

2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

자유 입상식 사용후 핵연료 건식저장 Cask에 대한 지진응답해석
Seismic Response Analysis of Free-Standing Spent Fuel
Storage Cask

염성호
충남대학교 기계공학과 대학원

구경희, 이재한, 서기석
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

정성환
한국수력원자력(주) 환경기술연구원

요 약

자유 입상식 사용후 핵연료 건식저장 Cask는 구속 조건 없이 콘크리트 패드 위에서 자유입상 상태로 일정기간 보관된다. 현재 지진발생시 Cask의 지진 안전성을 고려한 설계 해석이 수행 중에 있으며 본 논문에서는 지진 해석방법론의 정확성을 확립하기 위한 예비과정으로 유한요소 수치해석 절차를 정립하고자 한다. 1/2대칭 3차원 유한요소 해석 모델을 사용하여 미끄럼 및 회전운동 지진응답해석을 수행하였으며 ABAQUS에서 제공하는 Explicit 해법을 사용하였다. 그리고 하중조건으로는 가속도 지진하중 입력방법과 Baseline Correction을 적용한 변위 지진하중 입력방법을 사용하여 그 정확성을 비교 검토하였다. 해석결과 유한요소모델의 Mesh가 충분한 경우에 자유 입상식 Cask의 회전각 응답예측에 있어 좋은 결과를 나타내었다.

Abstract

The free-standing spent fuel cask is one of the nuclear spent fuel storages, where there is no fixed condition. Recently, the design and analysis are carrying out and it is intended that the finite element analysis methodology will be established in this paper. To do this the 1/2 symmetric 3-dimensional finite element model is exemplified

and the ABAQUS Explicit method is used to assure the convergence of the solution. For the method applying the seismic input load, both the acceleration input method and the displacement input method using the baseline correction are considered and the results are compared each other. From the results, it is verified that the seismic analysis method established in this paper gives a good prediction of the seismic rocking motion of the free-standing cask.

1. 서론

자유 입상식 Cask는 사용후 핵연료집합체를 보관할 수 있는 건식저장 장치의 하나이다. 외부로부터의 임의의 구속장치 없이 자유 입상으로 보관되는 건식저장 Cask는 지진 발생시 미끄럼 발생과 회전(Rocking) 거동에 의한 전도사고가 발생 할 수 있다. 따라서 주어진 설계 지진하중에 대하여 지진 발생시 미끄럼에 의한 Cask 간의 충돌방지를 위한 Cask 간의 설치간격 설계와 회전거동에 의한 전복(Overtuning)발생 방지설계가 요구 된다.

일본의 전력중앙연구소(CRIEPI)를 비롯한 각국에서는 자유 입상식 Cask의 개발을 위한 지진응답연구를 활발히 수행하고 있으며 이를 위하여 비선형 지진해석방법의 개발과 축소 시험모델을 사용한 검증시험 등을 수행 한바 있다[1,2]. 실제로 자유 입상구조물의 지진응답은 매우 비선형적이며 미끄럼 거동과 회전 거동에 의한 충격거동이 크게 연계되는 현상을 나타내기 때문에[3] 정확한 비선형 지진응답 해석방법을 확립하는 것이 매우 시급하다.

일반적으로 Cask에 대한 지진 미끄럼 응답과 회전 응답해석에는 단순 보모델을 사용하는 방법[4]과 강체모델을 사용하는 방법[5]들이 사용되고 있으나 본 논문에서는 ABAQUS에서 제공하는 Explicit 해법[6]을 사용한 3차원 유한요소 해석기법을 사용하여 자유 입상모델에 대한 지진응답 해석방법론을 정립하고자 한다. 이를 위하여 가속도 지진하중 입력방법과 Baseline Correction을 사용한 변위 지진하중 입력방법을 각각 사용하여 시간이력 지진응답해석을 수행하고 그 결과들을 비교검토 하였다. 그리고 일본 전력중앙연구소에 수행한 시험결과 및 해석결과들과 비교하여 그 정확성을 검증하였다.

2. 자유입상 물체의 미끄럼 및 회전응답 발생조건

그림 1과 같이 물체와 지면사이의 마찰이 존재하는 상태에서 지면이 수평방향 가속도 a_h 와 수직방향 가속도 a_v 로 움직일 경우 자유입상 물체의 동적거동 현상은 매우 비선형적이며 마찰면에서의 조건에 따라서 미끄럼과 회전 거동을 할 수가 있다.

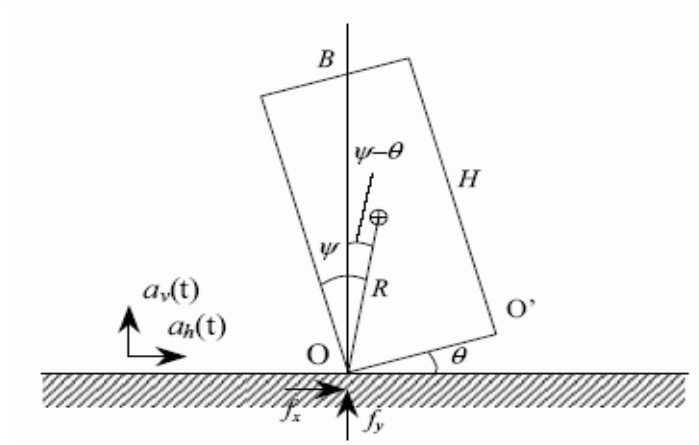


그림 1 자유입상 구조물의 거동 개념도

물체가 회전 거동을 할 경우에 물체 하단부의 모서리를 중심으로 회전하게 되는데 이때 물체는 지면과 물체면사이의 각(θ)을 이루게 된다. 이러한 회전각이 각도 $\square\square$ 를 넘어서면 물체는 전복을 일으키게 된다.

그림 1에서와 같이 지면을 가진 할 경우에 물체와 지면사이에는 f_x 와 f_y 방향으로 반발력을 받게 된다. 이때 자유입상구조물의 지배방정식을 다음과 같이 표현된다.

$$m\{\ddot{x} + a_h(t)\} = -S(\dot{x}_0)m\mu_k\{\ddot{y} + g + a_v(t)\} \quad (1)$$

$$I_o\ddot{\theta} = mR\{\ddot{y} + mg + ma_v(t)\}\{S(\theta)\sin(\psi - \theta) + S(\dot{x}_0)\mu_k\cos(\psi - \theta)\} \quad (2)$$

자유 입상구조물의 회전운동 발생 조건식은 다음과 같다.

$$a_h(t) > \frac{B}{H}\{g + a_v(t)\} \quad (3)$$

자유 입상구조물의 미끄럼 발생 조건식은 다음과 같다.

$$\mu_s < \left| \frac{\ddot{x} + a_h(t)}{\ddot{y} + g + a_v(t)} \right| \quad (4)$$

3. 지진응답해석

3.1 유한요소 해석모델

해석에 사용된 자유입상 Cask는 그림 2와 같이 일본 전력중앙연구소에서 사용한 대형 1/3 축소상사 모형과 동일한 것으로 하부지지물의 크기는 지름 0.45m 높이 0.12m 이고 본체는 지름 0.96m 높이 1.55m 이다. 해석에 사용된 동 마찰계수는 0.75를 가정하였으며 감쇄는 0.07을 사용하였다. Cask와 Slab 사이의 유한요소 모델링에는 ABAQUS에서 제공하는 Surface contact을 사용하였으며 총 사용된 Cask의 절점수는 2159개, 요소수는 1726개이며, Slab의 절점수는 4185개, 요소수는 3360개이다.

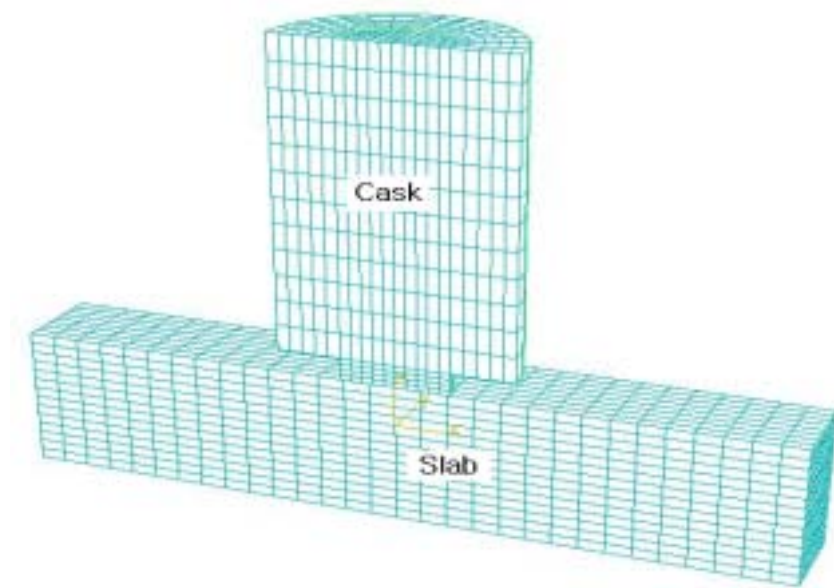


그림 2. ABAQUS Explicit 해석모델

접촉면에서의 충돌거동 등의 접촉거동에는 ABAQUS에서 제공하는 Penalty Formulation을 사용하였다.

3.2 입력 지진파형

해석에 사용된 가속도 입력 지진자료는 그림 3과 같이 Kobe 지진파형으로 최대입력 가속도 값이 0.41g 이다. 그림에서와 같이 총 해석시간은 25초이며 강지진이 발생하는 시간은 5초 정도로 매우 짧은 시간대에서 발생한다. 입력지진 파형은 0.02초 간격으로 생성된 것이며 총 1250 points이다.

변위 지진하중 입력방법을 사용하기 위하여 주어진 그림 3의 가속도 입력자료를 시간

적분하여 변위로 변환할 필요가 있다. 이때 적분상수에 의한 파형왜곡을 방지하기 위하여 Baseline correction을 해 주어야 한다. 본 논문에서는 ABAQUS에서 제공하는 Baseline correction 기능을 사용하여 지진가속도 자료를 변위로 변환하였다.

그림 4는 Baseline correction 방법에 따른 지진변위 변환자료를 나타낸 것이다.

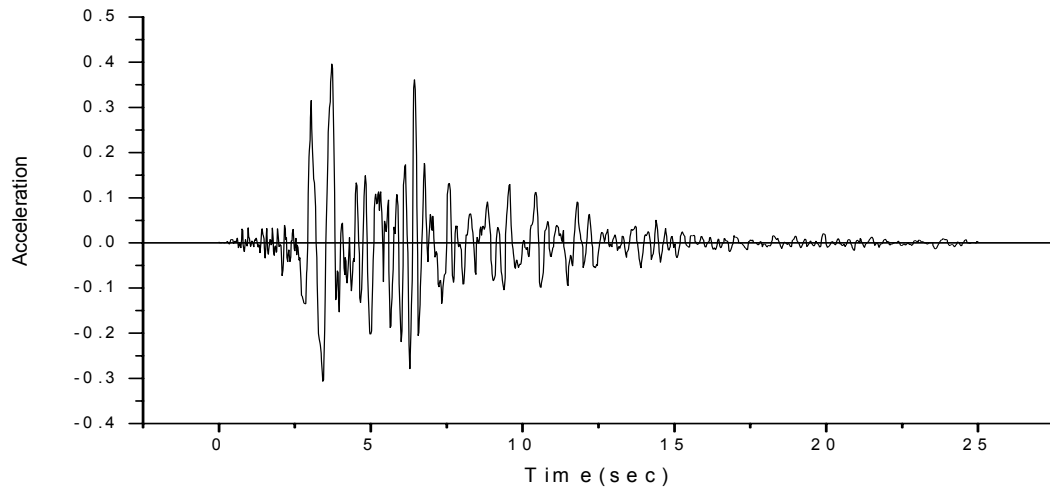


그림 3 해석에 사용된 Kobe 지진가속도 파형(0.41g)

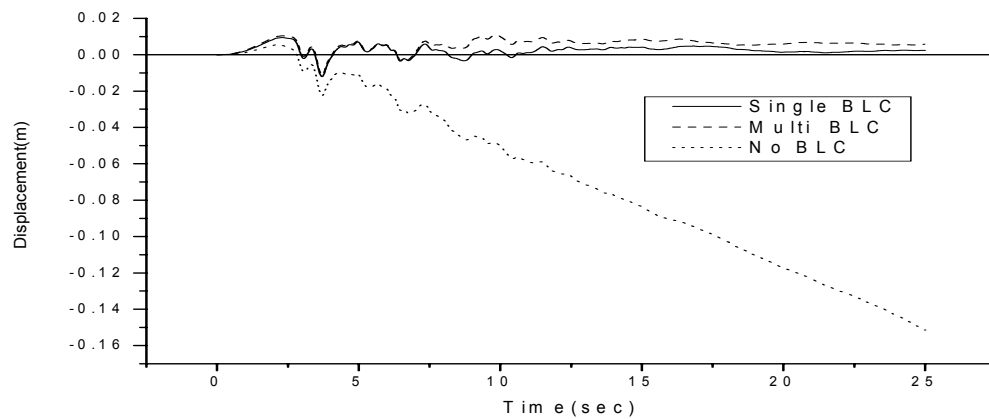


그림 4 Baseline Correction에 따른 지진변위 입력파형

그림 4에서와 같이 Baseline correction을 하지 않았을 경우에 변환된 변위파형은 일정한 경향을 가지고 계속 증가하는 왜곡현상을 나타낸 반면에 경우에 Baseline correction을 적용한 경우에는 지진발생 시간이 종료해 감에 따라서 변위도 줄어드는 타당한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 가속도 지진하중 입력방법의 경우

그림 5는 가속도 지진하중 입력방법에 의한 회전각 응답해석 결과에 대한 절대치를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 회전각 응답은 약 7.5초에서 증가하여 최대 약 9.8° 로 나타났으며 이는 일본 전력중앙연구소의 시험결과와 잘 일치한다. 최대 회전각 발생이후부터 응답이 급격히 줄어드는 현상 등으로 볼 때 각 시간대에서의 전반적인 회전각 해석결과는 시험결과와 매우 유사하다.

그림 6은 미끄럼 변위응답 해석결과를 나타낸 것으로 최대 변위는 6.5mm 정도로 나타났으며 최종적으로 약 1mm의 잔류미끄럼 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같이 미끄럼 변위가 작게 나타난 것은 마찰면에 사용된 0.75의 큰 동마찰계수를 사용했기 때문인 것으로 판단된다.

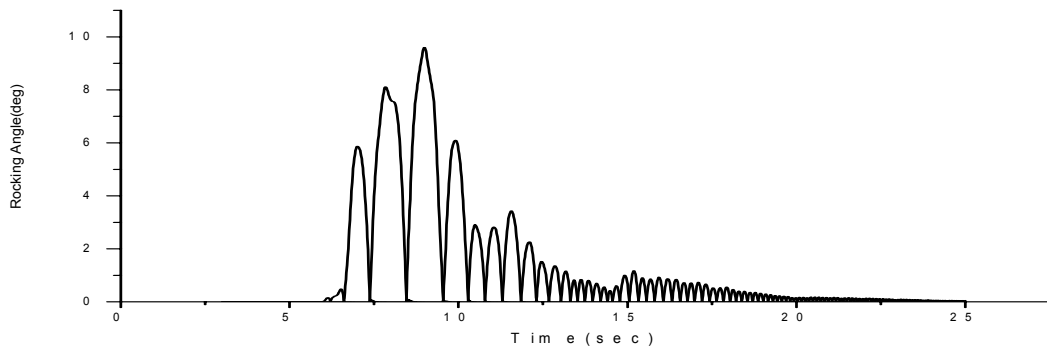


그림 5. 회전각 응답해석 결과(가속도 지진하중 입력방법)

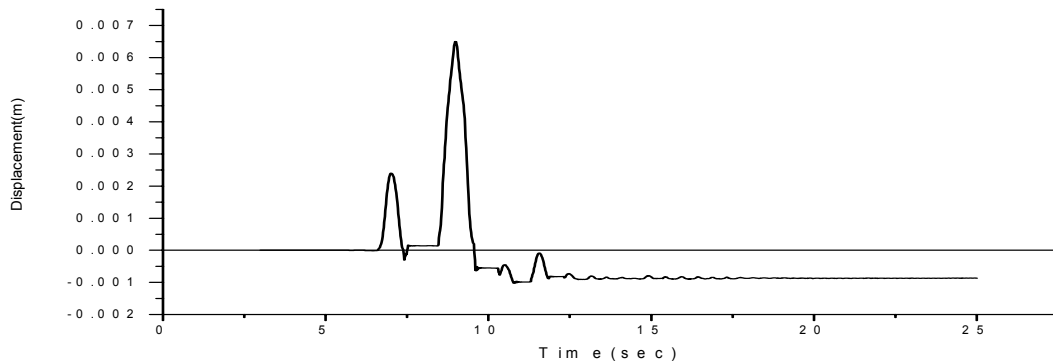


그림 6. 미끄럼 변위응답 해석결과(가속도 지진하중 입력방법)

4.2 변위 지진하중 입력방법의 경우

그림 7은 Slab에 지진 입력값을 변위로 입력하여 해석한 결과이다. 최대 회전각 응답은 8초 시간대에서 약 10° 를 나타내었다. 그림에서와 같이 지진하중이 거의 없는 20초 이후에서 회전각 응답이 지속적으로 나타남으로서 가속도 지진하중 입력방법에 비하여 안정된 해석경향을 보이지 않고 있음을 알 수 있다.

Cask의 미끄럼 변위는 그림 8에서와 같이 최대 4mm 정도로 나타났으며 가속도 지진하중 입력방법에 비하여 작게 나타났다.

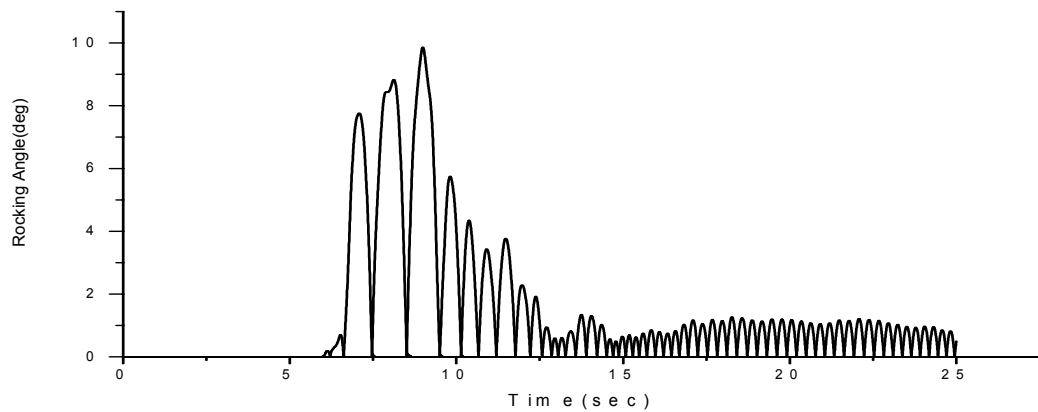


그림 7. 회전각 응답해석 결과(변위 지진하중 입력방법)

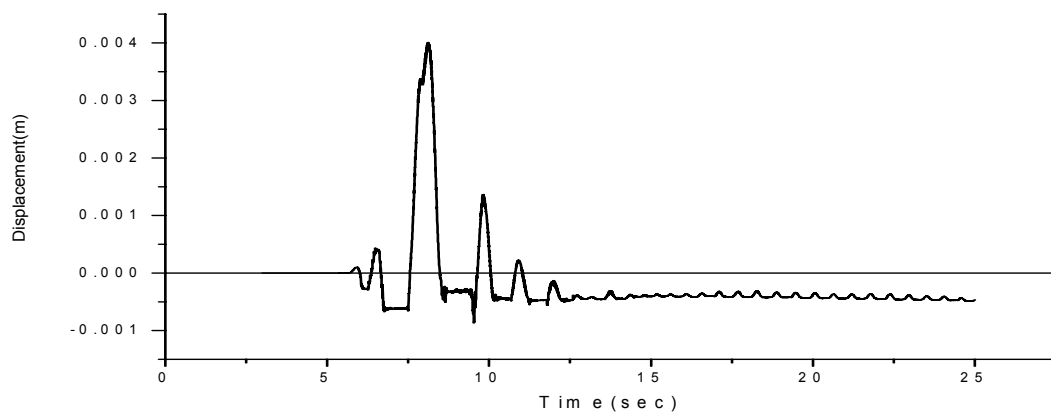


그림 8. 미끄럼 변위응답 해석결과(변위 지진하중 입력방법)

4.3 CRIEPI의 시험 및 해석결과 분석

그림 9의 시험결과를 보면 최대 회전각 응답은 7.5초에서 10.6° 를 나타낸다. 그리고 20초 이후는 회전운동이 거의 발생하지 않는 안정된 거동을 보이는 것을 알 수 있으며 이는 앞의 4.1절에서의 해석결과와 일치 한다.

그림 10은 CRIEPI에서 해석한 결과를 나타낸 것으로 최대 회전각 응답은 9초대에서 약 10.1° 를 나타냄으로서 시험결과와 매우 유사하나 최대 응답이후 부터의 응답거동이 시험결과와 다소 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

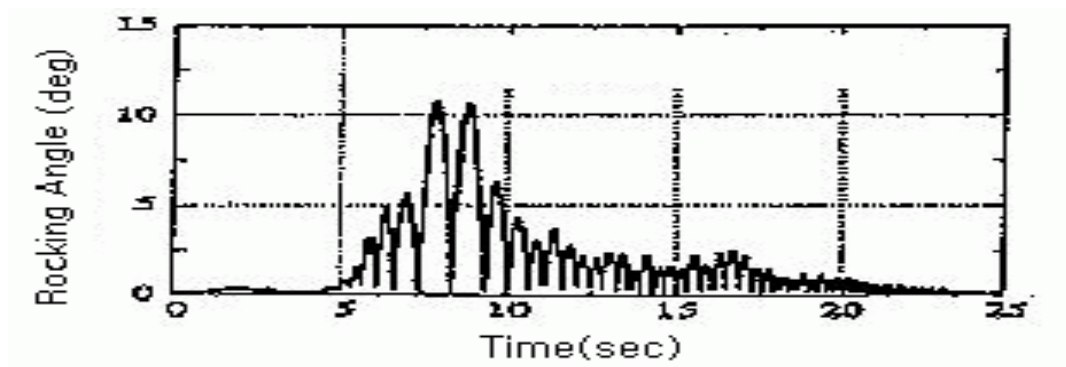


그림 9. 회전각 시험결과(CRIEPI)

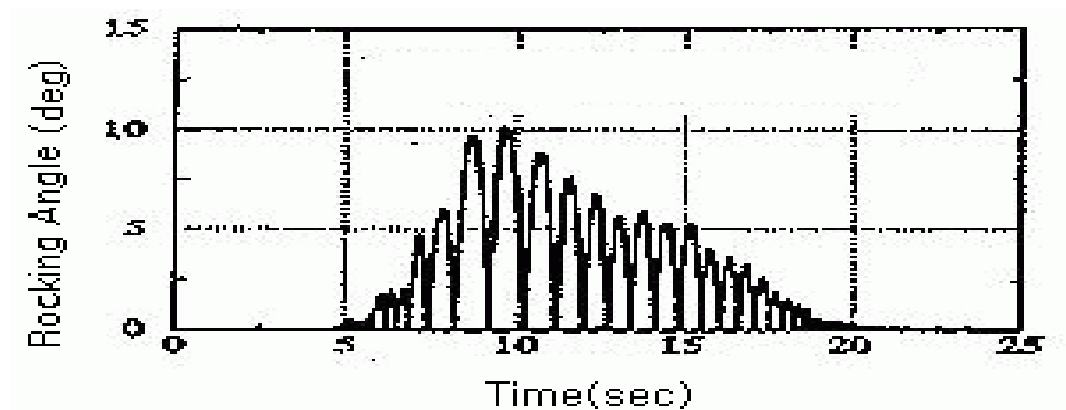


그림 10 회전각 해석결과(CRIEPI)

표 1은 최대 회전각 및 미끄럼응답에 대한 시험결과와 해석결과들을 상호 비교해 놓은 것이다. 표에서와 같이 본 논문에서 사용한 3차원 유한요소 해석방법은 회전응답 해석에 있어서 시험결과와 매우 유사한 결과를 나타낸다. 미끄럼 변위응답에 대해서는 비교

검증할 시험자료나 해석자료가 없기 때문에 정확한 검증을 위하여 시험이 필요 할 것으로 판단된다.

표1. 최대 회전각과 최대 변위 비교

		최대 회전각(degree)	최대 미끄럼 변위(mm)
CRIEPI	시험	10.6	-
	해석	10.1	-
본 논문	가속도 입력방법	9.8	6.5
	변위 입력방법	10	4

5. 결 론

본 논문에서는 ABAQUS에서 제공하는 Explicit 해법을 사용하여 자유 입상식 사용 후 핵연료 건식저장용 Cask에 대한 3차원 유한요소 지진응답 해석을 수행하고 그 결과들을 CRIEPI 시험 및 해석결과들과 비교 검토하였다. 해석결과 회전각 응답해석 결과는 시험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났으며 가속도 지진하중 입력방법과 변위 지진하중 입력방법 모두 유사한 최대 회전각 응답을 나타내었다. 따라서 Explicit 해법을 사용할 경우 Baseline correction이 필요 없는 가속도 지진하중 입력방법을 사용하는 것이 효율적인 것으로 판단된다. 향후 보다 정확한 해석방법론의 검증을 위하여 다양한 시험과 해석변수들에 대한 민감도 해석이 수행될 예정이다.

감 사 의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업 연구 개발 사업의 일환으로 수행 되었기에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- (1) K. Shira, T.Ito and Y.Ozaki, 사용후 핵연료 캐스크저장기술의 확립-지진시의 캐스크

전도평가-," 일본전력중앙연구소, 연구보고:U92037, 1993.

- [2] K.Shira, K.Hirata and T.Saegusa, "Experimental Studies of Free-Standing Spent Fuel Storage Cask Subjected to Strong Earthquakes," Transactions of the 17th SMiRT K08-2, 2003.
- [3] M.Y. Jeong, K. Suzuki, Solomon C.S. Yim, "Chaotic Rocking Behavior of Freestanding Objects with Sliding Motion," Journal of Sound and Vibration, Vol.262, pp.091-1112, 2003
- [4] 이재한,서기석,구경희, 등, "사용후연료 저장용기 자유입상 모델의 지진응답해석," 한국지진공학회, 추계학술발표회 논문집, 2003.
- [5] H.Lin and S.C.S. Yim, "Nonlinear Rocking Motions. I:Chaos Under Noisy Periodic Excitations," Journal of Engineering mechanics, pp.719-727,1996.
- [6] ABAQUS User's Manual Version 6.4.