

강체간의 충돌에 의한 충격력에 대한 수학적 정해 및 고준위폐기물 처분용기의 지면 추락낙하사고 시의 충돌충격에의 응용: 적용(수치해석)

권 영 주^{1*}

¹홍익대학교 기계정보공학과

Analytical Closed Form Solution for the Impact Load of a Collision between Rigid Bodies and its Application to a Spent Nuclear Fuel Disposal Canister Accidentally Dropped and Impacted on the Ground: Application(Numerical Analysis)

Young-Joo Kwon^{1*}

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

Abstract

This paper presents the analytical closed form solution for the impact load of a collision between rigid bodies and its application to a spent nuclear fuel disposal canister accidentally dropped and impacted on the ground. This paper performed a study on the numerical rigid body dynamic analysis to compute the impact load between two rigid bodies, especially, the impulsive force which is applied to the spent nuclear fuel disposal canister in the accidental drop and impact event on the ground. Through this study the impulsive force which is occurring in the spent nuclear fuel disposal canister under accidental drop and impact event on the ground and required in the process of 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 force applied to the canister under the accidental drop and impact event on the ground by using the commercial computer code for the rigid body dynamic analysis. On the basis of this study a problem to compute the impulsive force which is occurring in the canister in the case of collision with the ground is numerically treated. This numerically computed impulsive force is compared with the theoretical value, which shows a good agreement.

Keywords : spent nuclear fuel disposal canister, numerical rigid body dynamic 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 충격력을 구하는 기구동역학 해석에 관한 논문으로 기구동역학 해석 상용 컴퓨터코드를 이용한 수치해석 문제를 다루고 있다. 사용 후 핵연료와 같은 고준위폐기물의 관리를 위하여 가장 가능하고

안전한 해결방법으로 현재 고려되고 있는 기술인 심치층 처분 기술의 핵심기술 중 하나인 사용 후 핵연료 처분용기가 한국 원자력연구원을 중심으로 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

* Corresponding author:

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

Received March 13 2015; Revised April 27 2015;

Accepted April 28 2015

©2015 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.

(IAEA, 1985)에 의하면 고준위폐기물과 같은 방사성물질을 담고 있는 처분용기는 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 동적해석을 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 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 구성부품들이 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 문제는 본질적으로 핸드폰과 같은 휴대용 전산장비의 추락낙하 문제 또 그 외의 수많은 산업용 제품의 추락낙하 문제와 동일하다(Zhong *et al.*, 1994; Zhou *et al.*, 2008). 운반 중 처분용기의 추락낙하 문제는 일반적인 두 물체의 접촉-충돌(contact-collision)문제의 일환으로 접근하는 것이 타당하다고 사료된다(Jaeger, 1994). 또한 LS-DYNA와 같은 고가의 충돌전용 유한요소(FE) 해석 컴퓨터 코드도 개발되어 복잡한 구조를 갖는 자동차와 같은 제품개발에 이용되고 있다. 그러나 본 고준위폐기물 처분용기의 운반 중 추락낙하 문제에 이와 같은 고가의 컴퓨터해석코드를 이용하는 것은 비경제적으로 사료된다. 왜냐하면, 처분용기는 자동차 등에 비하여 구조가 비교적 간단하며 특히 지면과 충돌 시 접촉부분이 한 점이거나 일직선 등과 같이 단순하기 때문이다. 그에 비하여 자동차 등의 충돌은 충돌 시 접촉부분이 넓은 면이며 또한 두 접촉면이 접촉 시 같이 움직이거나 상대적으로 미끄러져 마찰의 영향이 크기 때문에 그 해석이 컴퓨터를 이용하지 않고는 매우 난해하기 때문이라 사료되기 때문이다. 그러나 운반중 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시에 접촉 부분이 한 개의 점인 경우에는 마찰의 영향을 무시할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 비교적 저가인 컴퓨터 해석코드인 RecurDyn을 이용하여 처분장에서 운반 중 사고로

추락낙하 하는 처분용기에 대하여 기구동역학해석을 수행하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력을 구하여 이론식으로 구한 충격력과 비교 검토하였다. 본 논문에서 수행한 처분장에서 운반 중 운송차량에서 사고로 추락낙하 하는 처분용기가 지면과 충돌하는 기구동역학 해석은 이미 수행한 기존의 해석(Kwon, 2013)과 동일하다. 따라서 본 논문에서는 기 수행논문(Kwon, 2013)과 일치하는 내용은 생략하고 본 논문에서 꼭 필요한 부분만 기술하도록 한다.

2. 처분장에서 운송 중 고준위폐기물 처분용기의 추락낙하 및 지면과의 충돌사고

비록 처분용기가 기술적으로 가볍게 설계되어 있다 하더라도 설계된 처분용기는 여전히 무거우며(Fig. 1 참조) 다루는 것이 어렵다. 따라서 내부에 밀봉된 위험한 방사성물질이 누출되지 않도록 처분장에서 특수하게 제작된 전용 운송차량을 이용하여 조심스럽게 운송되어야 한다. Fig. 2는 심지층 처분장의 한 예를 보여준다. 또한 Fig. 3는 처분장내에서 고준위폐기물 처분용기를 처리하는 과정에 대한 개념도이다. Fig. 4는 특수 설계된 처분용기 운반차량들을 보여준다. 이들 그림들을 고찰하면 처분용기의 추락낙하 충격 사고를 기술하기 위해서는 많은 변수들이 필요함을 알 수 있다. 이러한 변수들은 위치, 속도, 가속도, 각속도, 각가속도, 그리고 관성모멘트 등이다. 즉 처분용기의 추락낙하 충격사고에 대한 동적해석모델은 단순히 처분용기의 단순 추락낙하만이 아

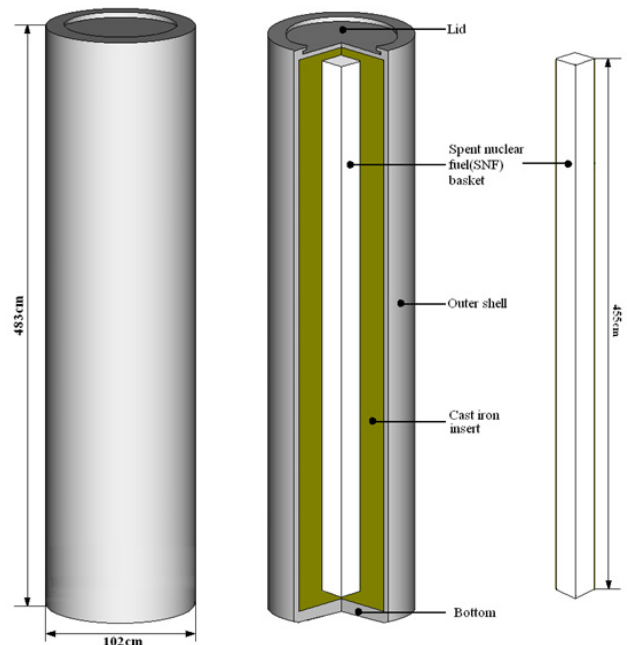


Fig. 1 Korean spent nuclear fuel(SNF) disposal canister (KDC: PWR SNF disposal canister)

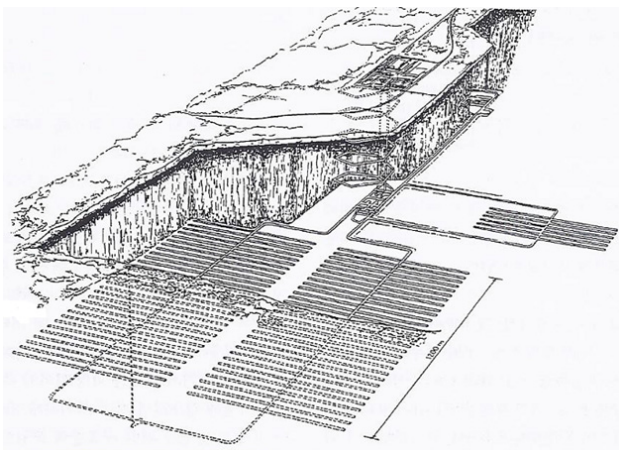


Fig. 2 Conceptual underground repository

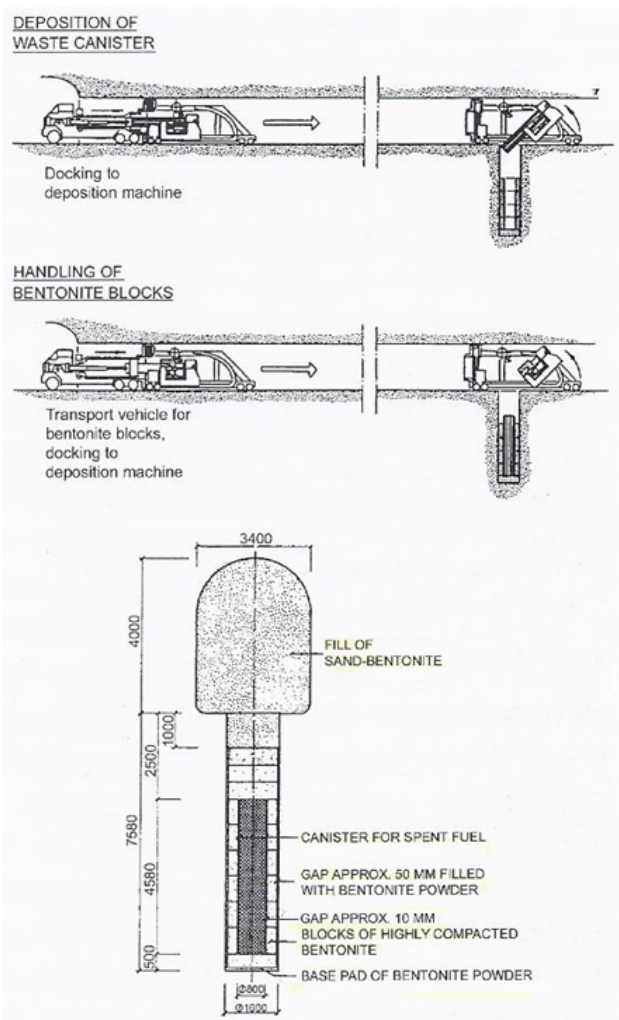
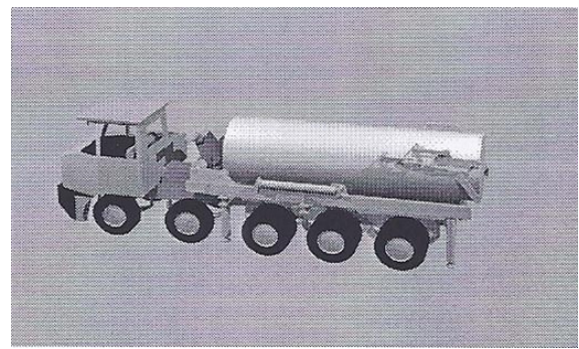
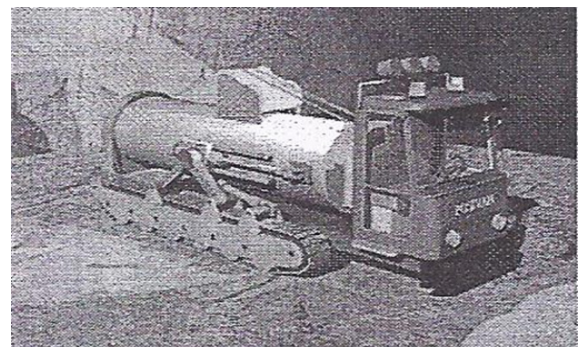


Fig. 3 Placement process of a SNF disposal canister into a repository deposition hole

닌 그 이상을 고려해야 함을 알 수 있다. 다시 말해 첫 번째 과정은 처분용기가 운반차량에 실려 운송되는 과정이며 그 다음 과정은 처분용기가 운반차량에서 추락낙하 하는 과정이고 최종적으로 처분용기가 지면과 강제 충돌하여 충격현상이



(a) Transport vehicle with tires



(b) Transport vehicle with caterpillars

Fig. 4 Repository transport vehicles for a SNF disposal canister

발생하는 과정이다. 이와 같은 관점에서 사고로 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 과정은 처분용기와 지면, 운송차량들을 강제로 취급하는 동적인 것으로 취급하는 것이 타당하다. 따라서 이전의 연구(Teper *et al.*, 1989; Miller, 1993)에서 고려하였던 난해한 소성변형이론은 본 연구에서는 전혀 고려하지 않고 그 대신 기구동역학해석 기법이 적용된다. 또한 이전의 연구에서 단순하게 원통형 용기로 가정하였던 처분용기도 실제 처분용기모델을 그대로 사용한다. 따라서 외곽 셀뿐만 아니라 내부의 고준위폐기물 다발도 그대로 처분용기 모델링 시 고려된다. 마지막으로 처분용기를 싣고 운반하는 운송차량도 해석모델링에 포함시킨다. 왜냐하면 처분용기의 추락낙하에 운반차량의 움직임도 영향을 미칠 거라 사료되기 때문이다.

3. 운반차량에서 처분용기가 사고로 추락낙하 하여 지면과 충돌 시의 충격 문제에 일반 충격이론의 적용

본 절에서는 이론적으로 유도한 사고로 운반차량에서 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 처분용기에 가해지는 충격력을 실제 처분용기에 적용하여 상용 컴퓨터 해석코드인 RecurDyn을 이용하여 구한 수치적 충격력 값과 비교 검토하는 문제를 다루고자 한다. 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시

충돌부분은 보통 한 개의 일점 혹은 일직선으로 여겨진다. 또한, 처분용기를 길이 L 인 일차원 원형단면으로 가정한다. 그러면 충격력에 대한 수학적 정해(Kwon, 2015)는 다음과 같이 된다. 전 충격량(total impact impulse)은 다음 식으로 구해진다.

$$\hat{F}(T) = \frac{(1+e)m V_z}{1+3(\cos^2\gamma + \mu\sin\gamma\cos\gamma)} \quad (1)$$

$$V_z \equiv V_0 + \frac{\omega_0 L}{2} \cos\gamma$$

여기서, e 는 반발계수이며 γ 는 충돌각도, μ 는 마찰계수 V_0 와 ω_0 는 충돌속도와 충돌회전각속도이다. 이 때 충격력(impulsive force)은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$F(t) \approx F_{\max} \sin\left(\frac{\pi V_z}{2.94\delta_z^*} t\right) \quad (2)$$

$$F_{\max} = 1.17 m^* \frac{3}{5} R^* \frac{1}{5} E^* \frac{2}{5} V_z^{\frac{6}{5}}$$

$$\delta_z^* = \left(\frac{15}{16}\right)^{\frac{2}{5}} m^* \frac{2}{5} R^* \frac{-1}{5} E^* \frac{-2}{5} V_z^{\frac{4}{5}}$$

또한 충돌시간 T 는 다음 식으로 주어진다.

$$T \approx 2.865 m^* \frac{2}{5} E^* \frac{-2}{5} R^* \frac{-1}{5} V_z^{\frac{-1}{5}} \quad (3)$$

$$R^* = R, \quad E^* = E / (1 - \nu^2)$$

E :탄성계수, ν = 포와송비

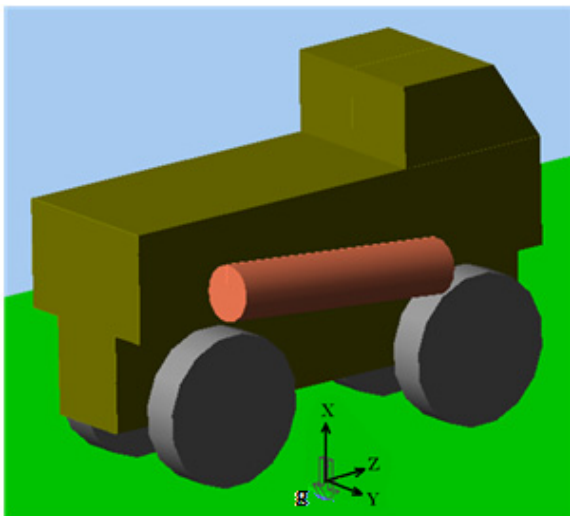


Fig. 5 Accidental drop and ground impact event for a SNF disposal canister during transport inside the repository and global coordinate system

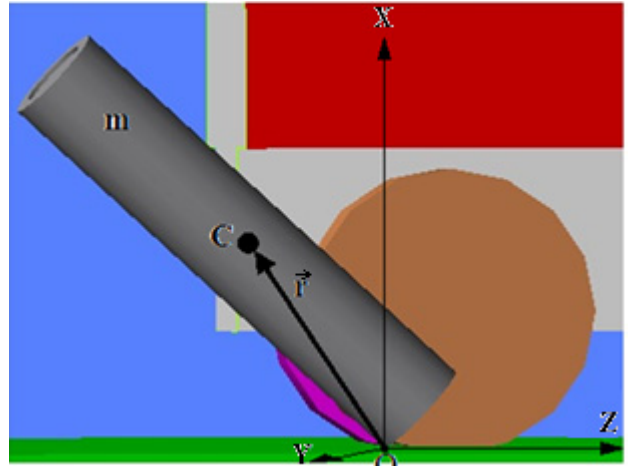


Fig. 6 Collision between the SNF disposal canister(KDC) and the ground. An inertial global coordinate system(X, Y, Z) is chosen for the analysis. C = the canister's mass center, m = the canister's mass and r = the mass center's position vector

$$m^* = \frac{m}{1+3(\cos^2\gamma + \mu\sin\gamma\cos\gamma)} \quad (4)$$

상기 유도한 추락낙하 하는 처분용기에 가해지는 충격력에 대한 수학적 정해의 효용성을 검증하기 위해서 상용 컴퓨터 해석 코드인 RecurDyn을 이용하여 Fig. 5와 Fig. 6과 같이 처분장에서 운반차량 위에 처분용기를 탑재하여 운송 시 사고로 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 것에 대한 컴퓨터 모의실험(computer experiment or simulation)을 수행한다. 그러나 상기 식을 Fig. 5와 Fig. 6의 컴퓨터 모의실험 값들과 비교하는 것은 몇 가지 문제가 있다. 왜냐하면 Fig. 5와 Fig. 6의 컴퓨터 모의실험으로부터 처분용기가 지면과 충돌 시의 충돌각도(γ)에 대한 정확한 정보를 직접 쉽게 알아내기가 어렵기 때문이다. 또한 매번 충돌 모의실험 시 충돌지점과 처분용기의 충돌자세가 다르기 때문에 Fig. 6에서 정의한 처분용기 무게중심(C)의 위치벡터 \vec{r} 의 좌표가 매번 처분용기의 추락위치에 따라서 변하게 된다. 그러나 처분용기가 지면과 충돌 시 지면에 고정된 절대 직각좌표계(X - Y - Z)의 축과 처분용기의 무게중심에 중심이 위치하고 처분용기에 고정 부착되어 처분용기와 함께 움직이는 직각좌표계(x - y - z : z 축은 처분용기 무게중심을 지나는 원형단면과 수직으로 처분용기의 상부를 향하며 x 와 y 축은 원형단면내에 위치한다)의 축사이의 각($\theta_{x_x}, \theta_{x_y}, \theta_{x_z}, \dots$)을 알면 다음과 같이 처분용기가 지면과 충돌 시 충돌각(γ)을 얻을 수 있다.

$$\gamma = 90^\circ - \theta_{x_z} \quad (5)$$

여기서, θ_{x_z} 는 충돌 시 X 축과 z 축이 이루는 각도이다. 이

각도는 RecurDyn 해석을 통하여 구할 수 있다. 한편 충돌 시 처분용기의 회전각속도 ω_0 는 충돌 시 절대 좌표계에 대한 처분용기의 회전각속도 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 와 다음의 관계가 있다.

$$\omega_0 = \omega_y \cos \alpha - \omega_z \sin \alpha, \alpha = (90^\circ - \theta_{yz}) / \cos \gamma \quad (6)$$

또 충돌 시의 추락속도 V_0 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$V_0 = -v_x \quad (7)$$

v_x 는 충돌 시 처분용기 무게중심의 수직방향(X 방향) 속도이다. 따라서 RecurDyn 해석을 통하여 절대좌표계에 대한 충돌 시 처분용기의 속도와 회전각속도 또 처분용기에 고정되어 처분용기와 함께 움직이는 직각좌표계의 축과 절대좌표계의 축 사이의 각($\theta_{x_x}, \theta_{x_y}, \theta_{x_z}, \dots$)을 알면 식 (5)~(7)을 통하여 처분용기가 지면과 충돌 시 충돌각도, 회전각속도, 충돌속도 등을 구할 수 있다. 이들을 식 (1)~(4)에 대입하면 전 충격량, 최대 충격력, 충돌 시간 등을 계산할 수 있다.

특히 충돌각도 γ 가 90° 이고 충돌 시 회전각속도가 0이며 초기 추락낙하 높이가 H 인 경우 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$\hat{F}(T) = (1+e)m\sqrt{2gH}, e = \sqrt{H'/H} \quad (8)$$

여기서, H' 은 충돌 후 처분용기가 첫 번째 튀어 오른 높이이다.

4. 기구동역학 수치해석

일반 충격이론을 적용하여 처분장에서 운반차량으로 부터 사고로 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 처분용기에 가해지는 충격력에 대한 수학적 정해(Kwon, 2015)인 식(1)~(4)를 이용하여 여러 가지 경우에 대한 처분용기에 가해지는 실제 충격량을 구하기 위해서는 충돌시 처분용기 무게중심의 위치, 속도, 처분용기의 회전 각속도, 반발계수, 처분용기 중심에 대한 관성텐서 값들을 알아야 한다. 단순한 추락낙하인 경우 식 (8)과 같이 간단히 충격량을 구할 수 있으나 운반차량에 실린 처분용기가 사고로 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 경우 문제는 간단하지 않다. 왜냐하면 추락 전 처분용기가 운반차량 위에서 굴림 운동을 하면서 움직일 수 있기 때문에 추락낙하는 경우 지면과 충돌 시 회전운동을 동반할 수 있기 때문이다. 특히 처분용기가 운반차량 위에서 굴림 운동을 하는 경우 처분용기 외곽 면과 운반차량 표면 사이의 마찰도 고려해야 한다. 이와 같은 처분용기의 움직임을 이론적으로 구하는 것은 난해하다. 가능한 방법은 컴퓨터를 이용한 수

치적 방법이다. 다행이도 기 수행한 연구(Kwon, 2013)를 통하여 컴퓨터를 이용한 동일한 수치적 연구가 상용 컴퓨터 해석 코드인 RecurDyn과 ADAMS를 이용하여 진행된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 기 수행한 연구를 활용하여 상업용 해석 코드인 RecurDyn을 이용하여 처분용기의 추락낙하 시 지면과의 충돌 해석을 수행한다. 자세한 해석 방법 및 과정은 기수행한 논문(Kwon, 2013)에 기술되어 있기 때문에 본 논문에서는 생략하고 계산 결과만을 기술한다.

RecurDyn을 이용하여 기구동역학 수치해석을 수행하는 경우 운반차량에서 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. 그러나 이 모든 경우의 수들에 대한 해석들을 수행할 필요는 없다. 왜냐하면 본 논문의 목적은 수치해석결과와 이론적 수학적 정해결과 값과의 비교검토에 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 운반차량의 바퀴와 지면과의 마찰계수 값을 입력값으로 설정 조정하여 최악의 경우를 고려한 수치해석을 수행한다. 다수(6개)의 약간 다른 마찰계수 값에 대하여만 해석을 수행한다. 계산결과는 Table 1~5에 요약되어 있다. Table 1~5의 계산에 사용된 처분용기의 질량은 $m=26,581.29\text{Kg}$, 처분용기의 길이는 $L=4.83\text{m}$, 탄성계수는 $E^*=12\text{GPa}$, 반경은 $R^*=0.51\text{m}$ 이다. 역시 충돌각도 (γ)가 90° 이고 충돌 시 회전 각속도가 0인 정면충돌인 경우에 대하여 기구동역학 수치해석을 수행한 결과와 이에 대한 이론적인 식 (8)으로 구한 결과가 Table 6에 표시되어 있다. 표에 나타난 바와 같이 수치적으로 구한 값들과 수학적 정해인 식 (1)~(4)으로 구한 값들이 잘 일치함을 알 수 있다. 또한

Table 1 Various numerical computer simulation cases according to the control of friction coefficients between carriage vehicle wheels and the ground(M_d, M_s :dynamic, static friction coefficients between the wheels and the ground, respectively, M : friction coefficient between the canister and the ground)

Simulation case	Input data for friction coefficients
Case 1	$M_d=0.7, M_s=0.8, M=0.4$ (first collision)
Case 2	$M_d=0.7, M_s=0.8, M=0.4$ (second collision)
Case 3	$M_d=0.02, M_s=0.03, M=0.4$ (first collision)
Case 4	$M_d=0.02, M_s=0.03, M=0.4$ (second collision)
Case 5	$M_d=0.002, M_s=0.003, M=0.0$ (first collision)
Case 6	$M_d=0.001, M_s=0.002, M=0.0$ (first collision)

Table 2 Numerically computed angle between the axes of the global coordinates($X-Y-Z$) and the axes of the coordinates($x-y-z$) fixed to the canister at the moment of collision for each simulation case

Simulation case	Angle between coordinate axes
Case 1	$\theta_{Xx}=9.90^\circ, \theta_{Xy}=92.43^\circ, \theta_{Xz}=99.596^\circ,$ $\theta_{Yx}=88.237^\circ, \theta_{Yy}=4.49^\circ, \theta_{Yz}=94.128^\circ,$ $\theta_{Zx}=80.256^\circ, \theta_{Zy}=86.227^\circ, \theta_{Zz}=10.462^\circ$
Case 2	$\theta_{Xx}=15.397^\circ, \theta_{Xy}=104.68^\circ, \theta_{Xz}=85.472^\circ,$ $\theta_{Yx}=74.974^\circ, \theta_{Yy}=15.636^\circ, \theta_{Yz}=94.228^\circ,$ $\theta_{Zx}=93.286^\circ, \theta_{Zy}=84.747^\circ, \theta_{Zz}=6.201^\circ$
Case 3	$\theta_{Xx}=23.797^\circ, \theta_{Xy}=70.324^\circ, \theta_{Xz}=77.151^\circ,$ $\theta_{Yx}=110.833^\circ, \theta_{Yy}=21.051^\circ, \theta_{Yz}=87.113^\circ,$ $\theta_{Zx}=100.987^\circ, \theta_{Zy}=97.19^\circ, \theta_{Zz}=13.18^\circ$
Case 4	$\theta_{Xx}=7.526^\circ, \theta_{Xy}=85.524^\circ, \theta_{Xz}=96.038^\circ,$ $\theta_{Yx}=94.180^\circ, \theta_{Yy}=5.135^\circ, \theta_{Yz}=87.022^\circ,$ $\theta_{Zx}=83.752^\circ, \theta_{Zy}=92.512^\circ, \theta_{Zz}=6.7376^\circ$
Case 5	$\theta_{Xx}=42.32^\circ, \theta_{Xy}=47.93^\circ, \theta_{Xz}=93.80^\circ,$ $\theta_{Yx}=132.27^\circ, \theta_{Yy}=42.32^\circ, \theta_{Yz}=91.68^\circ,$ $\theta_{Zx}=88.32^\circ, \theta_{Zy}=86.21^\circ, \theta_{Zz}=4.15^\circ$
Case 6	$\theta_{Xx}=16.686^\circ, \theta_{Xy}=77.561^\circ, \theta_{Xz}=100.944^\circ,$ $\theta_{Yx}=102.688^\circ, \theta_{Yy}=12.689^\circ, \theta_{Yz}=90.082^\circ,$ $\theta_{Zx}=79.34^\circ, \theta_{Zy}=87.53^\circ, \theta_{Zz}=10.94^\circ$

Ex) θ_{Xz} =angle between the inertial global coordinate X axis and the moving coordinate z axis

Table 3 Numerically computed angular velocity of the canister and velocity of the canister's mass center at the moment of collision for each simulation case in terms of the global reference coordinate($X-Y-Z$)

Simulation case	Angula velocity of the canister (rad/sec)	Velocity of the canister's mass center(m/sec)
Case 1	$\omega_x = 0.077815$ $\omega_y = -0.14972$ $\omega_z = 4.446205$	$v_x = -9.53117$ $v_y = 2.24686$ $v_z = 0.26059$
Case 2	$\omega_x = 1.374579$ $\omega_y = 5.304182$ $\omega_z = 4.321928$	$v_x = -4.03971$ $v_y = 2.44814$ $v_z = -2.15277$
Case 3	$\omega_x = -0.128819$ $\omega_y = 0.1376505$ $\omega_z = 4.2507894$	$v_x = -9.47934$ $v_y = 2.18501$ $v_z = 0.03431$
Case 4	$\omega_x = 0.463287$ $\omega_y = 5.374326$ $\omega_z = 4.145899$	$v_x = -3.96737$ $v_y = 2.32229$ $v_z = 2.34897$
Case 5	$\omega_x = 0.078855$ $\omega_y = -0.02617$ $\omega_z = 4.081476$	$v_x = -9.76005$ $v_y = 2.10823$ $v_z = 0.18076$
Case 6	$\omega_x = 0.048656$ $\omega_y = -0.13213$ $\omega_z = 4.411732$	$v_x = -9.54397$ $v_y = 2.22160$ $v_z = 0.26087$

예상한 대로 최고 충격력은 충격량에 비하여 매우 크며 충격 시 충돌시간은 매우 작은 0.01초 이내임을 알 수 있다. Table 5에서 보는 바와 같이 이론값들과 수치계산 값들이 대체로 일치하지만 경우에 따라 약간의 오차가 있음을 알

Table 4 Numerically computed collision angle(γ), collision angular velocity(ω_0), and collision velocity(V_0) at the moment of collision for each simulation case

Simulation case	γ (°)	α (°)	ω_0 (rad/sec)	V_0 (m/sec)
Case 1	-9.59606	-4.18712	0.175309	9.531174
Case 2	4.52771	-4.24182	5.609329	4.039715
Case 3	12.8491	2.96067	-0.082088	9.479342
Case 4	-6.03843	2.99445	5.150470	3.967367
Case 5	-3.79620	-1.67902	0.093426	9.760051
Case 6	-10.9447	-0.08359	-0.125690	9.543968

Table 5 Comparison between numerically and theoretically computed impact periods, impact impulses, peak values of the impulsive forces for each simulation case

Simulation case	Impact period T(sec)	Impact impulse \hat{F} (T) (KN-sec)	Peak value of impulsive force(MN)		
			F_{max}	Q_{max}	
Case 1	N	0.0095	158.409	33.817	13.527
	T	0.0067	142.200	35.575	14.230
Case 2	N	0.0064	251.362	75.898	30.359
	T	0.0058	228.837	66.519	26.608
Case 3	N	0.0100	163.673	34.470	13.788
	T	0.0065	120.061	30.839	12.335
Case 4	N	0.0064	235.980	95.116	38.046
	T	0.0060	226.098	63.274	25.310
Case 5	N	0.0098	136.163	26.647	0
	T	0.00651	133.147	34.274	0
Case 6	N	0.0076	143.273	32.721	0
	T	0.0067	126.299	31.707	0

N: numerically computed values,

T: theoretically computed values

F_{max} : peak value of the normal impulsive force

Q_{max} : peak value of the tangential(frictional) impulsive force $e=1$

Table 6 Impact impulse computed theoretically and numerically for a straight central impact simulation of an accidental drop and impact event for a SNF disposal canister(KDC)($e=1$)

Variables	Values
Impact impulse (N-sec)	Theoretical value : $\hat{F} = 526,287.6767$ Numerical value : $\hat{F} = 532,720.7036$ Difference(%) : 1.2

수 있다. 이는 이론식 (1)~(4)를 유도할 때 처분용기를 일차원 원형단면 보(beam)로 가정한 것에 기인하는 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 일반적인 충격이론으로 유도한 처분장에서 운송차량으로 처분용기 처분 시 추락낙하 사고로 지면과 충

돌하는 처분용기에 발생하는 충격력에 대한 수학적 정해를 실제 처분용기 추락낙하 사고에 적용하였다. 특히 기구동역학 전용 컴퓨터 해석코드인 RecurDyn를 이용하여 수치적 해석을 동시에 수행하여 수학적 정해로 구한 값과 비교하였다. 비교결과 서로 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 충격은 극히 짧은 시간에 발생하며 최대 충돌 충격력은 충돌 중 발생하는 충격량에 비하여 매우 크다는 사실을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2013학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

References

- IAEA(International Atomic Energy Agency) (1985) Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, Vienna, Austria.
- Jaeger, J. (1994) Analytical Solutions of Contact Impact Problems, *Appl. Mech. Rev.*, 47(2), pp.35~54.
- 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. (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. (2015) Analytical Closed Form Solution for the Impact Load of a Collision between Rigid Bodies and its Application to a Spent Nuclear Fuel Disposal Canister Accidentally Dropped and Impacted on the Ground: *Theory, Submitted to a Journal for Publication and under review.*
- 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.
- Miller, G.K. (1992) Calculation of Impact Loads for High Energy Drops of Cylindrical Containers, *International J. Impact Eng.*, 13(4), pp.511~526.
- Teper, W.W., Suavé, R.G. (1989) Simplified Method for Predicting Impact Loads of Solid-walled Transportation Packagings for Radioactive Materials, *J. Press. Vessel Tech.*, 111, pp.316~321.
- Zhong, Z.H., Mackerie, J. (1994) Contact-impact problems: A Review with Bibliography, *Appl. Mech. Rev.*, 47(2), pp.55~76.
- 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

본 논문은 강제간의 충돌에 의한 충격력에 대한 수학적 정해 및 고준위폐기물 처분용기의 지면 추락낙하사고 시의 충돌충격에의 응용 논문으로 강제간 충돌에 의해 발생하는 충격력 특히 고준위폐기물 처분용기의 지면 추락낙하 충격사고 시 처분용기에 가해지는 충격력을 구하는 기구동역학 수치해석 연구를 수행하였다. 이를 통하여 고준위폐기물 처분용기의 구조안전성 설계과정에서 요구되는 처분용기 처분 시 사고로 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 경우 처분용기에 가해지는 충격력을 수치적으로 구하였다. 수치해석 연구의 주된 내용은 기구동역학해석 상용 컴퓨터코드를 이용하여 처분장에서 운반차량으로 처분용기 운반중 사고로 추락낙하 하여 지면과의 충돌 시에 처분용기에 가해지는 충격력을 구하는 기술적인 방법에 관한 것이며 이를 토대로 지면과 충돌하는 처분용기에 발생하는 충격력을 구하는 문제를 수치적으로 다루었다. 이렇게 수치적으로 구한 충격력을 이론적으로 구한 값들과 비교하였다. 비교결과 이론값들과 잘 일치함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 고준위폐기물 처분용기, 기구동역학 수치해석, 구조안전성 설계, 추락낙하 충격사고, 충격력, 상용 컴퓨터코드