

추락낙하 충돌 시 가해지는 충격력에 대한 경수로(PWR) 처분용기의 구조해석

Structural Analysis of PWR(pressurized water reactor) Canister for Applied Impact Force Occurring at the Moment of Falling Plumb Down Collision

권 영 주*
Kwon, Young-Joo

요 지

본 논문에서는 고준위폐기물 처분장에서 처분용기를 취급할 때 발생할 수 있는 운송차량에서 처분용기의 추락낙하 사고 시 지면에 충돌할 때 지면으로부터 받는 충격력에 대하여 직경이 102cm인 가압경수로(PWR)용 처분용기에 대한 구조해석을 수행하여 처분용기의 구조적 안전성을 평가하였다. 이를 위하여 처분용기가 추락낙하하여 지면과 충돌 시에 처분용기가 받는 충격력을 구하기 위한 기구동역학해석을 상용 CAE 시스템인 RecurDyn을 이용하여 수행하였으며, 이와 같이 구한 충격력에 대하여 상용 유한요소해석 코드인 NISA를 이용하여 처분용기의 비선형구조해석을 수행하여 처분용기 내에 발생하는 응력 및 변형을 구하였다. 이를 바탕으로 처분용기가 처분장에서 취급 시 부주의로 운송차량에서 추락낙하 하는 경우 처분용기의 구조적 안전성을 평가하였다. 처분용기를 강체로 가정하고 기구동역학해석을 수행한 결과 처분용기는 지면과 두 가지 유형으로 충돌함을 알 수 있었고, 충돌 초기 지면으로부터 받는 충격력이 가장 크고 그 이후 충돌 시에는 충격력이 점차로 감소함을 알 수 있었다. 안정적인 구조안전성 평가결과를 얻기 위하여 처분장에서 차량 운송 시 추락낙하 사고에서의 운송차량의 높이는 충분히 높은 5m로 가정하였다. 충격력에 대한 비선형구조해석은 추락낙하하여 가장 큰 값인 충돌 초기의 충격력의 크기를 가지고 비선형구조해석을 수행하였다. 해석결과 이송 중인 차량에서 추락낙하하는 경우 처분용기의 내부 주철삽입물에 주철의 항복응력보다 더 큰 응력이 발생하였으며, 이는 처분용기에 항복이 발생하여 경수로 처분용기의 구조적 안전성이 확보되지 못함을 보여주고 있다.

핵심용어 : 가압경수로 처분용기, 추락낙하 사고, 충격력, 구조적 안전성평가, 기구동역학해석, 비선형구조해석

Abstract

In this paper a structural analysis of the PWR(pressurized water reactor) canister with 102cm diameter is carried out to evaluate the structural safety of the canister for the impact force occurring at the moment of collision with the ground in the falling plumb down accident from the carriage vehicle which may happen during the canister handling at the spent nuclear fuel disposal repository. For this, a rigid body dynamic analysis of the canister is executed to compute the impact force using the commercial CAE system, RecurDyn, and a nonlinear structural analysis is performed to compute stresses and deformations occurring inside the canister for this computed impact force using the commercial FEM code, NISA. From these analysis results, the structural safety of the canister is evaluated for the falling plumb down accident from the carriage vehicle due to the inattention during the canister handling at the repository. The rigid body dynamic analysis performed assuming the canister as a rigid body shows that the canister falls plumb down to the ground in two types. And also it shows that early collision impact force is the biggest one and following impact forces decrease gradually. The height of the carriage vehicle in the repository is assumed as 5m in order to obtain the stable structural safety evaluation result. The nonlinear structural analysis of the canister is executed for the biggest early impact force. The structural analysis result of the canister shows that the structural safety of the PWR canister is not secured for the falling plumb down accident from the moving carriage vehicle because the maximum stresses occurring in the cast iron insert of canister are bigger than the yield stress of the cast iron.

Keywords : PWR(pressurized water reactor) canister, falling plumb down accident, impact force, structural safety evaluation, rigid body dynamic analysis, nonlinear structural analysis

* 책임저자, 정회원 · 홍익대학교 기계정보공학과 교수
Tel: 041-860-2484 ; Fax: 041-866-6598
E-mail: yjkwon@wow.hongik.ac.kr

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

고준위폐기물 처분용기는 어떤 조건 하에서도 고준위폐기물의 방사성독성이 사라지는 10,000년 동안 고준위폐기물을 완전히 안전하게 격리시킬 수 있게 처분용기의 수명이 확실하게 보장되어야만 한다. 이러한 이유로 저장된 기간 중에 구조적 결함이 없도록 처분용기의 구조적 안전성측면에서 여러 가지 조건을 고려해야 한다. 처분용기가 받는 처분 환경 조건은 먼저 지하수의 유입에 의해 벤토나이트 버퍼에 발생하는 수압이다. 따라서 처분용기는 지하에 처분되는 기간 동안 이 버퍼수압에 견딜 수 있어야 한다(Kwon 등, 2001). 또 처분용기내의 폐기물 다발에서는 비록 점점 감소하지만 계속 붕괴열이 발생하고 있기 때문에 열 발생에 따른 처분용기내의 온도분포에 의한 열응력에도 견딜 수 있어야 한다(권영주 등, 2002). 이 이외에도 비록 저장 시 지진발생이 없는 안전한 지하 암반층에 저장하더라도 미래에 발생할 수도 있는 지진 등에 의한 지각변동에 의하여 발생할 수 있는 암반의 갈라짐에 의해 처분용기에 가해지는 충격에도 견디어야 한다(권영주 등, 2003). 또한 장시간 저장에 따른 내부 잔류응력 및 온도 등에 의한 처분용기에 발생할 수도 있는 크리프 변형도 견디어야 한다(권영주 등, 2004). 처분용기의 구조강도를 평가하기 위해서는 위에서 언급한 모든 구조해석을 수행하여야 한다. 그러나 이와 같은 여러 가지 구조해석들은 이미 충분히 수행되어 처분용기의 구조안전성에 큰 문제가 없음이 밝혀졌다.

그러나 처분용기 설계 시 고려해야 될 또 다른 중요한 사항은 완성된 처분용기를 운반하여 처분장내에 있는 처분공(borehole)에 처분 시 발생할 수 있는 낙하사고에 대한 안전설계이다. 처분용기 낙하사고는 처분용기를 제작하여 처분공에 매설하기 까지 운반이나 취급 중 발생할 수 있다. 처분용기 낙하사고가 발생할 수 있는 경우는 지상이나 지하 처분장에서 운반차량으로 운송 시 운반차량에서 추락낙하하는 경우가 있고 처분용기를 처분공에 매설 시 사고에 의해 처분공에 추락낙하하는 경우가 있다. 두 가지 추락낙하 사고는 약간의 차이는 있지만 근본적인 사고 해석과정은 동일하다고 여겨진다. 각 추락낙하 사고에서 낙하 시 지면과 충돌하여 처분용기가 받는 충격력을 구하는 해석이 먼저 요구되며 다음 단계는 이 충격력에 의하여 처분용기에 발생하는 변형에 대한 해석을 수행해야 된다고 사료된다. 사실 처분용기가 낙하하여 지면과 충돌하여 변형이 발생하는 것은 거의 동시에 일어나기 때문에 이를 한꺼번에 해석하는 것이 원칙이지만 현재의 공학기술로는 이와 같은 해석은 매우 어렵고 난해하다. 이론적 해석의 난해함과 함께 구조물의 복잡함 때문에

이론적 해석은 거의 가능하지 않으며 오로지 CAE 시스템을 활용하는 방법만이 유일한 해결책이다.

우선 기구동역학해석 CAE 시스템을 이용하여 처분용기를 강체로 가정하고 운송차량에서 추락낙하하는 처분용기에 대하여 기구동역학해석을 수행하여 처분용기의 추락낙하 메카니즘을 규명한다. 이를 통하여 처분용기가 추락낙하 시 지면과의 충돌부위와 이때의 충돌에 의한 충격력을 확인한다. 그 다음 단계로 구조역학해석 CAE 시스템을 이용하여 처분용기의 충돌부위에 기구동역학해석에서 계산한 충격력을 가하여 구조해석을 수행한다. 이 구조해석결과 처분용기에 발생하는 변형의 크기와 내부응력을 구한다. 이 때 발생하는 변형과 내부응력의 크기를 분석하여 처분용기의 구조적 안정성여부를 평가 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 앞에서 언급한 추락낙하 사고에 대하여 각각 상용 기구동역학해석 CAE 시스템인 RecurDyn 과 상용 유한요소해석 CAE 시스템인 NISA를 이용하여 운송차량에서 추락낙하하는 처분용기에 대한 기구동역학해석을 수행하고 그 결과 계산한 처분용기에 가해지는 충격력에 대하여 구조역학해석을 수행하여 처분장에서 처분용기 취급 시 발생하는 추락낙하 사고에 대하여 처분용기의 구조안전성을 평가하였다.

2. 처분용기 추락낙하 해석

2.1 처분용기 추락낙하 문제의 구성

2.1.1 처분용기 구조형상

본 연구에서 구조해석을 수행하고자 하는 가압경수로(PWR)용 처분용기모델의 구조형상 및 재원은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 가압경수로(PWR)용 고준위폐기물 처분용기는 단면형상이 정사각형(22.4cm×22.4cm)형상인 4개의 고준위폐기물 다발이 처분용기 단면 중심에 대하여 대칭되게 나란하게 배열되어 있고, 이를 주철(cast iron)로 된 직경 92cm의 내부삽입물(insert)이 감싸고 있으며, 이 내부삽입물을 5cm 두께의 구리로 된 외곽 셸이 감싸고 있다. 따라서 처분용기의 직경은 102cm이다. 또 역시 구리로 된 5cm 두께의 위아래 덮개가 있으며 위 덮개에는 덮개홀더가 붙어있다.

2.1.2 운송차량의 구조형상

Fig. 1의 처분용기를 지상이나 지하처분장에서 운반차량으로 운반 시 처분용기가 추락낙하 하는 경우는 운송 중 차량에서 직접 추락낙하 하는 경우와 운송차량에서 처분용기를 들어 내리거나 올리는 작업 중에 추락낙하하는 경우를 고려

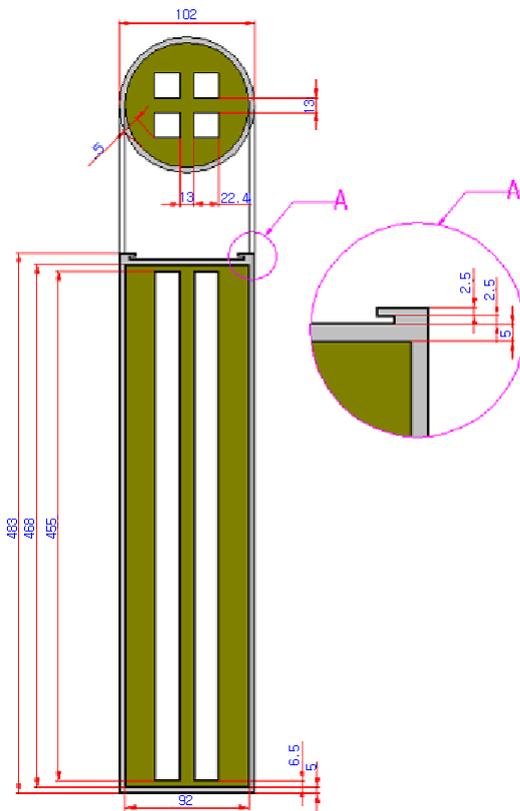


Fig. 1 Structural geometry and dimensions of the PWR canister(unit : cm)

할 수 있다. 실제 운송차량의 높이는 2~3m정도로 추정되므로 운송 중 운송차량에서 추락낙하하는 경우는 처분용기가 지상 2~3m 높이에서 자유낙하하는 경우로 생각될 수 있으며 운송차량에서 처분용기를 들어 내리거나 올리는 작업 시 추락낙하하는 경우는 이보다 더 높은 지상 4~5m에서 자유낙하하는 경우로 생각될 수 있다. 따라서 처분용기의 안전 설계를 고려하는 경우 가장 안정적으로 처분용기를 설계해야 되기 때문에 가장 높은 높이인 지상 5m 높이에서 자유낙하하는 처분용기의 추락낙하 사고를 고려하는 것이 타당하다고 여겨진다.

좀 더 사실적인 추락낙하 사고해석을 위하여서는 추락낙하의 경우에 대하여 차량이나 처분용기를 들어 올리거나 내리는 작업구조물(크레인 등)의 사실적인 구조모델링과 함께 해석을 수행함이 원칙이겠지만 그렇게 하기에는 많은 시간과 노력이 요하며 처분용기의 구조적 안전성 설계측면에서는 굳이 모든 경우에 대하여 상세한 모델링과 함께 추락낙하 사고에 대한 해석은 필요하지 않다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 운송차량의 사실감을 살리고 처분용기의 보다 안정적인 안전설계를 위하여 운송차량을 실제의 높이인 2~3m보다 더 높은 5m 높이의 차량으로 가정하고, 5m 높이의 차량위에서 처분용기가 자유낙하하는 추락낙하 사고로 가정한다.

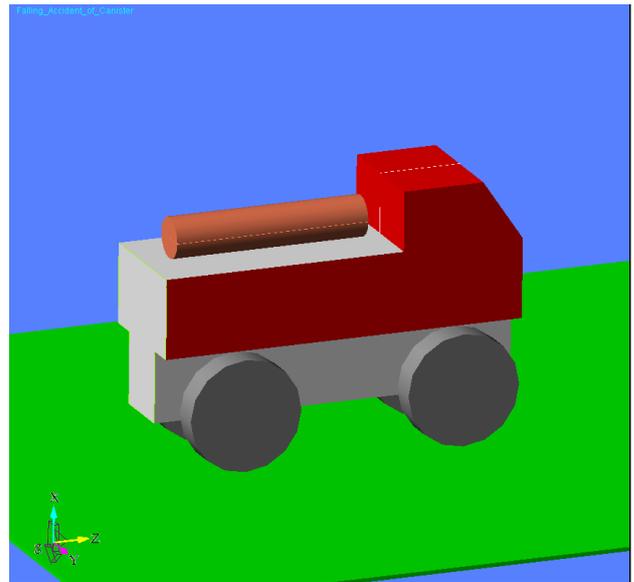


Fig. 2 Carriage vehicle geometry and canister configuration on the vehicle (g : gravitational acceleration)

이를 위하여 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 5m 높이의 운송차량 위에 처분용기가 위 뒷개 부분이 차량 앞쪽(운송차량 진행방향)으로 놓여있는 상태에서 추락낙하 한다고 가정한다.

2.1.3 추락낙하 사고의 고찰

Fig. 2와 같이 운송차량위에 처분용기가 실려 있다고 가정한다. 차량이 움직이고 있을 때 처분용기가 추락낙하하는 것이 자연스럽다고 여겨진다.

따라서 차량의 초기속도는 적당하게 가정하고 Fig. 2와 같이 좌표계를 설정하였을 경우 지면에 고정된 절대좌표계 XYZ의 Y방향으로 처분용기가 운송차량 위에서 움직여서 -X방향으로 자유낙하 한다고 가정한다. xyz좌표계는 처분용기에 고정되어 처분용기와 함께 움직이는 좌표계이다. 처분용기가 운반차량위에서 움직이는 경우는 미끄러지지 않고 굴러서 움직인다고 가정한다. 이 때 처분용기와 운송차량 모두 낙하하는 동안 지면과의 고체접촉을 가정한다. 처분용기가 운송차량에서 굴러 움직여서 낙하하여 지면에 충돌하는 동안 처분용기의 움직임은 강체(rigid body) 운동으로 취급함이 타당하다. 비록 추락낙하하여 지면과 충돌 후에는 처분용기에 충격력이 가해져서 처분용기에 변형이 발생할 수 있지만 처분용기가 지면에 충돌하기까지의 운동은 강체운동으로 가정하는 것이 편리하다. 따라서 본 연구에서는 우선 처분용기를 강체로 가정하고 처분용기가 추락낙하하는 운동에 대하여 기구동역학해석을 수행하여 처분용기가 추락낙하하여 지면과 충돌할 때 처분용기에 가해지는 충격력을 구한 후 이 충격력을 이용하여 처분용기가 지면에 충돌 시 처분용기에 발생하는 구조변형 및 내부 응

Table 1 Material property values of composing parts

Material properties	Insert	Outer shell, Lid & Bottom	Fuel bundle
	Cast iron	Copper	Fuel + Zry-4 tube(equivalent value)
Young's modulus E(GPa)	126.5	117.0	29.7774
Poisson's ratio ν	0.25	0.3	0.3
Thermal expansion coefficient $\alpha(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	10.85	16.5	3.24
Mass density $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$	8,000	8,900	2,000
Yield stress $\sigma_y(\text{MPa})$	200	45	-
Tensile strength $\sigma_u(\text{MPa})$	1,400	200	-
Thermal conductivity $k(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C})$	52	386	0.135
Specific heat $C(\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C})$	504	383	2,640

력을 구하여 추락낙하에 대한 처분용기의 구조안전성을 평가하는 방법론을 채택하고자 한다. 처분용기가 추락낙하하여 지면에 충돌 시까지 처분용기의 운동 특성(처분용기내의 임의의 점의 위치, 속도, 가속도)과 이 운동과 처분용기에 가해지는 외력들과의 상관관계식(Euler 식 등; 김성원 등, 1998)을 이론적으로 풀면 처분용기가 추락낙하 할 때 처분용기의 움직임에 대한 운동역학적 특성을 파악할 수 있다. 즉 처분용기가 지면에 충돌할 때의 충격력 등을 구할 수 있다. 그러나 처분용기의 구조가 단순한 균질수직원통이 아니라, Fig. 1에 표시된 것과 같이 복잡하고 운동식의 본질이 삼차원이므로 이들을 이론적으로 해석하는 것은 매우 난해하며 실제로는 거의 불가능하다. 이들을 다룰 수 있는 방법은 수치해석적인 방법을 동원하여 컴퓨터를 이용하여 해석하는 것만이 가능한데, 현재 이와 같은 컴퓨터응용 기구동역학해석 시스템이 개발되어 상용으로 이용되고 있다. 이들 상용 컴퓨터응용 기구동역학해석 시스템은 여러 가지가 있다. 대표적 시스템들은 ADAMS, RecurDyn, DADS 등이다. 본 연구에서는 이 중에서 RecurDyn 시스템을 이용하여 처분용기의 추락낙하 사고에 대한 기구동역학 해석을 수행한다.

2.2 처분용기 추락낙하 기구동역학해석

기구동역학해석 CAE 시스템인 RecurDyn을 이용하여 처분용기가 운송차량에서 추락낙하하여 지면에 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력을 구하고자 한다. 이를 위하여 지면(ground)을 모델링하고 처분용기가 낙하하는 구역을 생성한다. 다음 이 지면위에 운송차량(carriage vehicle)을 모델링하고 이 운송차량위에 탑재된 처분용기(canister)를 모델링한다. 전체 모델링이 완성된 후 운송차량 및 탑재된 차량위의 처분용기를 움직여서 운송차량에서 지면으로 추락낙하하게 한다.

2.2.1 지면, 운송차량 및 처분용기 모델링

RecurDyn의 고체형상 모델링(solid modelling) 기능인 박스(box), 실린더(cylinder) 등의 기능들을 이용하여 지면(ground), 운송차량(carriage vehicle) 및 처분용기(canister)들을 모델링하였다. 운송차량 모델링에서 차량의 바퀴와 운송차량 몸체사이의 연결은 리볼류트 조인트(revolvute joint)를 사용하였다. 처분용기와 운송차량 및 지면사이, 또 운송차량의 바퀴들과 지면사이의 접촉은 고체-고체접촉(solid-solid contact) 조건을 적용하였다. 모델링한 최종 형상은 Fig. 2에 나타나 있다. 지면과 운송차량의 물질은 RecurDyn의 데이터베이스(data base)에서 제공되는 물질인 암석과 강철로 각각 가정하였다. 그러나 처분용기의 재질은 Table 1의 물질상수 값들과 Fig. 1에 근거한 정확한 처분용기 재질의 값들을 이용하여 계산한 체적($V=3.916907874\text{m}^3$) 및 질량($M=26,581.28914\text{kg}$) 값을 이용하였다. 본 연구결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 계산에 사용한 물질 값들이 실험에 근거한 정확한 값들이어야 한다. 본 연구의 해석 대상인 Fig. 1의 처분용기는 스웨덴 및 핀란드에서 연구(Werme 등, 1995; Werme, 1998; Salo 등, 1990; Raiko 등, 1992; Anttila, 1996, 1999)된 처분용기를 모델로 하여 개념설계 된 처분용기이다. 따라서 Table 1의 물성 값들은 스웨덴 및 핀란드에서 처분용기 개발 시 실험적으로 신뢰성이 검증된 물성 값들을 한국원자력연구원에서 검토하여 한국형 고준위폐기물 처분시스템개발에 적당한 값들로 확보한 데이터 값들이다. 고준위폐기물 다발의 등가 물성치(열전도계수 등)들은 경수로(PWR) 고준위폐기물 다발의 물성치 값들을 계산한 기존의 문헌(Idaho National Engineering Lab., 1979)의 값들을 참조하였다. 따라서 이들 값들에 근거한 등가 밀도 값($\rho=6.78629418706 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$)을 처분용기 모델의 물성치로 사용하였다.

2.2.2 운송차량, 처분용기의 초기속도 및 마찰계수

처분용기의 추락낙하 사고에 대한 기구동역학해석을 수행하기 위해서는 운송차량 및 처분용기의 초기속도를 적절하게 가정하여야 한다. 또한 처분용기의 추락낙하 시 발생하는 처분용

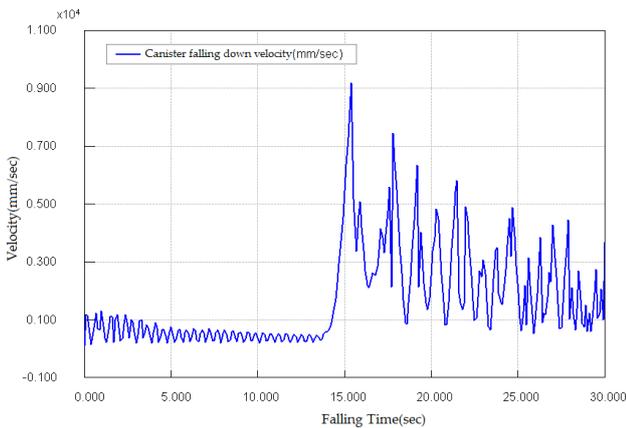


Fig. 4 Falling plumb down velocity of canister (falling plumb down type 1)

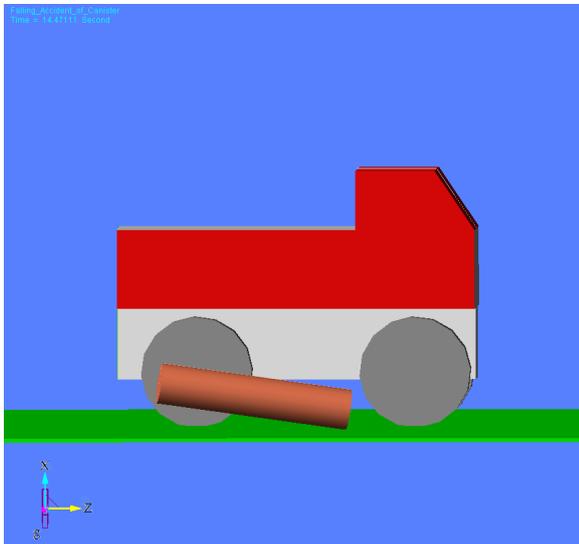


Fig. 5 The collision moment of canister on to the ground (falling plumb down type 1)

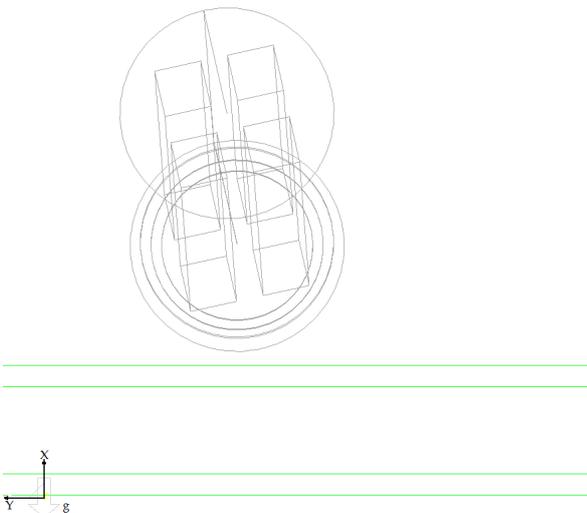


Fig. 6 The collision position and basket array type of canister at the moment of falling plumb down to the ground (falling plumb down type 1)

2, Fig. 3 참조). 또한 충격력의 크기에 비해 충격력이 가해지는 충돌 시간은 1초 이내의 매우 짧은 시간임을 알 수 있다(Fig. 3). 충돌 속도도 초기 충돌 시에 가장 크고 그 이후의 충돌 속도는 점차 감소함을 알 수 있다(Fig. 4 참조). 충돌 위치는 첫 번째 추락낙하 유형(falling plumb down type 1)의 경우 고준위폐기물 다발사이 중간 위 덮개홀더 부분이 지면과 충돌하여 이 부분이 충돌위치임을 알 수 있다(Fig. 5, Fig. 6 참조).

3. 추락낙하 충격력에 대한 처분용기의 비선형구조 해석

3.1 구조해석 문제의 구성

처분용기를 운송차량으로 처분장에 운송하여 처분공(bore-hole)에 처분하기까지 운반과정 중에 안전사고가 발생하여 처분용기가 지면에 추락낙하하는 경우가 발생할 수 있다. 이 경우 처분용기가 구조적으로 안전하지 못하면 처분용기가 추락낙하하여 지면과 충돌 시 처분용기가 파손되고 처분용기내의 고준위폐기물이 유출되어 방사능유출 사고가 발생할 수 있다. 따라서 처분용기 설계 시에 이를 고려하여 처분용기 강도를 충분히 확보하여야 한다. 이를 위하여 처분용기가 추락낙하하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력을 알아야 한다. 이 충격력은 앞 절에서 RecurDyn을 이용하여 구하였다(Table 2, Fig. 3 참조). 그 다음 단계는 이 충격력을 처분용기에 가하여 처분용기에 발생하는 구조변형과 내부응력을 계산하여야 한다. 만약에 이 때 발생한 내부응력의 최대값이 처분용기를 구성하는 재질(주철과 구리)의 항복 응력 값을 초과하면 처분용기는 구조적으로 안전하지 못하여 파손될 수 있다. 따라서 본 절에서는 RecurDyn을 이용하여 앞 절에서 구한 처분용기가 추락낙하하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력에 대하여 NISA를 이용하여 구조해석을 수행하여 처분용기에 발생하는 구조변형과 내부응력을 구한다. 이를 통하여 처분용기가 지면과 충돌 시에 처분용기의 구조적 안전성을 평가한다. 정확한 구조해석을 위하여 대변형 구조해석이 가능한 NISA의 비선형구조해석 기능을 이용하여 구조해석을 수행한다.

3.1.1 처분용기 구조형상

해석 대상 처분용기의 구조형상 및 재원은 Fig. 1과 같다. 비선형구조해석 시 내부고준위폐기물 다발은 없다고 가정하고 구조해석을 수행한다. 그 이유는 처분용기의 강도는 대부분 내부 주철삽입물이 지지하고 내부 고준위폐기물다발의 강도는 매우 작기 때문이기도 하지만 좀 더 안정적인 구조해석결과를 얻기 위해서이다. 이와 같은 구조해석 방법은 스웨덴이나 핀란드

Table 3 Piecewise linear hardening stress-strain curve data of copper

σ_j (Pa)	ϵ_j
50×10^6	0.005
80×10^6	0.015
130×10^6	0.065
180×10^6	0.154
210×10^6	0.288

Table 4 Piecewise linear hardening stress-strain curve data of cast iron

σ_j (Pa)	ϵ_j
300×10^6	0.005
412×10^6	0.023
542×10^6	0.078
697×10^6	0.147

드의 처분용기 구조해석 연구(Werme 등, 1995; Werme, 1998; Salo 등, 1990; Raiko 등, 1992; Anttila, 1996, 1999)에서도 채택되었다.

3.1.2 물질상수

Fig. 1에서 보는 바와 같이 처분용기는 사용 후 고준위폐기물 연료봉들을 저장하는 다발(바스켓)을 보호 지탱하는 주철(cast iron)로 된 삽입물(insert)과 이 삽입물을 감싸고 있는 구리(copper)로 된 외곽 셸(outer shell)과 위아래 덮개(lid and bottom)로 되어 있다. 앞 절에서 RecurDyn으로 계산한 충격력에 대하여 처분용기에 대변형이 발생할 수 있기 때문에 정확한 구조해석을 수행하기 위하여 NISA의 비선형구조해석 기능을 이용하여 해석을 수행한다. 비선형구조해석 수행 시 처분용기를 구성하고 있는 재질인 주철과 구리는 탄소성체(elastoplastic material)로 가정한다. 이 경우 적당한 항복조건을 적용해야 하는데 주철과 구리는 모두 금속물질이기 때문에 금속류에서 실험치와 잘 일치하는 von Mises 항복조건(yield criterion)을 적용한다. 이때 주철과 구리의 항복응력은 각각 200MPa(주철의 항복응력)과 45MPa(구리의 항복응력) 값을 사용한다(Table 1참조). 또한 초기항복이후의 경화법칙(hardening rule)은 이동경화법칙(kinematic hardening rule)을 적용한다. 초기 항복 이후 응력-변형률관계는 스웨덴의 Börgesson(1992)의 연구에서 사용된 값들을 적용한다(Table 3~4참조). Table 3~4는 본 연구에서 적용된 불연속 선형경화 단축 응력-변형률 곡선(piecewise linear hardening uniaxial stress-strain curve)의 수치 값들을 나타낸다.

3.2. 유한요소 수치해석

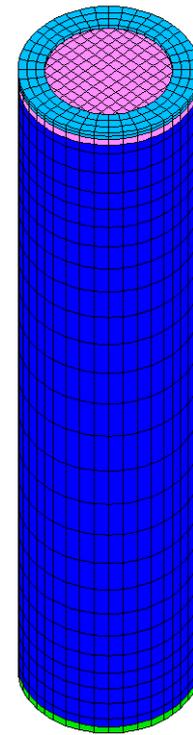


Fig. 7 F.E. model of PWR canister(D=102cm)

Table 5 Element and node number used in the F.E model of PWR canister(full model)

No. of element	5944
No. of node	28249
Element type	2nd order hexahedron/wedge element(20/15 nodes)

상용 유한요소해석 code인 NISA를 이용하여 유한요소 모델링과 해석을 수행한다.

3.2.1 유한요소모델링

Fig. 1의 처분용기를 NISA를 이용하여 구조형상 및 유한요소모델링을 한다. 구조형상의 대칭성을 이용하여 모델링한다(Fig. 7 참조). 구조물의 대칭성을 이용하여 유한요소모델링을 수행했지만 해석은 전체 유한요소모델을 이용하여 수행한다. 왜냐하면 작용하는 외력은 대칭이 아니기 때문이다. 해석에 사용된 가압경수로(PWR)용 처분용기 유한요소모델의 유한요소(element)의 수와 절점(node)의 수는 Table 5에 표시하였다. 비선형 구조해석결과의 정확성을 향상시키기 위하여 2차원 유한요소를 사용하여 유한요소모델링을 수행하였다.

3.2.2 유한요소해석(Finite element analysis)

Fig. 1의 처분용기(가압경수로(PWR)용 고준위폐기물 처분용기)에 대하여 외력 및 경계조건을 가하여 해석을 수행한다. 앞 절에서 RecurDyn을 이용하여 해석한 결과 처분용기가

운송차량에서 추락하여 자유낙하 한 후 지면과 충돌 시 처분용기가 지면으로부터 받는 충격력을 구할 수 있었다. 본 연구에서는 운송차량을 실제차량과 유사한 본체(main body)가 강철(steel)로 된 차량이라고 가정하여 구조해석 문제를 다루기로 한다. 이 경우 처분용기가 지면과 충돌 시 받는 충격력은 추락낙하 유형과는 관계없이 두 가지 추락낙하 유형 모두 첫 번째 충돌 시 가장 크고 그 이후의 충돌에서는 점점 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서 첫 번째 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력에 대하여 처분용기의 구조해석을 수행하여 처분용기의 구조적 안전성 평가를 수행함이 타당하다고 사료되기 때문에 본 비선형 구조해석 문제에서는 첫 번째 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력(추락낙하 유형 1인 경우 $F=3,888,59.3\text{N}$ 추락낙하 유형 2인 경우 $F=3,786,098.9\text{N}$, Table 2 참조)을 외력으로 사용한다. 다음 문제는 이 충격력의 작용점인데 앞 절의 해석결과 추락낙하 유형 1인 경우 처분용기가 지면과 충돌 시 충돌 위치는 매년 바뀌지만 첫 번째 충돌 위치는 위 덮개홀더 모서리 부분임이 확인되었다. 좀 더 정확한 위치는 정사각형 단면의 고준위폐기물 다발(바스켓) 코너 부분이 아니고 다발과 다발 사이 중앙 부분임을 알 수 있었다(Fig. 6참조). 따라서 충격력의 작용 위치는 처분용기의 다발과 다발 사이의 중앙 부분에 해당하는 위 덮개홀더 모서리 부분으로 한다. 이 때 충격력은 한 점에 집중되는 집중하중으로 작용시킨다. 이 충격력의 작용점은 추락낙하 유형 1인 경우 xyz 좌표계로는 $x=-0.51\text{m}$, $y=0\text{m}$, $z=4.83\text{m}$ 이고, 유한요소모델에서는 절점(node) 번호 $N=22,170$ 에 해당한다. 따라서 이점에 상기 집중하중을 작용시킨다. 비선형구조해석 수행 시 처분용기의 강제운동을 막기 위하여 적당한 구속조건을 주어야 한다. 보통 구조해석 시 구조물의 지점(support)이 분명한 경우에는 지점에 구속하는 경계조건을 가한다. 그러나 어떤 경우에는 지점이 분명하지 않을 경우가 있다. 움직이는 물체(예를 들어, 주행 중의 차량, 운행 중의 비행기, 선박 등)에 외력이 가해져서 파손 등의 변형이 발생하는 경우에 변형은 보통 물체의 강제운동(병진, 회전운동)과 동시에 발생하지만 지점이 분명하지 않다. 그런데 강제운동은 변형과 무관하기 때문에 순수한 변형해석이 목적인 구조해석에서는 이와 같은 강제운동을 구속하는 적당한 경계조건을 구조물의 지점 역할을 하는 곳에 가해 주어야 한다. 보통 구조물의 지점 역할을 하는 곳은 변형이 거의 발생하지 않는 곳이라고 사료되는데 구조물의 대칭면 혹은 대칭점, 대칭문제가 아닌 경우에는 외력이 가해지는 곳에서 제일 먼 곳이라고 사료된다. 본 처분용기 추락낙하 구조해석 문제에서는 구조물은 대칭이지만 구조해석문제는 대칭문제가 아니기 때문에 지면과의 충돌에 의하여 충격력이 가해지는 곳에서 제일 먼 곳(추락낙하 유형 1인 경우 아래 덮개 부분, 추

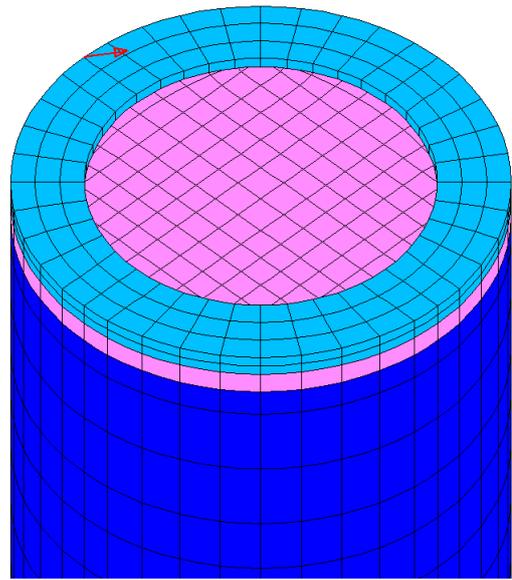


Fig. 8 Impact force applied to the canister at the collision contact point(arrow means the impact force) (falling plumb down type 1)

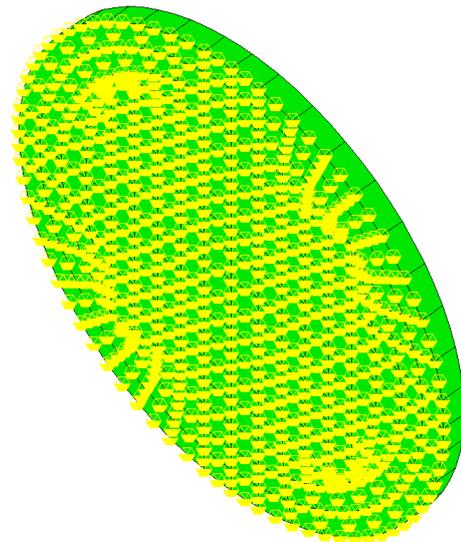


Fig. 9 Constrained boundary condition ($U_x = U_y = U_z = 0$) applied on the bottom surface($z=0$) of the canister (falling plumb down type 1, boundary condition type 1)

락낙하 유형 2인 경우 위 덮개홀더 부분)이 지점으로 사료된다. 따라서 이곳에 강제운동을 구속하는 경계조건을 가해준다. 추락낙하 유형 1(falling plumb down type 1) 문제에서는 처분용기 맨 하단 면의 변위를 모두 구속한다. 즉 처분용기의 맨 밑면(아래 덮개(bottom)의 맨 밑면)의 모든 변위를 0으로 구속한다(즉, $U_x = U_y = U_z = 0$ at $z=0$)(boundary condition type 1)(Fig. 9참조). 이들 외력조건과 경계조건은 그림 8~9에 나타나 있다. 그런데 강제운동을 구속하는 상기의 경계조

건 이외에도 다른 경계조건들도 가능하다. 예를 들면, 원통좌표계(r, θ, z)를 사용하면 처분용기 아래 덮개 밑면의 중심($r = \theta = z = 0$)의 모든 변위를 구속(즉, $U_r = U_\theta = U_z = 0$ at $r = \theta = z = 0$)하고 밑면은 U_θ 와 U_z 를 구속(즉, $U_\theta = U_z = 0$ at $z = 0$)하는 경계조건(boundary condition type 2)도 가능한 경계조건이다. 혹은 아예 아래 덮개 외곽면 부분의 모든 변위를 구속(즉, $U_x = U_y = U_z = 0$ at $r = 0.51\text{m}$ & $0 \leq z \leq 0.115\text{m}$)하는 경계조건(boundary condition type 3)도 가능한 경계조건이다. 따라서 본 연구에서는 지금까지 기술한 세 가지 유형의 구속 경계조건 모두를 사용하여 구조해석을 수행한 후 그 결과를 비교한다. 추락낙하 유형 2에 대해서도 같은 방법으로 비선형구조해석을 수행한다. 이 경우에는 처분용기 아래 덮개에 충격력이 작용하므로 변위 구속조건을 처분용기 위 덮개홀더 맨 윗면에 적용한다(즉, $U_x = U_y = U_z = 0$ at $z = 4.83\text{m}$)(boundary condition type 1).

3.3 해석결과 및 검토

처분용기에 대한 비선형구조해석결과 처분용기의 각 부분에 발생하는 최대 폰 미세스 등가응력(von Mises equivalent

stress) 및 변형 값을 Table 6~9에 나타내었다.

해석결과를 검토하면 처분용기가 추락낙하 시 지면과 충돌하는 위 덮개홀더(lid holder)(falling plumb down type 1) 혹은 아래 덮개(bottom)(falling plumb down type 2)에 큰 응력과 변형이 발생함을 알 수 있다(Fig. 14, Fig. 15 참조). 이들 부분에 발생하는 응력의 크기는 강제운동을 구속하기 위하여 가해지는 경계조건들에 따라 약간씩 값들에 차이가 있지만 전반적으로 큰 차이가 없이(Table 6~8참조) 본 연구에서 채택한 덮개 및 덮개홀더를 구성하는 재질인 구리의 항복응력(45MPa)을 훨씬 상회하는 응력이 발생함을 알 수 있다. 따라서 이들 부분들은 추락낙하에 의하여 파손됨을 알 수 있다. 또한 처분용기 내부의 핵 연료봉을 지지하고 있는 내부 주철삽입물에도 주철의 전단항복응력 값(200MPa)을 초과하는 응력이 발생하여 구조적으로 항복이 발생함을 알 수 있다. 일반적으로 구조물의 안전성을 확보하기 위해서 안전계수(Safety Factor) S($S = \text{항복응력}/\text{최대응력}$)의 개념을 사용하는데 보통 허용 안전계수는 $S = 2.0 \sim 2.5$ 이상이다. 그런데 본 추락낙하 구조해석 시 계산된 내부주철삽입물의 안전계수 값은 $S = 0.6 \sim 0.7$ 로 매우 낮은 값을 보여주고 있다. 따라서 처분용기 내부의 내부주철삽입물 기준으로는 처분용기가 추락낙

Table 6 Structural analysis result of canister(falling plumb down type 1, boundary condition type 1)

		Whole structure	Cast iron insert	Bottom	Outer shell	Lid	Lid holder
von Mises Stress (MPa)	Max.(Node)	834.0(22170)	259.8	164.0	299.5	364.3	834.0
	Min.(Node)	0.1424(14194)	1.399	7.451	0.5665	0.675	0.1424
Deformation (m)	Max.(Node)	0.2731 (22170)	0.0453	0.0013	0.0617	0.1294	0.2731
	Min.(Node)	0.0(9301)	4E-6	0.0	3E-5	0.04	0.04

Table 7 Structural analysis result of canister(falling plumb down type 1, boundary condition type 2)

		Whole structure	Cast iron insert	Bottom	Outer shell	Lid	Lid holder
von Mises Stress (MPa)	Max.(Node)	941.8(22170)	332.8	294.6	332.8	353.1	941.8
	Min.(Node)	0.1538(14194)	1.421	7.897	0.7857	0.7053	0.1538
Deformation (m)	Max.(Node)	0.4401 (22170)	0.2130	0.0191	0.2311	0.2935	0.4401
	Min.(Node)	0.0(9964)	2E-4	0.0	0.0	0.2090	0.2115

Table 8 Structural analysis result of canister(falling plumb down type 1, boundary condition type 3)

		Whole structure	Cast iron insert	Bottom	Outer shell	Lid	Lid holder
von Mises Stress (MPa)	Max.(Node)	770.5(22170)	274.2	184.9	293.8	355.4	770.5
	Min.(Node)	0.1949(14194)	1.369	19.12	0.5077	0.6503	0.1949
Deformation (m)	Max.(Node)	0.2671 (22170)	0.0512	0.00185	0.0657	0.1307	0.2671
	Min.(Node)	0.0(9301)	7E-2	0.0	6E-2	5E-2	5E-2

Table 9 Structural analysis result of canister(falling plumb down type 2, boundary condition type 1)

		Whole structure	Cast iron insert	Bottom	Outer shell	Lid	Lid holder
von Mises Stress (MPa)	Max.(Node)	2366.0(28032)	2366.0	917.8	1734.0	2366.0	877.2
	Min.(Node)	0.2473(20857)	1.396	0.3875	0.2	4.234	15.39
Deformation (m)	Max.(Node)	1.818 (9965)	1.625	1.818	1.668	0.2438	0.1397
	Min.(Node)	0.0(13938)	2E-2	1.602	1.0E-2	3E-3	0.0

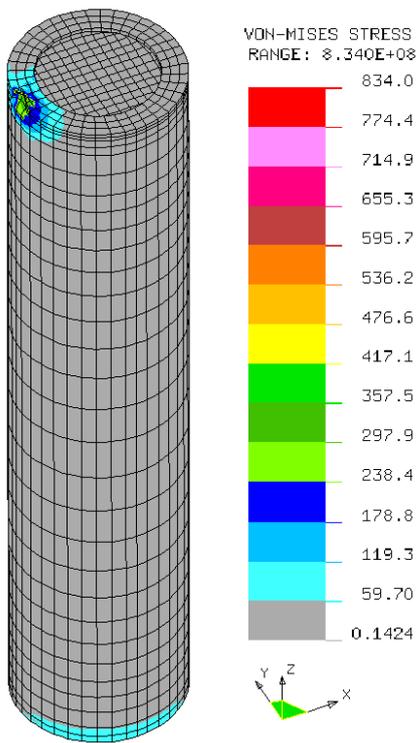


Fig. 10 von Mises stress contour occurring in the canister for the impact force(whole structure, unit : MPa) (falling plumb down type 1, boundary condition type 1)

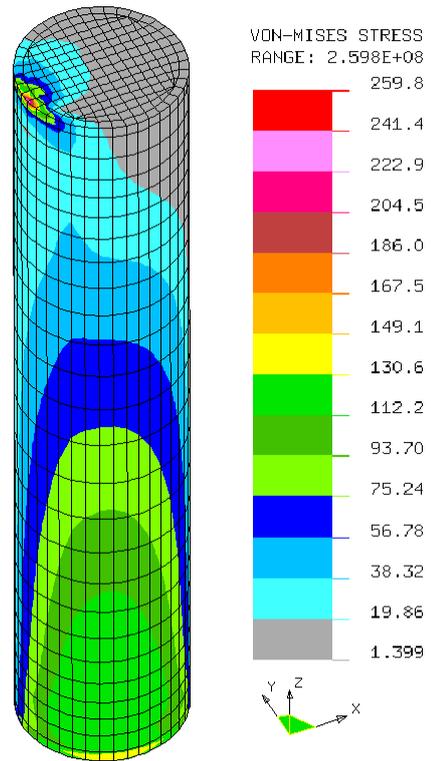


Fig. 11 von Mises stress contour occurring in the canister for the impact force(cast iron insert, unit : MPa) (falling plumb down type 1, boundary condition type 1)

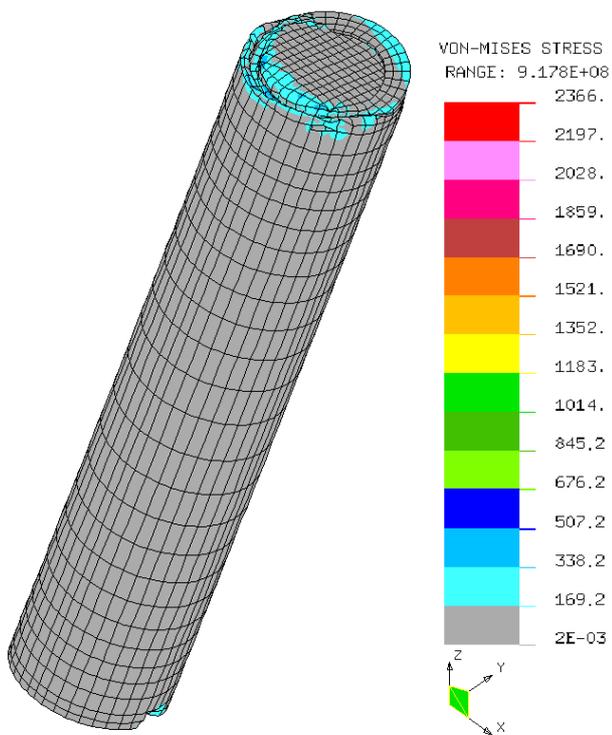


Fig. 12 von Mises stress contour occurring in the canister for the impact force(whole structure, unit : MPa) (falling plumb down type 2, boundary condition type 1)

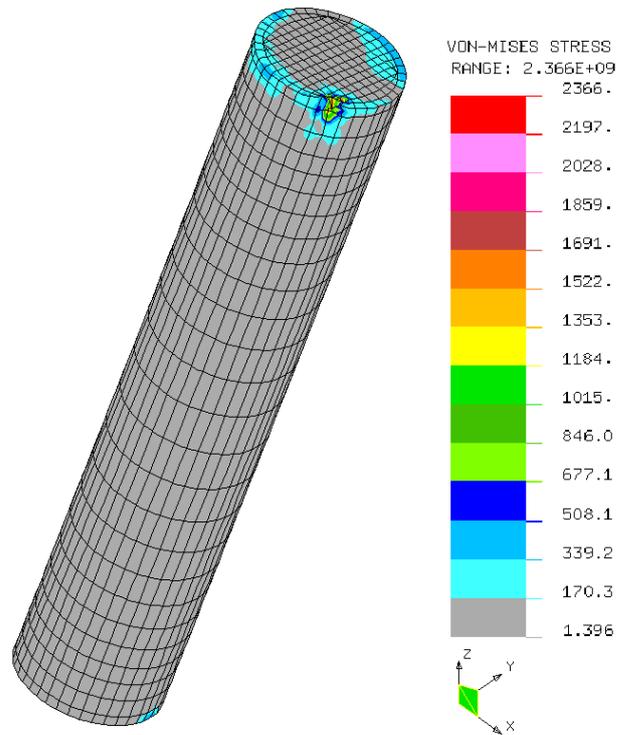


Fig. 13 von Mises stress contour occurring in the canister for the impact force(cast iron insert, unit : MPa) (falling plumb down type 2, boundary condition type 1)

하하여 지면과 첫 번째 충돌 시 처분용기의 내부 주철삽입물은 구조적으로 안전하지 못함을 알 수 있다. 따라서 두 번째, 세 번째 충돌 시에도 첫 번째 충돌 시 발생한 내부 응력이 잔류하여 구조적으로 취약한 상태이기 때문에 두 번째, 세 번째 등의 충돌에 의하여 구조물은 더욱 더 약화될 것으로 사료된다. 첫 번째 유형의 경계조건(boundary condition type 1)을 적용하여 계산한 결과에 의하면 추락낙하 유형 1에서는 충돌부분인 위 덮개홀더 부분에 약 27.31cm의 대변형이 추락낙하 유형 2에서는 아래 덮개 부분에 181.8cm의 대 변형이 발생함을 알 수 있다. 또한 추락낙하 유형 1보다 추락낙하 유형 2의 경우에 내부 주철삽입물에 더 큰 응력이 발생함을 알 수 있다. 따라서 추락낙하 유형 2의 경우가 더 구조적으로 안전하지 않음을 알 수 있다. 추락낙하 유형 2의 경우가 추락낙하 유형 1의 경우보다 응력 및 변형이 더 크게 발생한 이유는 추락낙하 유형 1의 경우 5cm 두께의 위 덮개에 덮개홀더가 붙어 있어 충격을 흡수하는 완충작용을 하기 때문으로 사료되며 또한 추락낙하 유형 2에서는 변위의 구속면적이 훨씬 작은 위 덮개홀더 위 면이 구속되어 지지력이 더 약하기 때문으로 사료된다. 따라서 발생한 변형도 추락낙하 유형 2에서의 처분용기가 추락낙하 유형 1에서의 처분용기보다 구조물전체가 심하게 기울어져 한쪽으로는 쓸림현상이 매우 심함을 알 수 있다(Fig. 10~13참조). 이러한 이유로 추락낙하 유형 1에서는 충격력이 가해지는 부분에 27.31cm의 대 변형이 발생하지만 내부 주철삽입물에는 구조물의 파괴에는 이르지 않고 초기항복이 발생할 정도의 응력 및 변형이 발생하고 있지만 추락낙하 유형 2에서는 지지부분에 심한 응력 및 변형이 발생하면서 구조물전체가 한쪽으로 기울어지고 동시에 내부 주철삽입물도 심하게 파괴되고 있음을 알 수 있다(Table 9, Fig. 13 참조). 또한 비록 본 연구에서 좀 더 안정적인 구조안전성 평가결과를 얻기 위하여 구리와 주철의 항복응력 값을 문헌에 제시된 값들 중 작은 값들을 사용하였지만 실제로는 구리와 주철은 본 연구에서 사용한 값들보다 큰 범위의 항복응력 값(구리의 경우 55~760MPa, 주철의 경우 120~290MPa) 및 극한응력 값(구리의 경우 230~830MPa, 주철의 경우 69 ~2480MPa)(Gere, 2001)을 가지고 있다. 그런데 본 연구결과 계산된 내부 주철삽입물에 발생하는 최대응력 값들은 이 범위 내에 있기 때문에 추락낙하에 의해 고준위폐기물을 감싸고 있는 Fig. 1에 제시된 내부 주철삽입물에는 구조물이 항복이 발생할 정도의 큰 응력이 발생하여 구조적으로 안전성이 확보되지 못하지만 항복이 진행되어 파괴에 이르러 내부 고준위폐기물이 누출되는 사고는 발생하지 않을 것으로 사료된다. 더욱이 대부분의 추락낙하는 본 연구에서 고려한 운송차량 높이인 5m보다 더 낮은 높이에서 발생할 것으로 예상되기 때문에 본 연구결과는 처분장

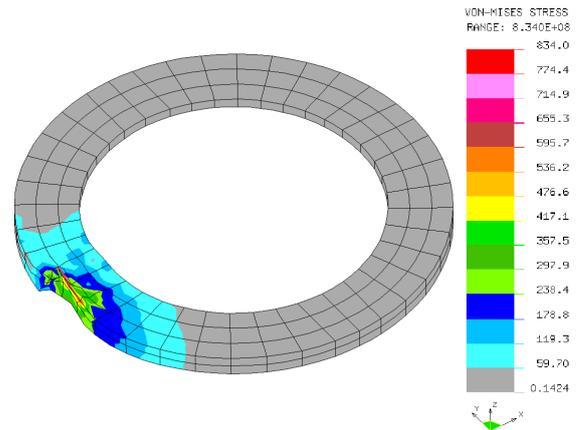


Fig. 14 von Mises stress contour occurring in the lid holder of canister and deformed shape(falling plumb down type 1, boundary condition type 1, unit : MPa)

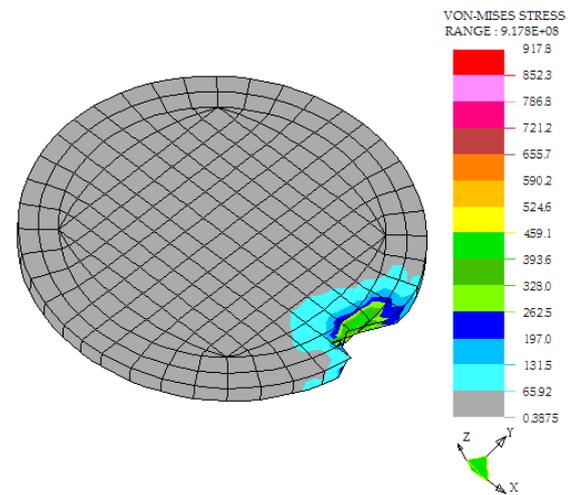


Fig. 15 von Mises stress contour occurring in the bottom of canister and deformed shape(falling plumb down type 2, boundary condition type 1, unit : MPa)

에서 처분용기 취급 시 추락낙하 사고가 발생할 때 처분용기의 파괴에 의한 내부 고준위폐기물 누출 등의 심각한 사고는 발생하지 않을 것임을 보여주고 있다고 사료된다. 또한 추락낙하 충돌 시 발생하는 충격력은 1초 이내의 극히 짧은 시간 내에 발생하기 때문에 본 연구에서 적용한 충돌 초기 최대 크기의 힘이 처분용기에 직접 작용하기 보다는 실제로는 훨씬 작은 힘(예를 들어, 1초당 충격력(impulse))이 가해진다고 사료되기 때문에 이 충격력을 가하여 구조해석을 수행함이 좀 더 사실에 가까운 해석으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 직경이 102cm인 가압경수로(PWR)용 처분용기에 대하여 처분장으로서의 운송 중에 또 처분공에 처분시 발생할 수 있는 안전사고인 추락낙하 사고에 대하여 처분

용기의 구조적 안전성 평가를 수행하였다. 이를 위하여 처분용기가 추락낙하하여 지면과 충돌 시에 처분용기가 받는 충격력을 구하기 위한 기구동역학해석을 RecurDyn이라는 CAE 시스템을 이용하여 구하였으며. 이와 같은 기구동역학해석을 통하여 구한 충격력을 이용하여 역시 유한요소해석 CAE 시스템인 NISA를 가지고 처분용기에 대한 비선형구조해석을 수행하여 처분용기 내에 발생하는 응력 및 변형의 크기를 구하였다. 이를 바탕으로 처분용기가 처분장에서 안전사고로 추락낙하하는 경우 처분용기의 구조적 안전성을 평가하였다.

처분용기를 강체(rigid body)로 가정하고 기구동역학해석을 수행한 결과 처분용기는 지면과 여러번 충돌함을 알 수 있었고 맨 처음 충돌 시 지면으로부터 받는 충격력이 가장 크고 두 번째, 세 번째 충돌 시에는 충격력이 점차로 약간씩 감소함을 알 수 있었다. 안정적인 구조안전성 평가결과를 얻기 위하여 처분장에서 운송 시 추락낙하 사고에서는 운송 차량의 높이를 충분히 높은 높이인 5m로 가정하였다. 추락낙하 시 처분용기는 두 가지 유형으로 지면과 충돌함을 알 수 있었다. 각 경우 구조해석은 추락낙하 할 때 가장 큰 값인 맨 처음 충돌 시의 충격력의 크기를 가지고 비선형구조해석을 수행하였으며, 해석결과 처분용기의 내부 주철삽입물에 본 연구에서 채택한 주철의 항복응력 값(200MPa)보다 큰 응력이 발생하여 처분용기는 구조적으로 항복이 발생하여 안전성이 확보되지 못함이 확인되었다.

감사의 글

이 논문은 2009학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었습니다. 본 논문의 일부 연구결과는 교육과학기술부 원자력 중장기개발사업 기금으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

권영주, 하준용, 최종원 (2002) 가압경수로 고준위폐기물 처분용기의 열응력 해석, 한국전산구조공학회 논문집, 15(3), pp.471~480.

권영주, 하준용, 최종원 (2004) 가압경수로 고준위폐기물 처분용기에 대한 크립해석, 한국전산구조공학회 논문집, 17(4), pp.413~421.

권영주, 최석호, 최종원 (2003) 고준위폐기물 처분용기와 밴드 나이트 버퍼로 이루어진 복합구조물에 대한 비선형 구조해석 : 대칭압반 전단력, 한국전산구조공학회 논문집, 16(4), pp.369~376.

김성원, 김정수, 황재혁 공역 (1998) 동역학, (주)사이텍미디어, 서울, p.633.

Anttila, M. (1996) Criticality Safety Calculations for the Nuclear Waste Disposal Canisters, *Report POSIVA-96-11*, Posiva Oy, Helsinki, Finland.

Anttila, M. (1999) Criticality Safety Calculations of the Nuclear Waste Disposal Canisters for Twelve Spent Fuel Assemblies, *Working Report 99-03*, Posiva Oy, Helsinki, Finland, p.20.

Börgesson, L. (1992) Interaction between Rock, Bentonite Buffer and Canister. FEM Calculations of Some Mechanical Effects of Canister in Different Disposal Concepts, *Technical Report TR 92-20*, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB), Stockholm, Sweden, appendixes, ISSN 0284-3757, p.83.

Gere, J.M. (2001) *Mechanics of Materials*, Fifth Edition, Brooks/Cole, Pacific Grove, CA, USA, p.926.

Idaho National Engineering Laboratory(Compiled and Edited by Hargman, D.L., Reymann, A.R.,) (1979) *Matro-Version II, a Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior*, NUREG/CR- 0497, EG&G Idaho, Inc., USA, p.514.

Kwon, Y.J., Kang, S.U., Choi, J.W., Kang, C.H. (2001) Structural Analysis for the Determination of Design Variables of Spent Nuclear Fuel Disposal Canister, *KSME International Journal* 15(3), pp.327~338.

Raiko, H., Salo, J.P. (1992) The Design Analysis of ACP-Canister for Nuclear Waste Disposal, *Report YJT-92-05*, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki, Finland.

Salo, J.P., Raiko, H. (1990) The Copper/Steel Canister Design for Nuclear Waste Disposal, *TVO/KPA Turvallisuus Ja Tekniikka, Work Report 90-10*, Rev. 1., Teollisuuden Voima Oy, Helsinki, Finland.

Werme, L., Eriksson, J. (1995) Copper Canister with Cast Inner Component, *Technical Report TR-95-02*, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.(SKB), Stockholm, Sweden, ISSN 0284-3757.

Werme, L. (1998) Design Premises for Canister for Spent Nuclear Fuel, *Technical Report TR-98-08*, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SKB), Stockholm, Sweden, ISSN 0284-3757, p.46.

- 논문접수일 2010년 12월 1일
- 논문심사일
 - 1차 2010년 12월 3일
 - 2차 2011년 2월 22일
- 게재확정일 2011년 2월 24일