

# 추락낙하 사고 시 지면과의 충돌충격에 의하여 다양한 고준위폐기물 처분용기모델에 발생하는 응력에 대한 유한요소해석 비교연구

권 영 주<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 기계정보공학과

## Comparative Study of Finite Element Analysis for Stresses Occurring in Various Models of the Spent Nuclear Fuel Disposal Canister due to the Accidental Drop and Impact on to the Ground

Young-Joo Kwon<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical & Design Engineering, Hongik Univ., Sejong, 30016, Korea

### Abstract

Stresses occur in the spent nuclear fuel disposal canister due to the impulsive forces incurred in the accidental drop and impact event from the transportation vehicle onto the ground during deposition in the repository. In this paper, the comparative study of finite element analysis for stresses occurring in various models of the spent nuclear fuel disposal canister due to these impulsive forces is presented as one of design processes for the structural integrity of the canister. The main content of the study is about the design of the structurally safe canister through this comparative study. The impulsive forces applied to the canister subjected to the accidental drop and impact event from the transportation vehicle onto the ground in the repository are obtained using the commercial rigid body dynamic analysis computer code, RecurDyn. Stresses and deformations occurring due to these impulsive forces are obtained using the commercial finite element analysis computer code, NISA. The study for the structurally safe canister is carried out thru comparing and reviewing these values. The study results show that stresses become larger as the wall encompassing the spent nuclear fuel bundles inside the canister becomes thicker or as the diameter of the canister becomes larger. However, the impulsive force applied to the canister also becomes larger as the canister diameter becomes larger. Nonetheless, the deformation value per unit impulsive force decreases as the canister diameter increases. Therefore, conclusively the canister is structurally safe as the diameter increases.

**Keywords** : spent nuclear fuel disposal canister, finite element analysis, structural safety design, accidental drop and impact event, impulsive force, commercial computer code

### 1. 서 론

본 논문은 처분장에서 운반 중 사고로 지면에 추락낙하 충돌하는 고준위폐기물 처분용기에 가해지는 충격력에 대하여 처분용기에 발생하는 응력을 구하는 구조해석에 관한 논문으로 구조해석용 상용 컴퓨터 유한요소해석코드를 이용한 수치

해석문제를 다루고 있다. 특히 처분용기 직경을 변화시킨 여러 가지 처분용기 모델에 대하여 구조해석을 수행하여 발생하는 응력을 비교하였다. 이를 통하여 처분장에서 발생하는 추락낙하 사고에 대하여 구조적으로 안전한 고준위폐기물 처분용기를 설계하고자 한다. 사용 후 핵연료와 같은 고준위폐기물의 관리를 위하여 가장 가능하고 안전한 해결방법으로 현재 고려되고 있는

\* Corresponding author:

Tel: +82-44-860-2484; E-mail: yjkwon@hongik.ac.kr

Received August 3 2017; Revised August 19 2017;

Accepted August 21 2017

©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기술인 심치층 처분기술(Kwon, 2010; Lee *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2010)의 핵심기술 중 하나인 사용 후 핵연료 처분용기가 한국원자력연구원이 중심이 되어 개발되었다(Lee *et al.*, 2007; Kwon *et al.*, 2001). 그러나 개발 설계된 처분용기가 실제 처분장에서 처분 시 운송차량에서의 추락낙하 같은 사고에 의해 지면과 충돌하는 경우 처분용기에 발생하는 충격력에도 견딜 수 있는지는 여전히 의문이다. 고준위폐기물 처분용기와 같은 방사성물질을 운반하는 수송용기(cask)는 운반 수송 중 안전사고가 발생하여 수송용기가 파괴되어 내부의 방사성물질이 외부로 누출되면 매우 위험하기 때문에 국내외 엄격한 안전규정(Lee<sup>a</sup> *et al.*, 2005)을 정하여 통제되고 있다. 이러한 안전규정에는 국내의 원자력법 관련 방사성물질 포장 및 운반 안전규정(과학기술부, 2001), 국제원자력기구(IAEA)의 방사성물질 포장 및 운반 안전규정(IAEA, 1996), 그리고 미국 10CFR71의 포장 및 운반 안전규정(NRC Regulatory Guide 7.6, 1978) 등이 있다. 이들 안전규정에 의하면 고준위 폐기물과 같은 방사성물질을 운반하는 수송용기(cask)는 적재 및 하역 과정에서 발생할 수 있는 사고를 가정한 정상수송조건 및 수송 중에 발생할 수 있는 사고를 가정한 가상사고조건들에 대한 시험을 실시한 후 방사성물질의 누출 없이 건전성을 유지하여야 한다. 정상수송조건은 살수시험, 1.2m 낙하시험, 적층 시험, 관통시험으로 이루어져 있고 가상사고조건은 9m 자유낙하시험, 타격시험, 열시험, 침수시험들로 이루어져 있으며 특히 사용 후 핵연료를 운반하는 고준위폐기물 처분용기인 경우에는 강화침수시험, 가관낙하시험들이 추가된다(Lee<sup>a</sup> *et al.*, 2005). 가상사고조건 중에서도 9m 자유낙하시험은 수송용기의 구조적 건전성에 가장 큰 영향을 미칠 수 있으므로 가장 중요한 시험조건이 된다. 따라서 고준위폐기물 처분용기는 처분장에서 운송 중 운송차량에서 사고로 추락낙하 하여 가장 약한 부분이 지면에 충돌하여도 그 충격에 견딜 수 있도록 안전하게 설계되어야 한다. 이를 위해서는 처분용기 모델을 설계 시험제작하여 실험을 수행해야 하지만 안전성과 비용적인 측면에서 바람직하지 않다. 그 대신 개념설계 단계에서 처분용기의 추락낙하 충돌반응에 대한 해석을 수행하여 처분용기 추락낙하 시 지면과의 충돌에 의한 처분용기 파손 가능성을 방지할 수 있도록 충분한 충격강도를 확보하는 것이 바람직하다. 이런 경우 처분용기 설계자의 주된 관심은 추락낙하 충돌 충격 시 처분용기에 가해지는 충격력에 대하여 처분용기에 발생하는 응력 및 변형이다. 왜냐하면 처분용기에 발생하는 응력에 의하여 변형이 발생하고 이 변형의 정도가 처분용기의 파손유무를 결정하기 때문이다. 따라서 처분용기에 발생하는 파손은 추락낙하 충돌 충격 시 처분용기에 가해지는 충격력이 주된 원인임이 분명하다. 물론 처분용기에 발생하는 파손은 부위에 따라 충격

력의 절대크기와 무관하게 발생할 수 있다. 처분용기의 추락낙하 충돌 충격에 대한 구조해석의 근본적인 목적은 이와 같은 충격력에도 처분용기가 파괴되지 않고 내부 방사성물질이 누출되지 않도록 처분용기가 충분한 강도를 갖도록 하는 것이다. 따라서 처분용기 내부를 포함한 모든 구성부품들이 추락낙하 충돌 충격 시 처분용기에 가해지는 충격력을 충분히 견딜 수 있도록 처분용기가 설계되어야 한다. 이와 같은 추락낙하 충돌 반응에 대한 해석은 상용 해석전용 프로그램을 이용하여 수행할 수 있다. 특히 대변형 구조해석을 수행할 수 있는 상용 유한요소해석 코드인 LS-DYNA나 ABAQUS들과 같은 고가의 프로그램을 이용하여 해석을 수행할 수도 있다(Lee<sup>b</sup> *et al.*, 2005). LS-DYNA와 같은 고가의 충돌전용 상용 유한요소(FE) 컴퓨터해석코드는 복잡한 구조를 갖는 자동차와 같은 제품개발에 대기업 등에서 주로 이용되고 있다. 그러나 본 고준위폐기물 처분용기와 같은 수송용기의 운반 중 추락낙하 문제에 이와 같은 고가의 상용 컴퓨터해석코드를 이용하는 것은 비경제적으로 사료된다. 왜냐하면, 수송용기는 자동차 등에 비하여 구조가 비교적 간단하며 특히 지면과 충돌 시 접촉부분이 한 점이거나 일직선등과 같이 단순하여 마찰의 영향을 무시할 수 있기 때문이다. 그에 비하여 자동차등의 충돌은 접촉면이 크고 두 접촉면의 상대운동이 커서 마찰의 영향이 크기 때문에 그 해석이 고가의 상용 컴퓨터해석코드를 이용하지 않고는 매우 어렵기 때문이다. 또한 본 연구의 목적인 직경이 다른 여러 처분용기모델의 구조해석 비교연구에는 단순한 추락낙하 충돌 해석 및 응력해석을 수행하면 되기 때문에 고가의 충돌전용 상용 컴퓨터해석코드를 굳이 사용할 필요가 없다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 비교적 저가인 상용 컴퓨터해석코드인 RecurDyn과 NISA를 이용하여 처분장에서 운반 중 사고로 추락낙하 하는 여러 직경의 처분용기 모델들에 대하여 기구동역학해석을 수행하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력을 구하고 이 충격력에 의하여 발생하는 응력과 변형을 구조해석을 수행하여 구하여 비교분석 연구를 수행하였다. 본 논문에서 수행한 처분장에서 운반 중 운송차량에서 사고로 추락낙하 하는 처분용기가 지면과 충돌하여 발생하는 충격력을 구하는 기구동역학해석 및 이 충격력에 의하여 처분용기에 발생하는 응력 및 변형을 구하는 구조해석은 이미 수행한 기존의 연구들(Kwon, 2011; Kwon, 2013)과 유사하다. 따라서 본 논문에서는 기 수행논문들과 유사한 내용은 생략하고 본 논문에서 꼭 필요한 부분만 기술하였다. 그러나 구조해석은 기 수행 구조해석(Kwon, 2011)에서 수행했던 비선형구조해석 수행 대신에 선형구조해석을 수행하였다. 왜냐하면 적용하는 외력이 최대충격력이 아닌 비교적 작은 충격량이고 직경이 다른 여러 처분용기에 발생하는 응력의 비교연구를 위해서는 굳이 어려운

비선형구조해석을 수행하지 않고 선형구조해석 만으로도 충분 (Kwon, 2001)하다고 사료되기 때문이다.

2. 추락낙하 충돌사고에 대한 기구동역학 해석

2.1 기구동역학해석 문제의 구성

비록 처분용기가 기술적으로 가볍게 설계되어 있다 하더라도 실제 설계된 처분용기(Fig. 1)는 직경(D)이 제일 작은 102cm 라 하더라도 중량이 26.58ton으로 매우 무거워서(Table 1 참조) 다루는 것이 어렵다. 따라서 내부에 밀봉된 위험한 방사능물질이 노출되지 않도록 처분장에서 특수하게 제작된 전용 운송차량을 이용하여 조심스럽게 운송되어야 한다. 직경이 여러 가지로 변하는 처분용기에 대하여 처분장에서 사고로 추락 낙하 하는 경우들을 구하여 비교분석연구를 수행하기 위해서는 먼저 응력 및 변형을 구하는 구조해석에 필요한 추락낙하 시 처분용기에 가해지는 충격력을 구해야 한다. 이를 위해서 본 절에서는 기구동역학해석 상용 컴퓨터코드인 RecurDyn을 이용한다. 해석 대상인 가압경수로(PWR)용 처분용기모델의 구조형상과 제원은 Fig. 1에 표시된 바와 같다. Fig. 1에 보는 바와 같이 설계된 처분용기는 원통형으로 내부에 정사각형 단면형상의 고준위폐기물 다발 4개가 원형인 처분용기 중심에 대하여 대칭되게 나란히 배열되어 있고 이들을 주철로 된 내부 삽입물이 감싸 보호하고 있으며 이 내부 삽입물을 두께 5cm인 구리로 된 외곽셀이 덮고 있다. 특히 상부는 역시 그림에 보인 형상의

Table 1 Computed volume and mass of canisters for various canister diameters

Diameter(cm)	Volume(m <sup>3</sup> )	Mass(kg)	Density(kg/m <sup>3</sup> )
102	3.9169	26,581	6,786.3
107	4.3098	29,765	6,906.4
112	4.7215	33,100	7,010.5
117	5.1519	36,585	7,101.3
122	5.6011	40,221	7,180.9

구리로 된 두께 5cm인 덮개홀더가 붙어 있다. 주요제원은 Fig. 1에 표시된 바와 같이 고정시키고 단지 처분용기 단면의 직경(D)만 변화시키면서 이에 따른 여러 가지 처분용기 모델에 대하여 해석을 수행하고자 한다. 직경은 5cm씩 증가시킨 102cm, 107cm, 112cm, 117cm, 122cm의 다섯 가지 모델이며 이에 따라 내부주철삽입물의 직경도 92cm, 97cm, 102cm, 107cm, 112cm로 증가된다. 그러나 고준위폐기물 다발의 간격은 일정(13cm)하게 나란히 유지시키고 외곽셀의 두께도 5cm로 일정하게 유지시킨다. 직경의 변화에 따라 처분용기의 체적 및 질량은 변화하는데 이를 계산하면 Table 1과 같다. Table 1에 나타난 바와 같이 처분용기 직경이 증가함에 따라 처분용기의 무게도 증가하는데 본 연구에서는 이와 같이 무게가 변화하는 다섯 개의 처분용기 모델에 대하여 처분장에서 운송 차량에 실려 운반 중 사고로 추락낙하 하는 경우 지면과 충돌 시 처분용기에 발생하는 충격력을 수치적으로 계산하여 직경의 변화에 따른 변화를 비교분석한다. 처분장에서 운송차량으로 처분용기를 운송 시 추락낙하 사고로 처분용기가 지면과 충돌하여 처분용기가 받는 충격력을 구하는 문제를 RecurDyn과 같은 상용 컴퓨터해석코드로 기구동역학해석을 수행하기 위해서는 처분용기, 운송차량, 지면 등을 문제에 적합하게 모델링을 하여야 한다. 이에 대해서는 이미 기 수행한 연구(Kwon, 2013)에서 자세히 다루었기 때문에 여기에서는 본 논문과 관련된 부분만 다시 기술한다. Fig. 1의 처분용기를 지상이나 지하처분장에서 운반차량으로 운반 시 처분용기가 추락낙하

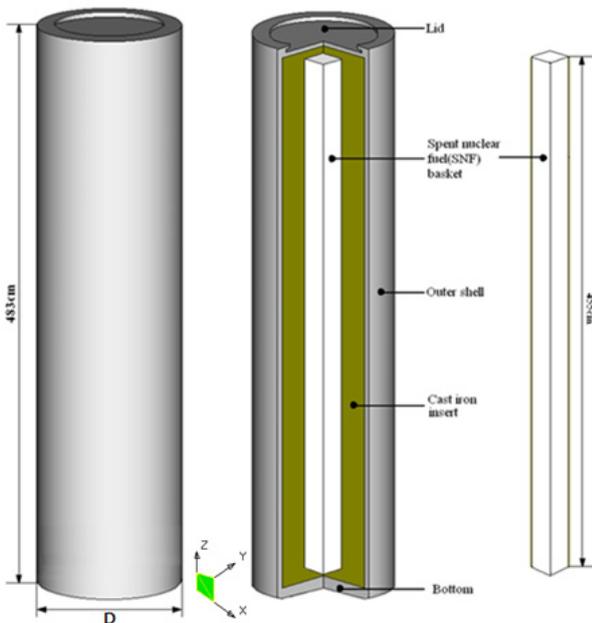


Fig. 1 Korean spent nuclear fuel(SNF) Disposal Canister(KDC) and coordinate system

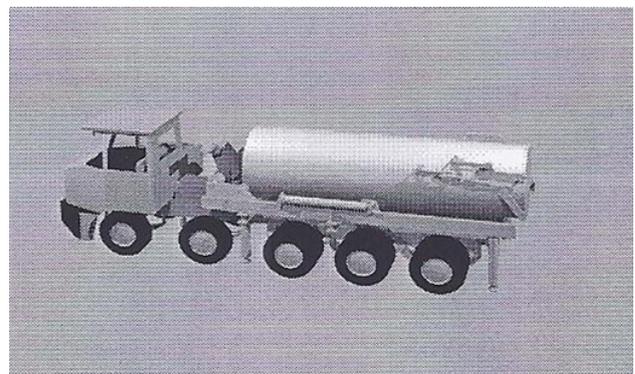


Fig. 2 Repository transportation vehicle for a SNF disposal canister

하는 경우는 운송 중 차량에서 직접 추락낙하 하는 경우와 운송 차량에서 처분용기를 들어 내리거나 올리는 작업 중에 추락 낙하 하는 경우를 고려할 수 있다. 실제 운송차량(Fig. 2)의 높이는 2~3m 정도로 추정 되므로 운송 중 운송차량에서 추락 낙하 하는 경우는 처분용기가 지상 2~3m 높이에서 자유낙하 하는 경우로 생각될 수 있으며 운송차량에서 처분용기를 들어 내리거나 올리는 작업 시 추락 낙하하는 경우는 이보다 더 높은 지상 4~5m에서 자유낙하 하는 경우로 생각될 수 있다. 실제로 국제원자력기구(IAEA)에서 요구하는 기준은 지상 9m에서 자유낙하 시의 안전을 요구하고 있다. 그러나 이는 정지 상태에서의 추락 낙하하는 경우이고 실제로 움직이는 운송차량의 높이 9m는 실제로는 불가능하고 이보다 더 낮은 높이에서 추락 낙하 한다고 봄이 타당하다. 따라서 처분용기의 안전 설계를 고려하는 경우 가장 안정적으로 처분용기를 설계해야 되기 때문에 가장 높은 높이인 지상 5m 높이에서 낙하하는 처분용기의 추락낙하 사고를 고려하는 것이 타당하다고 여겨진다. 실제로 적재높이 5m의 운송차량은 실제로는 존재할 수 없지만 컴퓨터 시뮬레이션인 경우 가능하다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 운송차량의 사실감을 살리고 처분용기의 보다 안정적인 안전설계를 위하여 운송차량을 실제의 높이인 2~3m 보다 더 높은 5m 높이의 차량으로 가정하고 이 5m 높이의 차량위에서 처분용기가 운송 중 추락낙하 하는 사고로 가정한다. 이를 위하여 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 모델링한 5m 높이의 운송 차량 위에 처분용기가 위 덮개 부분이 차량 앞쪽(운송차량 진행 방향)으로 놓여있는 상태에서 추락낙하 한다고 가정하여 기구동역학해석을 수행한다. Fig. 3에 보인바와 RecurDyn을 이용하여 운송차량을 모델링하였다. 운송차량은 네 개의 바퀴와

한 개의 몸체로 구성되어 있으며 네 개의 바퀴와 몸체사이의 연결은 리볼류트 조인트(revolute joint)로 모델링되어 있다. 운송차량 모델링 시 운송차량에 실려 있는 처분용기도 동시에 모델링하였다. 또한 운송차량이 이동할 도로(road)도 동시에 모델링하였다. 도로는 기저물체인 지면(ground)에 고정조인트(fixed joint)로 고정부착 되도록 모델링하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 처분용기, 운송차량 등의 구조형상을 모델링 하는 것도 중요하지만은 정확한 실제 상황과 근접한 기구동역학 해석을 수행하기 위해서는 운송차량 운행 중 처분용기가 운송차량 위에서 움직여서 지면으로 추락 낙하 시 발생하는 각 부분들의 접촉상태의 모델링도 매우 중요하다. 본 해석에서는 모두 세 개의 접촉이 발생한다. 첫 번째 접촉은 처분용기가 운송 차량위에서 움직일 때 발생하는 처분용기와 운송차량 표면과의 접촉, 두 번째는 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌할 때 처분용기와 지면과의 접촉, 마지막 세 번째는 차량 바퀴와 지면과의 접촉이다. RecurDyn과 같은 컴퓨터 수치해석 코드를 이용하여 기구동역학 해석을 수행하기 위해서는 위에서 언급한 각 접촉을 정의할 때 각 접촉상태를 특징짓는 상수들을 입력 하여야 한다. 이들 상수들은 각 접촉상태에 따라 또 처분용기의 모델에 따라 다른 값을 갖는다. 왜냐하면 접촉 상태는 접촉하는 물체의 종류, 접촉면의 상태, 기타 여러 외부 상황에 따라 변하기 때문이다. 본 논문에서는 처분용기가 운송차량에서 추락낙하 하여 지면과의 충돌 시 처분용기에 발생하는 충격력을 정확하게 구할 수 있도록 가능하면 실제 상황과 유사한 경우를 가정하였다. 이에 대한 상세한 내용은 기 수행한 연구(Kwon, 2013)에서 기술하였으므로 여기서는 생략한다. 그 다음으로 중요한 입력 데이터는 운송차량과 운송차량 위에서 처분용기의 초기 속도이다. 왜냐하면 운송차량의 초기속도는 처분장에서 운송 차량의 운행을 충분히 반영해야 하고 운송차량위에서 처분용기는 마찰을 이기고 움직이기에 충분한 초기속도를 가져야 소기의 신빙성 있는 추락낙하 시뮬레이션을 얻을 수 있기 때문이다. 더 중요한 이유는 IAEA에서 요구하는 정지 상태에서의 9m 자유낙하와 동일한 조건을 충족시키기 위해서는 처분용기가 운송차량에서 추락낙하 할 시 일정속도를 유지해야 하기 때문이다. 역시 이에 대한 상세한 내용도 기 수행된 연구(Kwon, 2013)에서 기술되었으므로 이도 역시 생략한다.

## 2.2 기구동역학해석 및 결과

앞 절에서 정의한 모델링을 이용하여 여러 입력 데이터 (바퀴와 지면과의 마찰계수, 처분용기와 지면과의 마찰계수, 초기속도)들에 대하여 기구동역학 전용 컴퓨터해석 코드인 RecurDyn을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 자세한 해석

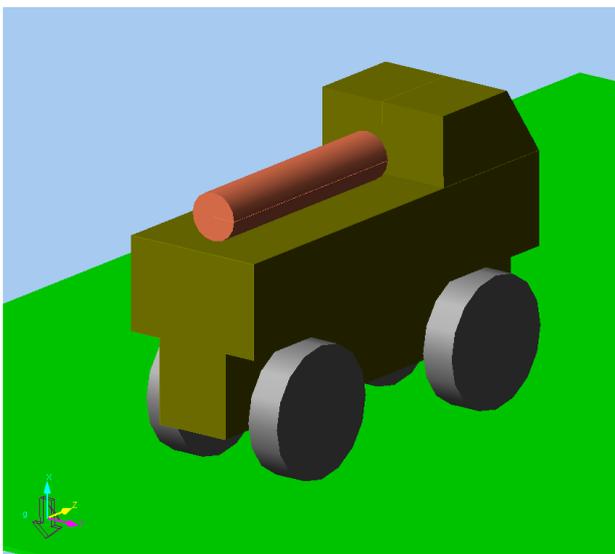
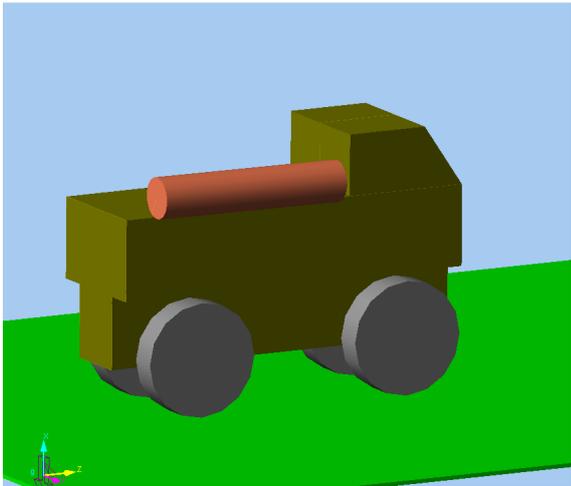
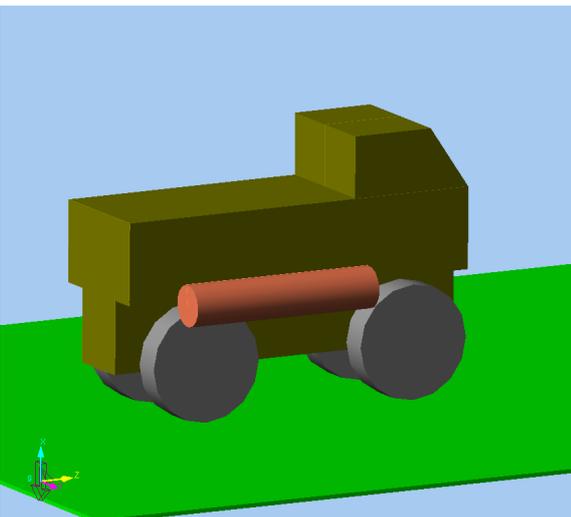


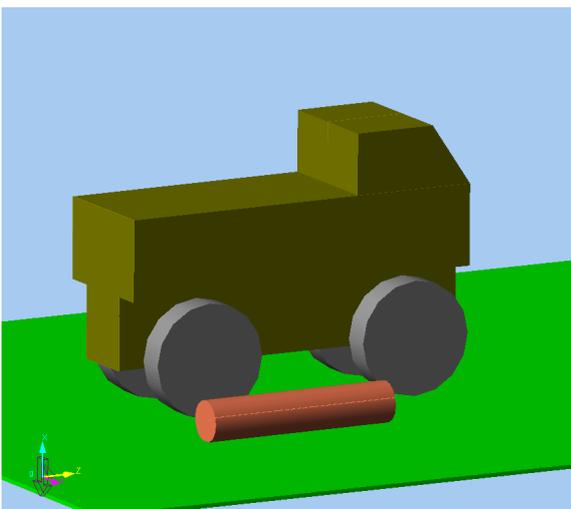
Fig. 3 Canister, transportation vehicle, and road modelling using RecurDyn



(a) Beginning state of drop impact event



(b) Middle state of drop impact event



(c) Collision state onto the ground

Fig. 4 Process of drop and impact event of the spent nuclear fuel disposal canister

방법 및 과정은 기수행한 논문(Kwon, 2013)에 기술되어 있기 때문에 본 논문에서는 생략하고 계산 결과만을 기술한다. Recur Dyn을 이용하여 기구동역학 수치해석을 수행하는 경우 운송 차량에서 사고로 고준위폐기물 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 다양한 경우를 가정하여 수치해석을 수행하는 것이 가능하다. 이 경우 운반차량의 속도, 마찰계수등과 같은 여러 변수들이 수치해석결과에 영향을 미칠 수 있다. 기수행연구(Kwon, 2013)와 마찬가지로 본 연구에서도 처분장에서 운송 중 운송차량에서 추락낙하 하는 처분용기에 대한 기구동역학해석 결과 추락낙하는 처분용기와 차량탑재면/지면, 차량바퀴와 지면 사이의 접촉 마찰 및 처분용기/운송차량의 초기속도 등에 매우 민감하며 이들 값들에 따라 세가지 유형으로 추락낙하 하여 지면과 충돌함을 알 수 있었다. 처분용기가 운송 차량에서 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 과정은 Fig. 4에 나타나 있다. 그림에는 나타나 있지 않지만 처분용기는 추락낙하 하여 지면과 1차 충돌 직후에 충돌 점을 기준으로 회전 관성이 생기게 되고 이로 인하여 불안정해져서 지면에 다시 충돌하는 2차 충돌이 발생하는 것을 알 수 있다. 기수행한 연구(Kwon, 2013)와 마찬가지로 처분용기 직경의 증가에 따른 충돌에 의한 충격량을 비교하면 대체로 직경이 커짐에 따라서 충격량도 증가함을 알 수 있었다(Table 2). 역시 기수행한 연구에서 언급한 세 번째 충돌유형(drop type 3)인 경우 발생하는 충격량은 첫 번째(drop type 1)와 두 번째 충돌유형(drop type 3)에서 보다 집중적으로 크게 발생함을 알 수 있다. 기수행연구에서 검토된 대로 짧은 순간 동적으로 작용하는 최대 충돌 충격력은 실제 구조해석 시 외력으로 사용하는 것은 타당하지 않다고 사료된다. 실제로 처분용기에 가해지는 외력은 짧은 충돌시간 중 처분용기에 가해지는 실제 순수 힘의 크기인 충격량(impulse)이라고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이 충격량을 가지고 구조해석을 수행한다. 본 기구동역학해석을 통하여 계산한 충격량(impulse)이 Table 2에 나타나 있다. 표에서  $x, y, z$ 는 Fig. 1에 정의된 직각좌표에 대한 각 물리량의 성분들이다. 처분용기의 추락낙하 충돌에 의하여 발생하는 충격력에 대한 응력해석을 수행하려면 기준좌표에 대한 충격력( $F$ )의 성분( $F_x, F_y, F_z$ )들과 충격력이 작용하는 충돌점(impact point)의 위치( $r = xi + yj + zk$ )을 알아야 한다. Table 2의 값들은 바로 이들에 대한 수치값들을 나타낸다. 이들 값들을 이용하여 응력 및 변형을 구하는 구조해석을 수행할 수 있다. Table 2의 세 번째 충돌유형에서 관찰되지 않는 것(not observed)의 의미는 더 많은 컴퓨터 모의시험을 하면 관찰될 수도 있지만 본 연구에서 수행한 모의시험에서는 관찰되지 않았음을 뜻한다.

**Table 2** Computed impulsive force(impulse) and impact point

Diameter (cm)	Variable	Component	Drop type 1		Drop type 2		Drop type 3
			First impact	Second impact	First impact	Second impact	
102	Impulsive force(F) (MN)	$F_x$	0.1463	0.31645	0.15119	0.26502	0.519056
		$F_y$	0.01275	0.002861	0.02741	-0.0000728	0.199635
		$F_z$	-0.00970	0.013306	0.02163	-0.0200963	-0.000129
	Impact point(r) (m)	$x$	-0.50987	-0.50362	-0.50194	-0.50643	-0.4755619
		$y$	-0.00946	0.0782985	-0.09031	-0.05887	-0.1842301
		$z$	4.83	0.0	0.0	4.83	2.39
107	Impulsive force(F) (MN)	$F_x$	0.162746	0.3325736	0.17086156	0.2925279	not observed
		$F_y$	-0.034893	-0.1095637	-0.00448607	-0.0606428	not observed
		$F_z$	-0.0094222	0.01247108	0.02270879	-0.0209757	not observed
	Impact point(r) (m)	$x$	-0.53104	-0.47424	-0.53478	-0.53265	not observed
		$y$	0.06448	0.24702	0.01537	0.04864	not observed
		$z$	4.83	0.0	0.0	4.83	not observed
112	Impulsive force(F) (MN)	$F_x$	0.183725	0.3223253	0.2200159	0.2691721	not observed
		$F_y$	0.056017	0.0422944	0.0402399	-0.0796084	not observed
		$F_z$	-0.024982	0.0229219	0.0807869	-0.0629704	not observed
	Impact point(r) (m)	$x$	-0.53599	-0.54610	-0.55083	-0.5369	not observed
		$y$	-0.16222	-0.12362	-0.10092	0.15918	not observed
		$z$	4.83	0.0	0.0	4.83	not observed
117	Impulsive force(F) (MN)	$F_x$	0.1534399	0.3223198	0.1755777	0.3399765	0.5915589
		$F_y$	0.1310183	0.2240077	0.1269978	0.1953176	0.3836330
		$F_z$	-0.0134421	0.0149430	0.01870432	-0.0209348	0.0039131
	Impact point(r) (m)	$x$	-0.41997	-0.52007	-0.48252	-0.46761	-0.46846
		$y$	-0.40721	-0.26751	-0.33075	-0.35127	-0.35028
		$z$	4.83	0.0	0.0	4.83	2.39
122	Impulsive force(F) (MN)	$F_x$	0.1465773	0.3229589	0.1536302	0.2835814	0.7091882
		$F_y$	0.1754746	0.3317943	0.2152337	0.2028065	0.4797525
		$F_z$	-0.0106216	0.0124514	0.0750677	-0.0583142	0.0151379
	Impact point(r) (m)	$x$	-0.3489	-0.47933	-0.35204	-0.49606	-0.5507
		$y$	-0.50031	-0.37703	-0.49816	-0.355	-0.26191
		$z$	4.83	0.0	0.0	4.83	2.39

### 3. 추락낙하 충격력에 대한 처분용기의 구조해석

#### 3.1 구조해석 문제의 구성

처분용기를 운송차량으로 처분장에 운송하여 처분공(bore-hole)에 처분하기까지의 운반과정 중에 안전사고가 발생하여 처분용기가 지면에 추락낙하 하는 경우가 발생할 수 있다. 이 경우 처분용기가 구조적으로 안전하지 못하면 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기가 파손되고 처분용기 내의 고준위폐기물이 유출되어 방사능유출 사고가 발생할 수 있다. 따라서 처분용기 설계 시에 이를 고려하여 처분용기 강도를 충분히 확보하여야 한다. 이를 위하여 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력에 대하여 처분용기에 발생하는 내부응력과 구조변형을 계산하여야 한다. 만약에 이 때 발생한 내부응력의 최대값이 처분용기를 구성

하는 재질(주철과 구리)의 항복 응력 값을 초과하면 처분용기는 구조적으로 안전하지 못하여 파손될 수 있다. 따라서 본 절에서는 RecurDyn을 이용하여 앞 절에서 구한 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌시 처분용기에 가해지는 충격력(Table 2참조)에 대하여 상용 컴퓨터구조해석 프로그램인 NISA를 이용하여 구조해석을 수행하여 처분용기에 발생하는 구조변형과 내부응력을 구한다. 이를 통하여 처분용기가 지면과 충돌 시에 처분용기의 구조적 건전성을 평가할 수 있다. 기 수행한 연구(Kwon, 2011)에 의하면 처분용기에 만약에 처분용기가 운송 중 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력의 최대값이 정적으로 가해지면 직경이 102cm로 설계된 Fig. 1의 처분용기에 대변형이 발생하여 직경이 102cm로 설계된 처분용기(KDC)는 구조적으로 건전하지 않음을 알 수 있었다. 그러나 기 수행논문에서 검토했듯이 추락낙하 시 가해지는 최대 충격력은 정적으로 계속하여 처분용기에 가해지는 것이 아니고

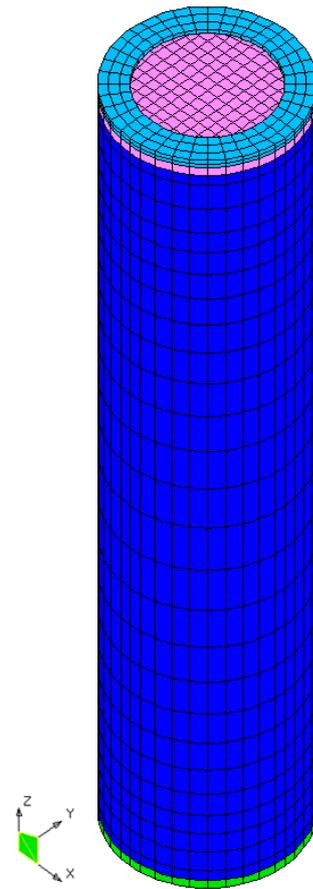
**Table 3** Material property values of composing parts of the SNF disposal canister

Material	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 $\nu$	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 $\sigma_y$ (MPa)	200	64	-
Tensile strength $\sigma_u$ (MPa)	1,400	200	-
Thermal conductivity $k$ (W/m $^{\circ}\text{C}$ )	52	386	0.135
Specific heat $C$ (J/kg $^{\circ}\text{C}$ )	504	383	2,640

매우 동적으로 아주 짧은 순간에 처분용기에 가해지기 때문에 실제로는 충돌시간 중 가해지는 총 충격력의 크기인 충격량 (impulse)이 처분용기에 가해진다고 보기 때문에 이 충격량에 대하여 구조해석을 수행함이 좀 더 타당하다고 사료된다. 또한 최대충격력에 구조적으로 취약한 기 설계된 직경 102cm의 처분용기 대신에 좀 더 구조적으로 건전한 처분용기를 설계하기 위하여 앞 절에서 언급했듯이 처분용기 직경을 5cm 씩 증가시킨 여러 가지 처분용기 모델에 대하여 구조해석을 수행하여 비교하고자 한다. 이를 위하여 5cm씩 직경을 증가시킨 다섯 가지 모델에 Table 2의 충격량을 각각 적용시켜 구조해석을 수행한다. 구조해석은 선형구조해석을 수행한다. 구조해석을 수행하기 위해서는 처분용기를 구성하는 구성 물질들에 대한 물질상수 값들이 필요한데 Table 3에 본 연구의 해석에 필요한 물질상수들의 수치 값들을 나타내었다.

### 3.2 유한요소 수치해석

상용 유한요소해석 코드인 NISA를 이용하여 유한요소모델링과 해석을 수행한다. Fig. 1의 처분용기를 NISA를 이용하여 구조형상 및 유한요소모델링을 한다. 구조형상의 대칭성을 이용하여 모델링한다(Fig. 5참조). 같은 방법으로 처분용기의 직경을 5cm씩 증가시킨 나머지 처분용기 모델들에 대해서도



**Fig. 5** Finite element model of PWR spent nuclear fuel disposal canister(D=102cm)

**Table 4** Number of elements and nodes for F.E. models

Diameter (cm)	102	107	112	117	122
Number of elements	5944	8008	8008	9288	9288
Number of nodes	28249	37913	37913	43153	43153

모델링을 한다. 구조물의 대칭성을 이용하여 유한요소 모델링을 수행했지만 해석은 전체 유한요소 모델을 이용하여 수행한다. 왜냐하면 작용하는 외력은 대칭이 아니기 때문이다. 해석에 사용된 가압경수로(PWR)용 처분용기 유한요소모델들의 유한요소(element)의 수와 절점(node)의 수는 Table 4에 표시하였다. 충격력은 충돌 점(impact point) 한 점에 집중되는 집중하중으로 작용시킨다(Fig. 6참조). 선형구조해석 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

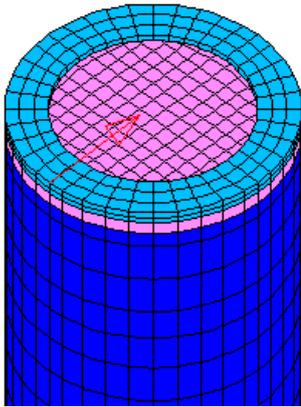


Fig. 6 Impact force applied to the canister at the collision impact point (arrow is the impact force) (D=102cm, drop type 1, first impact)

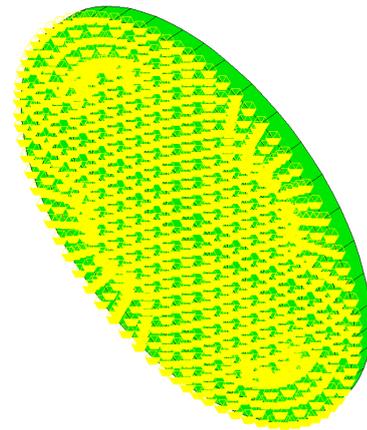


Fig. 7 Constrained boundary condition ( $u_x = u_y = u_z = 0$ ) on the bottom surface ( $z=0$ ) of the canister (D=102cm, drop type 1, first impact)

Table 5 Computed maximum von Mises stress and deformation occurring in the SNF disposal canister due to the impulsive forces incurred in the event of the accidental drop impact

Diameter (cm)	Variables	Parts	Drop type 1		Drop type 2		Drop type 3
			First impact	Second impact	First impact	Second impact	
102	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	750.6	873.4	441.0	1338.0	43.72
		Cast iron insert	8.037	47.98	23.92	14.03	43.72
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.218	2.586	1.236	2.195	0.1601
		Cast iron insert	0.9805	2.238	1.069	1.769	0.9344
107	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	813.4	929.7	606.1	1676.0	-
		Cast iron insert	9.504	33.65	15.85	17.05	-
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.188	2.454	1.199	2.133	-
		Cast iron insert	0.9219	2.069	0.9930	1.652	-
112	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	841.5	411.3	259.9	1124.0	-
		Cast iron insert	10.63	27.75	18.27	15.17	-
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.137	1.797	1.157	1.609	-
		Cast iron insert	0.8591	1.573	1.027	1.235	-
117	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	811.6	968.7	512.7	1589.0	118.8
		Cast iron insert	11.93	38.9	21.17	23.67	37.26
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.041	2.008	1.092	2.023	0.1994
		Cast iron insert	0.7585	1.602	0.8762	1.478	0.1071
122	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	891.2	1143.0	552.2	1292.0	143.5
		Cast iron insert	13.75	44.83	25.81	20.85	45.95
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.038	2.058	1.094	1.522	0.2257
		Cast iron insert	0.7243	1.603	0.8706	1.079	0.1125

\* -: not observed

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 구조해석 문제는 대칭문제가 아니기 때문에 지면과의 충돌에 의하여 충격력이 가해지는 곳에서 제일 먼 곳(추락낙하 유형 1인 경우 아래면 부분)이 지점으로 사료된다. 따라서 이곳에 강제운동을 구속하는 경계조건을 가해준다. 예를 들어 추락낙하 유형 1 문제에서는 처분용기 맨 하단 면의 변위를 모두 구속한다. 즉 처분용기의 맨 밑면의 모든 변위를 0으로 구속한다(즉,  $u_x = u_y = u_z = 0$  at  $z=0$ )(Fig. 7참조).

### 3.2 해석결과 및 검토

처분용기에 대한 선형구조 해석결과 처분용기의 각 부분에 발생하는 최대 폰 미세스 등가응력(von Mises equivalent stress) 및 변형 값들을 Table 5 및 Fig. 8~9에 나타내었다. 해석결과를 검토하면 처분용기가 추락낙하 시 지면과 충돌하는 윗 덮개홀더(lid holder)(추락낙하 유형 1) 혹은 아래 덮개(bottom)(추락낙하 유형 2)에 약간 큰 응력이 발생함을 알 수 있다. 그러나 내부주철 삽입물에는 매우 미소한 응력이 발생함을 알 수 있다. 변형은 구조물 전체에 걸쳐서 매우 작은 변형이 발생하며 특히 내부주철삽입물에는 아주 미소한 변형이 발생함을 알 수 있다. 이는 충돌 시 최대 충격력을 적용하여 구조해석을 수행한 기존의 연구(Kwon, 2011)와는 아주 대조적인 결과를 보여주고 있다. 처분용기 직경의 변화에 따른 응력 및 변형 값들을 비교 분석하면 처분용기직경이 커져서 처분용기가 무거워 질수록 처분용기에 발생하는 응력은 정도의 차이는 있지만 직경이 커질수록 증가함을 알 수 있다. 그러나 가해지는 단위 충격력당 변형값들은 오히려 직경이 커질수록 작아지는데(Table 6참조) 이는 직경 커질수록 구조물은 구조적으로 건전함을 알 수 있다. 이는 이미 앞절에서 언급했듯이 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 적용되는 충격력은 매우 짧은 시간 동안 아주 동적으로 적용되기 때문에 실제로 처분용기에 가해지는 충격력은 짧은 충돌시간 동안 가해지는 총 충격력인 충격량이기 때문이라고 사료된다. 이 충격량은 최대충격력 보다 훨씬 작다. 처분용기 내부의 내부주철삽입물 기준으로는 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 첫 번째

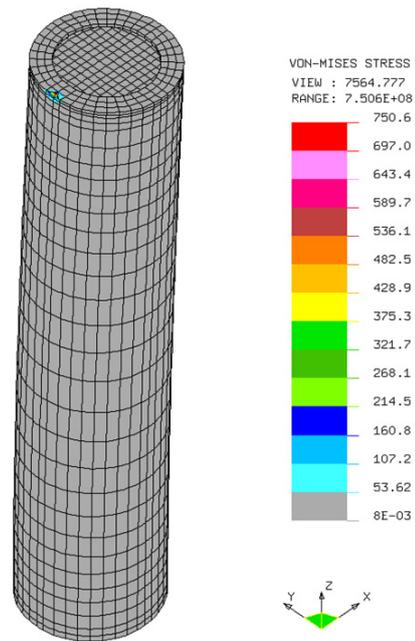


Fig. 8 von Mises stress contour occurring in the canister for the impulsive force(impulse) (whole structure, unit: MPa) (D=102cm, drop type 1, first impact)

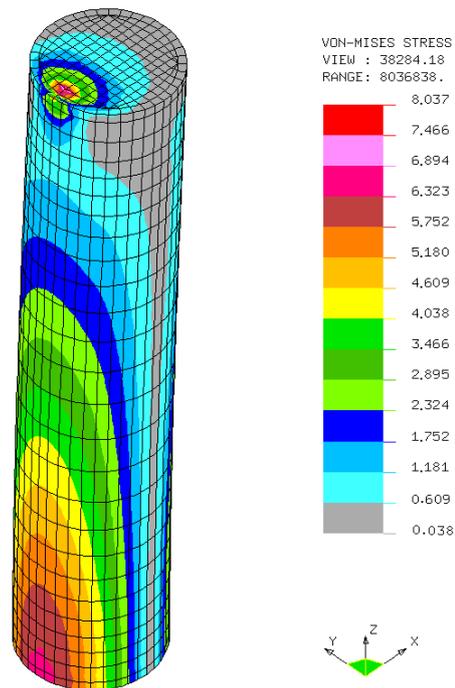


Fig. 9 von Mises stress contour occurring in the canister for the impulsive force(impulse) (cast iron insert, unit: MPa) (D=102cm, drop type 1, first impact)

충돌 시 처분용기에 발생하는 단위 충격량 당 변형은 직경이 커짐에 따라 감소한다. 따라서 처분용기는 직경이 커짐에 따라서 구조적으로 더욱 건전해지는 것으로 판단된다. 그러나 직경이

**Table 6** Ratios of von Mises stress and deformation per unit impulsive force(drop type 1, first impact)

Dia-meter (cm)	Variables	Parts	Computed value	Ratio per unit impulsive force ( $\times 10^{-5}$ )	Applied impulsive force ( $\times 10^5$ N)
102	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	750.6	510.0	1.471763
		Cast iron insert	<b>8.037</b>	5.46	
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.218	0.8276	
		Cast iron insert	0.9805	<b>0.6662</b>	
107	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	813.4	487.9	1.667111
		Cast iron insert	<b>9.504</b>	5.70	
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.188	0.7126	
		Cast iron insert	0.9219	<b>0.5530</b>	
112	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	841.5	434.5	1.936928
		Cast iron insert	<b>10.63</b>	5.4881	
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.137	0.5870	
		Cast iron insert	0.8591	<b>0.4435</b>	
117	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	811.6	401.4	2.022135
		Cast iron insert	<b>11.93</b>	5.90	
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.041	0.1764	
		Cast iron insert	0.7585	<b>0.3751</b>	
122	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	891.2	389.3	2.288865
		Cast iron insert	<b>13.75</b>	6.01	
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.038	0.4534	
		Cast iron insert	0.7243	<b>0.3164</b>	

커지면 무게가 무거워져 다루기가 쉽지 않고 또 제작 시 단가가 비싸지기 때문에 구조적 건전성을 위하여 무조건 직경을 크게 하는 것은 바람직하지 않다고 사료된다. 본 연구 결과에 의하면 직경이 102cm인 처분용기의 내부주철 삽입물에 발생하는 응력과 변형이 충분히 작으므로 직경을 크게 하였을 때 중량의 증가를 고려하면 직경이 102cm인 처분용기가 적절하다고 사료된다. 그러나 외곽셀에는 많은 응력이 발생하고 있으므로 좀더 정밀한 해석을 위해서는 추가로 비선형 구조해석을 수행하여 확인할 필요가 있다고 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 직경이 102cm로부터 5cm씩 증가 시켜 직경이 102cm, 107cm, 112cm, 117cm, 122cm인 가압경수로 (PWR)용 처분용기들에 대하여 처분장으로의 운송 중에 또 처분공에 처분 시 발생할 수 있는 안전사고인 추락낙하 사고에 대하여 처분용기의 구조적 건전성 비교 평가를 수행하였다. 이를 위하여 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시에 처분용기가 받는 충격력을 구하기 위한 기구동역학해석을 RecurDyn이라는 CAE 시스템을 이용하여 구하였으며. 이와 같은 기구동역학 해석을 통하여 구한 충격력을 이용하여 역시 유한요소해석 CAE 시스템인 NISA를 가지고 처분용기에 대한 구조해석을 수행하여 처분용기 내에 발생하는 응력 및 변형의 크기를 구하였다. 이를 바탕으로 처분용기가 처분장에서 안전사고로 추락 낙하 하는 경우 처분용기의 구조적 건전성에 대한 비교 평가를 수행하였다. 처분용기를 강체(rigid body)로 가정하고 기구동역학 해석을 수행한 결과 처분용기는 지면과 첫 번째 충돌 후에 곧바로 두 번째 충돌함을 알 수 있었고 첫 번째 충돌 시 지면으로부터 받는 충격력보다 두 번째 충돌 시의 충격력이 더 큰 것을 알 수 있었다. 또한 세 가지 유형으로 추락낙하 충돌함을 확인 하였다. 각 경우 구조해석을 수행하였으며 해석 결과 처분용기의 내부 주철삽입물에 본 연구에서 채택한 주철의 항복응력 값 (200MPa)보다 매우 작은 응력이 발생하여 해석 대상 처분용기들은 모두 구조적으로 건전함이 확인되었다. 그러나 처분용기의 직경이 커짐에 따라서 내부주철 삽입물에 발생하는 응력의 크기는 증가하는데 비하여 충돌 시 처분용기에 가해지는 단위 충격력 당 발생하는 변형크기는 오히려 작아져서 처분용기는 직경이 커짐에 따라서 구조적으로 건전함을 알 수 있었다. 그러나 직경이 커지면 처분용기의 무게가 커져 취급하기 어렵고 제작단가가 비싸지는 단점이 있다. 따라서 처분용기의 직경을 구조적인 건전성 때문에 너무 크게 설계하는 것은 바람직하지 않다고 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2017학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

#### References

IAEA(International Atomic Energy Agency)  
 (1996) IAEA Safety Standards Series No. ST-1,  
 Regulations for the Safe Transport of Radioactive

- Materials, Vienna, Austria.
- Kwo, Y.J., Kang, S.W., Choi, J.W., Kang, C.H.** (2001) Structural Analysis for the Determination of Design Variables of Spent Nuclear Fuel Disposal Canister, *KSME Int. J.*, 15(3), pp.327~338.
- Kwon, Y.J.** (2010) Finite Element Analysis of Transient Heat Transfer in and Around a Deep Geological Repository for a Spent Nuclear Fuel Disposal Canister and the Heat Generation of the Spent Nuclear Fuel, *Nucl. Sci. & Eng.*, 164, pp.264~296.
- Kwon, Y.J.** (2011) Structural Analysis of PWR (pressurized water reactor) Canister for Applied Impact Force Occurring at the Moment of Falling Plumb Down Collision, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(2), pp.211~222.
- Kwon, Y.J.** (2013) Rigid Body Dynamic Analysis on the Spent Nuclear Fuel Disposal Canister under Accidental Drop and Impact to the Ground: Numerical Analysis, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 26(5), pp.373~384.
- Lee, J.Y., Cho, D.K., Choi, H.J., Choi, J.W.** (2007) Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuel, *J. Nucl. Sci. & Tech.*, 44(12), pp.1565~1573.
- Lee,<sup>a</sup> Y.S., Kim, Y.J., Choi, Y.J., Kim, W.T.** (2005) A Study on the Dynamic Impact Response Analysis of Cask by Modal Superposition Method, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 18(4), pp.373~383.
- Lee,<sup>b</sup> Y.S., Ryu, C.H., Kim, H.S., Choi, Y.J.** (2005) A Study on the Free Drop Impact of a Cask using Commercial FEA Codes, *Nucl. Eng. & Desig.*, 235, pp.2219~2226.
- MOST** (2001) Regulations on Shipping and Transportation of the Radioactive Materials.
- NRC Regulatory Guide 7.6** (1978) Design Criteria for the Structural Analysis of Shipping Cask Containment Vessels, USNRC.
- Zhou, W., Apted, M.J., Kessler, J.H.** (2010) The Thermal-hydrological Impact on Increased Spent Fuel Storage Capacity in Yucca Mountain Repository, *Nucl. Tech.*, 170, pp.336~352.

## 요 지

고준위폐기물 처분용기를 처분장에서 처분 시 사고로 운송차량에서 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 경우 처분용기에 가해지는 충격력에 의해 처분용기에 응력이 발생한다. 본 논문에서는 고준위폐기물 처분용기의 구조안전성 설계과정의 일환으로 이와 같은 충격력에 의하여 여러 가지 처분용기 모델에 발생하는 응력에 대한 비교연구를 수행하였다. 연구의 주된 내용은 이와 같은 비교연구를 통하여 구조적으로 건전한 처분용기의 설계에 관한 것이다. 처분장에서 운반차량으로 처분용기 운반 중 사고로 추락낙하 하여 지면과의 충돌 시에 처분용기에 가해지는 충격력은 기구동역학해석 상용 컴퓨터코드인 RecurDyn으로 구하였다. 이렇게 구한 충격력에 의하여 여러 가지 처분용기 모델에 발생하는 응력 및 변형은 유한요소해석 상용 컴퓨터코드인 NISA를 이용하여 구하였다. 이 응력과 변형 값들의 비교 검토를 통하여 구조적으로 건전한 처분용기에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과 처분용기 내부 고준위폐기물 다발은 감싸는 외곽 벽의 두께가 두꺼워 질수록 또는 처분용기의 직경이 커질수록 처분용기에 발생하는 응력이 커지는 것을 알 수 있었다. 그러나 처분용기에 가해지는 충격력도 처분용기의 직경이 커짐에 따라 증가하였다. 그럼에도 불구하고, 단위 충격력 당 발생하는 변형의 크기는 직경이 증가함에 따라 감소하였다. 따라서 결론적으로 직경이 증가할수록 처분용기는 구조적으로 건전함을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 고준위폐기물 처분용기, 유한요소해석, 구조안전성 설계, 추락낙하 충격사고, 충격력, 상용 컴퓨터코드