추락낙하 사고 시 지면과 충돌하는 고준위폐기물 처분용기의 비선형구조해석

권 영 주^{1*}

¹홍익대학교 기계정보공학과

Nonlinear Structural Analysis of the Spent Nuclear Fuel Disposal Canister Subjected to an Accidental Drop and Ground Impact Event

Young-Joo Kwon^{1*}

¹Department of Mechanical & Design Engineering, Hongik Univ., Sejong, 30016, Korea

Abstract

The biggest obstacle in the nuclear power generation is the high level radioactive waste such as the spent nuclear fuel. High level radioactivities and generated heat make the safe treatment of the spent nuclear fuel very difficult. Nowadays, the only treatment method is a deep geological disposal technology. This paper treats the structural safe design problem of the spent nuclear fuel disposal canister which is one of the core technologies of the deep geological disposal technology. Especially, this paper executed the nonlinear structural analysis for the stresses and deformations occurring in the canister due to the impulsive force applied to the spent nuclear fuel disposal canister in the case of an accidental drop and ground impact event from the transportation vehicle in the repository. The main content of the analysis is about that the impulsive force is obtained using the commercial rigid body dynamic analysis computer code, RecurDyn, and the stress and deformation caused by this impulsive force are obtained using the commercial finite element static structural analysis computer code, NISA. The analysis results show that large stresses and deformations may occur in the canister, especially in the rid or the bottom of the canister, due to the impulsive force occurring during the collision impact period.

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

1. 서 론

사용 후 핵연료와 같은 고준위폐기물의 관리를 위하여 가장 가능하고 안전한 해결방법으로 현재 고려되고 있는 기술인 심지층 처분기술(Kwon, 2010; Lee *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2010)의 핵심기술 중 하나인 고준위폐기물 처분용기가 한국원자력연구원이 중심이 되어 개발되었다(Lee *et al.*, 2007; Kwon *et al.*, 2001). 이와 같은 심지층 처분기술은 지속적으로 원전건설을 추진하는 국가나 탈원전 정책을 추진하는 국가나 원자로에서 배출되는 사용 후 핵연료를 처분하기 위해

서는 필연적으로 개발해야 하는 기술임에 틀림없다. 고준위 폐기물 처분용기와 같은 방사성물질 운반하는 수송용기(cask)는 운반 수송 중 안전사고가 발생하여 수송용기가 파괴되어 내부의 방사성물질이 외부로 누출되면 매우 위험하기 때문에 국내외 엄격한 안전규정(Lee *et al.*, 2005)을 정하여 통제되고 있다. 이러한 안전규정에는 국내의 원자력법 관련 방사성 물질 포장 및 운반 안전규정(과학기술부, 2001), 국제원자력 기구(IAEA)의 방사성물질 포장 및 운반 안전규정(IAEA, 1996), 그리고 미국 10CFR71의 포장 및 운반 안전규정(NRC Regulatory Guide 7.6, 1978) 등이 있다. 국내 원자력

* Corresponding author:

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

Received August 23 2018; Revised January 14 2019;

Accepted February 8 2019

©2019 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.

안전법령체계는 원자력 안전법, 시행령, 시행규칙, 원자력안전위원회 규칙 및 고시로 구성되어 있다. 원자력 안전규제 전문기관인 한국원자력안전기술원(KINS)에서는 규제실무에 적용할 수 있는 상세기준 및 지침(KINS/RS-N12.00, 2015)을 자체적으로 개발 및 활용하고 있다. 특히, 상세기준 및 지침에서는 방사성폐기물을 운반하고자 할 때에는 원자력안전위원회 고시 제2014-50호(폐기물, 02)(방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정)(NSSC Notice 2014-50, 2014)의 요건을 만족해야 한다고 규정하고 있다. 이들 안전규정에 의하면 고준위폐기물과 같은 방사성물질을 운반하는 수송용기(cask)는 적재 및 하역 과정에서 발생할 수 있는 사고를 가정한 정상수송조건 및 수송 중에 발생할 수 있는 사고를 가정한 가상사고 조건들에 대한 시험을 실시한 후 방사성물질의 누출없이 건전성을 유지하여야 한다. 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 위해서 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 의하여 처분용기에 발생하는 응력 및 변형이다. 왜냐하면 처분용기에 발생하는 응력에 의하여 변형이 발생하고 이 변형의 정도가 처분용기의 파손유무를 결정하기 때문이다. 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 충돌반응에 대한 해석은 충돌전용 컴퓨터해석 프로그램인 LS-DYNA3D나 ABAQUS/Explicit 같은 프로그램으로 해석할 수 있다. 그러나 이와 같은 프로그램은 가격이 매우 고가이기 때문에 접근 이용하기가 쉽지 않고 충돌 시 접촉 면적이 넓어 마찰의 영향이 큰 경우인 자동차 충돌 사고 같은 해석에는 유용하지만 본 연구와 같이 원통형상의 고준위폐기물 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 주로 점접촉이나 선접촉이 발생하여 마찰의 영향이 적은 경우에는 크게 유용하지 않을 것으로 사료된다. 특히 충돌 시 극히 짧은 시간 내에 처분용기에 가해지는 동적인 충격력에 의하여 충돌 직후 처분용기에 동적인 구조적 진동이 발생할 수 있지만(Lee

et al., 2005; Zhou *et al.*, 2008) 최종적으로 처분용기에 발생하여 처분용기의 구조적 건전성에 영향을 주는 것은 탄소성 변형같은 정적인 변형이라고 사료된다. 따라서 굳이 충돌전용 해석 컴퓨터프로그램인 LS-DYNA3D나 ABAQUS/Explicit를 사용하는 대신에 정적 구조해석 전용 프로그램을 이용하여 연구를 수행할 수 있다. 이런 경우 충돌 중 처분용기에 가해지는 충격력을 정확히 파악하여만 하는데, 이를 위해서는 정적 구조해석 전용 컴퓨터프로그램 뿐만 아니라 동적 기구동역학 해석 컴퓨터프로그램도 필요하다. 그래서 본 연구를 위해서는 상용 기구동역학 컴퓨터해석코드인 RecurDyn를 이용하여 처분장에서 운반 중 사고로 추락낙하 하는 처분용기 모델들에 대하여 기구동역학해석을 수행하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력을 구하고, 이 충격력에 의하여 발생하는 응력과 변형을 정적 구조역학 컴퓨터해석 코드인 NISA를 이용하여 구조해석을 수행하여 구한 후 그 결과를 비교분석하여 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 정적 구조역학해석은 이미 인용한 기 연구들(Kwon, 2011; 2013; 2017)에서 수행되어 상세히 기술되어 있다. 따라서 본 논문에서는 인용한 논문들과 유사한 내용은 생략하고 본 논문에서 꼭 필요한 부분만 기술하고자 한다. 운송중 운반차량에서 추락낙하 하여 처분용기에 가해지는 충격력에 의하여 처분용기에 발생하는 구조적 변형에 대한 연구는 국내외에서 많은 연구가 수행되어 오고 있다. 추락낙하 사고 시 처분용기에 가해지는 충격력을 흡수하기 위하여 보통 처분용기에 충격흡수체(impact limiter)를 부착하기도 하는데, 이 경우 처분용기의 전체 중량 및 재료비 등이 증가하기 때문에 현재 원전에 저장되어 있는 대량의 사용 후 핵연료를 처리 운송할 시에는 처리비용이 천문학적으로 증가하는 문제가 발생할 수 있다. 그렇지만 충격흡수체 없이 설계 제작된 처분용기 자체에 대한 추락낙하 실험은 실제로 어렵고 위험이 따르기 때문에 보통 고준위폐기물 처분용기에 충격흡수체를 부착하여 실험적 연구가 수행되고 있다(Aquaro *et al.*, 1983; Dierch *et al.*, 1994). 수치해석적 연구도 고준위폐기물 처분용기에 충격흡수체를 부착한 구조물에 대하여 수행되고 있다(Choi *et al.*, 2010; Pugliese *et al.*, 1994). 그러나 이론적인 연구는 충격흡수체가 없는 특정한 구조형상에 대하여 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 발생하는 국부변형을 완전소성변형으로 가정하여 처분용기에 가해지는 최대충격력을 구하였다(Teper *et al.*, 1989; Miller, 1993). 본 연구에서도 마찬가지로 충격흡수체가 없는 특정한 원통형 처분용기가 운송차량에서 추락낙하 하여 지면과 충돌

하여 발생하는 구조적 변형을 구하였다. 단 기존의 이론적인 연구에서 국부변형을 완전소성변형으로 가정 한 것과는 다르게 본 연구에서는 좀 더 실제와 가까운 탄소성 정적 변형으로 가정 하였다. 이에 추가하여 충격력에 의해 발생하는 국부적 변형 이외에 충격력과 동시에 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격모멘트에 의해 처분용기에 발생하는 국부적 변형 이외의 변형을 구하였다. 이와 같은 충격모멘트에 의한 변형은 기존의 이론 연구에서는 취급되지 못한 내용이다. 인용한 연구(Kwon, 2016)에 이미 이와 같은 국부적 변형을 탄소성 변형으로 가정 하고 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력을 이론적/수치적으로 구하여 이론적으로 구한 충격력과 RecurDyn을 이용하여 수치적으로 구한 충격력이 일치함을 확인하였다. 본 연구에서는 여러개의 처분용기 모델들에 대하여 많은 경우의 수에 따라 처분용기에 발생하는 충격력을 계산하여 그 결과를 비교·연구하여야 한다. 이런 경우 이론적으로 많은 충격력을 구하는 것은 무리이다. 따라서 본 연구에서 추락낙하 시 처분용기에 발생하는 충격력을 상용 기구동역학 컴퓨터해석 코드인 RecurDyn을 이용하여 수치적으로 구하였다. 이 충격력과 이 충격력에 의한 충격모멘트에 의하여 처분용기에 발생하는 구조변형은 상용 구조역학 컴퓨터해석코드인 NISA를 이용하여 구하였다. 특히 본 연구에서는 NISA의 비선형구조 해석 기능을 이용하여 처분용기에 대한 비선형구조해석을 수행 하였다.

2. 처분용기모델의 구조형상 및 제원과 기구동역학 해석

2.1 처분용기모델의 구조형상 및 제원

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 다루는 것이 어렵다. 따라서 내부에 밀봉된 위험한 방사능물질이 노출되지 않도록 처분장에서 특수하게 제작된 전용 운송차량을 이용하여 조심스럽게 운송되어야 한다. 해석 대상인 가압 경수로(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 구리로 된 두께 5cm인 덮개홀더가 붙어 있다. 주요 제원은 Fig. 1에 표시된 바와 같이 고정시키고 단지 처분용기 단면의 직경(D)만 변화시키면서 이에 따른 여러 가지 처분용기

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

모델에 대하여 해석을 수행하고자 한다. 직경은 5cm씩 증가 시킨 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 변화하며 처분용기 직경이 증가함에 따라 처분용기의 무게도 증가하는데 본 연구에서는 이와 같이 무게가 변화하는 다섯 개의 처분용기 모델에 대하여 처분장에서 운송차량에 실려 운반 중 사고로 추락낙하 하는 경우 지면과 충돌 시 처분용기에 발생하는 충격력을 수치적으로 계산한다. 처분장에서 운송차량으로 처분용기를 운송 시 추락낙하 사고로 처분용기가 지면과 충돌하여 처분용기가 받는 충격력을 구하는 문제를 Recur Dyn과 같은 상용 컴퓨터해석코드로 기구동역학 해석을 수행하기 위해서는 처분용기, 운송차량, 지면 등을 문제에 적합하게 모델링을 하여야 한다. 이에 대해서는 이미 인용한 기 연구(Kwon, 2013)에서 자세히 다루었기 때문에 여기에서는 생략한다.

2.2 기구동역학 해석 및 결과

앞 절에서 정의한 모델을 이용하여 여러 입력 데이터(바퀴와 지면과의 마찰계수, 처분용기와 지면과의 마찰계수, 초기속도) 들에 대하여 기구동역학 전용 컴퓨터해석코드인 Recur Dyn을 사용하여 수치해석을 수행한다. 자세한 해석 방법 및 과정은 인용한 기 논문(Kwon, 2013)에 기술되어 있기 때문에 본 논문

에서는 그 중 본 논문과 관련된 중요내용 및 해석 결과를 기술하였다. 앞 절에서 언급한 구조모델링과 함께 정확한 기구동역학해석에 중요한 것은 운송차량 운행 중 처분용기가 운송차량 위에서 움직여서 지면으로 추락낙하 시 발생하는 각 부분들의 접촉 상태의 모델링이다. 본 해석에서는 모두 세 가지의 접촉이 발생한다. 첫 번째 접촉은 처분용기가 운송차량 위에서 움직일 때 발생하는 처분용기와 운송차량 표면과의 접촉, 두 번째는 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌할 때 처분용기와 지면과의 접촉, 마지막 세 번째는 차량바퀴와 지면과의 접촉이다. RecurDyn과 같은 컴퓨터수치해석코드를 이용하여 기구동역학해석을 수행하기 위해서는 위에서 언급한 각 접촉을 정의할 때 각 접촉상태를 특정 짓는 상수들을 입력하여야 한다. 이들 상수들은 각 접촉상태에 따라 또 처분용기의 모델에 따라 다른 값들을 갖는다. 본 해석에서는 처분용기가 운송차량에서 추락

Table 1 Static friction coefficient between canister and the vehicle surface(Kwon, 2013)

Diameter(D) (cm)	Mass(m) (Kg)	Friction coefficient (μ_s)
102	26.58	0.3578
107	29.765	0.387
112	33.1	0.40
117	36.58	0.40857
122	40.22	0.4168

낙하 하여 지면과의 충돌 시 처분용기에 발생하는 충격력을 정확하게 구할 수 있도록 가능한 실제상황과 유사한 경우로 가정하였다. 이에 대한 상세한 내용은 인용 논문(Kwon, 2013) 3.3절에 기술되어 있다. 그 중 첫 번째 처분용기와 운송차량 표면과의 접촉 시 마찰계수는 Table 1에 표시되어 있다. Table 1의 마찰계수 값들은 인용 논문(Kwon, 2013)의 연구

Table 2 Computed impulsive force and impact point(Kwon, 2017)

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	0.3165	0.1512	0.2650	0.5191
		F_y	0.0128	0.0029	0.0274	-0.0001	0.1996
		F_z	-0.0097	0.0133	0.0216	-0.0201	-0.0001
	Impact point(r) (m)	x	-0.5099	-0.5036	-0.5019	-0.5064	-0.4756
		y	-0.0095	0.0783	-0.0903	-0.0589	-0.1842
		z	4.83	0.00	0.00	4.83	2.39
107	Impulsive force(F) (MN)	F_x	0.1627	0.3326	0.1709	0.2925	not observed
		F_y	-0.0349	-0.1096	-0.0045	-0.0606	not observed
		F_z	-0.0094	0.0125	0.0227	-0.0210	not observed
	Impact point(r) (m)	x	-0.5310	-0.4742	-0.5348	-0.5327	not observed
		y	0.0645	0.2470	0.0154	0.0486	not observed
		z	4.83	0.00	0.00	4.83	not observed
112	Impulsive force(F) (MN)	F_x	0.1837	0.3223	0.2200	0.2692	not observed
		F_y	0.0560	0.0423	0.0402	-0.0796	not observed
		F_z	-0.0250	0.0229	0.0808	-0.0630	not observed
	Impact point(r) (m)	x	-0.5360	-0.5461	-0.5508	-0.5369	not observed
		y	-0.1622	-0.1236	-0.1009	0.1592	not observed
		z	4.83	0.00	0.00	4.83	not observed
117	Impulsive force(F) (MN)	F_x	0.1534	0.3223	0.1756	0.3400	0.5916
		F_y	0.1310	0.2240	0.1270	0.1953	0.3836
		F_z	-0.0134	0.0149	0.0187	-0.0209	0.0039
	Impact point(r) (m)	x	-0.4200	-0.5201	-0.4825	-0.4676	-0.4685
		y	-0.4072	-0.2675	-0.3308	-0.3513	-0.3503
		z	4.83	0.0	0.0	4.83	2.39
122	Impulsive force(F) (MN)	F_x	0.1466	0.3230	0.1536	0.2836	0.7092
		F_y	0.1755	0.3318	0.2152	0.2028	0.4798
		F_z	-0.0106	0.0125	0.0751	-0.0583	0.0151
	Impact point(r) (m)	x	-0.3489	-0.4793	-0.3520	-0.4960	-0.5507
		y	-0.5003	-0.3770	-0.4982	-0.3550	-0.2619
		z	4.83	0.00	0.00	4.83	2.39

시에도 사용된 동일 값들이다. 다른 접촉인 운송차량 바퀴와 지면, 처분용기와 충돌 지면과의 마찰계수는 너무 다양한 경우들이 존재하므로 여러 가지 경우들로 입력 데이터 값들을 가정하여야 한다. 따라서 수많은 경우의 수가 존재한다. 본 연구에서는 실제 상황에 유사하도록 마찰계수 $\mu_s = 0.0 \sim 0.9$ 의 값을 사용하여 해석을 수행하였다. 처분장에서 운송 중 운송차량에서 추락낙하 하는 처분용기에 대한 기구동역학해석 결과 추락낙하 하는 처분용기와 차량 탑재면/지면, 차량바퀴와 지면 사이의 접촉마찰 및 처분용기/운송차량의 초기속도 등에 매우 민감하며, 이들 값들에 따라 세 가지 유형으로 추락낙하 하여 지면(ground)과 충돌함을 알 수 있다. 첫 번째 추락낙하 유형은 처분용기의 위 덮개 부분인 덮개홀더가 지면과 먼저 충돌하는 추락낙하 유형(type 1)이고 두 번째 추락낙하 유형은 아래 덮개 부분이 지면과 먼저 충돌하는 추락낙하 유형(type 2)이며 마지막 세 번째 추락낙하 유형은 처분용기가 일자형으로 지면과 충돌하는 추락낙하 유형(type 3)이다. 세 번째 추락낙하 유형에는 두 가지 방식으로 지면과 충돌할 수 있는데, 하나는 처분용기가 일자형으로 지면과 평행하게 나란히 충돌하는 방식이고 다른 충돌 방식은 처분용기가 일자형으로 지면과 수직으로 충돌하는 방식인데, 지면과 수직으로 충돌하는 후자의 충돌방식은 본 연구에서는 관찰되지 않았다.

짧은 충돌 시간 동안 발생하여 처분용기에 가해지는 충격력(Kwon, 2016)은 충돌시간 중 일정한 값을 갖지 않고 Fig. 2에 보인 바와 같이 발생 직후 시간에 따라 급격히 증가하여 최고 값에 도달 한 후 급격히 감소하는 분포를 보이고 있다. 이 분포하중에 의해 처분용기에 정적인 구조변형이 발생한다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 정적인 구조해석 수행 시에 매우 짧은 시간(0.01초 이내) 중에 집중적으로 발생하는 이 분포하중의 합력을 처분용기에 충격력으로 가해준다. 이 분포하중의 합력을 구하면 충격량(impulse)과 일치하는데, 이는 매우 짧은 한 순간인 충돌시간 동안 물체에 가해지는 총 충격력이라는 의미이므로 정적 구조해석 수행 시 충돌시간 동안 처분용기에 충격력으로 가해주는 것이 타당하다고 사료된다. 이와 같은 가정은 충돌 시 충격시간(impact time)이 매우 짧다는 사실에 기초하고 있다. 본 기구동역학해석을 통하여 계산한 충격력(impulsive force)이 Table 2에 나타나 있다. Table 2에 계산한 충격력은 처분용기의 직경을 변화시킨 다섯 개의 처분용기 모델에 대하여 많은 경우의 수 중 운송차량 바퀴와 지면과의 마찰계수를 앞에서 언급한 $\mu_s = 0.0 \sim 0.9$ 의 값을 사용하여 RecurDyn으로 기구동역학해석을 수행하여 계산한 값들이다. Table 2에서 x , y , z 는 Fig. 1에 정의된 직각좌표에 대한 각 물리량의 성분들이다. 처분용기의 추락낙하 충돌에 의하여 발생하는 충격력에 대한 응력해석을 수행하려면 기준좌표에

Fig. 2 Comparison between the numerical value and the mathematical approximate(theoretical) value for the impact force occurring to the canister accidentally dropped and directly collided on the ground (Kwon, 2016)

대한 충격력($\mathbf{F}$)의 성분(F_x , F_y , F_z)들과 충격력이 작용하는 충돌점(impact point)의 위치($\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$)를 알아야 한다. Table 2의 값들은 바로 이들에 대한 수치 값들을 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. 본 기구동역학해석에서는 처분용기와 처분용기 끼리 충돌에 의한 영향은 고려하지 않는다. 왜냐하면 설계된 처분용기는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 높이가 483cm 직경이 102cm~122cm로 무게가 가장 가벼운 모델인 경우가 26.58ton으로 매우 크고 무겁기 때문에 취급 시 여러 개의 처분용기들을 동시에 취급하는 것은 매우 어려우며 개별적으로 한 개씩 취급해야 하기 때문이다. 따라서 처분장에서 처분용기는 운송 중에도 특수차량에 의하여 1개씩 개별적으로 취급되어야 한다.

3. 처분용기의 비선형구조해석

3.1 구조해석 문제의 구성

처분장에서 처분용기를 처분공(borehole)에 처분하기까지의 운반과정 중에 안전사고가 발생하여 처분용기가 지면에 추락낙하 하는 경우가 발생할 수 있다. 이 경우 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기가 파손되고 처분용기내의 고준위폐기물이 유출되어 방사능 사고가 발생할 수 있다. 이와 같은

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

Material	Insert	Outer shell, Lid & Bottom	Fuel bundle
Properties	Cast iron	Copper	Fuel+Zry-4 tube (equivalent value)
Young's modulus $E(\text{GPa})$	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 $\rho(\text{kg/m}^3)$	8,000	8,900	2,000
Yield stress $\sigma_y(\text{MPa})$	200	64	-
Tensile strength $\sigma_u(\text{MPa})$	1,400	200	-
Thermal conductivity $k(\text{W/m}^{\circ}\text{C})$	52	386	0.135
Specific heat $C(\text{J/kg}^{\circ}\text{C})$	504	383	2,640

Table 4 Piecewise linear hardening stress-strain curve data of copper(Kwon, 2011)

$\sigma_j(\text{Pa})$	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 5 Piecewise linear hardening stress-strain curve data of cast iron(Kwon, 2011)

$\sigma_j(\text{Pa})$	ϵ_j
300×10^6	0.005
412×10^6	0.023
542×10^6	0.078
697×10^6	0.147

원자력 방사능 누출사고를 사전에 방지하기 위해서는 처분용기 설계 시에 처분용기 강도를 충분히 확보해야 한다. 이와 같은 처분용기에 대한 내구성 강도설계를 위해서는 처분용기가 추락 낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력에 의하여 처분용기에 발생하는 내부응력과 구조변형을 계산해야 한다. 만약에 이 때 내부응력이 과도하게 발생하여 내부응력의 최대 값이 처분용기내의 사용 후 핵연료다발을 감싸고 있는 내부 삽입물을 구성하는 재질(주철)의 항복응력 값을 상회하면 처분용

기는 구조적으로 안전하지 못하여 파손되어 방사능 누출 사고가 발생할 수 있다. 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력에 의하여 처분용기에 발생하는 응력과 변형을 계산하기 위하여 본 절에서는 RecurDyn을 이용하여 앞 절에서 구한 충격력(Table 2참조)에 대하여 상용 유한요소 정적 구조해석 컴퓨터프로그램인 NISA를 이용하여 구조해석을 수행하여 처분용기에 발생하는 내부응력과 구조변형을 구한다. 이를 통하여 처분용기가 지면과 충돌 시에 처분용기의 구조적 건전성을 평가할 수 있다. 기 설계된 직경 102cm의 처분용기부터 처분용기 직경을 5cm씩 증가시킨 여러 가지 처분용기 모델에 대하여 구조해석을 수행하여 비교한다. 이를 위하여 5cm씩 직경을 증가시킨 다섯 가지 모델에 Table 2의 충격력을 각각 적용시켜 구조해석을 수행한다. 구조해석은 NISA의 비선형구조해석기능을 이용하여 수행한다. 비선형구조해석을 수행하기 위해서는 처분용기를 구성하는 구성 물질들에 대한 물질상수 값들이 필요한데 Table 3~5에 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 유한요소 모델링을 한다. 구조형상의 대칭성을 이용하여 모델링한다(Fig. 3 참조). 같은 방법으로 처분용기의 직경을 5cm씩 증가시킨 나머지 처분용기 모델들에 대해서도 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 6에 표시하였다. 유한요소 모델링 시 해석모델의 유한요소 수는 해석결과가 수렴 값에 도달하도록 충분히 많이 생성하였다. 왜냐하면 인용한 논문(Wang *et al.*, 2014)에서 확인된 바와 같이 해석 결과는 해석모델의 유한요소 개수에 민감하고 충분한 개수의 유한요소 수에서 수렴한 값을 갖기 때문이다. 충격력은 충돌 점(impact point) 한 점에 집중되는 집중하중으로 작용시킨다(Fig. 4참조). 구조해석 수행 시 처분용기의 강제운동을 막고 처분용기가 운송차량에서 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력과 동시에 처분용기의 무게중심에 작용하는 중력(처분용기의 무게)과 충돌 점에 작용하는 충격력(일종의 우력)에 의하여 처분용기에 충격모멘트(굽힘모멘트)가 가해진다. 따라서 충격력과 함께 처분용기에 가해지는 충격모멘트에 의하여 처분용기에 발생하는 구조변형을 구하기 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

Fig. 3 Finite element model of PWR spent nuclear fuel disposal canister ($D=102\text{cm}$)

Table 6 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

Fig. 4 Impact force applied to the canister at the collision impact point (arrow is the impact force) ($D=102\text{cm}$, drop type 1, first impact)

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 구조역학 해석에서는 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 보통 변형이 발생하지 않는 외력이 가해지는 곳에서 제일 먼 곳이라고 사료된다. 본 처분용기 추락낙하 구조해석 문제에서는 구조물은 대칭이지만 구조해석문제는 대칭문제가 아니기 때문에 처분용기에 가해지는 충격력과 충격모멘트에 의한 구조적 변형을 해석할 수 있도록 처분용기에 적당한 지점을 정하고 구속해야 한다. 처분용기의 한 쪽 끝을 구속하고 다른 한 쪽 끝에 집중하중을 가하면 처분용기 내에는 이 외력에 의한 충격모멘트인 굽힘모멘트가 발생한다. 물론 한 쪽 끝이 아닌 적당한 중간 지점에 구속을 가해도 처분용기 내에 굽힘모멘트가 발생한다(예, 처분용기의 무게중심이 위치한 중간지점). 그러나 처분용기의 한 쪽 끝을 구속하고 다른 한 쪽 끝에 집중하중을 가하는 경우에 처분용기 내에 가장 큰 굽힘모멘트가 발생한다. 본 논문에서는 보수적인 설계관점에서 처분용기 내에 가장 큰 충격모멘트(굽힘모멘트)가 발생하도록 지면과의 충돌에 의하여 충격력이 가해지는 곳에서 제일 먼 곳(추락낙하 유형 1인 경우 아래 덮개 밑면 부분)을 지점으로 가정한다. 따라서 이곳에 강제운동을 구속하는 경계조건을 가해준다. 예를 들어 추락낙하 유형 1 문제에서는 처분용기 아래 덮개 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. 5참조). NISA

Fig. 5 Constrained boundary condition ($u_x = u_y = u_z = 0$) on the bottom surface ($z=0$) of the canister ($D=102\text{cm}$, drop type 1, first impact)

의 비선형구조해석 기능을 이용하여 해석을 수행한다. 이 때 처분용기의 재질은 실제상황에 맞게 탄소성체(elastoplastic material)로 가정한다. Table 3~5의 물질상수 값들을 이용하여 비선형구조해석을 수행한다.

3.3 해석결과 및 검토

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

equivalent stress) 및 변형 값들을 Table 7~8 및 Fig. 6~9에 나타내었다. 해석결과를 검토하면 인용한 기 연구(Kwon, 2017)의 선형구조해석에서와 같이 처분용기가 추락 낙하 시 지면과 충돌하는 위 덮개홀더(lid holder)(추락낙하 유형 1) 혹은 아래 덮개(bottom)(추락낙하 유형 2)에 큰 응력 및 변형이 발생함을 알 수 있다(대체로 응력은 선형구조해석 값보다 작고 변형은 선형구조해석 값보다 크다). 그러나 그 값은 선형구조해석의 값(Kwon, 2017)보다 수렴된 값을 보임으로서 선형구조해석으로 구한 값에 오차가 있었음을 확인 할 수 있다.

Table 7 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	254.9(750.6)	335.2(873.4)	214.1(441.0)	382.9(1338.0)	37.1(43.7)
		Cast iron insert	7.8(8.0)	67.9(48.0)	30.3(23.9)	16.0(14.0)	37.1(43.7)
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	8.95(1.22)	30.16(2.59)	6.58(1.24)	45.07(2.20)	0.16(0.16)
		Cast iron insert	0.98(0.98)	2.25(2.24)	1.07(1.07)	1.77(1.77)	0.14(0.93)
107	Maximum von Mises stress(MPa)	Whole structure	577.6(813.4)	662.1(929.7)	435.1(606.1)	1214.0(1676.0)	-
		Cast iron insert	9.2(9.5)	33.7(33.7)	16.5(15.9)	16.6(17.1)	-
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.19(1.19)	2.45(2.45)	1.20(1.20)	2.13(2.13)	-
		Cast iron insert	0.92(0.92)	2.07(2.07)	0.99(0.99)	1.65(1.65)	-
112	Maximum von Mises stress(MPa)	Whole structure	580.2(841.5)	282.7(411.3)	181.0(259.9)	782.7(1124.0)	-
		Cast iron insert	10.3(10.6)	27.1(27.8)	19.8(18.3)	14.8(15.2)	-
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.14(1.14)	1.80(1.80)	1.16(1.16)	1.61(1.61)	-
		Cast iron insert	0.86(0.86)	1.57(1.57)	1.03(1.03)	1.24(1.24)	-
117	Maximum von Mises stress(MPa)	Whole structure	560.3(811.6)	674.9(968.7)	358.4(512.7)	1109.0(1589.0)	58.8(118.8)
		Cast iron insert	11.7(11.9)	38.7(38.9)	21.0(21.2)	23.2(23.7)	25.1(37.3)
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.04(1.04)	2.01(2.01)	1.09(1.09)	2.02(2.02)	0.20(0.19)
		Cast iron insert	0.76(0.76)	1.60(1.60)	0.88(9.88)	1.48(1.48)	0.11(0.11)
122	Maximum von Mises stress(MPa)	Whole structure	611.7(891.2)	797.6(1143.0)	388.1(552.2)	887.0(1292.0)	70.6(143.5)
		Cast iron insert	13.4(13.8)	44.9(44.8)	25.6(25.8)	20.3(20.9)	31.1(46.0)
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.04(1.04)	2.06(2.06)	1.09(1.09)	1.52(1.52)	0.23(0.23)
		Cast iron insert	0.72(0.72)	1.60(1.60)	0.87(0.87)	1.08(1.08)	0.11(0.11)

※ -: not observed, (): linear analysis results(Kwon, 2017)

Table 8 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	254.9	173.2	1.471763
		Cast iron insert	7.784	5.289	
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	8.954	6.084	
		Cast iron insert	0.982	0.667	
107	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	577.6	346.5	1.667111
		Cast iron insert	9.241	5.543	
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.188	0.713	
		Cast iron insert	0.922	0.553	
112	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	580.2	299.5	1.936928
		Cast iron insert	10.340	5.338	
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.137	0.587	
		Cast iron insert	0.859	0.444	
117	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	560.3	277.1	2.022135
		Cast iron insert	11.690	5.781	
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.041	0.176	
		Cast iron insert	0.759	0.375	
122	Maximum von Mises stress (MPa)	Whole structure	611.7	267.3	2.288865
		Cast iron insert	13.380	5.846	
	Maximum deformation (mm)	Whole structure	1.038	0.453	
		Cast iron insert	0.724	0.316	

역시 내부주철 삽입물에는 매우 미소한 응력 및 변형이 발생함을 알 수 있다. 이 값들은 선형구조해석 값(Kwon, 2017)들과 대체로 일치함을 보이고 있다. 이는 선형구조해석으로 구한 내부주철삽입물에 발생하는 응력 값들은 내부주철 삽입물에 발생하는 응력에 대해서는 신뢰할 수 있음을 알 수 있다. 이를 근거로 판단하면 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시

Fig. 6 von Mises stress contour occurring in the canister for the impulsive force(whole structure, unit: MPa) ($D=102$ cm, drop type 1, first impact) **Fig. 7** von Mises stress contour occurring in the canister for the impulsive force(cast iron insert, unit: MPa) ($D=102$ cm, drop type 1, first impact)

Fig. 8 Local deformation due to the impulsive force
(whole structure)
($D=102\text{cm}$, drop type 1, first impact)

Fig. 9 Bending deformation due to the impact moment
(whole structure)
($D=102\text{cm}$, unit: m, drop type 1, first impact)

처분용기를 감싸고 있는 위 덮개 혹은 아래 덮개가 대부분의 충격력을 흡수하여 이들에 큰 국부변형이 발생하고 사용 후 핵연료를 감싸고 있는 내부주철삽입물에는 그렇게 큰 충격력이 전달되지 않아 미소한 응력 및 변형이 발생함을 알 수 있다. 역시 처분용기의 내부주철삽입물에 발생하는 응력은 정도의 차이는 있지만 선형구조해석과 마찬가지로 직경이 커질수록 증가함을 알 수 있다(Table 8 참조). 그러나 내부주철삽입물에 가해지는 단위 충격력 당 변형 값(컴플라이언스, compliance)들은 오히려 직경이 커질수록 작아지는데(Table 8 참조) 이는 직경이 커질수록 구조물의 유연성(flexibility)은 작아지고 반대로 강도(stiffness)는 커져서 처분용기의 직경이 커짐에 따라서 구조적으로 건전함을 알 수 있다. 이는 이미 선형구조해석(Kwon, 2017)에서 확인한 바와 일치한다. 결론적으로 처분용기 내부의 내부주철삽입물 기준으로는 처분용기가 추락 낙하 하여 지면과 첫 번째 충돌 시 처분용기에 발생하는 단위 충격력 당 변형은 직경이 커짐에 따라 감소한다. 따라서 기존의 연구(Kwon, 2017)에서와 같이 처분용기는 직경이 커짐에 따라서 구조적으로 더욱 건전해지는 것으로 사료된다. 그러나 직경이 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. 이는 기존의 연구결과(Kwon, 2017)와 같은 결론이다. 그러나 본 비선형구조해석 연구를 통하여 선형구조해석 시 처분용기 외곽셀과 위아래 덮개 등에 발생하였던 부정확한 응력 및 변형 값들은 본 연구를 통하여 올바르게 수정되었다고 사료된다. 본 구조해석을 통하여 충격력에 의한 국부적 변형 뿐 아니라 충격력과 동시에 처분용기에 가해지는 충격모멘트에 의해 발생하는 굽힘 변형도 구하였다(Fig. 8~9 참조). 본 논문에서는 처분용기에 대한 보수적 설계관점에서 가장 큰 충격모멘트가 발생하도록 충격력이 가해지는 충돌 점에서 가장 먼 곳인 반대 끝(위 덮개나 아래 덮개의 밑면)을 지점으로 정하고 이곳을 구속하여 굽힘 변형을 구하였다. 그러나 이 한쪽 끝이 아닌 중간 지점(무게중심이 위치하는 중간지점)을 구속하여 구조해석을 수행할 수도 있다. 이는 좀 더 사실적인 현상을 반영한 구조해석이라고 사료된다. 그러나 이 경우에 처분용기에 가해지는 충격모멘트 값이 더 작기 때문에 본 논문에서 수행한 보수적 관점의 구조해석 보다 더 작은 응력 및 변형이 발생하는 것일 뿐 본 논문의 해석결과와 큰 차이가 없을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 직경이 102cm로부터 5cm씩 증가시켜 직경이 102cm, 107cm, 112cm, 117cm, 122cm인 가압 경수로 (PWR)용 처분용기들에 대하여 처분장으로서의 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 기구동역학해석을 통하여 구한 충격력을 이용하여 유한요소해석 CAE 시스템인 NISA를 가지고 처분용기에 대한 비선형구조해석을 수행하여 처분용기 내에 발생하는 응력 및 변형의 크기를 구하였다. 비선형구조해석 수행 결과로 기존에 수행했던 선형구조해석 (Kwon, 2017)의 부정확했던 외곽셀에 발생하는 응력 및 변형 값들을 정확한 값들로 수정 보완하였으며, 이를 바탕으로 처분용기가 처분장에서 안전사고로 추락낙하 하는 경우 처분용기의 구조적 건전성에 대한 비교 평가를 정확하게 수행하였다. 연구 결과 처분용기의 내부 주철삽입물에 본 연구에서 채택한 주철의 항복응력 값(200MPa)보다 매우 작은 응력이 발생하여 해석 대상 처분용기들은 모두 구조적으로 건전하다는 기존의 선형구조해석(Kwon, 2017)의 결론이 다시 확인되었다. 또한 처분용기의 직경이 커짐에 따라서 내부주철 삽입물에 발생하는 응력의 크기는 증가하는데 비하여 충돌 시 처분용기에 가해지는 단위 충격력 당 발생하는 변형(컴플라이언스)크기는 오히려 작아져서 처분용기는 직경이 커짐에 따라서 구조적으로 건전하다는 기존의 선형구조해석(Kwon, 2017)에서의 결과도 재 확인 되었다.

감사의 글

이 논문은 2018학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

References

Aquaro, D., Forassasi, G. (1983) Impact Tests on Scale Models of a Shock Absorber for LWR Spent Fuel Transport Packaging, *7th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, Chicago, USA.

Choi, W.S., Seo, K.S. (2010) A Simple Sizing Optimization Technique for an Impact Limiter Based on Dynamic Material Properties, *Nucl. Eng. &*

Des., 240, pp.925~932.

Dierch, R., Weiss, M., Dreier, G. (1994) Investigation of the Impact Behaviour of Wooden Impact Limiter, *Nucl. Eng. & Des.*, 150, pp.341~348.

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

KINS(Korea Institute of Nuclear Safety) (2015) Regulatory Standards and Guides No.KINS/RS-N12.00 for PWR.

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.

Kwon, Y.J. (2016) Impact Force Applied on the Spent Nuclear Fuel Disposal Canister that Accidentally Drops and Collides on to the Ground, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 40(5), pp.469~481.

Kwon, Y.J. (2017) 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, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 30(5), pp.415~425.

Kwon, 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.

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. & Technol.*, 44(12), pp.1565~1573.

Lee, 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.
- Miller, G.K.** (1993) Calculation of Impact Loads for High Energy Drops of Cylindrical Containers, *Int. J. Impact Eng.*, 13(4), pp.511~526.
- 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.
- NSSC** (2014) Notice 2014-50: Regulations on Shipping and Transportation of the Radioactive Materials.
- Pugliese, G., Frano, R.L., Forasassi, G.** (2010) Spent Fuel Transport Cask Thermal Evaluation under Normal and Accident Conditions, *Nucl. Eng. & Des.*, 240, pp.1699~1706.
- Teper, W.W., Suavé, R.G.** (1989) Simplified Method for Predicting Impact Loads of Solid-walled Transportation Packagings for Radioactive Materials, *J. Press. Vessel Technol.*, 111, pp.316~321.
- Wang, B., Gea, H.C., Kwon, Y.J.** (2014) Finite Element Analysis of Stresses and Deformations Occurring in the Spent Nuclear Fuel(SNF) Disposal Canister Deposited in a Deep Geological Repository, *Nucl. Eng. & Des.*, 266, pp.166~179.
- Zhou, C.Y., Yu, T.X., Lee, R.S.W.** (2008) Drop/Impact Tests and Analysis of Typical Portable Electronic Devices, *Int. J. Mech. Sci.*, 50, pp.905~917.
- Zhou, W., Apted, M.J., Kessler, J.H.** (2010) The Thermal-hydrological Impact on Increased Spent Fuel Storage Capacity in Yucca Mountain Repository, *Nucl. Technol.*, 170, pp.336~352.

요 지

원자력발전의 최대 걸림돌은 사용 후 핵연료인 고준위폐기물이다. 높은 방사능과 발생하는 열은 사용 후 핵연료의 안전한 처분을 어렵게 하고 있다. 현재 유일한 처리방법은 심지층 처분기술이다. 본 논문은 이와 같은 심지층 처분기술의 핵심기술 중의 하나인 처분용기의 구조안전성 설계문제를 다루고 있다. 특히 처분장에서 처분용기 처분 시 사고로 운송차량에서 추락 낙하 하여 지면과 충돌하는 경우 처분용기에 가해지는 충격력에 의하여 처분용기에 발생하는 응력 및 변형에 대한 비선형구조해석을 수행하였다. 해석의 주된 내용은 심지층 처분장에서 운반차량으로 처분용기 운반 중 사고로 추락낙하 하여 지면과의 충돌 시에 처분용기에 가해지는 충격력을 기구동역학해석 상용 컴퓨터코드인 RecurDyn으로 구하고 이 충격력에 의하여 처분용기에 발생하는 응력 및 변형을 유한요소 정적 구조해석 상용 컴퓨터코드인 NISA를 이용하여 구한 것이다. 해석결과는 충돌 충격 시간 중 발생하여 처분용기에 가해지는 충격력에 의하여 처분용기, 특히 처분용기의 위 덮개 혹은 아래 덮개에 큰 응력과 대변형이 발생함을 보여주고 있다.

핵심용어 : 사용 후 핵연료, 처분용기, 비선형 구조해석, 유한요소 정적 구조해석, 추락낙하 충격사고, 충격력, 상용 컴퓨터코드