COSEIK J. Comput. Struct. Eng., 26(5)
pp.373~384, October, 2013
http://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2013.26.5.373

pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302
Computational Structural
Engineering Institute of Korea

사고로 지면으로 추락낙하 충돌하는 고준위폐기물 처분용기에 대한 기구동역학 해석: 수치해석

권 영 주[1†]

[1]홍익대학교 기계정보공학과

Rigid Body Dynamic Analysis on the Spent Nuclear Fuel Disposal Canister under Accidental Drop and Impact to the Ground: Numerical analysis

Young-Joo Kwon[1†]

[1]Department of Mechanical & Design Engineering, Hongik University, Sejong, 339-701, Korea

Abstract

This paper is the second paper among two papers which constitute the paper about the rigid body dynamic analysis on the spent nuclear fuel disposal canister under accidental drop and impact to the ground. This paper performed the numerical study on the rigid body dynamic analysis. Through this study the impulsive force which is occurring in the spent nuclear fuel disposal canister under accidental drop and impact to the ground and required for the structural safety design of the canister is computed numerically. The main content of this numerical study is about the technical method how to compute the impulsive forces occurring in the canister under accidental drop and impact to the ground by using the commercial rigid body dynamic analysis computer codes. On the basis of this study the impulsive force which is occurring in the canister in the case of collision with the ground is numerically computed. This numerically computed impulsive force is increasing as the canister weight is increasing, and the canister falls plumb down and collides with the ground in three types according to the analysis results.

Keywords : *spent nuclear fuel disposal canister, structural safety design, rigidbody dynamic analysis, impulsive force*

1. 서 론

본 논문은 사고로 지면으로 추락낙하 충돌하는 고준위폐기물 처분용기에 대한 기구동역학 해석에 관한 두 번째 논문으로 수치해석문제를 다루고 있다. 이론을 다룬 첫 번째 논문에서 언급했듯이 사용 후 핵연료와 같은 고준위폐기물의 관리를 위하여 가장 가능하고 안전한 해결방법으로 현재 고려되고 있는 기술은 심지층 처분기술(Choi *et al*., 2008; Kwon, 2010; Zhou *et al*., 2010)이다. 심지층 처분기술의 핵심기술 중 하나인 사용 후 핵연료 처분용기가 한국원자력연구원이 중심이되어 개발되었다(Lee *et al*., 2007; Kwon, 2010). 그러나 개발 설계된 처분용기가 실제 처분장에서 처분 시 운송차량에서의 추락낙하 같은 사고에 의해 지면과 충돌하는 경우 처분용기에 발생하는 충격력에도 견딜 수 있는지는 여전히 의문이다. 국제원자력기구(IAEA)의 규정(IAEA, 1985)에 의하면 고준위폐기물과 같은 방사성물질을 담고 있는 처분용기는 지상 9m(30ft) 높이에서 추락낙하 하여 가장 약한 부분이 지면에 충돌하여도 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 동적해석을 수행하여 처분용기 추락낙하 시 지면

† Corresponding author:
Tel: +82-44-860-2484; E-mail: yjkwon@hongik.ac.kr
Received July 31 2013; Revised September 24 2013;
Accepted October 21 2013
©2013 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.

과의 충돌에 의한 처분용기 파손 가능성을 방지 할 수 있도록 충분한 충격강도를 확보하는 것이 바람직하다. 이런 경우 처분용기 설계자의 주된 관심은 추락낙하 충돌 충격 시 처분용기에 가해지는 충격력의 성격이다. 처분용기에 발생하는 파손은 추락낙하 충돌 충격 시 처분용기에 가해지는 충격력이 주된 원인임은 분명하다. 물론 처분용기에 발생하는 파손은 부위에 따라 충격력의 절대크기와 무관하게 발생할 수 있다. 처분용기의 추락낙하 충돌 충격에 대한 동적해석의 근본적인 목적은 이와 같은 충격력에도 처분용기가 파괴되지 않고 내부 방사성물질이 누출되지 않도록 처분용기가 충분한 강도를 갖도록 하는 것이다. 따라서 처분용기 내부를 포함한 모든 구성부분들이 추락낙하 충돌 충격 시 처분용기에 가해지는 충격력을 충분히 견딜 수 있도록 처분용기가 설계되어야 한다. 이를 위해서는 추락낙하 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력의 성격을 정확하게 파악해야 한다. 이와 같은 방사성물질 처분용기의 추락낙하 시 발생하는 충격력 계산이 Teper 등(Teper *et al*., 1989), 또한 그 후 Miller(Miller, 1993)에 의해 수행된 적이 있다. 그러나 이들이 충격력을 계산한 처분용기는 매우 제한된 특별한 구조형상이었다. 따라서 그들의 계산 결과는 다른 구조형상의 처분용기에는 적용할 수가 없다. 또한 그들은 처분용기가 추락낙하 시 충돌에 의하여 충돌 부위에 완전 소성변형이 발생한다는 가정에 의하여 충격력을 계산하여 실제 충돌에 의한 충격력보다는 더 큰 정적 충격력을 계산하였다고 사료된다. 또한 그들의 계산은 충격력의 성격을 규명하기 보다는 충격력의 절대크기에 대한 계산에 한정되어 있어 추락낙하 충돌 시 충격에 의한 처분용기의 파손을 예측하는 데에는 한계가 있다고 사료된다. 최근의 연구(Kwon, 2011)에 의하면 이와 같은 매우 큰 정적 충격력이 처분용기에 가해지는 경우 처분용기는 파괴 되어 그 내부의 사용 후 핵연료가 노출될 정도의 큰 소성변형이 발생하여 처분용기가 사고에 의한 추락낙하 시에는 구조 안전성에 문제가 있음을 알 수 있다. 그러나 이는 실제 상황과는 거리가 있는 해석결과라고 사료된다. 실제 처분용기 구조는 단순 실린더 구조형상이 아니고 복잡한 구조형상(Salo *et al*., 1990)을 가지고 있을 뿐 아니라 처분용기가 처분장에서 사고로 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 반응은 매우 동적이며 또한 처분용기 자체이외에 운반차량의 영향도 받기 때문에 그 반응은 다물체 동역학문제(Shabana, 1985)라고 사료된다. 따라서 처분용기의 추락낙하 시 지면과의 충돌에 의하여 처분용기에 가해지는 충격력의 성격을 정확하게 규명하기 위해서는 임의구조형상의 처분용기 추락낙하 반응에 대한 매우 일반적인 해석방법이 요구된다고 사료된다. 이를 위하여 첫 번째 논문에서는 매우 일반적인 다물체 기구동역학이론이 사고로 추락낙하 하는 처분용기의 지면과의 충돌 충격현상을 이해하기 위하여 연구되었다. 또한 이론 연구결과를 처분장에서 운송차량으로 처분용기 운송 중 사고에 의하여 지면으로 추락낙하 하는 문제에 적용하여 수학적인 정해를 구하는 것은 매우 어렵다는 결론을 얻었으며 실용적인 유용한 방법은 유도된 이론식들을 바탕으로 컴퓨터를 이용하는 수치해석 프로그램을 만들어 삼차원 해석을 수행하는 것이다. 그러나 유도된 이론식들을 바탕으로 컴퓨터 이용 수치해석 프로그램을 만드는 작업 또한 많은 노력과 시간을 요하는 작업이며 수편의 논문을 작성하여야 한다. 이런한 이유로 현재 이와 같은 해석을 위하여 널리 사용되고 있는 검증된 범용 컴퓨터해석코드를 사용하여 해석을 수행함이 좋다고 사료된다. 처분용기가 처분장에서 운송 중 운송차량에서 추락낙하 하는 거동이 거의 강체와 같이 보일지라도 지면과의 충돌 시 충격에 의한 파손 등을 고려할 때 강체가 아닌 유연한 변형체(flexible body)로 가정하여 해석을 수행함이 타당하다. 이와 같은 관점에서 현재 이 같은 해석에 널리 쓰이고 있고 성능이 검증된 LS-DYNA등과 같은 해석코드를 사용하는 것이 추락낙하 하는 처분용기의 충격에 의한 파손상태까지 완전히 파악하는데 적당하다고 사료된다. 그러나 현재 수행된 연구의 궁극적인 목적이 추락낙하 충돌 충격에 의한 처분용기의 파손상태 파악에 있다 하더라도 동일제목의 첫 번째 논문에서 언급하였듯이 본 논문은 첫 번째 논문과 연계하여 파손의 주된 원인인 충격력의 성격을 규명하는 것이 주된 관심이며 특히 LS-DYNA는 매우 고가이기 때문에 해석의 경제성에 제한이 있다고 사료된다. 따라서 본 논문에서는 이미 유사한 이론을 이용하여 작성된 검증된 또다른 우수한 상용 컴퓨터 코드를 활용하여 동 문제를 풀고자 한다. 따라서 본 두 번째 논문에서는 상용 기구동역학 해석 코드인 RecurDyn과 ADAMS를 이용하여 실제 처분장에서의 상황과 유사하게 운반차량위에 처분용기가 실려 운송되고 있는 도중에 사고에 의하여 지면으로 추락낙하 하는 동적인 과정을 시뮬레이션하여 운반차량의 거동과 추락낙하 하는 처분용기의 거동을 동시에 해석하고 이결과 지면과 처분용기가 충돌 시 처분용기가 받는 충격력의 성격을 규명하고자 한다.

2. 기구동역학해석 문제의 구성

2.1 처분용기 구조형상

본 연구에서 기구동역학 해석을 수행하고자 하는 가압경수로(PWR)용 처분용기모델의 구조형상과 제원은 Fig. 1에 표시한 바와 같다. Fig. 1에서 가압경수로(PWR)용 고준위폐

기물 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 내부삽입물(insert)이 감싸고 있으며 이 내부삽입물을 5cm 두께의 구리로 된 외곽 쉘이 감싸고 있다. 처분용기의 직경(D)은 102cm, 107cn, 112cm, 117cm, 122cm의 5cm씩 증가시킨 다섯 가지 모델이며 이에 따라 내부 주철 삽입물의 직경(d)도 92cm, 97cm, 102cm, 107cm, 112cm로 증가한다. 그러나 고준위폐기물 다발의 간격은 13cm로 일정하게 유지하면서 나란한 배열구조를 유지시킨다. 따라서 처분용기 단면의 직경이 5cm씩 증가함에 따라 고준위폐기물 다발과 외곽 쉘과의 간격(Fig. 1의 'g')은 최소 5cm에서 2.5cm씩 증가하여 커진다. 또 역시 구리로 된 5cm 두께의 위아래 덮개가 있으며 위 덮개에는 덮개홀더가 붙어있다. 높이 등 나머지 제원은 Fig. 1에 나타 난 값으로 일정하다. 본 연구에서는 이와 같이 무게가 증가하는 다섯 개의 처분용기 모델에 대하여 처분장에서 운송차량에 실려 운반 중 사고로 추락낙하 하는 경우 지면과 충돌 시 처분용기에 발생하는 충

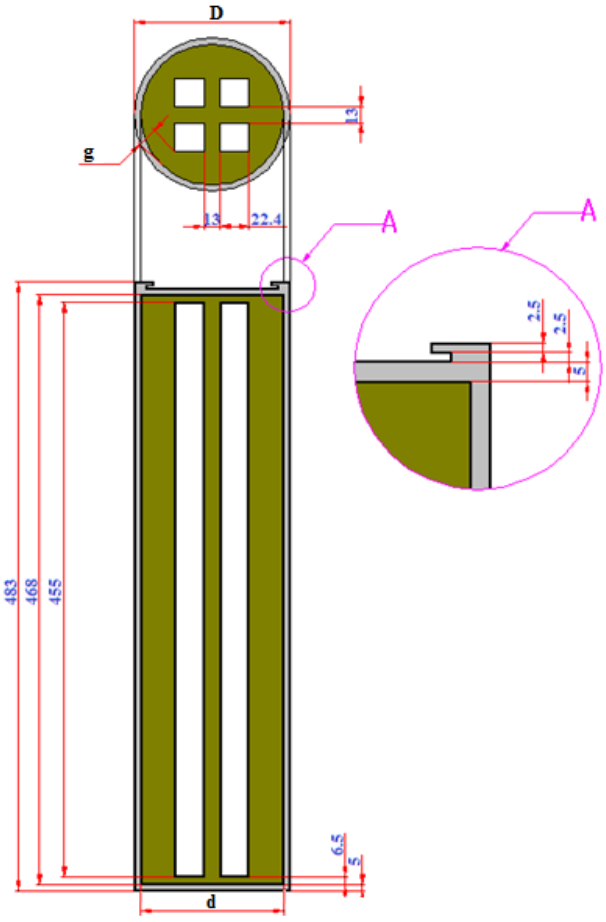


Fig. 1 Structural geometry and dimensions of the PWR canister(unit : cm)

Table 1 Material property values of composing parts

Properties \ 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 ν	0.25	0.3	0.3
Thermal expansion coefficient $\alpha(10^{-6}/℃)$	10.85	16.5	3.24
Mass density ρ(kg/m^3)	8,000	8,900	2,000
Yield stress σ_Y(MPa)	200	64	-
Tensile strength σ_u(MPa)	1,400	200	-
Thermal conductivity k(W/m℃)	52	386	0.135
Specific heat C(J/kg℃)	504	383	2,640

Table 2 Computed geometric property values of canisters

D (cm)	Volume (m^3)	Mass (kg)	ρ(density) (kg/m^3)	$I_x = I_y$ (kgm^2)	I_z (kgm^2)
102	3.9169	26,581.29	6,786.30	52,200.9	3,463.75
107	4.3098	29,765.50	6,906.4	58,655.7	4,268.05
112	4.7215	33,100.26	7,010.5	65,460.9	5,199.89
117	5.1519	36,585.53	7,101.3	72,622.8	6,271.73
122	5.6011	40,221.31	7,180.9	80,147.9	7,496,56

※ D:처분용기 직경, I_x, I_y, I_z : 처분용기의 주관성 모멘트(principal moments of inertia)

격력을 수치적으로 계산하여 무게에 따른 변화를 알아본다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 처분용기를 구성하는 물질은 크게 세 개로 나눌 수 있는데 내부삽입물을 구성하는 주철(cast iron), 외곽 쉘과 위아래 덮개를 구성하는 구리(copper), 그리고 내부 고준위폐기물을 담고 있는 Zry-4물질로 된 튜브다발들이다. 이들에 대한 물성치는 Table 1에 표시되어 있다.

Fig. 1의 제원과 Table 1의 물성치들을 이용하면 각 직경에 따른 처분용기의 총 부피와 총 질량, 평균밀도를 계산할 수 있으며 또한 주관성 모멘트(principal moment of inertia) 값들을 Table 2에 나타난 바와 같이 계산할 수 있다. 물론 이들 값들은 만약에 RecurDyn이나 ADAMS와 같은 컴퓨터 코드를 이용하여 모델링하면 자동으로 계산될 수 있다.

2.2 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 추락낙하 하는 경우를 고려할 수 있다. 실제 운송차량(Fig. 2)의 높이는 2~3m 정도로 추정 되므로 운송 중 운송차량에서 추락낙하 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 실제 불가능하고 이보다 더 낮은 높이에서 추락낙하 한다고 봄이 타당하다. 따라서 처분용기의 안전 설계를 고려하는 경우 가장 안정적으로 처분용기를 설계해야 되기 때문에 가장 높은 높이인 지상 5m 높이에서 낙하 하는 처분용기의 추락낙하 사고를 고려하는 것이 타당하다고 여겨진다. 실제로 적재높이 5m의 운송차량은 실제로는 존재할 수 없지만 컴퓨터 시뮬레이션인 경우 가능하다고 사료된다.

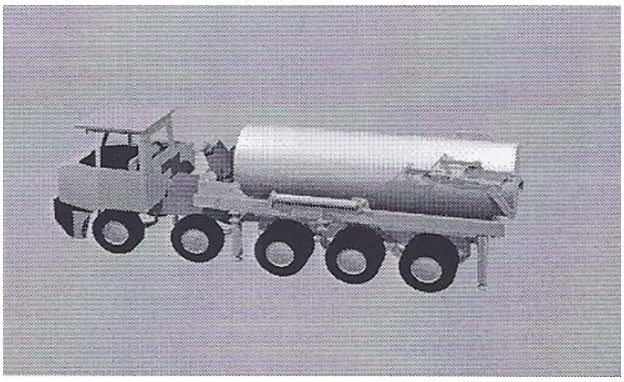


Fig. 2 Actual transport vehicle configurartion of SNF disposal canister in repository

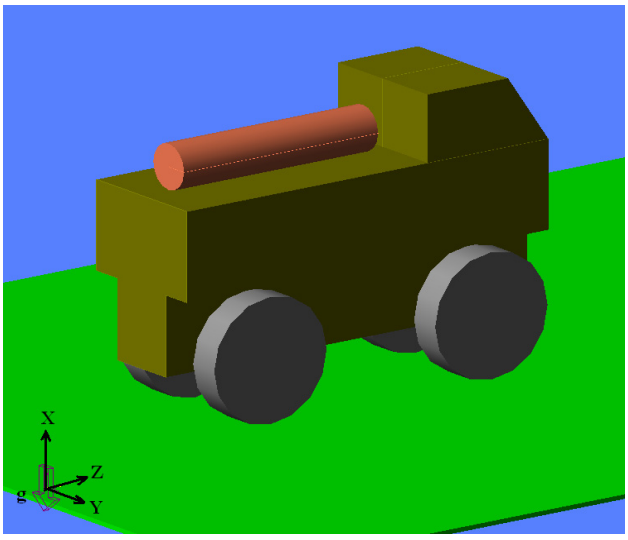


Fig. 3 Transport vehicle model geometry and canister configuration on the vehicle
(g: gravitational acceleration)

좀 더 사실적인 추락낙하 사고해석을 위하여서는 추락낙하의 경우에 대하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 실제차량모델이나 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. 또한 실제 모형을 사용하는 경우 국제원자력기구(IAEA)에서 요구하는 추락낙하 높이에 따른 처분용기에 가해지는 충격력의 성격을 규명하는 데에는 제한이 있다. 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 운송차량 위에 처분용기가 위 덮개 부분이 차량 앞쪽(운송차량 진행방향)으로 놓여있는 상태에서 추락낙하 한다고 가정한다.

2.3 추락낙하 사고의 고찰

Fig. 3과 같이 운송차량위에 처분용기가 실려 있다고 가정한다. 차량이 움직이고 있을 때 처분용기가 추락낙하 하는 것이 자연스럽다고 여겨진다. 따라서 차량의 초기속도는 적당하게 가정하고 Fig. 3과 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. 처분용기가 운송차량 위에서 굴러서 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 경우 처분용기와 운송차량 탑재면, 처분용기와 지면과는 접촉이 발생하며 마찰이 작용한다고 가정한다. 물론 차량바퀴와 지면 사이에도 접촉 및 마찰이 작용한다고 가정한다. 또한 처분용기는 비록 지면과의 충돌 직전까지는 거의 강체와 같이 운동 한다 하여도 지면과 충돌하여 충격에 의한 파손유무를 완전히 해석하기 위해서는 처분용기를 유연한 변형체

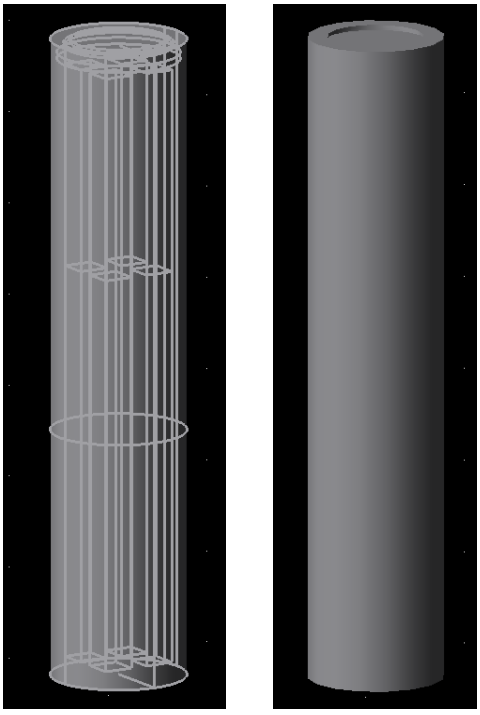
(flexible body)로 가정하여 해석을 수행함이 타당하다. 이런 경우 앞서도 언급 했듯이 LS-DYNA 등과 같은 고가의 해석코드를 사용하여 해석을 수행하여야 하는 어려움이 있다. 그러나 본 논문의 연구목적은 서론에서 언급했듯이 추락낙하 충돌 충격에 의한 처분용기의 파손 상태까지 완전히 해석하기 보다는 파손의 주된 원인인 충격력의 성격을 규명하는 데 있다. 또한 본 논문은 동일 제목으로 처분용기를 강체로 가정하고 작성한 이론 논문인 첫 번째 논문의 후속 논문으로 첫 번째 논문의 연장선상에서 처분용기를 강체로 가정하고 처분용기가 추락낙하 하는 운동에 대하여 기구동역학 해석을 수행하여 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌할 때 처분용기에 가해지는 충격력의 성격을 규명한다. 처분용기가 추락낙하 하여 지면에 충돌 시까지 처분용기의 운동 특성(처분용기내의 임의 점의 위치, 속도, 가속도)과 이 운동과 처분용기에 가해지는 외력들과의 상관관계식을 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 한 가지 방법은 수치해석적인 방법을 동원하여 컴퓨터를 이용하여 해석하는 것만이 가능하다. 그래서 본 논문의 첫 번째 논문에서 유도된 이론식들을 바탕으로 컴퓨터 수치해석 시스템을 만들 수도 있다. 그러나 이와 같은 컴퓨터 수치해석 시스템을 만드는 작업은 별도의 논문들을 작성할 만큼 시간과 노력이 드는 일이다. 다행스럽게도 현재 이와 같은 컴퓨터응용 기구동역학 수치해석 시스템이 개발되어 상용으로 이용되고 있다. 이들 상용 컴퓨터응용 기구동역학해석 시스템은 여러 가지가 있다. 대표적 시스템들은 ADAMS, RecurDyn, DADS 등이다. 이들 컴퓨터 해석 코드들은 이미 그 성능들이 검증되어 이들을 사용하여 기구동역학 해석을 수행하는 데에는 아무 문제가 없다고 사료된다. 본 연구에서는 이중에서 RecurDyn과 ADAMS를 이용하여 처분용기의 추락낙하 사고에 대한 기구동역학 해석을 수행하기로 한다. 이와 같은 해석은 복합 다물체구조물에서 접촉부분이나 이음매(조인트) 등에서 발생하는 동적하중(Kwon, 1999; Ku *et al*., 2012a; 2012b)을 구하는 해석과 동일하다. 물론 처분용기를 완전 강체로 가정하여 RecurDyn과 ADAMS 등으로 기구동역학 해석을 수행하는 경우 실제로는 변형체인 처분용기를 강체로 가정한 것에 따른 충격력의 크기에 대한 과도한 응답 값을 얻을 가능성이 있다. 따라서 이런 경우 RecurDyn과 ADAMS에서 제공하는 변형체동역학(Flexible Body Dynamics)기능을 이용하여 추가적인 해석을 수행함이 타당하다. 그러나 이런 경우 본 논문의 분량이 매우 길어지고 또한 추가작업에 따른 시간도 상당히 요구되기 때문에 이는 별도의 후속 논문에서 다루는 것이 옳다고 사료된다. 특히 본 논문은 앞서 언급했듯이 처분용기를 강체로 가정하고 작성한 동일 제목의 첫 번째 논문의 후속 논문으로 그 연속선상에서 처분용기를 강체로 가정하고 해석을 수행한다.

3. 기구동역학해석 모델링

처분장에서 운송차량으로 처분용기를 운송 시 추락낙하 사고로 처분용기가 지면과 충돌하여 처분용기가 받는 충격력을 구하는 문제를 RecurDyn과 같은 컴퓨터해석 코드로 기구동역학해석을 수행하기 위해서는 처분용기, 운송차량, 지면 등을 문제에 적합하게 모델링을 하여야 한다.

3.1 처분용기 모델링

RecurDyn을 이용하여 처분용기를 모델링 한다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 처분용기는 네 개의 고준위폐기물 다발(SNF basket), 이를 감싸는 내부 주철삽입물(cast iron insert), 그리고 구리(Cu)로 된 외곽 쉘(outer shell)과 위아래 덮개(lid and bottom)로 구성되어 있다. 이들 모두를



(a)Wire frame model (b)Solid model

Fig. 4 Analysis model of canister

강체로 가정하고 각 부분들 사이에는 간극이 없다고 가정하여 한 개의 일체된 구조물로 모델링한다. 실제 처분용기구조에서 네 개의 고준위폐기물 다발은 이들을 감싸고 있는 주철삽입물과 간극 없이 일체화된 상태로 장착되어 있다. 그러나 내부주철삽입물과 외곽 쉘은 약 1~2mm정도의 간극이 제작문제상 존재할 수 있다. 이런 경우 추락낙하 충돌 충격에 의한 처분용기의 파손 상태까지 파악하기 위한 엄밀한 해석을 수행하기 위해서는 이와 같은 간극을 고려하여 해석을 수행하여야 한다. 그러나 간극의 크기가 무시할 정도로 매우 작고 처분용기를 간극이 없는 강체로 가정하고 작성한 동일제목의 첫 번째 논문의 연속선상에서 처분용기를 간극이 없는 강체로 가정하고 모델링을 수행한다. 모델링한 결과는 Fig. 4에 나타나 있다.

3.2 운송차량 및 도로 모델링

역시 RecurDyn을 이용하여 운송차량도 모델링할 수 있다. 운송차량은 네 개의 바퀴와 한 개의 몸체로 구성되어 있으며 네 개의 바퀴와 몸체사이의 연결은 리볼류트 조인트(revolute joint)로 모델링 되어 있다. 운송차량 모델링 시 운송차량에 실려 있는 처분용기도 동시에 모델링하여야 한다. 또한 운송차량이 이동할 도로(road)도 동시에 모델링하여야 한다. 도로는 기저물체인 지면(ground)에 고정조인트(fixed joint)로 고정부착 되도록 모델링 하였다. 운송차량 모델링 시 중요한 것은 처분용기가 실려 있는 운송차량 바닥의 적재높이이다. 앞 절에서 논의 되었듯이 이 높이는 지면으로부터 5m가 되도록 모델링 하였다. 도로, 운송차량, 그리고 처분용기가 함께 모델링된 그림이 Fig. 3과 Fig. 5에 나타나 있다. Fig, 3과 Fig. 5는 같은 그림인데 서로 다른 각도에서 본 그림이다.

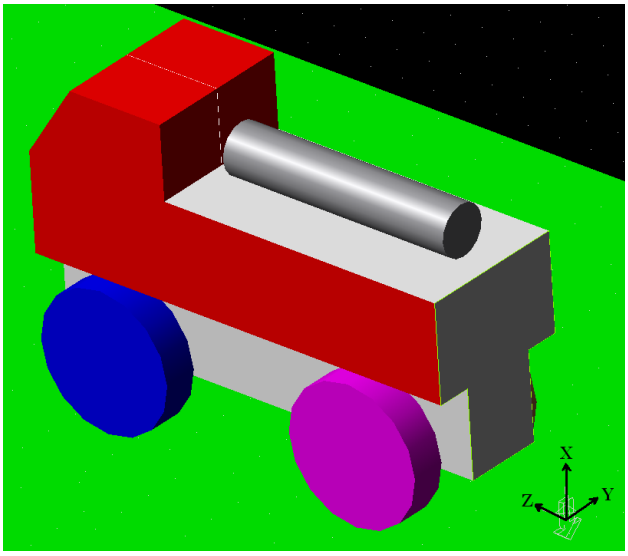


Fig. 5 Modelling result of the canister, the transport vehicle, and the road

3.3 접촉 모델링(스프링상수, 마찰계수)과 초기속도

Fig. 3과 Fig. 5에 나타난 바와 같이 구조형상을 모델링하는 것도 중요하지만은 정확한 실제상황과 근접한 기구동역학 해석이 이루어지기 위해서는 운송차량 운행 중 처분용기가 운송차량 위에서 움직여서 지면으로 추락 낙하 시 발생하는 각 부분들의 접촉상태의 모델링이다. 본 해석에서는 모두 세 개의 접촉이 발생한다. 첫 번째 접촉은 처분용기가 운송차량위에서 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 입력하여야 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 가정하도록 한다.

첫 번째 정의하여야 하는 상수는 스프링 상수(spring constant) k이다. 기구동역학 해석을 수행할 때 모든 물체는 변형이 발생하지 않는 강체(rigid body)로 가정한다. 물체가 접촉 없이 혼자 움직이는 경우는 물체를 강체로 가정할 수 있다. 그러나 두 물체가 접촉하는 경우 접촉을 통하여 힘이 전달되기 때문에 어떻게든 접촉물체들에는 변형이 발생한다. 항상 수반되는 변형은 탄성변형이다. 따라서 기구동역학 해석에서 모든 물체를 강체로 가정하였다 하더라도 일단 접촉이 발생하면 탄성변형을 고려하여 해석을 수행하여야 한다. 구조물에 외력이 가해져 탄성변형이 발생한 경우 특히 미소탄성변형이 발생한 경우 외력(F)과 변형(δ)은 다음과 같은 선형관계식을 만족한다.

$$F = k\delta \tag{1}$$

여기서, 비례상수 k를 스프링상수(spring constant)라 한다. 구조물에 어떤 특정 외력이 가해지는 경우 그 구조물과 외력의 특성에 따라 일정한 스프링상수를 구할 수 있다(Thomson, 1976). 예를 들어 일정 단면적 A이고, 탄성계

수 E, 길이 L인 보(beam)를 F라는 인장력으로 잡아당겼을 경우 늘어난 길이(δ)는 다음 식을 만족하므로 등가하는 스프링상수 k를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{FL}{AE} \text{ 또는 } F = \frac{AE}{L}\delta = k\delta \text{ 즉 } k = \frac{AE}{L} \quad (2)$$

따라서 본 논문에서는 처분용기를 길이 L=483cm의 보(beam)로 가정하여 각 경우에 등가 하는 스프링상수를 구할 수 있다. 단 처분용기는 Fig. 1과 같이 세 가지 물질로 구성된 복합구조물이므로 이를 고려하여 스프링상수를 구하여야 한다. 우선 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 경우 처분용기를 외팔보(cantilever beam)로 가정하여 스프링상수를 구할 수 있다. 그 이유는 처분용기가 지면과 충돌 시 처분용기에 충격력이 가해질 때 충격력이 가해지지 않는 처분용기의 위 덮개 혹은 아래 덮개 면에는 변형이 전혀 발생하지 않은 고정단과 같이 취급할 수 있기 때문이다(권영주, 2011). 따라서 이경우 처분용기에 대한 스프링상수는 다음 식으로 구할 수 있다(Thomson, 1976).

$$k_1 = \frac{3EI}{L^3} \text{ 여기서 } I\text{는 처분용기 단면의 관성모멘트} \quad (3)$$

처분용기가 4개의 고준위폐기물 다발, 내부 주철 삽입물, 외곽 쉘이 병렬로 결합되어 있는 복합구조물임을 고려하여 k_1을 다섯 가지 처분용기 직경에 대하여 구하면 Table 3에 나타난 바와 같다. Table 3의 k_1값과 식 (3)을 이용하면 복합구조물인 처분용기의 등가 탄성계수 E_{eq}를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$E_{eq} = \frac{k_1 L^3}{3I_{eq}} \text{ 여기서 } I_{eq} = \frac{\pi R^4}{4},\ R\text{=처분용기 반경} \quad (4)$$

각 직경의 처분용기에 대하여 구한 E_{eq}값이 역시 Table 3에 나타나 있다. 식 (4)를 이용하면 처분용기가 운송차량 위에서 추락낙하 직전까지 움직일 때 처분용기가 운송차량 표면과의 접촉에 대한 스프링상수 k_2역시 처분용기를 등분포하중을 받는 단순보로 가정하여 다음 식으로 구할 수 있다(Thomson, 1976; Lee *et al.*, 2001).

$$k_2 = \frac{384 E_{eq} I_{eq}}{5L^3} \quad (5)$$

각 직경에 대한 처분용기에 대한 k_2값 역시 Table 3에 나타나 있다.

Table 3 Spring constants for various canister diameters

Diameter(cm)	k_1(N/mm)	E_{eq}(N/mm^2)	k_2(N/mm)
102	120,580.4128	85.2366346×10^3	3,086,858.54
107	162,852.9223	95.0628131×10^3	4,169,034.81
112	211,449.1116	102.821513×10^3	5,413,097.26
117	266,969.8737	109.010673×10^3	6,834,428.77
122	330,027.7875	113.988595×10^3	8,448,711.36

Table 4 Static friction coefficient between canister and the vehicle surface and initial Y velocity of canister

Diameter(D) (cm)	Mass(m) (Kg)	Static friction coefficient(μ_s)	Initial Y velocity of canister(v_Y) (mm/sec)
102	26.58	0.3578	3,244.380
107	29.765	0.387	3,374.175
112	33.1	0.40	3,430.379
117	36.58	0.40857	3,466.932
122	40.22	0.4168	3,501.676

다음으로 중요한 상수는 접촉 시 마찰계수이다. 위에서 언급한 세 가지 접촉 중에서 중요한 마찰계수는 처분용기가 운송차량위에서 움직일 때의 마찰계수이다. 왜냐하면 이 값은 임의 값이 아닌 어떤 일정 값이기 때문이다. 정확한 이 마찰계수 값은 실험으로 구해야 한다. 그러나 실험을 할 수 없는 상황에서 이 마찰계수 값들은 적당한 값들로 가정해야 한다. 다행이도 참고문헌(小栗富土雄 *et al.*, 2000)을 통하여 다음 Table 4에 나타난 바와 같이 각 직경의 처분용기에 대하여 구할 수 있다. 참고로 Table 4의 마찰계수는 처분용기의 무게를 기초로 하여 보간법으로 구한 값이다. 다른 접촉인 운송차량 바퀴와 지면, 처분용기와 충돌 지면과의 마찰계수는 너무 다양한 경우들이 존재하므로 여러 가지 경우들로 입력 데이터 값들을 가정하여야 한다. 따라서 수 많은 경우의 수가 존재한다. 본 연구에서는 마찰계수 μ_s=0.0~0.9의 값을 사용하여 해석을 수행한다.

다음으로 중요한 입력 데이터는 운송차량과 운송차량 위에서 처분용기의 초기속도이다. 왜냐하면 운송차량의 초기속도는 처분장에서 운송차량의 운행을 충분히 반영해야 하고 운송차량위에서 처분용기는 마찰을 이기고 움직이기에 충분한 초기속도를 가져야 소기의 신빙성 있는 추락낙하 시뮬레이션을 얻을 수 있기 때문이다. 이들 값들은 처분용기의 추락낙하운동 상태를 결정하는 매우 민감하고 중요한 인자들이다. 본 연구에서는 처분장에서 처분용기 취급 시 발생하는 처분용기의 추락낙하 운동을 가능한 한 정확하게 묘사할 수 있도록 운송차량 및 처분용기의 초기속도와 추락낙하 시 발생하는 각 접촉에 대한 마찰계수를 사실적으로 가정하고자 하였

다. RecurDyn을 이용한 지면(ground), 운송차량, 처분용기 모델링 시 이들 값들(초기속도와 마찰계수)은 설계변수로서 입력된다. 처분용기를 처분장에서 취급 시 처분용기가 추락낙하 하는 사고는 대부분 운송차량에 처분용기를 싣거나 내려놓을 시 발생한다고 예상된다. 이때의 처분용기 속도는 거의 정지 상태의 속도이다. 따라서 운송차량의 초기속도는 운송차량의 초기 출발속도인 0~2km/hr로 예상된다. 이와 같은 관점에서 본 연구에서는 운송차량의 초기속도를 Z축 방향으로 100~200mm/sec(약 0.36~0.9km/hr)로 가정하였다. 초기에 처분용기는 운송차량에 탑재되어 있으므로 처분용기 초기속도의 Z방향성분은 운송차량의 속도인 100~200mm/sec와 같고 X방향속도는 없으며 Y방향속도는 처분용기가 운송차량에서 추락낙하 할 수 있도록 충분한 속도를 갖도록 가정하여야 한다. 이 Y방향속도는 처분용기와 운송차량의 접촉에 의한 마찰과 밀접한 관계가 있다. 처분용기를 원통(cylinder)으로 가정했을 때 처분용기와 운송차량 사이의 접촉 시 마찰계수를 μ라 하면 운송차량 위를 처분용기가 굴러서 Y방향으로 움직일 때 에너지 보존의 법칙으로부터 처분용기 초기속도의 최소값은 $v_Y = \sqrt{2\mu_s g S}$ 식으로 구할 수 있다. 여기서 g는 중력가속도(=9,806.25mm/sec^2)이다. 마찰계수 μ_s는 정지마찰계수(Table 4 참조)이고, S는 처분용기가 운송차량위에서 움직인 거리(혹은 운송차량 폭의 반=1,500 mm)이다. 상기 식을 이용하여 처분용기의 초기 Y방향속도를 계산하면 Table 4에 나타난 바와 같다.

4. 기구동역학해석

제3절에서 정의한 모델링을 이용하여 여러 입력 데이터(바퀴와 지면과의 마찰계수, 처분용기와 지면과의 마찰계수)들에 대하여 기구동역학 전용 컴퓨터해석 코드(RecurDyn과 ADAMS)를 사용하여 수치해석을 수행할 수 있다. 컴퓨터해석을 수행하기에 앞서 좀 더 문제의 본질을 확인하기 위하여 먼저 이론적인 고찰을 해보기로 한다.

4.1 이론적인 고찰

본 절에서는 동일한 제목의 첫 번째 논문에서 논한 이론을 어떻게 처분용기의 추락낙하 문제에 적용하는지에 대한 이론적인 고찰을 간단히 논하고자 한다. 심층적인 이론적인 해석은 또 한편의 논문을 작성해야 하기 때문에 생략하고 간단히 개념만 소개하기로 한다. Fig. 3과 Fig. 5에 모델링한 처분장에서 운송차량으로 처분용기를 운송 중 발생하는 추락낙하 사고에 의하여 처분용기에 발생하는 충격력을 구하는 문제는 첫 번째 논문에서 논했듯이 다물체동역학 문제이다. 해석대상은 닫힌 운동연쇄(closed kinematic chain)이며 또한 처분용기가 운송차량에서의 추락낙하 높이가 H=5m로 일정한 구속조건(constraint condition)을 갖는 다물체동역학 충돌 문제이다. 따라서 이론적인 해석을 수행하기 위해서는 먼저 열린 운동연쇄계인 나무구조(tree structure)에 대한 운동방정식을 유도하여야 하며 그다음 구속조건을 만족하는 최종적인 닫힌 운동연쇄에 대한 운동방정식을 유도한다. 그 후 유도된 운동방정식을 바탕으로 충격력을 구하기 위한 추가적인 작업이 필요하다.

4.2 기구동역학 해석 결과 및 검토

컴퓨터 기구동역학 전용 해석코드인 RecurDyn과 ADAMS를 이용하여 해석을 수행하였다. 먼저 RecurDyn을 이용하여 모든 모델링 및 해석을 수행하고 RecurDyn과 ADAMS의 인터페이스 기능을 이용하여 RecurDyn의 해석 데이터 파일을 ADAMS에서 읽어 동일한 해석을 수행하였다. 먼저 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 세 가지 유형으로 추락낙하 하여 지면(ground)과 충돌함을 알 수 있다. 이는 이전에 수행한 유사한 연구(Kwon, 2011)에서는 밝혀지지 않은 새로운 연구결과이다. 이는 이전의 연구는 경우의 수가 많지 않은 시뮬레이션이었던 것에 비하여 본 연구에서는 많은 경우의 수를 고려하였고 좀 더 정확한 모델링을 수행하였기 때문이라고 사료된다. 첫 번째 추락낙하 유형은 처분용기의 위 덮개 부분인 덮개홀더가 지면과 먼저 충돌하는 추락낙하 유형(type 1, Fig. 6)이고 두 번째 추락낙하 유형은 아래 덮개 부분이 지면과 먼저 충돌하는 추락낙하 유형(type 2, Fig. 7)이며 마지막 세 번째는 이전의 연구(Kwon, 2011)에서는 발견하지 못한 추락낙하 유형으로 처분용기가 일자형으로 선접촉으로 지면과 정면충돌하는 추락낙하 유형(type 3, Fig. 8)이다. 첫 번째와 두 번째 추락낙하 유형에서는 첫 번째 충돌 후에 반대쪽이 다시 지면과 충돌하는 두 번째 충돌이 첫 번째 충돌 직 후 바로 발생함을 알 수 있다. 충돌이 발생하는 시간은 매우 짧은 시간 보통 약 0.01초 동안에 발생함을 알 수 있다(Table 5). 그리고 충격력은 첫 번째와 두 번째 충돌유형에서는 처음 충돌 시보다는 두 번째 충돌 시 더 큰 충격력이 발생함을 알 수 있고(Table 6, Table 7, Fig. 9, Fig. 10) 세 번째 충돌 유형에서는 한꺼번에 많은 충격력이 집중해서 발생함을 알 수

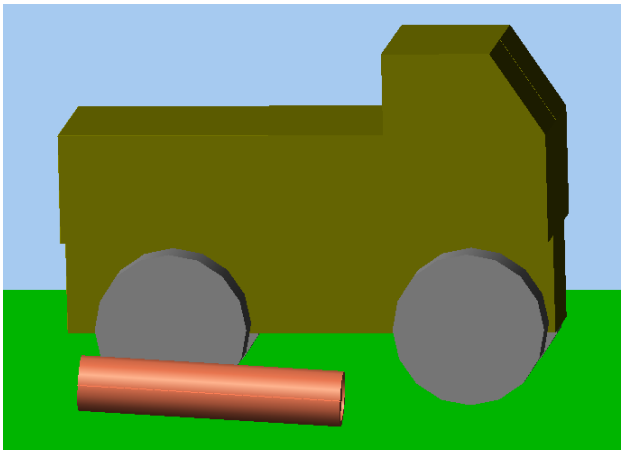


Fig. 6 The first falling plumb down collision type 1

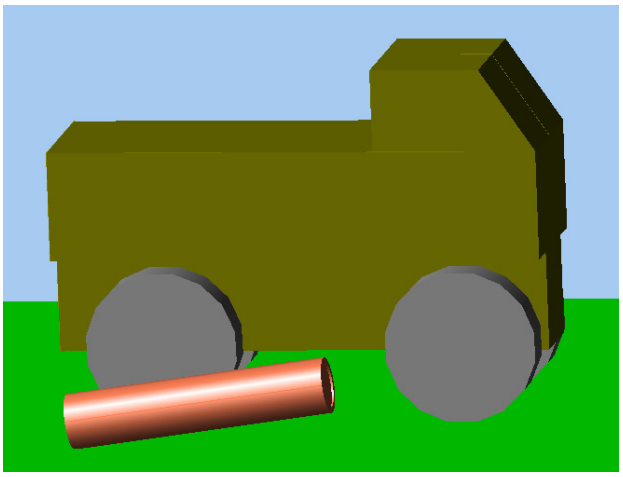


Fig. 7 The second falling plumb down collision type 2

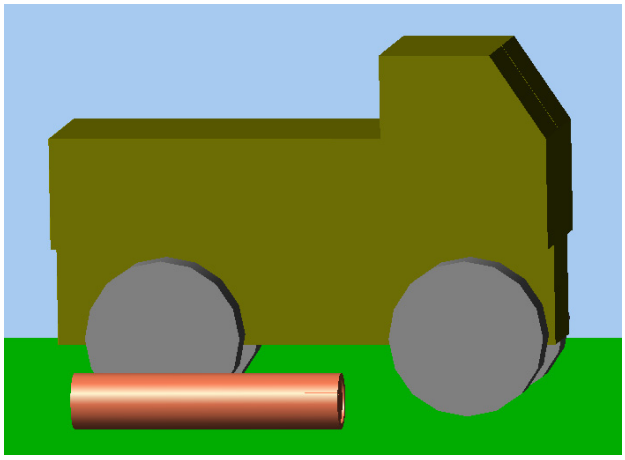


Fig. 8 The third falling plumb down collision type 3

Table 5 Collision time

D(diameter)(cm)				102	107	112	117	122
Collision time (sec)	type 1	1st	R	1.675	1.588	1.556	1.536	1.540
			A	1.622	1.599	1.543	1.633	1.563
			△t	0.009	0.01	0.0095	0.009	0.01
		2nd	R	1.696	1.607	1.595	1.661	1.577
			A	1.637	1.628	1.570	1.661	1.577
			△t	0.01	0.01	0.0075	0.009	0.0096
	type 2	1st	R	1.580	1.553	1.559	1.567	1.540
			A	1.602	1.578	1.613	1.627	1.645
			△t	0.01	0.01	0.009	0.0072	0.009
		2nd	R	1.622	1.592	1.668	1.593	1.626
			A	1.648	1.603	1.655	1.652	1.677
			△t	0.0086	0.0084	0.0081	0.008	0.0075
	type 3	1st	R	1.672	-	-	1.604	1.583
			A	-	-	1.621	1.628	-
			△t	0.0096	-	-	0.0115	0.019

※ R: RecurDyn, A:ADAMS, △t: collision durartion,
- : not observed

Table 6 Maximum collision impulsive force(MN)

D(diameter)(cm)				102	107	112	117	122
Collision force (MN)	type 1	1st	R	37.35	35.29	49.40	49.64	53.23
			A	39.20	48.22	57.65	68.17	72.68
		2nd	R	75.40	80.02	89.81	91.82	104.9
			A	89.47	104.1	117.1	137.7	162.7
	type 2	1st	R	36.27	41.38	63.56	87.12	73.35
			A	40.58	46.41	56.41	65.51	75.94
		2nd	R	68.01	77.40	83.67	108.0	112.3
			A	78.14	91.32	106.4	134.9	147.0
	type 3	1st	R	132.3	-	-	206.8	100.4
			A	102.6	-	108.3	198.9	151.0

※R: RecurDyn, A:ADAMS, - : not observed

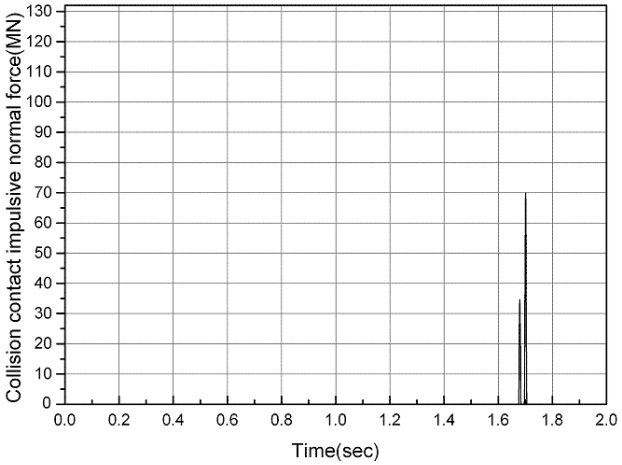
Table 7 Collision impact impulse(MN-sec)

D(diameter)(cm)				102	107	112	117	122
Impulse (MN-sec)	type 1	1st	R	0.159	0.180	0.209	0.218	0.247
			A	0.161	0.184	0.205	0.234	0.245
		2nd	R	0.341	0.377	0.351	0.423	0.499
			A	0.326	0.340	0.366	0.406	0.488
	type 2	1st	R	0.167	0.186	0.256	0.234	0.296
			A	0.167	0.188	0.207	0.229	0.255
		2nd	R	0.286	0.322	0.310	0.423	0.381
			A	0.271	0.305	0.331	0.401	0.421
	type 3	1st	R	0.557	-	-	0.760	-
			A	0.592	-	0.640	0.759	0.799

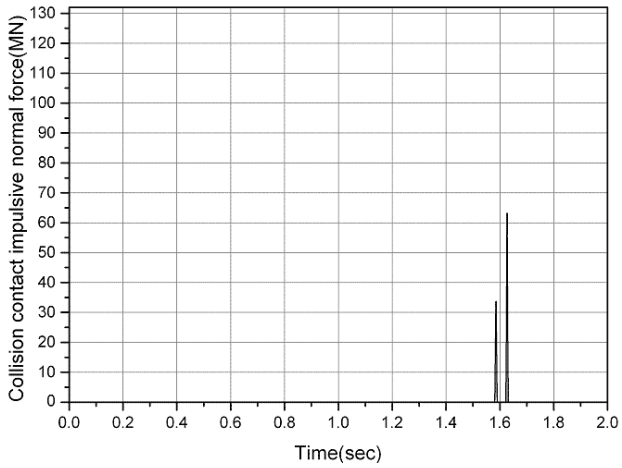
※R: RecurDyn, A:ADAMS, - : not observed

있다(Fig. 9, Fig. 10). 특히 첫 번째와 두 번째 추락낙하 유형인 경우 처분용기가 지면과 충돌하는 각도에 따라 충격력이 다름을 알 수 있다. 충돌각도가 작아짐에 따라 충격력의 크기가 커짐을 알 수 있다(Table 9 참조).

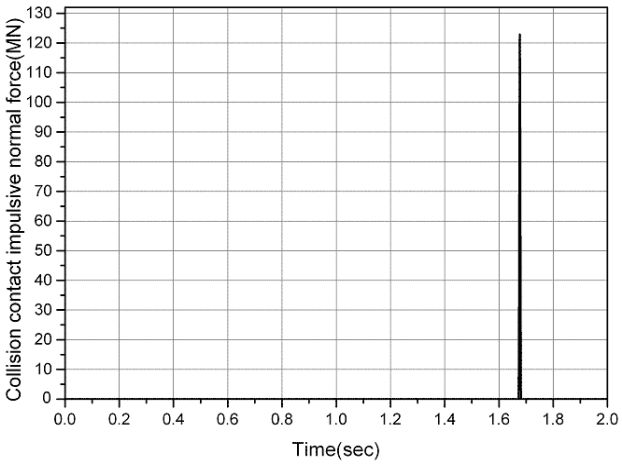
처분용기 직경의 증가에 따른 충돌에 의한 충격력과 충격량을 비교하면 대체로 직경이 커짐에 따라서 충격력과 충격량도 증가함을 알 수 있다(Table 6~9 참조). 특히 세 번째 충돌유형(type 3)인 경우 발생하는 충격력과 충격량은 첫 번째와 두 번째 충돌유형에서 보다 집중적으로 크게 발생함을 알 수 있다. RecurDyn과 ADAMS 해석결과를 비교하면



(a) The first falling plumb down collision type 1(MN)

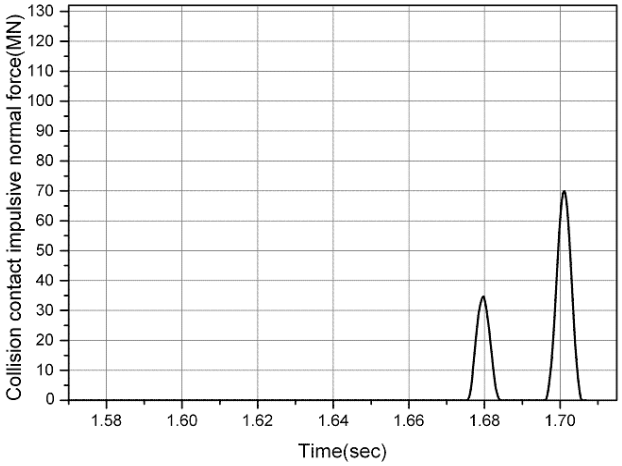


(b) The first falling plumb down collision type 2(MN)

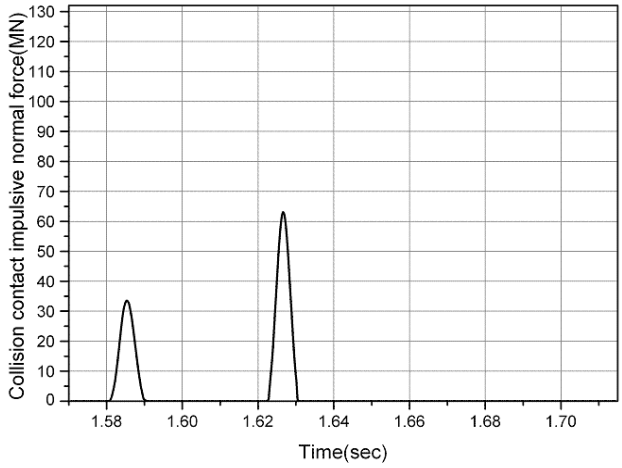


(c) The first falling plumb down collision type 3(MN)

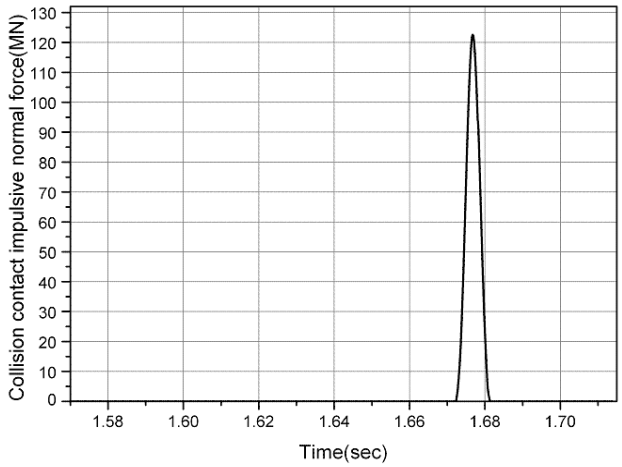
Fig. 9 Collision contact impulsive normal force (D=102cm)



(a) The first falling plumb down collision type 1(MN)



(b) The first falling plumb down collision type 2(MN)



(c) The first falling plumb down collision type 3(MN)

Fig. 10 Collision contact impulsive normal force (D=102cm, enlarged time scale view)

비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 충격량(impulse)값은 거의 일치하고 있다(Table 7 참조). 한 가지 RecurDyn과 ADAMS 해석 결과의 차이는 ADAMS에서는 실제 충돌점의 위치나 Table 8에 나타난 바와 같이 충돌점에 직접 작용하는 수직 충격력 및 충격량에 대한 정보를 구할 수 없다는 것이다. 모든 추락낙하 충돌에서 최대 충돌 충격력은 매우 큰

Table 8 Collision normal impact impulse(MN-sec)

D(diameter)(cm)			102	107	112	117	122
Normal impulse (MN-sec)	type 1	1st	0.147	0.167	0.194	0.202	0.229
		2nd	0.317	0.350	0.351	0.393	0.463
	type 2	1st	0.155	0.172	0.238	0.217	0.275
		2nd	0.266	0.299	0.288	0.393	0.353
	type 3	1st	0.557	-	-	0.705	0.856

※ R: RecurDyn, A:ADAMS, - : not observed

Table 9 Collision contact impulsive force and impulse (collision contact angle variation)

D (Diameter) (cm)	Contact angle	Maximum force (MN)	Impulse (MN-sec)	Collision type
102	large	36.271	0.1671	type2
	small	51.045	0.1673	
107	large	44.376	0.1857	type2
	small	52.596	0.1890	
112	large	49.403	0.2086	type1
	small	53.938	0.2180	
117	large	49.638	0.2178	type1
	small	55.280	0.2280	
122	large	53.226	0.2465	type1
	small	69.654	0.2623	

데 비하여 충돌시간은 극히 작기 때문에 실제로 이 최대 충격력이 계속 처분용기에 작용하는 것이 아니고 극히 일순간 매우 동적으로 처분용기에 작용한다고 볼 수 있다. 따라서 일반적으로 계속 작용하는 정적인 힘과 같은 큰 효과는 없다고 사료된다. 즉 짧은 순간 동적으로 작용하는 최대 충돌 충격력은 실제 구조해석 시 외력으로 사용하는 것은 타탕하지 않다고 사료된다. 실제로 처분용기에 가해지는 외력은 짧은 충돌시간 중 처분용기에 가해지는 실제 순수 힘의 크기인 충격량(impulse)이라고 볼 수 있는데 Table 7과 Table 8에 나타난 바와 같이 충돌에 의한 충격량은 최대 충격력에 비하여 매우 작다. 특히 실제 충돌 지점에서 처분용기에 수직으로 작용하는 충격량(Table 8의 값)은 일반적으로 처분용기의 무게중심에 작용하는 충격량(Table 7의 값)보다 더 작다. 따라서 실제 추락낙하 충돌에 의해 처분용기에 가해지는 힘은 Table 8에 나타난 충돌 수직 충격량이라고 사료되며 이 값들을 처분용기 설계 시 요구되는 구조해석 수행 시 외력으로 적용함이 타당하다고 사료된다. 그렇지 않고 극히 짧은 충돌시간 동안 잠간 작용하는 Table 6의 최대 충돌 충격력을 구조해석 시 외력으로 작용하면 이전의 연구(Kwon, 2011)에서 알 수 있듯이 처분용기는 파괴되어 구조적으로 안전하지 못하다는 잘못된 구조해석 결과를 얻을 수 있다. 이는 정확한 처분용기 설계를 위하여 옳지 않다고 사료된다. 특히 본 연구에서는 처분용기를 강체로 가정하여 해석을 수행하여 실제 처분용기에 가해지는 충격력보다 크기가 과다하게 계산되었으므로 실제 처분용기가 받는 충격량은 Table 8의 값보다 작다고 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 처분장에서 운송차량으로 처분용기 처분 시 추락낙하 사고로 지면과 충돌하는 처분용기에 발생하는 충격력의 성격을 컴퓨터 기구동역학 전용해석 코드인 RecurDyn과 ADAMS를 이용하여 수치적으로 구하였다. 해석결과 추락낙하 충돌유형은 세 가지 유형이 있음을 알았으며 특히 세 번째 유형(type 3)의 추락낙하 충돌 사고인 경우 다른 유형에 비하여 첫 번째 충돌 시에 비교적 큰 충격력이 처분용기에 집중적으로 발생하여 다른 추락낙하 충돌유형에 비하여 처분용기의 파손 가능성이 큼을 알 수 있다. 따라서 처분용기 설계 시 이와 같은 추락낙하 사고를 고려해야 된다고 사료된다. 추락낙하 충돌 시 충돌은 극히 짧은 시간에 발생하며 첫 번째와 두 번째 충돌 유형에서는 처음 충돌과 그다음 충돌이 거의 시간차이없이 발생함을 알 수 있었다. 또한 이와 같은 충돌유형에서는 두 번째 충돌 시 더 큰 충격력이 발생함을 알 수 있었다. 실제 이 매우 큰 충돌 충격력은 극히 짧은 충돌시간 동안 잠시 처분용기에 동적으로 작용하기 때문에 일반적으로 처분용기 설계를 위하여 요구되는 구조해석 수행 시 이 최대 충돌 충격력을 외력으로 적용함은 타당치 않으며 그 대신 짧은 충돌시간 동안 실제 처분용기에 가해지는 전체 힘의 합인 충돌 충격량(impulse)을 외력으로 작용하는 것이 타당하다고 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

IAEA(International Atomic Energy Agency) (1985) Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, Vienna, Austria.

Ku N.K., Roh M.I., Cha J.H. (2012) Calculation of the Dynamic Contact Force between a Shipbuilding Block and Wire Ropes of a Goliath Crane for the Optimal Lug Arrangement, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*,

25(5), pp.375~380.

Ku N.K., Roh M.I., Lee K.Y. (2012) Dynamic Constrained Force of Tower Top ad Rotor Shaft of Floating Wind Turbine, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 25(5), pp.455~463.

Kwon Y.J. (1999) Structural Analysis of Robot Structure Handling Nuclear Fuel Assembly in Liquid Metal Reactor Vessel I: Rigid Body Dynamic Analysis, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 12(4), pp.573~581.

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, *Nuclear Science and Engineering*, 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, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 24(2), pp.211~222.

Lee J.Y., Cho D.K., Choi H.J., Choi J.W. (2007) Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuel, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 44(12), pp.1565~1573.

Lee P.S, Kang J.C. (2001) Applied Structural Analysis, Cheong Moon Gak Publishers, Republic of Korea, p.520.

Miller G.K. (1993) Calculation of Impact Loads for High Energy Drops of Cylindrical Containers, *International Journal of Impact Engineering*, 13(4), pp.511~526.

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.

Shabana A.A. (1985) Substructure Synthesis Methods for Dynamic Analysis of Multi-body Systems, *Computers & Structures*, 20(4), pp.737~744.

Teper W.W., Suavé R.G. (1989) Simplified Method for Predicting Impact Loads of Solid-walled Transportation Packagings for Radioactive Materials, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 111, pp.316~321.

Thomson T. (1976) Theory of Vibration with Applications, 2nd Edition, Prentice Hall.

Zhou W., Apted M.J., Kessler J.H. (2010) The Thermal-hydrological Impact on Increased Spent Fuel Storage Capacity in Yucca Mountain Repository. *Nuclear Technology*, 170. pp.336~352.

小栗富士雄, 小栗達男 (2000) 標準機械設計圖表, 大光書林 編輯部編, 日本.

요 지

본 논문은 두 편으로 구성된 사고로 지면에 추락낙하 충돌하는 고준위폐기물 처분용기에 대한 기구동역학 해석 논문 중 두 번째 논문으로 기구동역학 해석에 대한 수치해석연구를 수행하였다. 이를 통하여 고준위폐기물 처분용기의 구조 안전성 설계에 요구되는 처분용기 처분 시 사고로 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 경우 처분용기에 가해지는 충격력을 수치적으로 구하였다. 수치해석 연구의 주된 내용은 상용 기구동역학 해석코드를 이용하여 처분장에서 운송차량으로 처분용기 취급 시 사고로 추락낙하 하여 지면과의 충돌 시 처분용기에 발생하는 충격력을 구하는 기술적인 방법에 관한 것이며 이를 토대로 지면과 충돌 시 처분용기에 발생하는 충격력을 구하는 문제를 수치적으로 다루었다. 이렇게 수치적으로 구한 처분장에서 처분용기 운송 시 운반차량에서 사고로 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 처분용기에 발생하는 충격력을 분석한 결과 처분용기의 무게가 증가 할수록 충격력도 증가하며 처분용기는 추락낙하 하여 세 가지 유형으로 지면과 충돌함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 고준위폐기물 처분용기, 구조안전성 설계, 기구동역학 해석, 충격력