하에 연구되어, 원자로냉각재주배관 양단순간파단에 의한 원자로냉각재계통 기기, 분기관 등의 구조물 동적해석을 배제할 수 있음을 보였다. 이러한 연구는 파단전누설(LBB : Leak Before Break)[2]의 개념을 정립시켰다. 이에 따라 1986년 GDC 4에서는 원자로냉각재주배관에 한하여 파단전누설기법 적용을 허용하므로써, 원자로냉각재주배관 가상배관파단을 배제할 수 있었다. 더 나아가, 1987년 GDC 4에서는 원자력발전소 내의 모든 고에너지배관에 파단전누설기법 적용을 허용하므로써 이러한 배관의 가상배관파단을 배제할 수 있도록 하였다. J.J. LaRussa[3]등은 원자로냉각재주배관에만 파단전누설기법을 적용하였을 경우의 결과를 보고하였다.

1995년초 상업운전을 개시한 영광원자력 3호기는 1987년 GDC 4의 요구조건을 적용한 최초의 가압경수로발전소로서, 원자로냉각재주배관, 밀림관(Pressurizer Surge Line), 안전주입관(Safety Injection Line), 정지냉각관(Shutdown Cooling Line)에 파단전누설기법을 적용, 이들 배관들의 가상파단을 배제하였다. 그 결과 영광원자력 3, 4호기 이전의 원자력발전소에 설치한 육중한 보호장치를 제거할 수 있었다.

본 보고서의 목적은 영광원자력 3, 4호기의 참조발전소로서 원자로냉각재주배관의 양단순간파단을 고려한 미국 PaloVerde발전소와 한국형 표준원전인 울진원자력 3, 4호기의 결과를 비교, 분석하므로써, 1987년 GDC 4의 개정에 따른 영향을 평가함은 물론 향후 분기관 가상배관파단해석의 방향을 모색하는데 있다. Palo Verde발전소는 1300MWe급 발전소로서, 1000MWe급인 한국형 표준원전과는 출력은 다르지만 원자로냉각재계통 기기의 배열과 설계개념 등이 동일하므로, 본 보고서의 목적을 충분히 달성할 수 있다. 1986년 이전까지의 가압경수로의 가상배관파단은 원자로냉각재주배관(Palo Verde발전소 경우 고온관 42인치, 저온관 30인치)과 증기발생기주증기관(Palo Verde발전소 경우 28인치)의 파단만을 고려하여 동적구조해석을 수행하여도 보수적인 결과를 얻을 수 있었으므로 동적구조해석 경우의 수는 5가지 내외이었다. 그러나, 한국형 표준원전의 경우에는 원자로냉각재주배관, 밀림관, 안전주입관, 정지냉각관 등의 대구경 배관에 파단전누설기법을 적용하여 이들 분기관들의 가상배관파단을 배제하였으므로, 보수적인 결과를 얻기위해서는 파단전누설기법을 적용하기 어려운 12인치보다 작은 분기관, 미국 및

국내의 규제기관에서 파단전누설기법 적용을 금지하는 분기관, 증기발생기주증기관 등의 가상배관파단을 가정하여야 하므로, 동적구조해석의 경우의 수는 모두 50여 가지나 되어, 원자로냉각재계통 분기관배관파단해석에 상당히 많은 인력과 시간이 필요하였다. 본 보고서에서는 향후 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단에 따른 원자로냉각재계통의 동적거동해석을 보다 효율적으로 수행하기 위해, 지배적인 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단의 경우를 선정하여 울진원자력 3, 4호기 이후의 후속기에서는 이들 배관에 대해서만 가상배관파단 해석을 수행하고자 한다.

2. 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단 구조해석

2.1. 구조해석을 위한 기본 가정

원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단 구조해석을 위한 수학적 모델 작성, 동적해석 등에 적용할 기본적인 가정은 다음과 같다.

- (1) 원자로, 증기발생기, 원자로냉각재펌프, 원자로냉각재주배관 등의 원자로냉각재계통 기기는 두께가 상당히 두꺼우며, 축 방향 길이가 직경에 비해 비교적 긴 압력용기류이므로, 선형탄성 3차원 보요소로 수학적 모델을 작성한다. 아울러, 원자로냉각재계통 기기의 재료는 균질한 등방성으로 가정하여, ASME 규격의 물성치를 이용한다.
- (2) 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단은 원자로냉각재계통이 100% 출력을 내는 정상운전 중에 발생하는 것으로 가정한다. 표 1은 정상운전상태의 일차측과 이차측의 온도와 압력을 보여준다.

2.2. 구조해석을 위한 수학적 모델

한국형 표준원전인 울진 3, 4호기의 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단 동적구조해석에 사용되는 3차원 집중질량 보요소로 구성된 수학적 모델의 전형적인 예가 그림 2에 나타나 있다. 원자로냉각재계통 집중질량은 각 기기의 무게중심, 질량관성모멘트, 기본고유진동수가 분포질량일 경우의 값이 유지되도록 계산, 위치시킨다. 원자로냉각재계통의 경계조건인 격납건물의 지

표 1. 원자로냉각재계통 유체의 정상운전 온도와 압력

	정상운전 온도	정상운전 압력
고온관	621 °F	2250 psia
저온관	565 °F	2250 psia
증기발생기 이차측	553 °F	1070 psia

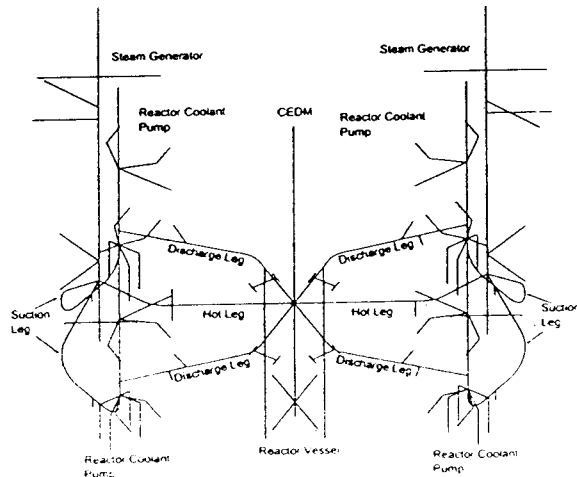


그림 2. 원자로냉각재계통 3차원 보요소 모델

지강성은 등가의 1차원 스프링계수를 구하여 이용한다. 원자로냉각재계통 기기에는 많은 분기관이 연결되어 있으나, 이들 배관의 강성 및 질량은 원자로냉각재계통 각 기기의 강성 및 질량에 비해 10% 정도에 불과하므로, 원자로냉각재계통 동적특성에 거의 영향을 미치지 않아, 원자로냉각재계통 동적구조해석 모델에 포함되지 않는다. 그러나, 원자로냉각재계통 동적거동에 따른 분기관의 동적거동은 별도의 해석으로 파단되지 않은 배관의 건전성을 평가하게 된다. 가압기 분기관 가상배관파단해석은 원자로, 증기발생기, 원자로냉각재펌프 및 원자로냉각재주배관으로 구성된 루프(Loop)에 대한 가상배관파단해석과는 별도로 수행되며, 본 보고서에서는 고려하지 않는다.

원자로냉각재계통 각 기기는 원자로의 정지상태로부터 전력을 생산하는 정상운전상태로의 운전과정 또는 원자로의 정상운전상태로부터 정지상태로의 운전과정 중에 열팽창/수축에 따른 구속이 발생하지 않도록 여러 곳의 지지점에 간극을 설정하게 된다. 이러한 간극은

크면 클수록 열팽창/수축에 의해 원자로냉각재계통 기기와 격납건물이 접촉하여 열구속을 유발할 가능성을 크게 줄여 주지만, 원자력발전소의 중요한 설계하중 중에 하나인 지진하중, 그리고 본 보고서에서 기술하는 분기관 가상배관파단 하중에 대해 커다란 충격력을 유발하게 되므로, 적절한 간극을 설계하여, 원자력발전소 고온기능시험 시 이를 확인, 유지하는 것이 필수적인 사항이 된다[4]. 이러한 간극은 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단 동적구조해석에 비선형성을 유발하므로, 이를 모델에 고려하게 된다. 또한, 원자로내부구조물 및 핵연료 모델에도 간극이 존재하므로, 이를 고려한 축소 모델을 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단 동적구조해석 모델에 포함한다. 기타 원자로냉각재계통의 수학적 모델 작성에 필요한 원자로냉각재주배관 노즐 부위 및 원자로냉각재계통 기기에 용접되어 부착된 지지물의 국부강성행렬등을 고려한다[4].

보요소로 구성된 구조물해석에 널리 사용되는 GT/STRUDL[5]을 이용하여 원자로냉각재계통 수학적 모델의 동적자유도(Dynamic Degree of Freedom)에 대한 강성행렬을 구하여, 미국 ABB-CE사가 개발한 비선형시간이력구조해석 전산코드인 CEDAGS(ABB-CE Dynamic Analysis of Gapped Structures)의 입력자료로 쓰인다. 한국형 표준원전 분기관 가상배관 파단해석을 위한 원자로냉각재계통 기기 전체의 동적자유도는 287개이다.

2.3. 분기관 가상배관파단해석 대상 배관

원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단해석 대상 배관은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 첫째는 일차측 분기관 배관파단으로서, 분기관 배관파단에 따라 원자로냉각재가 유출되는 냉각재상실사고(LOCA, Loss of Coolant Accident)인 경우로 원자로 내부에 비대칭 압력분포를 유발시킨다. 둘째는 이차측 분기관 배관파단으로서 원자로냉각재는 유출되지 않지만 증기발생기 이차측 유체가 유출되는 배관파단이다. 표 2는 분기관 가상배관파단해석의 대상이 되는 원자로냉각재계통 분기관을 나타낸다. 한국형 표준원전에서는 밀림관, 안전주입관, 정지냉각관 등에 파단전누설기법을 적용하므로써 이들 분기관의 가상배관파단을 배제하였다. 증기발생기 주증기관은 항 후 파단전누설기법을 적용할 대상 배관이다. 나머지 분기관 중 증기발생기주급수관의 크기는

표 2. 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단해석 대상 배관

일차측 분기관
* 밀림관(Surge Line) - 12인치
* 안전주입관(Safety Injection Line) - 14인치
* 정지냉각관(Shutdown Cooling Line) - 16인치
살수관(Spray Line) - 3인치
배수관(Drain Line) - 2인치
충전관(Charging Line) - 2인치
유출관(Letdown Line) - 2인치
장기안전주입관(Longterm Safety Injection Line) - 3인치
증기발생기 이차측 분기관
주증기관(Main Steam Line) - 24인치
주급수관(Feedwater Economizer Line) - 12인치
보조급수관(Feedwater Downcomer Line) - 6인치
재순환관(Recirculation Line) - 6인치
취출관(Blowdown Line) - 6인치
* : 한국형 표준원전에서 파단전누설기법 적용으로 가상배관파단을 배제한 분기관

12인치로서, 파단전누설기법을 적용할 대상 배관이나, 1986년 미국 Surry 2 원자력발전소의 증기발생기주급수펌프의 18인치 흡입배관이 정상운전 중 파단되어, 미국 및 국내의 원자력규제기관에서는 증기발생기주급수관에 파단전누설기법을 적용하지 않도록 추천하고 있다. 그 이외의 배관들은 6인치 이하로서 파단전누설기법을 적용하기 어려운 소규경 배관에 해당되므로 한국형 표준원전의 분기관 가상배관파단해석 대상 배관에 전부 포함된다.

2.4. 분기관 가상배관파단 유형 및 위치 결정

2.4.1. 분기관 가상배관파단 유형

분기관 가상배관파단은 원주방향파단, 축방향파단, 누설균열 및 관통균열로 분류된다. 이 중 원자로냉각재계통 기기의 동적거동에 영향을 미치는 것은 원주방향 파단과 축방향파단이다. 원주방향파단은 물리적인 방법으로 파단 후의 배관 거동을 구속하지 않는 한 배관이 완전히 절단, 분리되는 파단 유형으로서, 유체의 방출면적은 배관 내부단면적과 동일하다고 가정한다. 한편, 축방향파단은 배관축 방향으로 배관 벽면이 갈라지는 유형으로서, 방출되는 유체에 의한 추력의 방향이 배관 축

방향과 직각이 되며, 파단 부위의 형상은 배관 내부단면적과 동일한 크기의 원형 또는 타원형으로 가정한다.

2.4.2. 분기관 가상배관파단 위치 결정

1인치보다 큰 배관의 단말점, 즉 기기의 노즐과 배관의 열팽창을 완전히 구속하는 배관앵커 등에는 원주방향파단을 반드시 가상하여야 한다. 또한 응력 또는 피로 누적계수의 크기에 따라 배관 중간부에 대해서도 원주방향파단 또는 축방향파단을 가상하여야 한다. 그러나, 배관의 단말점과 4인치보다 작은 배관에 대해서는 축방향파단을 고려하지 않는다.[6, 7] 원자로냉각재계통 가상배관파단은 두가지 이상의 가상배관파단이 동시에 일어나지 않는 것으로 한다. 즉, 한 곳에서의 가상배관파단에 의해 원자로냉각재계통은 물론 다른 배관도 구조적으로 건전하도록 설계된다.

2.5. 분기관 가상배관파단 하중

원자로냉각재계통 분기관 배관파단에 따라 원자로냉각재계통을 가진시키는 하중으로는 추력, 제트충돌력, 부격실압력, 원자로내부 비대칭압력 등이 있다.

2.5.1. 추력(Thrust-momentum Force)

추력과 제트충돌력은 주로 유체의 압력, 배관의 단면적, 유체의 상태에 따라 그 크기가 결정된다.[6] 한국형 표준원전의 원자로냉각재계통 유체의 온도 및 압력은 Palo Verde발전소와 동일하나, Palo Verde발전소는 원자로냉각재주배관(30인치 또는 42인치)의 파단과 증기발생기주중기관(28인치) 파단을 가정하였으므로, 파단전누설기법을 적용한 한국형 표준원전의 추력은 상당히 줄어들었다. 그림 3은 이론적으로 계산되는 추력의 시간이력과 본 보고서에서 보수적으로 사용되는 추력의 시간이력을 비교한 것이다.

2.5.2. 제트충돌력(Jet Impingement Force)

원자로냉각재계통 분기관이 파단되면, 부채꼴 형상의 제트가 주위의 기기 및 배관에 방출, 충돌된다. 제트의 형상, 크기, 방향 등을 계산하여 원자로냉각재계통 동적 구조해석의 입력하중으로 이용한다.

2.5.3. 부격실압력(Subcompartment Pressure)

원자로냉각재계통 각 기기는 4개의 부격실에 배치되어 있다. 즉 원자로가 설치되는 원자로 부격실, 증기발생기와 원자로냉각재펌프가 설치되는 2개의 증기발생기 부격실, 가압기가 설치되는 가압기 부격실로 구분되어 다른 부격실에 설치된 기기의 파손으로부터 격리, 보호하게 된다. 원자로냉각재계통 분기관 파단 시 고온, 고압의 유체가 상온, 대기압 상태의 부격실로 방출되므로, 원자로냉각재계통 기기의 주위에 비대칭압력분포를 유발시켜, 원자로냉각재계통 기기에 동적하중을 작용시킨다. 한국형 표준원전에서는 원자로냉각재주배관의 가상배관파단을 배제하였으므로, 원자로 부격실에 비대칭압력분포를 유발시킬 수 있는 가상배관파단은 원자로내계측기안내관 가상배관파단과 원자로냉각재주배관의 누설크랙(Leakage Crack)이나, 무시할 정도의 하중을 유발시킨다. 증기발생기 부격실내의 증기발생기주급수관 또는 보조급수관이 파단될 시 발생하는 비대칭압력에 의한 하중은 이 때 발생하는 추력과 제트충돌력의 합과 비슷한 크기의 하중을 유발시키므로 중요하게 취급된다. 증기발생기주중기관 파단의 경우에는 그 파단 위치가 증기발생기 부격실 상부 또는 외부이므로, 유체가 격납건물 상부의 큰 공간으로 방출되므로 원자로냉각재계통 기기에 비대칭압력분포를 거의 유발시키지 않는다.

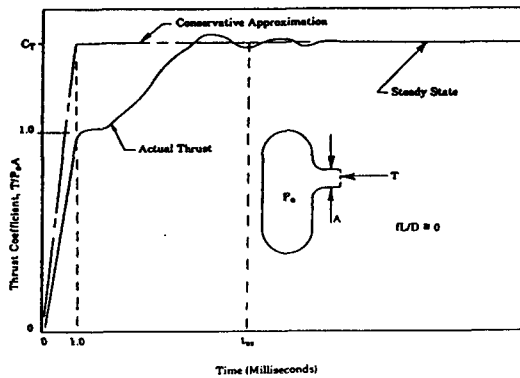
2.5.4. 원자로내부 비대칭압력(Asymmetric Blowdown Force on the Inside of Reactor Vessel)

원자로냉각재계통 일차측 분기관이 파단되면 원자로냉각재가 유출되므로, 원자로내부의 냉각재 유로에 시간에 따른 압력-유량의 과도현상이 발생하여 원자로내부구조물 주위에 비대칭압력분포가 유발된다. 이러한 비대칭압력의 크기는 분기관 파단점에서의 냉각재 유출량, 파단점으로부터 원자로까지의 배관 거리 등에 따라 결정된다. Palo Verde발전소의 경우에는 원자로냉각재주배관의 가상배관파단에 의해 원자로내부구조물은 물론 원자로냉각재계통 각 기기를 크게 가진시켰다.[8] 그러나, 한국형 표준원전의 경우는 원자로냉각재주배관과 12인치 이상의 일차측 분기관에 파단전누설기법을 적용하므로써, 본 해석에서 고려하여야 할 일차측 분기관 파단 중 가장 큰 배관은 3인치인 살수관 및 장기안전

주입관의 파단이다. 따라서, 원자로냉각재계통 일차측 분기관의 파단이 원자로냉각재계통 기기의 동적거동에 미치는 영향은 크게 줄어들었다.

2.6. 분기관 가상배관파단해석 절차

그림 4는 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단해석 절차를 간략하게 보여 주는 흐름도이다. 우선 가상배관파단 대상 분기관들을 2.3절에 따라 정한다. 각 대상 분기관의 파단 위치와 그 위치에 따른 하중의 종류 및 크



$C_T = 1.26$: 포화 및 과열 증기
 2.0 : 과냉각물
 그림 3. 추력의 시간이력

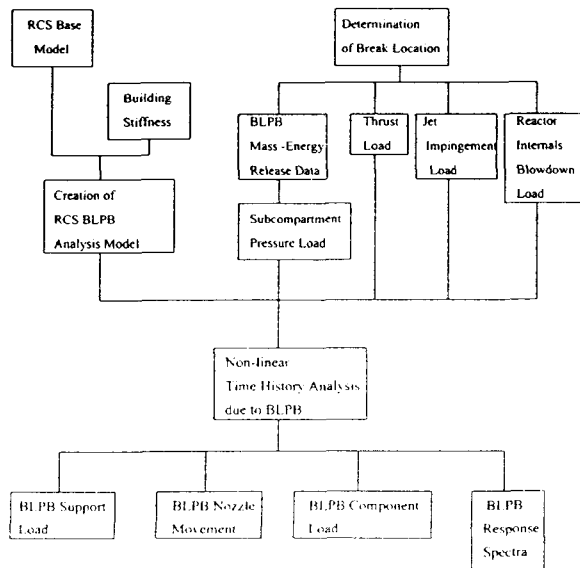


그림 4. 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단해석 절차

기를 2.4와 2.5절에서 기술한 방법에 의해 결정한다. 이러한 입력하중을 2.2절에서 작성한 원자로냉각재계통 수학적 모델에 작용시켜, 간극이 있는 기하학적 비선형을 고려한 비선형시간이력해석을 수행한다. 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단해석의 결과로는 원자로냉각재계통 기기와 지지점에 작용하는 기기하중과 지지하중, 원자로냉각재계통 기기의 변위시간이력, 가속도시간이력, 가속도응답스펙트럼 등이다. 이러한 결과는 원자로냉각재계통 기기, 원자로냉각재계통 기기에 연결된 분기관, 원자로부속계통 기기인 CEDM(Control Element Drive Mechanism)과 원자로내부계측기 등의 설계자료로 제공된다.

3. 분기관 가상배관파단해석 결과 및 검토

표 3과 표 4는 원자로냉각재계통을 구성하는 기기 중 대표적인 기기인 원자로와 증기발생기의 지지 구조물과 이들 기기에 연결된 원자로냉각재주배관 노즐에서의 설계하중을 한국형 표준원전과 Palo Verde발전소에 대해 비교한 것이다. 또한 한국형 표준원전의 경우 이러한 설계하중을 유발하는 가상배관파단의 종류를 나타내었

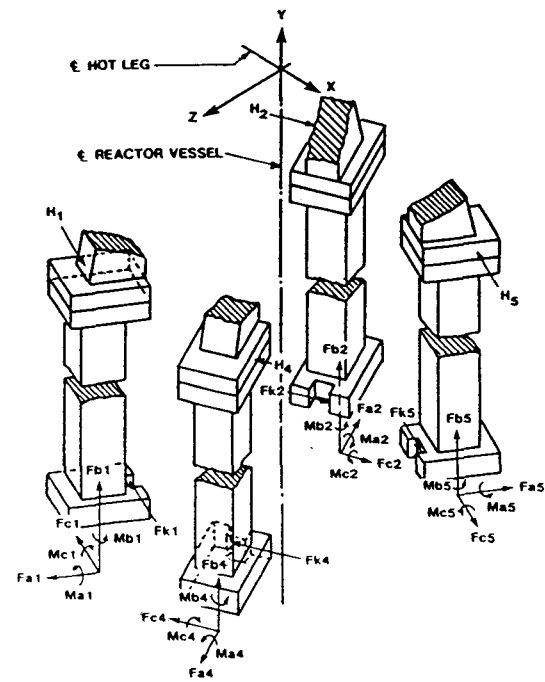


그림 5. 원자로 지지하중의 위치와 방향

표 3. 가상배관과파단에 의한 원자로 지지하중과 노출하중

하중 위치	하중 기호	하중 종류	Palo Verde (원자로냉각재- 주배관 파단)	한국형 표준원전 (분기관 파단)	비율 (한국형 표준원전/ Palo Verde)
지지컬럼	Fa	shear	50	10(FW) ⁽²⁾	0.20
앵커점	Fb	axial	3000	350(FW)	0.12
	Fc	shear	350	155(FW)	0.44
	Ma	bending	1000	510(FW)	0.51
	Mb	torsion	800	255(FW)	0.32
	Mc	bending	600	105(FW)	0.18
상부수평 지지점	H	force	7000	485(FW)	0.07
하부키	Fk	force	850	120(FW)	0.14
출구노즐	Mr	SRSS ⁽³⁾ of bending	42000	1370(FW)	0.03
입구노즐	Mr	SRSS of bending	5500	210(FW)	0.04

(1) Units : feet, kips

(2) 설계하중을 유발하는 분기관파단 종류 :

FW : 증기발생기주급수관 가상배관파단

(3) 제곱합의 제곱근(Square Root of Sum of Squares)

표 4. 가상배관과파단에 의한 증기발생기 지지하중과 노출하중

하중 위치	하중 기호	하중 종류	Palo Verde (원자로냉각재- 주배관 파단, 주증기관 파단)	한국형 표준원전 (분기관 파단)	비율 (한국형 표준원전/ Palo Verde)
스너버	F _{s1} F _{s2}	force	2100	360(MS) ⁽²⁾	0.17
상부키	Z ₁ Z ₂	force	1050	830(MS)	0.79
하부	Y ₁	force	1500	220(MS)	0.15
미끄럼판	Y ₂ Y ₄	force	2200	1590(MS)	0.72
	Y ₃	force	1900	270(MS)	0.14
Holddown Bolts	Y ₁ ' Y ₂ ' Y ₃ ' Y ₄ '	force	1000	(3)	
하부Stop	X ₃	force	10000	(3)	
하부키	Z ₁₁ Z ₁₂	force	2000	580(FW)	0.29
출구노즐	Mr	SRSS ⁽⁴⁾ of bending	54000	710(FW)	0.02
입구노즐	Mr	SRSS of bending	5500	1070(FW)	0.19

(1) Units : feet, kips

(2) 설계하중을 유발하는 분기관파단 종류 :

FW : 증기발생기주급수관 가상배관파단

MS : 증기발생기주증기관 가상배관파단

(3) 한국형 표준원전에는 설치하지 않았다.

(4) 제곱합의 제곱근(Square Root of Sum of Squares)

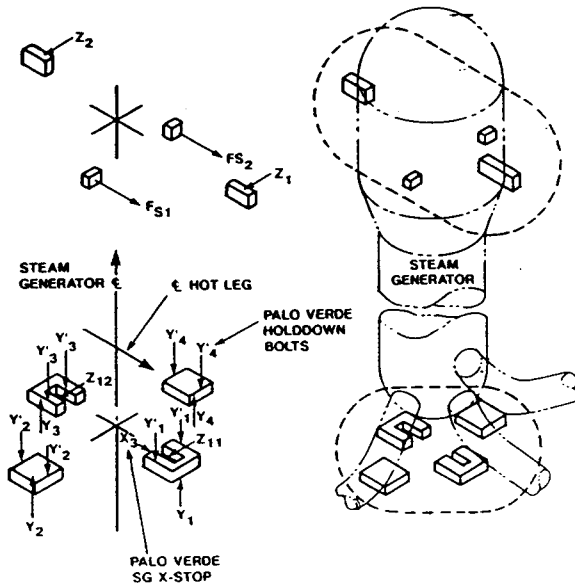


그림 6. 증기발생기 지지하중의 위치와 방향

다.

그림 5에는 표 3에 나타난 원자로 지지물과 노즐의 하중기호에 대한 위치가 나타나 있다. Palo Verde발전소에 대한 한국형 표준원전의 설계하중의 비는 지지하중의 경우는 최대 51%이며, 노즐하중의 경우는 굽힘모멘트가 중요하므로 이들의 제곱합의 제곱근(Square Root of Sum of Squares)을 비교할 때 4%에 불과하여 커다란 설계여유를 확보할 수 있었다. 원자로 하부키의 경우 Palo Verde발전소에서는 하부키와 접촉하는 곳에 탄소성 지지물을 설치하여 지지하중을 850 kips로 제한하였으나, 한국형 표준원전의 경우 지지하중이 120 kips에 불과하므로 탄소성 지지물을 제거할 수 있었다. 또한, 원자로의 최대설계하중을 유발시키는 가상배관파단은 증기발생기주급수관 파단임을 알 수 있다.

그림 6에는 표 4에 나타난 증기발생기 지지물과 노즐의 하중기호에 대한 위치가 나타나 있다. Palo Verde 발전소에 대한 한국형 표준원전의 설계하중의 비는 지지하중의 경우는 최대 79%이며, 노즐하중의 경우는 19% 이하이다. Palo Verde발전소의 경우 원자로냉각재주배관의 가상파단에 의해 유발되는 증기발생기의 과대한 움직임과 응력을 방지하기 위해 하부미끄럼판(Sliding Base)에 Holddown 볼트 및 Stop을 설치하였으나, 한국형 표준원전의 경우는 원자로냉각재주배관

가상파단이 배제되었으므로 이를 설계하지 않아도 충분한 설계여유를 확보할 수 있었다. 상부키 및 하부미끄럼판의 측면지지하중(Y_2, Y_4) 경우 Palo Verde발전소에서도 증기발생기주급수관 파단 시 최대 설계하중이 유발되므로, 한국형 표준원전의 설계하중과의 차이는 주급수관 크기 변경에 따른 입력하중 차이 만큼이다(Palo Verde발전소 - 28인치, 한국형 표준원전 - 24인치). 증기발생기 상부 지지물인 스너버와 상부키 그리고 하부 미끄럼판의 수직방향의 최대 지지하중은 증기발생기주급수관 파단에 의해 발생되고, 그 이외의 최대 지지하중과 노즐하중은 증기발생기주급수관 파단에 의해 발생된다.

한국형 표준원전의 분기관 가상배관파단해석 대상 배관을 크게 세가지로 분류하면, 일차측 분기관, 증기발생기주급수관, 그리고 증기발생기주급수관 이외의 이차측 분기관으로 분류할 수 있다. 이 때 증기발생기주급수관 이외의 이차측 분기관 중 제일 지배적인 가상배관파단은 증기발생기주급수관 가상배관파단임을 본 해석으로부터 확인하였다. 표 5는 증기발생기주급수관 가상배관파단시 발생하는 원자로냉각재계통 지지하중을 기준으로 하여 일차측 분기관과 증기발생기주급수관 가상배관파단시 발생하는 원자로냉각재계통 지지하중의 비율을 보여 준다.

이상의 비교, 분석으로부터 원자로와 원자로냉각재펌프의 동적거동을 지배하는 가상배관파단은 증기발생기주급수관 가상배관파단이며, 증기발생기의 동적거동을 지배하는 가상배관파단은 증기발생기주급수관 가상배관파단과 증기발생기주급수관 가상배관파단임을 알 수 있다.

4. 결 론

1987년 개정된 미국의 10 CFR Part 50 Appendix A GDC 4를 한국형 표준원전에 적용하므로써, 이 전 원전의 원자로냉각재계통 가상배관파단에 의한 하중을 현저히 줄이므로써, 설계상 다음과 같은 이점을 확보할 수 있었다.

- (1) 원자로내부구조물과 핵연료의 설계여유 확보
- (2) 원자로냉각재계통 기기 지지물의 설계여유 확보
- (3) 격납건물의 설계여유 확보
- (4) 증기발생기 Holddown 볼트 및 Stop, 원자로냉각재펌프 몸체 구속장치, 그리고 원자로냉각재주배관 밀림판, 안전주입관, 정지냉각관 등 파단전누설 기법을 적용한 배관 주위에 설치된 배관타격 구속

표 5. 한국형 표준원전의 일차측 및 이차측 분기관 가상배관파단효과 비교

기 기	지 지하중	증기발생기 주급수관 가상배관파단	증기발생기 주증기관 가상배관파단 ⁽¹⁾	일차측 분기관 가상배관파단 ⁽¹⁾
원자로				
	Fa	1.0	0.55	0.30
	Fb	1.0	0.35	0.30
	Fc	1.0	0.25	0.15
	Ma	1.0	0.85	0.45
	Mb	1.0	0.05	0.01
	Mc	1.0	0.55	0.30
	H	1.0	0. ⁽²⁾	0. ⁽²⁾
	Fk	1.0	0. ⁽²⁾	0. ⁽²⁾
증기 발생기				
	Y ₁	1.0	2.25	0.35
	Y ₂ Y ₄	1.0	8.00	0.25
	Y ₃	1.0	5.00	0.50
	Z ₁₁ Z ₁₂	1.0	0.15	0.10
	Fs	1.0	1.90	0.15
	Z ₁ Z ₂	1.0	1.05	0. ⁽²⁾
원자로 냉각재 펌프				
	V ₁ V ₂ V ₃ V ₄	1.0	0.50	0.65
	H ₁ H ₂	1.0	0.80	0.35
	H ₃ H ₄	1.0	0.55	0.35
	P	1.0	0.40	0.15

- (1) 증기발생기주급수관 파단에 따른 지하중에 대한 비율
 (2) 간극이 접촉되지 않는 경우임

장치, 제트보호물 등의 제거 가능

- (5) CEDM, 원자로내부계측기안내관, 원자로냉각재펌프 모터 등의 원자로냉각재계통 기기에 연결된 부속기와 분기관의 설계여유 확보

또한, 향후 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단해석을 간략하게 수행할 수 있도록 다음과 같은 지배적인 가상배관파단을 설정할 수 있었다.

- (1) 원자로냉각재계통 기기에 대해서는 이차측 분기관 가상배관파단인 증기발생기주증기관 및 주급수관 파단의 경우에 대해서만 해석을 수행하고, 이외의 이차측 분기관과 3인치 이하의 일차측 분기관 파단은 더 이상 고려하지 않는다.
 (2) 현재 미국 핵증기공급계통업체 및 원전회사에서는

증기발생기주증기관에도 파단전누설의 적용을 활발히 진행하고 있으며, 개량형경수로에 대해서는 미국 NRC에서도 이를 승인하고 있으므로[9], 향후에는 원자로냉각재계통 분기관 가상배관파단해석은 증기발생기주급수관 파단에 대해서만 수행하여도 될 것으로 예상된다.

참고문헌

1. ASME, 'ASME Boiler & Pressure Vessel, Section III' (1992)
2. US NRC, 'Evaluation of Potential for Pipe Breaks', NUREG-1061, Volume 3 (1981)

3. J.J. LaRussa and K.Y. Lee, "Effect of Tributary Pipe Breaks on Reactor Coolant System Response for YGN 3 & 4", Proceeding of the International Symposium on Pressure Vessel Technology and Nuclear Codes and Standards (1989)
4. K.S. Yoon, etc., "A Study on The Thermal Movement of The Reactor Colant System for PWR", Journal of the KNS, Vol. 27, No. 3, June (1995)
5. GTICES, "GT/STRUDL User's Manual" (1994)
6. ANS, "Design Basis for Protection of Light Water Nuclear Power Plants Against the Effects of Postulated Pipe Rupture", ANSI /ANS-58. 2 (1988)
7. US NRC, "Standard Review Plan Section 3.6", NUREG-0484 (1987)
8. ABB-CE, "Design Basis Pipe Breaks", CEN-PD-168-A (1977)
9. ABB-CE, "CE-SSAR Design Certification, System80+ Standard Design" (1994)