2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

월성원전 사용후연료저장대증설을위한내진안정성분석

Seismic Stability Analysis of the Spent Fuel Storage Structures for Increase of Storage Capacity at Wolsung NPP

최규섭,신태명 ,양계형,백창렬,이홍영

한국 수력원자력(주) 원자력환경기술원
대전광역시 유성우체국 사서함 149호
* 충주대학교
충주시 이류면 검단리 123

요 약

본 논문은 16단 적재를 가정하여 운영허가가 발급된 월성 2·3·4호기 핵연료 습식저장용 적재대를 17단 또는 18단으로 추가 적재할 경우에 대한 내진안정성 분석 기술을 소개한다. 기본적인 해석절차는 먼저 내진해석을 수행하여 지진시 저장구조물의 기울어짐 및 미끄러짐 안정성을 평가하고 내진해석 결과로 나타나는 지진하중을 각 구조모델에 적용하여 응력해석을 수행한 다음 해당코드 요건과의 적합성을 검토하는 방식을 취하였다. 평가 결과, 저장구조물은 17, 18단 적재시 설계기준지진 하에서 미끄러짐과 기울어짐이 발생하지 않을 것으로 나타났으며, 응력해석결과 사용후연료 저장트레이 및 지지대의 구조적 건전성이 적절히 유지될 것으로 예측되었다.

Abstract

This paper introduces the method of seismic stability analysis for the increase of fuel storage capacity of wet storage stacks by one or two more stack floor at Wolsung Nuclear Unit 2,3,4, which had been originally licensed assuming 16 tray stack storage. As a basic procedure, tipping and sliding stability of the structure is checked at first thru seismic analysis and the resultant load from dynamic analysis is applied for static stress analysis, and the result of which is reviewed for compatability with applicable standard. As a result, sliding and overturning are not expected under design basis earthquakes for increased storage cases of 17 tray and 18 tray stacks. And it is anticipated the result of stress analysis will be acceptable.

1. 서 론

국내 원자력위원회의 의결에 따라 2016년까지 사용후연료를 발전소부지에 자체보관하여야 하기 때문에, 사용후연료건물내 습식저장조의 시설용량확장과 더불어 건식저장방식에 대한 다각적인 연구가 진행중이다. 일반적으로 습식저장시설의 설계용량은 발전소의 수명기간동안 발생하는 사용후연료를 저장할 수 있는 용량보다 매우 작기 때문에 저장수조의 용량이 포화되기전에 비상 저장공간을 남겨두고 저장된 핵연료를 건식저장시설 또는 중간저장시설로 이동시켜야 한다. 특히, 중수로형 원자로는 경수로형 원자로에 비하여 사용후연료의 연간 발생량이 많고, 습식저장시설내의 사용후연료 저장방식도 비교적 효율성이 낮은 수평저장방식을 적용하고 있기 때문에 최종 저장부지가 확보되기 전까지는 습식저장조의 저장용량을 최적화하고, 부지효율성이 높은 조밀건식저장방식을 활용하여야 할 것이다.

현재 월성 2,3,4호기 사용후연료건물내 저장수조는 사용후연료 24다발을 수평으로 저장할 수 있는 트레이를 16단까지 적재할 수 있는 방식으로서, 각 트레이는 4개를 연결하는 2x2지지대와 트레이 2개를 연결하는 2x1지지대위에 적재된다. 사용후연료의 적재시 저장트레이는 사용후핵연료를 일정기간 동안 안전하게 저장하기 위한 수중 구조물로서, 냉각이 용이하도록 저장된 핵연료 사이에 일정간격을 유지하여야 하고, 지진하중에 대해서도 안전성을 유지하여야 한다. 본 논문에서는 중수로형 사용후연료 습식저장조의 기존적재방식인 16단 트레이 적재방식에 대하여 추가 적재가 가능한지를 구조안전성 측면에서 검토하였다. 이를 위해서 17단 또는 18단 적재방식에 대하여 내진해석을 수행하여 지진시 저장구조물의 기울어짐 및 미끄러짐 안정성을 평가하고, 내진해석 결과로 나타나는 지진하중을 각 구조모델에 적용하여 응력해석을 수행한 다음 해당코드 요건과의 적합성을 검토하였다. 지진에 의한 동적응답을 평가하기 위해서 저장수조내 유체의 출렁임과 부가질량효과 등의 유체동적효과를 고려하였으며, 단일트레이 상부면과 2x1그룹 및 2x2그룹적재대의 기울어짐, 그리고 저장조 바닥에서의 미끄러짐효과를 검토하였다. 해석결과로부터 저장구조물은 17, 18단 적재시 설계기준지진 하에서 미끄러짐과 기울어짐이 발생하지 않을 것으로 나타났으며, 응력해석결과 사용후연료 저장트레이 및 지지대의 구조적 건전성이 적절히 유지될 것으로 예측되었다.

2. 내진해석

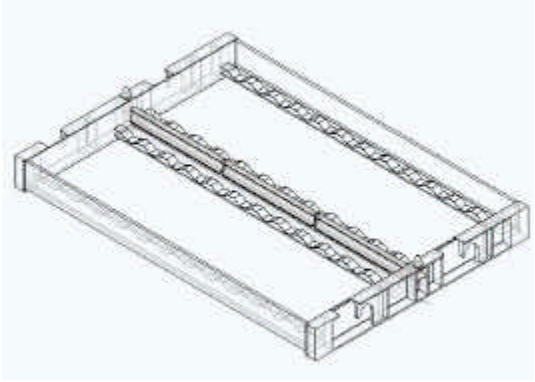
2.1 대상 구조물의 특성

1) 사용후연료 저장조 및 저장구조물

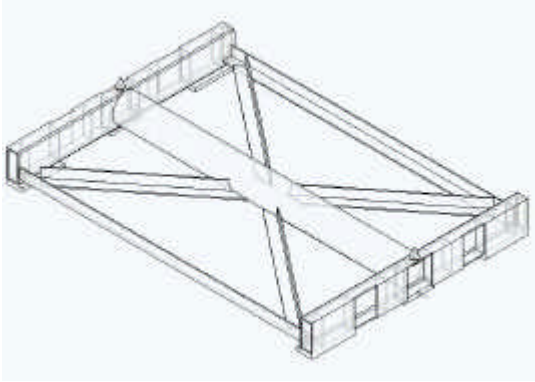
월성원전의 사용후연료는 서비스건물 내 주저장조의 수중에 저장된다. 주저장조는 8~9년 분의 사용후연료를 수중에서 저장할 수 있는 구조이다. 핵연료는 한줄에 12개씩 눕혀 두 줄에 총 24개의 핵연료를 저장할 수 있는 트레이에 담겨 반출조 및 접수조에 있는 핵연료 이송기를 통해 주저장조로 이송된 다음 저장조 바닥에 초기에 설치되는 지정된 지지대 위에 한 단씩 차곡차곡 쌓는 방식을 취하며 18단까지 적재가 가능하도록 설계되어 있다[1]. 저장조에는 이러한 트레이를 2X1 그룹 또는 2X2그룹 형태로 지지대에서 조합하여 그룹적재형태로 적재하고 있으며 각 층별 트레이의 배열은 가로 7열(2X2 3개, 2X1 1개), 세로 14열(2X2 및 2X1 각각 7개) 형태로 구성되어 있다.

2) 저장트레이

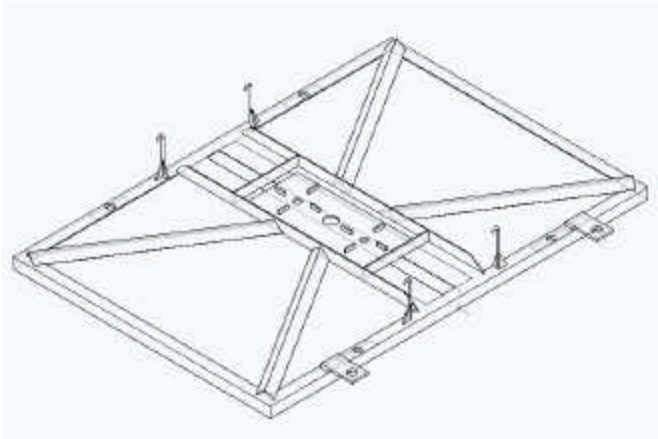
핵연료 저장트레이는 스테인리스 용접 구조물로서 그림 1에 나타낸 바와 같이 몇 개의 강성재와 모서리판으로 구성된 2개의 채널 양쪽 레일부, 그리고 양쪽에 보강판을 댄 앵글부에 의해 연결되며 중앙부를 통과하는 T자형 막대로 구성된다. 곡선형 휨대가 핵연료를 지지하기 위해 앵글부와 T-형 막대에 용접된다. 두 개의 인양판이 트레이 인양공구의 핀에 맞도록 각 측면 레일에 설치되어 있다. 저장트레이 측면 레일은 인양판으로 접근할 수 있도록 상부면이 잘려 있다. 각 트레이는 2개의 원뿔형 핀과 2개의 구멍이 있으며, 핀들은 적재시 위에 놓이는 트레이의 구멍에 삽입된다. 각 트레이는 하나의 문자와 3개의 숫자로 구분하는데, 상부의 각 모서리에 위치하고 스텐레스 강판을 잘라내어 표시한다. 모든 트레이는 핵연료를 다 채운 18단의 트레이를 지지할 수 있어야 한다. 트레이는 최대 18단으로 쌓아 안전 덮개(그림 2참조) 및 조사핵연료의 장주기 감시용으로 설치되는 밀폐봉과 함께 적재된다.



a) 저장트레이



b) 트레이 지지대



c) 안전 덮개

그림 1 핵연료 저장트레이, 지지대 및 덮개 형상

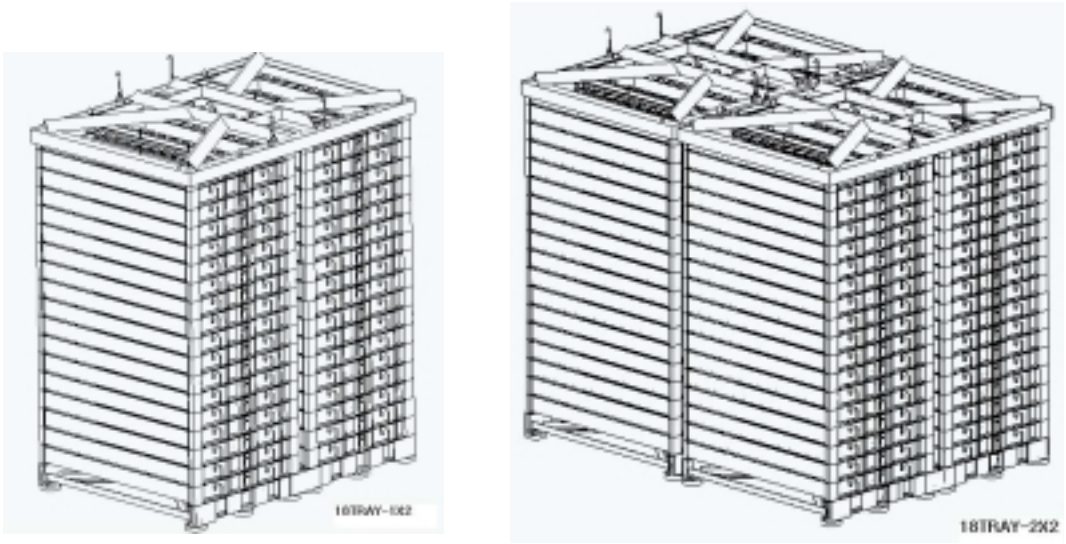


그림 2 2X1 및 2X2 그룹적재대(18단)의 적재 형상

3) 트레이 지지대

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. 저장트레이 지지대는 적재된 트레이를 지지하기 위해 접수조 및 저장조에 설치된다. 각 지지대는 그림 1에서 보듯이 중앙부를 지나 대각선 방향으로 교차하는 5인치 직경의 스테인리스 보강관이 있으며 각 지지대는 바닥면에 대해 수평을 유지하기 위해 하부에 6개의 스테인리스강 받침이 설계되어 있다. 측면의 “C”면은 강도를 높이기 위해 부분적으로 덧판이 덧붙여 있다. 상부에 있는 2개의 원뿔형 고정핀이 적재단에서 최하단 트레이의 위치를 잡아준다.

4) 재료특성

사용후연료 저장트레이 및 지지대 재료는 SA-240 스테인리스강이며 그 기계적 특성은 다음과 같다.

- 항복강도 : $S_y = 170\ MPa\ (25,000\ psi)$
- 극한강도 : $S_u = 485\ MPa\ (70,000\ psi)$
- 탄성계수 : $E = 28\times10^6\ psi$
- 포아송비 : $\nu = 0.30$
- 밀도 : $\rho = 0.29\ lb/in^3$

2.2 설계요건

1) 코드분류 및 허용응력 제한치

설계지침에 의하면 사용후연료 저장트레이 및 지지대는 CAN3-N289.3-M81[2]의 Table 5에서 규정하는 요건에 따라 설계된다. 참고문헌 2의 Table 5에 있는 하중조합은 하중계수, 중요도계수 및 하중조합계수를 1.0으로 놓은 것을 제외하면 CAN3-S16.1-M89[3]에 따르고 있다. 결과적으로, 저장트레이와 지지대의 내진 해석 및 검증 절차는 CAN3-N289.3-M81을 따랐으며 응력 평가 및 허용응력 한계치는 CAN3-S16.1-M89를 적용한다.

2) 하중 및 하중조합

사용후연료 저장트레이 및 지지대 설계에서 고려되는 하중의 형태로는; 자중, 부력 및 지진력(3방향 지진)이다. 이 때 하중조합은 다음과 같다.

a) 자중 + 부력 + 지진효과

b) 응력평가를 위해 CAN3-S16.1-M89에서 사용될 하중계수, 중요도계수 및 하중조합계수는 1.0으로 한다.

지진하중은 내진해석으로부터 결정되며 안정성 평가 및 응력해석에서 활용된다.

2.3 해석을 위한 모델링

1) 내진해석 절차

사용후연료 저장대의 내진해석을 최대한 정확히 구하기 위하여 시간이력 해석법을 채택하였다. 내진해석은 동적해석용 컴퓨터 프로그램인 STARDYNE 프로그램의 "DYNRE1" 모듈을 활용하여 직교모드 시간이력법을 채택하였다. 내진해석 절차는 다음과 같다[5].

(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 활용하였다.

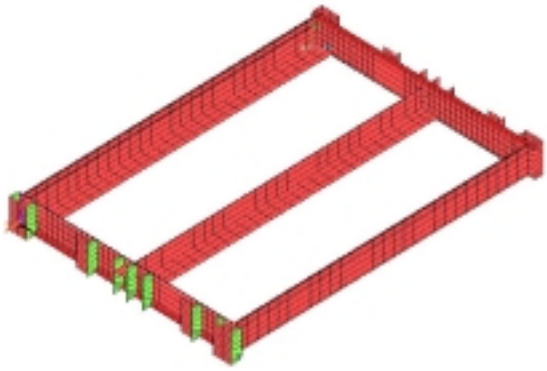
(c) 시간이력 해석

내진응답을 얻기 위해 DYNRE1 시간이력 해석을 수행하였다. 감쇠비는 구조물 전체가 수중에 잠겨 있고 총질량의 85% 정도가 구조용 부재가 아니면서 얹혀 있는 핵연료 다발에 의한 것이며 구조물간의 마찰은 고려하지 않았으므로 대체로 보수적인 값으로서 7%를 사용하였다.

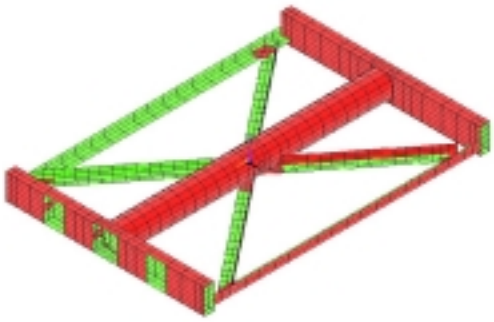
2) 내진해석 모델

(a) 저장트레이

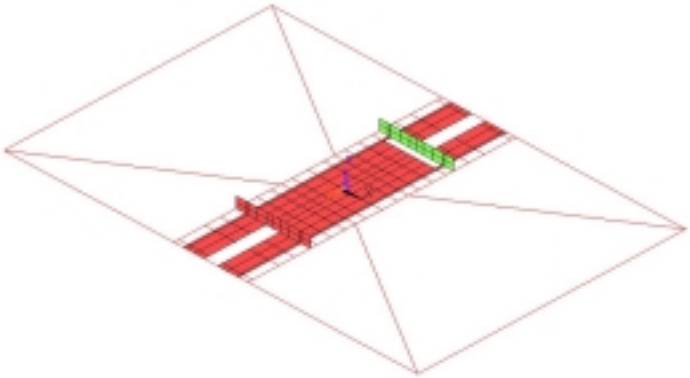
그림 3과 같은 단위 트레이에 대한 유한요소(FE) 모델을 작성한다. 여기서는 해석 효율을 고려하여 부구조화 기법을 적용하였는데 유한요소 모델은 STARDYNE 컴퓨터 프로그램[5]의 부구조화 기법에 의해 하나의 강성행렬로 압축시킨다. 1, 2차 부구조화를 통해 각 트레이는 적재대 하나당 차례로 2000여개의 절점에서 29개의 경계절점으로, 그리고, 다시 9개의 질량 절점으로 줄어든



a) 저장트레이 모델



b) 트레이 지지대 모델



c) 안전덮개 모델

그림 3 핵연료 저장트레이, 지지대, 덮개의 유한요소모델

다. 단, 지지대 및 덮개와 결합되는 최하위 및 최상위 트레이는 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 수직(X_2)방향으로 이격이 없는 것으로 보며, 이는 트레이간의 전도 불안정성이 없음을 나타낸다. 안정성 조건은 뒤에서 복원모멘트와 전도모멘트를 비교하여 확인한다.
- o 채널의 핀과 홀에서의 경계절점들끼리는 두 수평방향(X_1, X_3)에 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 수평축(X_1 및 X_3축)에 대한 굽힘 모멘트는 채널 가로대의 길이가 유한하므로 두 트레이 사이에 전달되는 것으로 본다.

(b) 트레이 지지대

그림 3과 같이 트레이 지지대 구조물 하나에 대해 유한요소 모델을 작성한다. 여기서도 역시

유한요소 모델은 부구조화 기법에 의해 강성행렬로 압축된다. 부구조화 과정에서 다음 지점에 16개의 경계절점을 지정한다.

o 두 채널가로대 상부의 10개 절점으로서 양쪽에 5개씩 첫 트레이 하단과 연결된다.

o 두 채널 가로대 하부의 6개 절점으로서 양쪽에 3개씩 지지 패드를 나타낸다.

o 첫 트레이의 하부와 지지대 상부의 연결은 강성보로 나타낸다. 각 경계절점들 간의 연결조건은 앞의 두 트레이 사이의 경우와 같다.

(c) 그룹적재대

17단(또는 18단) 트레이를 1개의 지지 구조물 위에 적재하기 위해 17단(또는 18단) 트레이의 2차 압축모델과 지지구조물의 1차 압축모델을 조합한다. 2×1 그룹의 배치에 대해 2개의 각 적재모델의 지지대 사이를 연결시킨다. 두 지지대 연결요소는 종합모델에서 표시한다. 유사하게 2×2 그룹 배치에 대해서도 4개의 단위 적재모델의 지지대끼리 연결시킨다. 네 지지대 사이의 연결요소도 종합모델에서 표시한다.

(d) 안전덮개

2X1그룹적재대의 덮개를 각각 유한요소로 모델하여 최상부 트레이에 맞는 20개의 절점과 고정봉 2개를 포함하여 총 22개의 경계절점 행렬로 압축하였으며 2X2 그룹적재대의 경우도 2X1 그룹적재대와 같은 방법으로 모델하되 두개의 덮개를 핀-연결하는 형태를 취하여 총 44개의 경계절점 행렬로 압축하여 적용하였다.

(e) 질량계산

내진해석에 활용된 총 질량은, 강구조의 질량 및 수중구조물의 진동에 의해 야기되는 유체 부가질량의 두 부분으로 구성된다. 트레이당 총질량은 구조부(각 L형 앵글과 T형 봉에 3개씩 9개)의 질량 절점들로 나뉜다. 강 질량에 유체 부가질량을 더하여 집중질량화 함으로써 적재대는 지진시 마치 공기 중에서 진동하는 것과 같이 보고 해석한다. 물에 의한 부가질량은 참고문헌 6의 표 14-2의 Case 3에 주어진 경험식으로 계산한다.

(f) 돌출보(Off-set Beam)

시간이력 내진해석에서는 3 방향 입력지진이 저장조 바닥층 높이에 동시 작용된다. 돌출보는 수평 및 수직 지진 효과에 의하여 실제 조합된 전도모멘트를 계산하기 위하여 모델한다. 돌출보는 각 적재 트레이 하단과 바닥층 높이에 둔다. 질량 중심점으로부터 벗어난 정도는 수직 지진력에 의한 전도모멘트의 모멘트 팔길이와 같다.

3) 입력 지진

사용후연료 저장 적재대의 내진해석용 수평방향 지진입력을 참고로 Fig. 4에 나타냈는데 보수적이면서도 편의상 다음과 같이 가정하였다.

(a) 응답스펙트럼법을 적용할 때에는 지반응답스픽트럼(GRS)에 10% 가산.

(b) 시간이력법을 적용할 때에는 지진 거동에 10% 가산.

사용후연료 저장 적재대의 내진해석에는 시간이력법을 채택하였는데 0.2g 설계기준 지진에 해당하는 지진 시간이력을 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 해석하였

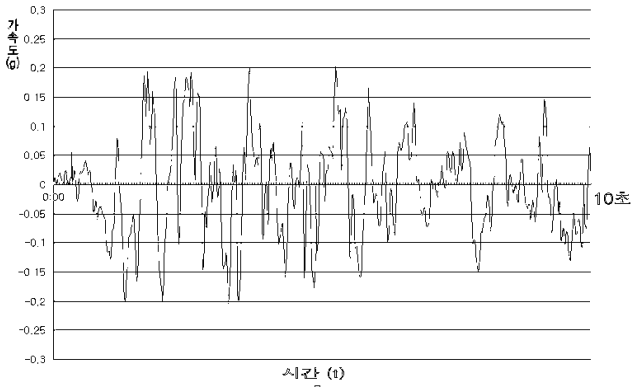


그림 4 사용후연료 저장 적재대의 입력 지진시간이력(수평방향)

다. 이 때, 두 수평방향(X_1과 X_3)지진은 위상차 효과가 무시할 만하므로 같은 것으로 놓았다. 이는 기하학적 형상이 두 개의 수직면 X_1과 X_2축이 이루는 면과 X_3, X_2축이 이루는 면에 대해 대칭이기 때문이다. 단, 두 수평방향의 내진응답은 서로 독립적이다. 그리고, 위상이 같거나 다른 지진에 의하여 발생되는 지진력은 설계목적상 두 가지 중에서 더 큰 값을 적용한다. 이렇게 동일 위상 및 반대 위상의 지진에 의한 결과 중에서 더 큰 쪽을 취하는 방법을 "결정론적 방법"이라 하는데 그 기술적인 적용근거는 IEEE-344[10]를 참고하였다.

4) 적재대에 작용되는 유체 동적 하중

지진시 수중구조물의 유체 동적 하중에 대해서도 계산하였다. 유체동적 하중은 주로 유체저항, 대류성 유체동적 하중(출렁임 효과), 충격성 유체동적 하중(가속도를 갖는 유체부의 관성)의 3 부분으로 구성된다.

(a) 저항력

마찰저항력은[8] : $F_f = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2}$

속도에 의한 직접적인 유체동적 압력하중으로부터 총 저항력 및 저항력에 의한 전도 모멘트를 계산하였다.

(b) 대류성 유체동적 하중

이 하중은 출렁임과 적재대 양단 상부의 수면 경사에 의한 압력차로 발생한다. 대류성 유체 동적 하중의 계산절차는 아래와 같다[9].

i) 출렁임 주파수는 : $\omega^2 = \frac{1.58 \times g}{L} \tanh(1.58 \frac{H}{L})$

ii) 출렁임 주파수를 이용하여 최대 유체변위 D는 0.5% 감쇠비에 해당하는 지반응답스펙트럼으로부터 얻어진다.

iii) 자유 출렁임의 최대 각변위는 $\theta = 1.58 \frac{D}{L} \tanh(1.58 \frac{H}{L})$

iv) 근사적으로 대류압력은 적재대 높이에 따라 선형적으로 분포된다고 가정하면 적재대에 작

용하는 대류성 유체동적 하중은 대략,

$$P_{C1} = l_3 \cdot \frac{h}{4} \cdot \sqrt{\frac{5}{2}} \cdot \rho \cdot L_1^2 \cdot \omega_1^2 \cdot \theta_1 \cdot (\frac{l_1}{L_1}) \cdot \frac{1+\cosh\sqrt{\frac{5}{2}}\frac{h}{L_1}}{\sinh\sqrt{\frac{5}{2}}\frac{H}{L_1}}$$

$$M_{C3} = l_3 \cdot \frac{h^2}{12} \cdot \sqrt{\frac{5}{2}} \cdot \rho \cdot L_1^2 \cdot \omega_1^2 \cdot \theta_1 \cdot (\frac{l_1}{L_1}) \cdot \frac{1+2\cosh\sqrt{\frac{5}{2}}\frac{h}{L_1}}{\sinh\sqrt{\frac{5}{2}}\frac{H}{L_1}}$$

상기한 절차에 따라 적재대에 작용하는 유체동적 하중은 두 방향 지진에 의한 값을 구하여 각각 적용했다.

(c) 충격성 유체동적 하중

적재대 바닥에서의 유체동적 가변충격하중과 전도 모멘트는 근사적으로 아래와 같이 계산된다.

$$P_{I1} = \frac{\sqrt{3}}{2} h^2 (1 - \frac{1}{3}\frac{h}{H}) l_3 \cdot \rho A_1 [\sinh\sqrt{3}\frac{L_1}{H} - \sinh\sqrt{3}(\frac{L_1 - \ell_1}{H})] / \cosh\sqrt{3}\frac{L_1}{H}$$

$$M_{I3} = \frac{\sqrt{3}}{3} h^3 (1 - \frac{3}{8}\frac{h}{H}) \ell_3 \rho A_1 [\sinh\sqrt{3}\frac{L_1}{H} - \sinh\sqrt{3}(\frac{L_1 - \ell_1}{L_1})] / \cosh\sqrt{3}\frac{L_1}{H}$$

(d) 총 유체동적 하중

앞에서 구한 저항력, 대류성 유체동적하중 및 충격성 유체동적하중을 제곱합의 자승근(SRSS) 방식에 따라 조합하였다

3. 해석결과

3.1 내진안정성 평가

지진시 저장구조물의 안정성 검토를 위하여 다음의 조건들을 평가하였다.

1) 적재대 지지구조물 위의 트레이 적재탑의 기울어짐에 의한 전도
2) 콘크리트 바닥 위의 2×1 또는 2×2 그룹 적재대의 기울어짐에 의한 전도
3) 에폭시 코팅된 콘크리트 바닥 위의 2×1 또는 2×2 그룹 적재대의 미끄러짐.

기울어짐 안정성 평가기준은 다음과 같다.

기울어짐 안전계수(S) = (복원모멘트) / (총 전도모멘트)

만일 S>1.0이면 구조물은 안전하며 들림이나 기울어짐이 없는 것으로 보았다. 기울어짐 안정성은 트레이더미 바닥(즉, 지지대 상부)과 콘크리트 바닥에 대해서 평가하였다. 트레이 더미 바닥에서의 총 전도모멘트는 각 트레이 하부에 모델한 돌출보 요소들에 의해 계산된다. 저장조 바닥에서의 그룹 적재대의 총 전도 모멘트는 독립적인 단일 돌출보 요소에 의해 계산된다. 내진해석을 위해 작성된 구조물 모델에 설계지진 시간기록을 적용하여 실시한 지진해석을 통해 각 돌출보의 최대 지진하중을 계산하였으며 이는 상기한 총 전도모멘트를 계산하는데 사용되었다. 그리고, 복원모멘트는 자중과 부력, 모멘트 팔길이를 고려하여 계산하였다.

1) 적재된 트레이 부분의 전도 안정성 검토

먼저, 17단 또는 18단 적재시 덮개 유무에 따른 지지대를 제외한 트레이 부분의 기울어짐에 대한 수평 두 방향의 안정성을 분석하였다. 그 결과 표 1에서 보는 바와 같이, 덮개가 없는 단일 트레이탑의 기울어짐 안정성은 폭이 더 좁은 수평 S3 방향의 경우 18단의 안전계수가 1.037 정도로서 설계마진이 약 4% 정도로 감소하였으나 여전히 기준값 1 보다는 크게 나타났다. 덮개가 포함된 트레이탑의 기울어짐 안정성은 2X1 그룹적재대의 경우 전체 폭이 더 좁은 S1 방향이 S3 방향에 비해 크게 차이가 나며 더 작게 나타났으나 여전히 안정적이라 할 수 있다. 덮개포함 2X2 그룹적재대의 경우에는 기울어짐 안전계수는 2를 넘으며 비교적 충분한 여유도를 보이고 있다.

표 1 트레이의 기울어짐 안정성 계수

	17단 적재시		18단 적재시	
	S1 방향	S3 방향	S1 방향	S3 방향
단일트레이탑 (덮개없는 2X1, 2X2 내)	1.251	1.084	1.140	1.037
복수 트레이탑 (덮개포함 2X1 적재대)	1.247	2.294	1.172	2.182
복수 트레이탑 (덮개포함 2X2 적재대)	2.618	2.411	2.373	2.175

2) 그룹 적재대의 전도안정성 검토

17단 또는 18단 적재시 덮개 유무에 따른 지지대를 포함한 적재대 전체의 기울어짐에 대한 수평 두 방향의 안정성을 분석하였다. 그 결과 표 2에서 보는 바와 같이, 덮개가 없는 2X1 그룹적재대의 경우 기울어짐 안정성은 폭이 더 좁은 수평 S1 방향의 경우 18단의 안전계수가 1.008 정도로서 설계마진이 약 1% 정도로 아주 작아지고 있지만 여전히 기준값 1 보다는 크게 나타났다. 덮개가 포함된 2X1 그룹적재대의 경우 덮개가 없는 경우와 그룹적재대 전체의 기울어짐 안정성은 큰 차이를 보이고 있지 않다 덮개유무에 관계없이 2X2 그룹적재대의 경우에는 기울어짐 안전계수가 대부분 2에 가깝거나 2를 넘고 있으며 비교적 충분한 여유도를 보이고 있다.

여기서 정의한 기울어짐 안전계수는 기준값 1보다 작아지면 기울어짐이 시작된다는 의미로서 바로 전도됨을 의미하는 것은 아니다. 실제로 구조적 특성과 동적거동 환경이 유사한 경수로 원전의 저장구조물에 대한 기울어짐 비선형 해석을 참고로 할 때[11] 최대가속도에 의해 일정량의 기울어짐이 발생한 후에도 방향이 수시로 바뀌는 시간기록의 특성에 의해 추가적인 한 방향 가속도의 누적 작용이 크지 않은 경우, 대부분 복원되는 응답특성을 보였던 점을 고려할 때 안전계수가 기준값 1에 근접하더라도 전도 현상까지는 아직 어느 정도의 여유도가 존재한다 할 수 있다.

표 2 그룹적재대의 기울어짐 안정성 계수

	17단 적재시		18단 적재시	
	S1 방향	S3 방향	S1 방향	S3 방향
덮개없는 2X1 적재대	1.090	1.984	1.008	1.910
덮개포함 2X1 적재대	1.065	1.974	1.009	1.895
덮개포함 2X2 적재대	2.300	2.108	2.068	1.901
덮개없는 2X1 적재대	2.251	2.080	2.061	1.894

3) 그룹 적재대의 미끄러짐 안정성 검토

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

만일 μ값이 지지대와 콘크리트 바닥에 에폭시 코팅면 사이의 마찰계수보다 작으면 구조물은 미끄러짐에 안정적인 것으로 본다. 바닥면에서의 수평지진력은 최하단 단일 돌출보의 보양단 전단력과 같다.

$$\mu_1 = \frac{F_1}{(W_{DB} - FX2)}, \qquad \mu_3 = \frac{F_3}{(W_{DB} - FX2)}$$

실험실 시험의 결과인 허용 마찰계수[7] $\mu = 0.65$를 참고로 하여 에폭시 보강 콘크리트 바닥면에서 적재대의 미끄러짐 안정성을 보장하기 위하여 μ_1과 μ_3은 미끄러짐 발생조건 값인 0.65보다 작아야 한다고 보았다.

지진해석 결과를 이용하여 덮개 유무에 따른 그룹적재대의 수평 두 방형에 대한 미끄러짐 분석 결과를 표 3에 나타내었다. 표에서 보듯이 S3 방향의 미끄러짐 가능성이 S1 방향에 비해 더 크게 나타나고 있지만 미끄러짐 시작조건에 대한 기준값인 0.65를 넘지 못하고 있으므로 미끄러짐이 발생하지 않을 것으로 예측된다.

3.2 응력 해석

지진력을 구하고, 적재대의 안정성을 평가하면 다음 단계는 적재대의 구조적 건전성을 보장하기 위하여 사용후연료 저장트레이 및 지지대의 응력 해석을 수행하는 것이다. 응력해석은 CAN3-S16.1-M89[2]의 요건에 근거를 둔다. CAN3-S16.1-M89는 기본적으로 보의 설계에 관한 것이므로 해석을 위해 정적 보모델을 작성한 다음, 최대 보응력 또는 하중을 얻기 위해 최대 지진하

표 3 그룹적재대의 미끄러짐 계수

	17단 적재시		18단 적재시	
	μ1	μ3	μ1	μ3
덮개없는 2X1 적재대	0.303	0.480	0.300	0.493
덮개포함 2X1 적재대	0.304	0.488	0.302	0.489
덮개포함 2X2 적재대	0.290	0.485	0.303	0.494
덮개없는 2X1 적재대	0.293	0.493	0.304	0.493

중과 자중을 조합하여 보모델에 적용한다. 보모델로부터 최대 보응력 및 하중을 계산하여 CAN3-S16.1-M89에 근거한 응력평가를 실시한다. 이 부분은 현재 해석이 진행 중이지만 앞선 16단 적재시의 설계여유도를 고려할 때 17단 및 18단 적재의 경우에도 잘 만족할 것으로 예상된다.

4. 결론

본 논문은 17단 및 18단 높이 트레이의 2×1(그림 3) 및 2×2(그림 2) 그룹 적재대의 기울어짐과 미끄러짐 안정성 평가에 대하여 기술하였다. 그 결과, 설계지진 하에서는 다음과 같은 안정성 문제가 발생하지 않는다는 결론을 얻을 수 있다.

a) 지지대에 고정된 17단 및 18단 트레이탑의 기울어짐

b) 저장조바닥면에서 17단 및 18단 트레이적재시 2×1 및 2×2 그룹적재대의 기울어짐과 미끄러짐

앞에서 기술한 바와 같이 사용후연료 저장트레이의 응력해석 결과는 앞선 16단 적재시의 설계여유도로 판단할 때 최대응력 및 하중은 CAN3-S16.1-M89의 요건을 만족할 것으로 예상하고 있다.

참 고 문 헌

1. Design Manual, “Spent Fuel Storage", file no. 86-35360-DM-001, Rev. 2, 1997
2. National Standard of Canada CAN3-N289.3-M81, “Design Procedures for Seismic Qualification of CANDU Nuclear Power Plants”
3. National Standard of Canada CAN3-N16.1-M89, “Limit States Design of Steel Structures”
4. AECL Stress Report, “Seismic Qualification of Spent Fuel Storage Stacks”, file no.

86-35360-220-001, Rev. 1, 1998 .
5. User Information Manual, STARDYNE Version 4.42, Research Engineers Inc.
6. R. D. Blevins, “Formulas for Natural Frequency and Mode Shape", Van Nostrand Reinhold Company
7. AECL Test Report, “Spent Fuel Storage Tray Support Friction Tests”, file no. TDS 86-35360-470-001, Revision 0
8. H. Rouse, “Elementary Mechanics of Fluids”, John Wiley & Sons Inc., 1946
9. TID-7024, “Nuclear Reactors and Earthquakes”, Chapter 6
10. IEEE Standard 344-1987, “IEEE Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generation Stations”.
11. 신태명, 김인용, “가압경수형 원자력발전소 비고정식 고밀도 핵연료 저장대의 지진해석 방법에 대한 검토”, 원자력학회지 제27권 1호, pp 133-140, 1995. 2