

사용후 핵연료 건식저장장치의 비정상 운영조건의 해석과 설계

Analysis and Design of Nuclear Spent Fuel Dry Storage System under Irregular Operation

송형수* 민창식** 윤동용***
Song, Hyung Soo Min, Chang Shik Yoon, Dong Yong

ABSTRACT

Delaying and objection for the construction of storage spent-fuel disposal has prompted to consider expanding on-site storage of spent reactor fuel since it can eliminate the need for costly and difficult shipping and control of the spent fuel completely under the direction of the owner-utility. The dry storage unit developed in Canada can accommodate Korea heavy water reactor fuel elements and become a candidate for the Korean market. In this paper, finite element analyses were carried out in order to investigate the structural behavior of the nuclear spent fuel dry storage system, which is subjected to impact loads such as collision of a truck load and dropping of flask under the irregular operation.

1. 서론

원자력발전소를 가동시 필연적으로 발생하는 사용후 핵연료를 포함한 방사성폐기물의 처리는 현재 우리나라에 상당한 사회적 문제로 부각되고 있는 실정이다. 이러한 방사성폐기물을 저장하는 시설은 국가관리정책에 의해서 추진되는데, 국민들에게 혐오시설 또는 위험시설로 분류되어 부지선정에 상당한 어려움과 많은 시간이 소요되고 있다. 발전소 내의 임시저장시설에 방사성폐기물을 수용하기도 하는데 용량은 사용후 핵연료의 경우 수년 내에 포화상태가 될 것으로 예상된다. 각 원전별로 사용후 핵연료의 저장용량 확장을 감안해도 약 10년후면 포화상태가 될 것으로 예상되기 때문에, 앞으로 사용후 핵연료를 포함한 방사성폐기물의 처리는 더 큰 사회적 문제로 부각 될 것이다.¹⁾ 장기적으로 이러한 문제를 해결하기 위해서 국가관리정책에 의해 방사성폐기물 저장시설을 건립하는 것도 중요하지만, 단기적으로 발전소내의 저장시설 부지에 방사성폐기물을 수용하는 방법도 고려될 수 있다. 이를위해 미국과 캐나다 등에서는 사용후 핵연료 건식저장시스템을 제작하여 사용하고 있다. 국내에서도 이를 도입하기 위해 국내 실정과 특성을 반영한 연구와 검토가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 발전소내의 부지에 방사성 폐기물을 저장하기 위해 고안된 사용후 핵연료 건식저장시스템에 대한 설계방법을 검토하였다. 그리고 사용후 핵연료 이송차량의 건식저장시스템에 대한 충돌영향과 사용후 핵연료를 저장하는 플라스크의 낙하사고 등 비정상 운영조건에 대한 안전성을 검토하였다. 비정상운영조건에 대한 사용후 핵연료 건식저장시스템의 안전성을 검토하기 위하여, 사용후 핵연료가 저장되어 있는 바스켓을 건식저장시스템에 저장하기 위하여 운반하는 장치인 플라스크가 작업중에 낙하하는 경우와 이송차량의 충돌에 대해 구조적 안전성을 유한요소 해석을 통해 검토하였다. 검토에서는 충돌이나 낙하 등의 충격하중을 등가의 정적하중으로 변환하여 이 정적하중에 대한 응력 및 변위에 대한 검토를 수행하였다.

*정회원, 동국대학교 토목환경공학과 박사과정

**정회원, 동국대학교 토목환경공학과 교수·공학박사

***정회원, INI STEEL 수요개발팀·공학박사

2. 사용후 핵연료 건식저장시스템의 해석

2.1 사용후 핵연료 건식저장시스템의 개요

사용후 핵연료 임시 저장시설은 원자력발전소의 사용후 핵연료에 대한 국가관리정책이 결정될 때까지 발전소 내에 안전하게 저장할 수 있는 시설이다. 그림 1에서 개략적으로 볼 수 있는 건식저장시스템은 다른 방식의 저장시설보다 열 차단 효율과 차폐능력이 높고, 부지 면적의 1/3을 절약할 수 있는 장점을 갖는 저장시스템이다. 또한 운영인력, 가동비용과 건설비용 등의 경제성도 다른 방식보다 뛰어난 것으로 알려져 있다. 저장방식은 모질건식저장시스템이며, 1개의 모듈에 40개의 실린더가 있어 400개의 바스켓을 수용할 수 있다. 따라서 건식저장시스템은 기존의 원자력 발전소의 사용후 핵연료 저장시설 보다 모듈당 저장용량을 2배 증가시킬 수 있어, 발전소 내에 저장시설의 수용능력과 모듈당 건설 및 관리비용을 개선시킨 시스템이다.

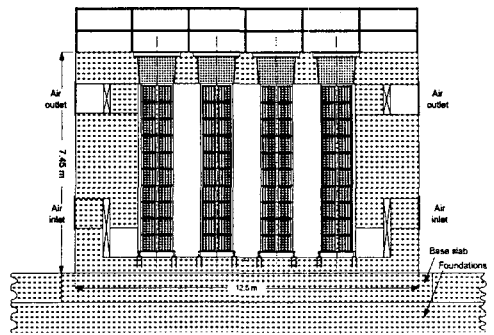


그림 1 사용후 핵연료 건식저장시스템의 개념도

2.2 플라스크 낙하하중 산정

사용후 핵연료가 저장되어 있는 바스켓을 건식저장시스템에 저장하기 위하여 운반하는 장치가 플라스크이다. 이러한 플라스크가 작업중 부주의로 건식저장시스템의 상부슬래브에 낙하하는 경우를 가장 엄격한 조건으로 가정하여 적용하였다. 이때 플라스크의 낙하하중 산정은 AECL²⁾에서 제시한 방법을 적용하였다. 플라스크 낙하에 의한 충격하중은 상부 슬래브를 단순보로 가정하여 플라스크 낙하이 의해 발생하는 정적변위와 플라스크의 낙하높이를 이용하여 증폭계수를 산정하고, 증폭계수를 통해 플라스크의 낙하 및 충격해석에 입력하중으로 사용하였다. 이러한 낙하하중 산정방법은 에너지 손실을 고려하지 않아, 실제 낙하 및 충격력보다 큰 값으로 보수적인 하중 적용에 해당된다.

2.3 이송차량 충돌하중 산정

사용후 핵연료 이송차량이 운전자의 과실로 인해 건식저장시스템에 충돌하는 사고를 가정하여 충돌에 대한 검토를 수행하게 된다. 이때 충돌하중은 AASHTO LRFD³⁾ 3.14.8절의 공식을 적용하여 산정하였다. 이 규정은 선박이 교각과 충돌할 경우의 충돌하중을 산정하는 것이지만, 이송차량의 충돌하중 산정에 충분히 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 건식저장시스템에 이송차량 충돌하중 재하는 이송차량이 방향에 따라 충돌할 수 있는 2가지의 경우(장변과 단변)와 속도에 따른 2가지 경우(20km/h, 40km/h)로 구분하여 적용하였다. 현재 월성원자력 발전소에서 운행중인 이송차량의 총무게는 382 kN으로 본 연구에서는 안전측으로 392 kN을 적용하였다.

2.4 유한요소 해석모델

본 해석은 구조해석 범용 프로그램인 ABAQUS 6.2를 사용하였으며, 3차원 비선형 유한요소 해석법을 사용하여 충격제하에 따른 충격부위의 국부적인 파괴모드와 거동양상을 파악하고자 하였다. 건식저장시스템의 해석은 8절점의 SOLID 요소를 이용하여 모델링 하였다. 구조물의 기하형상, 하중조건, 경계 및 구속조건의 대칭성을 고려하여 1/4 만을 제작하였다. 모델은 총 6980개의 절점과 4460개의 요소로 구성하였다. 본 해석에 사용된 1/4 축소 모델의 경계 조건은 구조물이 연속되는 1축 방향면과 2축 방향면은 연속되는 1축 방향, 2축 방향의 변위와 3축 회전을 구속하였고, 구조물의 바닥은 고정으로 하였다. 그리고 해석에 사용된 재료의 특성은 콘크리트의 설계기준 강도 30 MPa, 탄성계수 2.57×10^4 MPa, 프와송비 0.17, 단위질량 $2,350 \text{ kg/m}^3$ 이며, ACI-318⁴⁾에서 제시한 방법에 따라 $0.45f_{ck}$ 이후 구간부터 비선형구간으로 콘크리트의 변형을 0.002까지 제어하는 모델을 사용하였다.

플라스크 낙하하중은 건식저장시스템에 가장 큰 응력이 발생하도록 중앙부 상부슬래브에 3축 방향으로 하중을 작용시켰다. 이와같은 하중 재하위치 결정은 상부슬래브 여러곳에 재하시켜 최대응력이 발생하는 경우로 결정한 것이다. 이송차량 충돌하중은 차량의 운행방향에 따라 발생 가능한 2가지의 경우(장변과 단변)로 구분하여 작용시켰다. 여기서 장변은 긴 변인 1축 방향을 장변으로, 짧은 변인 2축 방향을 단변으로 구분하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 플라스크 낙하의 영향

플라스크 낙하에 의한 건식저장시스템의 해석 결과 나타난 응력분포는 그림 2와 같다. 그림 2에서 보는바와 같이 휨압축 응력은 슬래브의 중앙 상부, 벽체와 연결부위 하부에서 집중되는 것을 볼 수 있으며, 최대 압축응력은 슬래브의 중앙 상부에서 나타났다. 휨인장 응력은 슬래브의 중앙 하부, 벽체와 연결부위 상부에서 집중되며 최대 휨인장 응력은 슬래브의 중앙 하부에서 나타났다. 플라스크 낙하에 의한 상부슬래브의 인장응력은 그림 7과 같은 분포를 보였으며, 이로부터 표 1의 작용모멘트로 환산하였다. 단면에 배치되는 인장철근비의 계산과정은 다음과 같다.

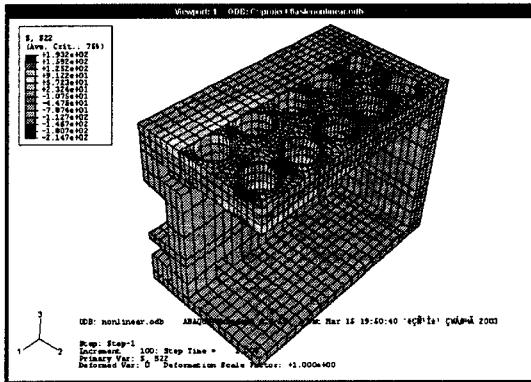


그림 2 플라스크 낙하에 의한 응력분포

- Step 1: 낙하하중에 의해 발생한 응력으로부터 그림 3과 같이 인장력(T) 계산
- Step 2: 계산된 인장력(T)과 모멘트 팔거리($j \cdot d$)를 이용하여 작용모멘트(M) 계산
- Step 3: 단면의 휨 저항계수(R) 계산

$$R = \frac{M}{bd^2}$$

- Step 4: 단면에 요구되는 철근비(ρ)를 PCA⁵⁾에서 사용하는 단면의 휨 저항계수(R)를 이용하여 계산

$$\rho = \frac{0.85f_{ck}}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R}{0.85f_{ck}}} \right)$$

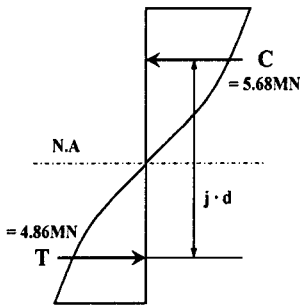


그림 3 단면의 응력 분포도

표 1 플라스크 낙하하중에 대한 상부슬래브의 사용 인장철근비 검토

작용 모멘트	3,497 kN·m
저항 모멘트	3,630 kN·m
단면에 설계된 철근비	0.0140
최소 철근비	0.0035
최대 철근비	0.0240
정적하중 철근비	0.0070

본 연구에서 검토한 플라스크 낙하에 의한 건식저장시스템 상부슬래브의 인장응력은 콘크리트구조설계기준⁶⁾에서 최소철근비의 4배 이상의 인장철근을 배근하게 되면 구조적 안전성을 확보할 수 있으며, 이러한 인장철근량은 정상운영하중에 대한 인장철근 요구량보다 약 2배 정도 큰 것으로 나타났다. 한편 본 연구에서 검토된 플라스크 낙하에 의한 기초부분의 인장응력은 최소철근비의 3.5배 이상의 인장철근이면 비정상운영하중에 충분한 것으로 나타났다. 벽체부분에서 요구되는 인장철근은 최소철근비의 3배 이상이면 충분하였다.

상부슬래브의 전단응력에 대한 결과는 표 7에서 보는 바와 같이 비정상운영하중에 의한 전단응력이 콘크리트가 부담하는 전단응력을 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구의 건식저장시스템의 경우는 1,221 kN/m 이상의 전단력을 부담할 수 있는 조건으로 스티럽을 배치하면 전단에 대해서도 충분한 안전성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다. 이러한 전단철근량은 정상운영하중에 대해 요구된 전단철근보다 20%정도 많은 양이다.

3.2 이송차량 충돌의 영향

이송차량 충돌에 의한 핵연료 건식저장시스템의 해석 결과 단변방향 이송차량 충돌시 최대 압축응력은 1.36 MPa으로 충돌하중 작용지점에서 나타났으며, 인장응력의 최대값은 2.45 MPa으로 충돌하중 작용지점 아래의 바닥기초에서 나타났다. 장변방향 이송차량 충돌시 최대 압축응력은 1.17 MPa으로 벽체의 중앙 지점에서 나타났으며, 인장응력 최대값은 1.22 MPa으로 충돌하중 작용지점 아래의 바닥기초에서 나타났다. 이러한 이송차량 충돌에 의해 나타난 응력들은 모두 플라스크 낙하에 의해 나타나는 응력들보다 작게 나타났다. 그러므로 이송차량의 충돌로 인한 건식저장시스템의 단면설계에 별도의 구조적 보강이 필요하지 않는 것으로 나타났다.

3.3 변형에 대한 검토

일반하중에 대한 변형 및 변위의 최대 한계치는 ACI-349⁷⁾ 규정에 따라 보의 경우 L/400, 슬래브는 L/320으로 제한하고 있다. 해석 결과 나타난 최대 변위는 플라스크의 낙하시 상부슬래브에서 발생하는 수직변위이며, 이때, 최대 변위량은 12.5 mm로 ACI-349⁷⁾ 규정인 20.3 mm 이내이다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소에서 발생하는 사용후 핵연료를 저장하는 시설인 사용후 핵연료 건식저장시스템의 비정상운영조건에 대한 검토를 수행하였다. 본 연구에서 고려한 비정상운영조건은 사용후 핵연료 이송차량의 건식저장시스템에 대한 충돌과 플라스크 낙하 등이 있으며, 3차원 유한요소해석을 통하여 구조적 안전성을 검토하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 연구의 플라스크 낙하시 발생하는 충격에 의한 응력이 상부슬래브에 가장 크게 나타났으며, 이러한 응력에 대해서 상부슬래브에 최소철근비의 4배 이상을 배근하게 되면 구조적 안전성을 확보할 수 있었다. 또한 이러한 철근비는 정상운영시 하중에 의해 요구되는 인장철근의 2배 정도에 해당한다. 본 연구의 건식저장시스템에 대한 전단응력 보강은 정적하중에 의해 배근되는 전단철근보다 약 20%가 더 요구되는 것으로 나타났다.

2. 본 연구의 이송차량 충돌에 대한 해석결과 발생한 응력은 미소하여, 휨이나 전단 등에 대해 별도의 보강이 필요하지 않는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 통하여 사용후 핵연료 건식저장시스템의 국내 적용을 위한 설계단계에서 비정상운영조건에 대한 신중한 검토가 필요함을 알 수 있었다. 끝으로, 건식저장시스템의 설계시 본 연구에서 제시한 최소철근에 대한 검토결과를 참고할 수 있을 것으로 판단되며, 건식저장시스템의 형상과 주변여건이 본 연구의 건식저장시스템과 다른 경우 그에 따른 추가적인 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 강병무, 김현, 최규섭 “방사성폐기물 관리사업 현황 및 처분시설개념”, 대한토목학회지, Civil Engineering, 제 48권, 제 8호, 2000년 8월, pp. 19-26.
2. AECL, “CANSTOR MECHANICAL DESIGN CALCULATIONS,” Atomic Energy of Canada Limited XC-20000-220-005. Rev. 0, 1992.
3. AASHTO, “LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS,” American Association of State Highway and Transportation Officials, 2002.
4. ACI 318-99, “Building Code Requirements for Structural Concrete(318-99) and Commentary (318R-99),” American Concrete Institute, 1999.
5. PCA, “Note on ACI 318-99 Building Code Requirements for Structural Concrete with Design Application,” Portland cement Association, 1999.
6. 한국콘크리트학회, “콘크리트구조설계기준 해설”, 2003
7. ACI 349-97, “Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures and Commentary (ACI 349R-97).” American Concrete Institute, 1997.