

중수로형 핵연료 저장대의 내진해석 방법

Seismic Analysis of Spent Fuel Storage Structures for PHWR Plant

신 태 명*
Tae-Myung Shin

Key Words : Seismic Analysis(내진해석), Submerged Structure(수중구조물), PHWR(가압중수로), PWR(가압경수로), Sliding(미끄러짐), Tipping(기울어짐), Fluid Dynamic Effect(유체동적효과)

ABSTRACT

The seismic analysis method of spent fuel storage structures for PHWR plant is introduced in comparison with the method for PWR plant. Investigating the structural characteristics of the storage structures, the former is vertically stacked fuel storage trays, while the latter is welded honeycomb type structure. However, as both structures are submerged and free standing, the analysis methods to anticipate the seismic response of both structures are complicated. For the better estimation of actual seismic response, how to model the dynamic properties and the structural behaviour is the key issue. In this paper, the overall procedures of the seismic modelling and stability check for seismic sliding and overturning of the two different storage structures are discussed in the viewpoint of analysis reliability.

1. 서 론

현재 국내에는 경수로형(14기)과 중수로형(4기) 원자로를 합쳐 총 18기의 원자력발전소가 가동 중이다. 원전 운전에 따라 발생하는 사용후연료를 원전건물 내에 일정기간 동안 안전하게 저장하기 위한 수중구조물로서 사용후핵연료 저장대가 사용되고 있는데 그 기능상 저장된 핵연료 사이에 일정간격을 유지하여야 하고 냉각이 용이해야 하며 지진에도 잘 견디는 구조물이어야 한다. 내진설계의 관점에서 보면 사용후핵연료 저장대가 바닥에 고정 없이 자유롭게 놓이며 수중에 있다는 점과 지진하중을 받게 된다는 점 등의 특징으로 인해 설계지진시 응답을 정확하게 예측하는 것이 간단치 않으며 때로 충분한 내진해석 기술과 경험을 요한다.

지금까지 경수로형 원전의 핵연료 저장 구조물의 내진해석 기술에 대해 소개된 바 있지만^[1] 중수로형

저장구조물에 대해서는 극히 제한적이었다. 따라서 본 논문에서는 현재 운전중인 중수로형 사용후연료 저장대의 일반적인 내진해석 방법을 소개하고 이와 기능은 유사하나 구조적 특징이 다른 경수로형 사용후연료 저장대의 내진해석 방법과 그 특성을 비교해 본다. 일반적으로 해석 방법의 선택은 대상 구조물의 특성, 동적 물성치, 입력하중 등을 고려하고 사용 가능한 해석 프로그램, 인력 및 해석 경험에 대한 판단에 의하여 이루어지기 때문에 해석절차만의 단순 비교는 큰 의미가 없다. 그러므로 여기서는 구조적인 특성에 따른 동적 모델링 기술과 안전성 검토 기준 등에 대하여 관심을 두고 주로 살펴보기로 한다.

2. 저장 구조물의 내진해석

2.1 대상 구조물의 구조적 특성

1) 중수로형 사용후연료 저장구조물

중수로형 원전의 사용후연료는 서비스건물 내 주 저장조의 수중에 저장된다. 주저장조는 8~9 년분의 사용후연료를 수중에서 저장할 수 있는 구조이다. 핵연료는 한 줄에 12개씩 넓혀 두 줄에 총 24개의 핵

* 충주대학교 기계설계학과

E-mail : tmshin@chungju.ac.kr

Tel : 043-841-5377, Fax : 043-841-5370

연료를 저장할 수 있는 트레이에 담겨 주저장조로 이송된 다음, 저장조 바닥에 초기에 설치되는 지정된 지지대 위에 한 단씩 차곡차곡 쌓는 방식을 취하며 현재 16단까지 적재하도록 운영하고 있다. 저장조에는 이러한 트레이를 2X1 그룹 또는 2X2그룹 형태로 지지대에서 조합하여 적재하고 있다.^[2]

각 트레이의 적재는 저장조 바닥에 놓이는 지지대에 의해 지지되는데, 지지대는 저장조 바닥 허용하중을 초과하지 않게 해주고, 최하단 트레이 내 핵연료 다발과 바닥 사이에 간격을 유지하며, 트레이 주위로 냉각수가 흐르게 해주는 역할을 한다. 각 지지대는 Fig. 1에서 보듯이 중앙부를 지나 대각선 방향으로 교차하는 5인치 직경의 스테인레스 보강관이 있으며 각 지지대는 바닥면에 대해 수평을 유지하기 위해 하부에 6개의 바닥지지대가 설계되어 있다. 상부에 있는 2개의 원뿔형 고정편이 적재단에서 최하단 트레이의 위치를 잡아준다.

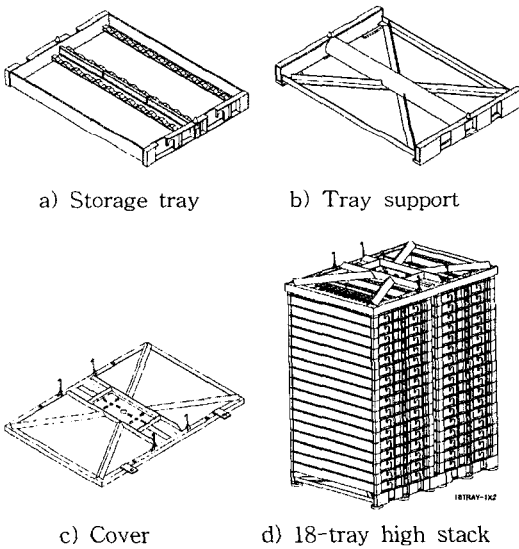


Fig. 1 Schematic diagram of PHWR fuel storage tray, support, cover, and stacks^[3]

핵연료 저장트레이는 스테인레스 용접구조물로서 강성재와 모서리판으로 구성된 2개의 채널 양쪽 레일부, 그리고 양쪽에 보강판을 댄 앵글부에 의해 연결되며 중앙부를 통과하는 T자형 막대로 구성된다. 각 트레이는 2개의 원뿔형 핀과 2개의 구멍이 있으며, 핀들은 적재시 위에 놓이는 트레이의 구멍에 삽입된다. 모든 트레이는 핵연료를 다 채운 18단의 트레이를 지지할 수 있어야 한다. 트레이는 최대 18단으로

쌓으면 안전 덮개를 씌워 밀폐봉과 함께 지지대에 고정시키는 개념이다.

2) 경수로형 사용후연료 저장구조물

저장대 및 그 모듈의 설계는 저장될 핵연료의 크기, 농축도, 총 노심핵연료 수, 1회 재장전 최대량, 총 저장요구량, 그리고 저장조 형상 등에 의해 영향을 받는다. 참고로 Fig. 2에는 표준원전 설계에 사용된 10x12형 저장대 모듈의 전형적인 형상을 보인다. 그 구조를 살펴보면 약 3mm 두께의 스테인레스강판을 굽혀서 핵연료 크기의 사각기둥 형상으로 만든 단위 셀들을 하나씩 대각선 방향에 붙여서 상하 약 1m 정도씩 용접하여 제작한다. 핵연료의 삽입 및 인출이 용이하도록 각 셀벽과 핵연료 사이에는 일정한 간극이 있으며 추후 용량증대의 필요시 이 사이에 중성자 흡수체(상자모양)가 삽입된다. 하단부에는 핵연료 지지판이 끼워져 고정되고 그 아래로 반달형의 냉각유로를 설계하였다. 바닥에는 바깥쪽 셀을 따라 보강판을 대고 네 모퉁이 셀부분에 다시 바닥지지판을 부착하였다. 저장대의 피치는 사용되는 경수로 핵연료의 크기 및 농축도에 의한 임계도 요건을 감안하여 약 9~11인치로 설계되고 있다.^[3]

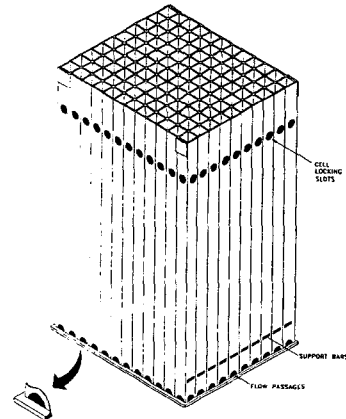


Fig. 2 Schematic diagram of PWR rack module

3) 구조 비교

중수로형 저장 구조물은 핵연료를 바구니 모양의 트레이에 담아서 쌓아 놓는 형태의 다층형 적재구조물로서 트레이간에는 핀으로 지지하고 있는데 반하여 경수로형의 경우는 단일형 용접구조물로서 벌집모양의 수직공간에 핵연료를 삽입하는 방식이다. 두 구조물 공히 저장조 바닥에 고정 없이 놓이며 스테인레스강을 재료로 하고 있다.

2.2 설계요건

1) 중수로형 사용후연료 저장구조물

설계지침에 의하면 중수로형 사용후연료 저장트레이와 지지대의 내진 해석 및 검증 절차는 캐나다 표준인 “중수로형 원전의 내진검증 절차”^[4]를 따르며 응력 평가 및 허용기준도 역시 캐나다 표준 “강구조물의 한계상태 설계법”^[5]을 적용한다.

2) 경수로형 사용후연료 저장구조물

경수로형 사용후연료 저장대의 내진해석 및 검증 절차는 미국원자력위원회(NRC)의 표준심사계획(SRP 3.7.2)^[6]을 따르며 응력 평가 및 허용기준은 ASME(미국기계학회) 코드, Sec III(원자력기기), NF(지지구조물)^[7]를 따른다.

3) 설계요건 비교

대부분의 원전 구조물과 유사하게 각 저장조의 기본 설계요건은 초기 설계국의 것을 따르고 있다. 각국의 표준들이 원전 운영을 가장 먼저 시작한 미국의 표준을 많이 참조하고 있기는 하지만 기본적으로 각국의 여건에 맞도록 작성된 자국 표준에 따른 것을 요구하고 있다. 따라서 나라별 기준 간에 차이를 보일 경우 한국과 같이 몇 가지 다른 원자로형을 가진 입장에서는 인허가 관점에서 1) 국내 허용기준의 일관성을 유지해야 하는가 및 2) 원자로형의 설계개념이 다르므로 각각에 맞춰 적용할 것인가의 두 가지 측면에 대해 사안별로 적절한 판단이 필요할 것이다.

2.3 내진해석 절차

1) 중수로형 사용후연료 저장구조물

사용후연료 저장대의 내진해석은 선형해석 모델에 시간이력 해석법을 채택하였다. 이를 위해 동적해석용 컴퓨터 프로그램인 STARDYNE 프로그램^[8]의 “DYNRE1” 모듈을 활용하여 직교모드 시간이력법을 채택하였다. 내진해석 절차는 다음과 같다.

(a) 내진모델의 작성

트레이 17단 및 18단 적재시 각각의 경우에 대하여 덮개 유무에 따른 2×1 및 2×2 그룹형 적재대의 총 8가지 종합모델을 작성하였으며 유체동적 효과는 유체의 부가적 가상질량으로 고려하였다.

(b) 모드 해석

필요한 개수만큼의 고유진동 모드를 얻기 위하여 “LANCZOS”법을 활용한다.

(c) 시간이력 해석

내진응답을 얻기 위해 DYNRE1 시간이력 해석을 수행한다. 감쇠비는 구조물 전체가 수중에 잠

겨 있고 총질량의 85% 정도가 구조용 부재가 아니면서 없혀 있는 핵연료 다발에 의한 것이며 구조물간의 마찰은 고려하지 않으므로 대체로 보수적인 값으로서 7%를 사용한다.

2) 경수로형 사용후연료 저장구조물

사용후연료 저장대의 내진해석은 비선형해석 모델에 시간이력 해석법을 채택한다. 이를 위해 동적해석용 컴퓨터 프로그램인 ANSYS를 사용하며 이외에도 DYEQMOD, ADDMASS, MODSK, ANNULUS, CESHOCK 등 몇 가지 동적해석 전용 프로그램도 동시에 활용한다. 내진해석 절차는 다음과 같다.

(a) 내진모델의 작성

비선형해석을 위한 단순화된 모델을 보다 정확하게 작성하기 위해서는 몇 가지 크기 저장대에 대하여 먼저 저장대 모델형상과 거의 유사한 유한요소모델을 작성한다.

(b) 모드 해석

각 모델에 모드 해석을 수행하여 얻어지는 고유진동수 및 모드 형상을 이용하여 이와 동특성이 거의 유사한 집중질량 보모델을 작성한다. 여기에 실험을 통해 검증된 핵연료의 보모델과 용량증대시 삽입될 중성자흡수체의 모델을 첨가하여 3열의 보모델을 먼저 작성한다.

(c) 비선형특성 및 상세모델의 작성

수중거동에 의한 수력학적 효과, 감쇠계수, 간극 및 충격스프링, 기울어짐, 미끄러짐 등에 대한 모델 변수 및 조건을 수립하고 설정한 물리량들을 적절히 모델에 첨가하여 모델을 완성한다.

(d) 시간이력 해석

앞에서 완성된 비선형 모델을 이용하여 시간이력 지진해석을 수행한다. 핵연료 집합체의 감쇠비는 실험을 통하여 얻어진 값을 토대로 1차 모드에서 8%, 그리고 3차 모드에서 5%로 주어졌다. 또 저장대 및 중성자흡수체는 용접구조물로서 원자력 규제지침서에서 권장하는 값 (안전정지지진에서 4%, 운전기준지진에서 2%)을 사용하고 있다. 그리고 감쇠는 비례감쇄로 가정하여 비례감쇄계수를 구하여 계산에 적용한다.

3) 해석절차 비교

해석절차는 두 노형 간에 전반적으로 유사하지만 중수로형의 경우 모델링의 효율화를 위해 부구조화 모델 방식을 써서 선형해석을 수행하는 점과 경수로

형의 경우 선형모델을 작성하여 모드해석에 이용한 다음 집중질량을 이용한 비선형 모델의 해석을 하고 나중에 응력해석시 다시 선형모델을 활용한다는 점 등의 차이가 있다.

2.4 해석을 위한 모델링

1) 경수로형 사용후연료 저장구조물

(a) 저장트레이

Fig. 3과 같은 단위 트레이에 대한 유한요소 (FE) 모델을 작성한다. 여기서는 해석 효율을 고려하여 부구조화 기법을 적용하였는데 유한요소 모델은 STARDYNE 컴퓨터 프로그램의 부구조화 기법에 의해 하나의 강성행렬로 압축시킨다. 1, 2 차 부구조화를 통해 각 트레이는 적재대 하나당 차례로 2000여개의 절점에서 29개의 경계절점으로, 그리고, 다시 9개의 질량 절점으로 줄어든다. 단, 지지대 및 덮개와 결합되는 최하위 및 최상위 트레이는 지지대 및 덮개와의 결합을 위하여 예외적으로 1차 압축시의 경계절점들을 유지시킨다.

인접한 두 트레이 접촉은 하위 트레이 상부 10개의 경계절점과 상위 트레이 하부 10개의 경계절점을 연결하는 강성보로 표현되는데 그 연결조건은 다음과 같다.

- o 두 트레이의 경계절점들 간에 수직방향으로 이격이 없는 것으로 보며, 이는 트레이간의 전도 불안정성이 없음을 나타낸다. 안정성 조건은 뒤에서 복원모멘트와 전도모멘트를 비교하여 확인한다.
- o 채널의 편과 홀에서의 경계절점들끼리는 두 수평방향에 대해 연동시킨다. 나머지 절점들은 지지전단력이 두 트레이간의 마찰력보다 크다는 것을 표현하기 위하여 두 수평방향에 대해 구속하지 않는다.
- o 경계절점 간의 비틀림 모멘트 자유도(수직축에 대한 회전 자유도)도 역시 지진력이 마찰력을 초과한다는 가정으로 구속하지 않는다.
- o 두 개의 수평축에 대한 굽힘 모멘트는 채널 가로대의 길이가 유한하므로 두 트레이 사이에 전달되는 것으로 본다.

(b) 트레이 지지대 및 안전덮개

지지대 및 덮개도 각각 유한요소로 모델하여 최하부 및 최상부 트레이에 맞는 경계절점 행렬로 압축하였다. 연결조건은 트레이간의 조건과 동일하게 적용한다.

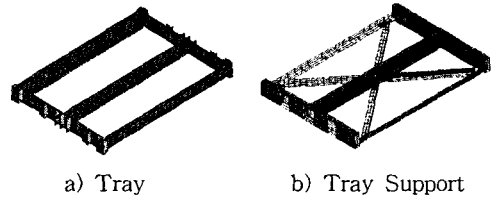


Fig. 3 FEM analysis model for PHWR tray and tray support

(c) 그룹적재대

16단 트레이를 1개의 지지 구조물 위에 적재하기 위해 16단 트레이의 2차 압축모델과 지지구조물의 1차 압축모델을 조합한다. 2x1 그룹의 배치에 대해 2개의 각 적재모델의 지지대 사이를 연결시킨다. 두 지지대 연결요소는 종합모델에서 표시한다. 유사하게 2x2 그룹 배치에 대해서도 4개의 단위 적재모델의 지지대끼리 연결시킨다. 네 지지대 사이의 연결요소도 종합모델에서 표시한다.

(d) 질량계산

내진해석에 활용된 총 질량은, 강구조의 질량 및 수중구조물의 진동에 의해 야기되는 유체 부가 질량의 두 부분으로 구성된다. 트레이당 총질량은 구조부의 질량 절점들로 나뉜다. 강 질량에 유체 부가질량을 더하여 집중질량화 함으로써 적재대는 지진시 마치 공기 중에서 진동하는 것과 같이 보고 해석한다. 물에 의한 부가질량은 경험식으로 계산한다.

2) 경수로형 사용후연료 저장구조물

먼저 핵연료 저장대, 중성자흡수체 및 핵연료 집합체와 같은 구조물들은 유한요소모델을 작성하여 모드 해석을 거치며 이와 동적으로 등가인 집중질량 모델로 작성하며 각 구조물 사이의 수력학적 효과, 감쇠계수, 충격스프링 및 마찰 등과 같은 물리적 특성을 고려한 해석 모델을 작성한다. 그리고 Fig. 4에 주어진 개수보다 더 적은 질량점을 택하여 모델을 단순화하려는 것이 일반적인 경향이다. 지진시 핵연료는 저장대의 지지판 위에 얹혀 있어 미끄러지면서 간극 내에서 자유로이 거동하다가 저장대의 쉘벽과 충돌이 일어날 수 있으므로 충격스프링으로 모델한다. 또한, 저장대모들끼리 및 저장조 벽과의 사이에도 간극이 존재한다. 이 때 각 간극 내에 존재하는 냉각수가 가지는 가속도에 의한 관성효과는 Fritz의 식^[9]을 적용하여 유체동적효과를 고려한다. 그리고 핵연료와 저장대는 각각 저장대와 저장조 내에서 미끄러지거나

기울어지며 거동할 수 있다고 보고 마찰계수와 비틀림강성을 비선형 모델에 포함시킨다.

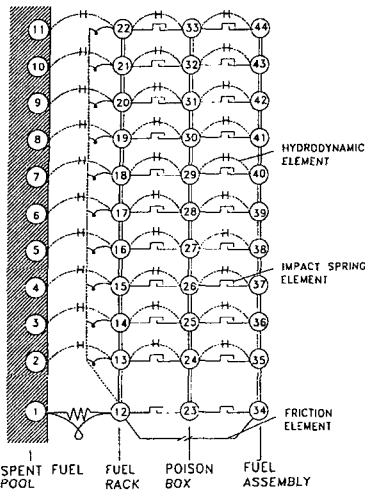


Fig. 4 Nonlinear seismic model of PWR rack

3) 모델링 비교

우선 중수로형 핵연료저장대에 대한 지진해석은 선형 모델을 이용하여 수행하며 해석결과를 기울어짐 발생 및 미끄러짐 발생을 위한 조건과 비교함으로써 발생 여부 또는 안전여유도를 체크하는 방법이다.

이에 반해 경수로형 저장대의 지진해석은 선형 모델을 사용하여 모드 해석을 수행한 후 이와 동적으로 동일한 거동의 집중질량형 비선형 모델을 작성한 다음 기울어짐 각도와 발생시 미끄러짐 거리에 대한 시간이력을 계산하여 전도가능성과 주변 인접 구조물과의 충돌여부를 판단한다. 경수로형 해석 방식의 경우 상세 계산이 가능하고 불필요한 마진을 줄여주는 장점이 있는 반면 해석에 많은 경험을 요구하고 시간소요가 많은 단점이 있다. 예로서, 중수로형 저장대의 기울어짐 계수가 1보다 작으면 기울어짐이 시작한다는 의미이며 그 기울어짐 각이 크지 않다면 진동형태로 나타나는 지진의 특성상 대부분 복원되는 것으로 나타난다. 그러나 중수로형 해석은 기울어짐이 시작되면 무조건 전도가 된다고 보수적으로 보았으며 경수로형의 경우는 기울어짐 시작 후에도 계속 실제 비선형 거동을 해석한 결과 전도와는 아직 충분하 마진이 있음을 확인한다.

2.5 입력지진

1) 중수로형 사용후연료 저장구조물

사용후연료 저장 적재대의 내진해석용 수평방향

지진입력을 참고로 Fig. 4에 나타냈다. 사용후연료 저장 적재대의 내진해석에는 시간이력법을 채택하였는데 지진입력은 0.2g 설계기준 지진에 해당하는 지진 시간이력을 IEEE344^[10]에 따라 작성하여 보수적 해석을 위해 10% 증가시켜 사용하였다. 그리고 저장조 바닥층 높이에서 3 방향 지진을 동시에 작용시켰다. 위와 같이 수평지진과 수직지진 사이에 있을 수 있는 위상차 효과를 고려하기 위하여 위상이 같거나 다른 두 가지 경우로 나누어 독립적으로 해석하였다.

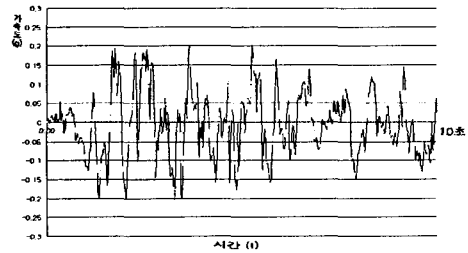


Fig. 5 Example of artificial input time history for seismic analysis of PHWR tray

2) 경수로형 사용후연료 저장구조물

비선형 해석을 하므로 시간이력법을 활용하여 수행한다. 지진입력으로 사용되는 0.2g 설계기준 지진에 해당하는 시간이력은 보수성을 높이기 위하여 미국원자력위원회의 규제지침서에서 80년대 말부터 그 요건이 크게 강화된 절차에 따라 작성되며 결과적인 형상은 Fig.4의 중수로형과 유사하다. 서로 랜덤하게 작성된 3 방향 지진을 사용하되 저장조 바닥층 높이에서 수평과 수직 방향 각각에 대해 2차원 해석을 독립적으로 수행한 후 그 결과를 조합하는 방식을 채택한다.

3) 입력지진 비교

중수로형 저장대의 인공 입력지진의 작성에 이용된 IEEE344^[10]에서는 수직 및 수평 입력에 대한 독립적인 랜덤 입력이 곤란한 경우 대안적으로 다음 4가지를 만족할 때 수평 및 수직 방향에 대한 종속적인 입력거동의 사용을 허가하고 있다. 즉, 해당요건은 ① 동일 위상의 복수 입력, ② 입력 중 하나를 180도 위상차가 나도록 입력, ③ 수직축에 대해 구조물을 90도 회전하여 동일 위상의 복수 입력, ④ 수직축에 대해 구조물을 90도 회전하여 180도 위상차의 단일 입력이다. 상기한 요건 항목은 종속적인 입력이 사용될 때 두 방향간 상호

립성의 부재를 보완하려는 목적인데 두개의 독립적인 2축방향 상호작용에 대해서는 각각 단일해석 수행만으로 동시에 수용이 가능하다. 즉, ①항과 ③항은 단일 동일위상 해석으로, 또한, ②항과 ④항은 수직입력 방향을 변경한 다른 하나의 상이위상 해석을 통해 가능하다. 이러한 방법은 소위 “결정론적 방법”으로서 엄격히 적용되며 통계적으로 볼 때 독립적인 입력을 꼭 사용해야 하는 것은 아니다.

이에 반하여 경수로형 저장대 해석에 적용된 인공 입력지진은 3방향 랜덤하게 작성되며 에너지 관점 등 보완점들에 대한 요건의 추가로 인하여 상대적으로 볼 때 중수로형의 그것보다는 더 보수적인 것으로 알려져 있다.

3. 해석결과와 분석

3.1 내진안정성 평가

1) 중수로형 사용후연료 저장구조물

① 기울어짐 평가

적재대 지지구조물 위의 트레이 적재탑, 콘크리트 바닥 위의 그룹 적재대의 기울어짐 여부를 확인하는데 기울어짐 안정성 평가기준은 다음과 같다.

안전계수(S) = (복원모멘트) / (총 전도모멘트)

만일 S>1.0이면 구조물은 안전하며 들림이나 기울어짐이 없는 것으로 본다. 전도모멘트는 그룹 적재대 및 트레이하부에 모델한 돌출보 요소들에 의해 계산된다. 그리고 복원모멘트는 자중과 부력, 모멘트 팔길이를 고려하여 계산한다.

② 미끄러짐 평가

에폭시 코팅된 콘크리트 바닥 위의 2×1 또는 2×2 그룹 적재대의 미끄러짐 여부를 확인하는데 미끄러짐 안정성 평가기준은 다음과 같다.

$$\text{계수}(\mu) = \frac{(\text{바닥층에서 수평지진력})}{(\text{자중} - \text{부력} - \text{수직지진력})}$$

만일 계수 μ 값이 지지대와 콘크리트 바닥에 에폭시 코팅면 사이의 마찰계수보다 작으면 구조물은 미끄러짐에 안정적인 것으로 본다. 바닥면에서의 수평지진력은 최하단 단일 돌출보의 보양단 전단력과 같다. 실험실 시험의 결과인 허용 마찰계수 $\mu = 0.65$ 를 참고로 하여 에폭시 보강 콘크리트 바닥면에서 적재대의 미끄러짐 안정성을 보장하기 위하여 μ_1 과 μ_3 은 미끄러짐 발생조건 값인 0.65보다 작으면 미끄러짐이 없다고 보고 있다.

2) 경수로형 사용후연료 저장구조물

① 기울어짐 평가

기울어짐에 대한 저장대 최악의 저장조건을 고려하여 기울어짐 각을 시간이력으로 계산하며 최대값을 전도 조건과 비교한다. 특히, 미끄러짐이 일어나지 않는다는 가정 하에 최대 기울어짐을 계산하며 바닥과의 충돌에 의한 구조적 건전성도 검토한다.

② 미끄러짐 평가

지진시 저장조내 최대 미끄러짐을 시간이력으로 계산하여 그 최대값에 대해 이웃한 주변 저장대와 의 충돌여부를 체크한다. 설계 간격보다 큰 미끄러짐 변위가 계산되면 충돌이 없도록 간격을 더 띄워 설계한다.

3) 안정성 평가의 비교

① 기울어짐 평가

중수로형 저장대의 경우 기울어짐 안전계수는 기준값 1보다 작아지면 기울어짐이 시작된다는 의미로서 바로 전도됨을 의미하는 것은 아니다. 예로서 경수로 원전의 경우는 기울어짐이 시작된 뒤의 거동 해석을 실제로 수행하여 전도까지 얼마나 여유가 있는지를 계산한다. 그 동안의 기울어짐 비선형 해석을 참고로 할 때 최대가속도에 의해 일정량의 기울어짐이 발생한 후에도 방향이 수시로 바뀌는 시간기록의 특성에 의해 대부분 복원되는 응답특성을 보이는 점을 고려할 때 안전계수가 기준값 1에 근접하더라도 전도 현상까지는 아직 어느 정도의 여유도가 존재한다는 점을 알 수 있다.

② 미끄러짐 평가

미끄러짐 마찰계수는 상호재료의 종류, 표면거칠기, 습도조건 등에 따라 다르므로 보통 특정 조건의 미끄러짐 해석의 사용할 마찰계수 값의 신뢰도를 높이기 위해서는 실제와 유사한 조건의 실험을 통하여 얻고 있다. 중수로형 저장대의 경우 미끄러짐 시작 여부에 관심을 두고 있으므로 정마찰계수가 사용되고 있다. 안정성 측면에서 실험치의 신뢰도와 마진에 달려 있으며 실제로 미끄러짐이 발생하더라도 경수로형 저장대의 경우에서 볼 수 있듯이 지진 특성상 실제 미끄러짐 변위는 그다지 크지 않은(약 3인치 이내로서 간격범위) 것으로 나타나고 있다.

3.2 응력 해석

지진력을 구하고, 적재대의 지진거동 안정성을 평가하면 다음 단계는 적재대의 구조적 건전성을 보장하기 위하여 각 구조물(저장트레이, 지지대, 덮개 등)의 응력 해석을 수행하여 코드 요건과 비교, 평가하는 것으로서 중수로형 및 경수로형 공히 유한요소모델을 이용하는 일반적인 구조해석 방법과 큰 차이가 없기 때문에 상세한 비교는 생략한다. 다만, 허용기준의 검토 방법상 중수로형 저장조의 경우는 한계상태설계법에 근거하여 제시되는 설계 검토식을 주로 이용하여 건전성 여부를 판별하는데 반해 경수로형 저장대의 경우에는 주로 부품별로 계산되는 최대응력과 재료의 허용기준치를 비교하는 방식을 취하고 있다.

4. 결 론

본 논문은 중수로형 원전의 사용후연료 저장구조물의 내진해석 방법에 대하여 소개하고 경수로형 저장대의 방법과 비교·평가하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 제시할 수 있다.

- 1) 원전 구조물은 원자로형 별로 설계개념의 차이가 있고 그에 따라 나라별 적용기준이 다를 수 있는데 몇가지 다른 설계의 원전을 운영하는 국내의 경우 대상별로 규제기준 적용의 일관성과 적합성의 문제를 신중히 할 필요가 있다.
- 2) 해석결과가 더 보수적이냐 아니냐의 판단은 해석의 가정과 적용된 물리량의 신뢰성, 그리고 모델링 방법 등이 동시에 고려되어야 한다.

참 고 문 헌

- (1) 신태명, 김인용, 1995, "가압경수형 원자력발전소 비교정식 고밀도 핵연료 저장대의 지진해석 방법에 대한 검토", 원자력학회지 제 27 권, 제 1 호, pp. 133~140.
- (2) AECL Stress Report, 1998, "Seismic Qualification of Spent Fuel Storage Stacks", file no. 86-35360 -220-001, Rev. 1.
- (3) 신태명 외 4인, 2003, "월성 원전 사용후 연료 저장대 증설을 위한 내진안정성 분석", 원자력학회 춘계학술대회.
- (4) National Standard of Canada CAN3-N289.3 -M81, 1981, "Design Procedures for Seismic Qualification of CANDU Nuclear Power Plants".
- (5) National Standard of Canada CAN3-N16.1 -M89, 1989, "Limit States Design of Steel Structures".
- (6) NRC Standard Review Plan 3.7.2, 1981, "Seismic System Analysis".
- (7) ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III, Subsection NF, 1998, "Component Supports".
- (8) User Information Manual, 1995, STARDYNE Version 4.42, Research Engineers Inc.,
- (9) Fritz R. J., 1972, "Effects of Liquid on the Dynamic Motions of Immersed Solids", J of Eng. for Industry, Trans. of ASME.
- (10) IEEE Standard 344, 1987, "IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generation Stations".