

사고로 지면에 추락낙하 충돌하는 고준위폐기물 처분용기에 발생하는 충격력

권 영 주*†

*홍익대학교 기계정보공학과

Impact Force Applied on the Spent Nuclear Fuel Disposal Canister that Accidentally Drops and Collides onto the Ground

Young Joo Kwon*†

*Dept. of Mechanical and Design Engineering, Hongik Univ.

(Received December 28, 2015 ; Revised March 30, 2016 ; Accepted April 5, 2016)

Key Words: Impact Force(충격력), Spent Nuclear Fuel Disposal Canister(고준위 폐기물 처분용기), Drop and Collision(추락낙하 충돌), Impact Theory(충격이론)

초록: 본 논문에서는 강체 간 충돌에 의해 발생하는 충격력을 얻는 수학적 방법이 이론적으로 연구되었다. 이 이론적 방법은 사고로 지면에 추락낙하 하는 고준위폐기물 처분용기에 가해지는 충격력을 구하는 데에 적용되었다. 이 연구로부터 고준위폐기물 처분용기의 구조 안전성 설계에 요구되는 충격력이 이론적으로 유도되었다. 이론연구의 주된 내용은 두 강체의 충돌 시 강체운동학과 운동방정식에 관한 것이다. 이를 토대로 두 물체 간 충돌 시 발생하는 충격력을 구하는 일반적인 충격이론이 개발되었다. 이 충격이론을 처분장에서 처분용기 운송 시 운반차량에서 사고로 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 처분용기에 발생하는 충격력을 구하는 문제에 적용하여 충격력에 대한 수학적 근사해를 이론적으로 구하였다. 동시에 컴퓨터코드를 이용한 수치해석을 수행하여 구한 수치해를 수학적 근사해와 비교하였다.

Abstract: In this paper, a mathematical methodology was theoretically studied to obtain the impact force caused by the collision between rigid bodies. This theoretical methodology was applied to compute the impact force applied on the spent nuclear fuel disposal canister that accidentally drops and collides onto the ground. From this study, the impact force required to ensure a structurally safe canister design was theoretically formulated. The main content of the theoretical study concerns the rigid body kinematics and equation of motion during collision between two rigid bodies. On the basis of this study, a general impact theory to compute the impact force caused by the collision between two bodies was developed. This general impact theory was applied to theoretically formulate the approximate mathematical solution of the impact force that affects the spent nuclear fuel disposal canister that accidentally falls to the ground. Simultaneously, a numerical analysis was performed using the computer code to compute the numerical solution of the impact force, and the numerical result was compared with the approximate mathematical solution.

- 기호설명 -

$\vec{\omega}$: 각속도
 $\vec{\delta\omega}$: 가상각속도
 $\vec{\alpha}$: 각가속도

e^i : 기저행렬
 \vec{r} : 위치벡터
 $\vec{\rho}$: 상대위치벡터
 \vec{v} : 속도
 $\vec{\delta v}$: 가상속도
 \vec{a} : 가속도

† Corresponding Author, yjkwon@hongik.ac.kr

$\vec{\delta a}$: 가상가속도
\vec{F}	: 힘
\vec{M}	: 토크
m	: 질량
J	: 관성텐서
δ_z	: 수직방향 접근거리
$\vec{F}(t)$: 충격력
$\hat{F}(t)$: 충격량
$v_{Rz}^O(t)$: 충돌물체의 수직방향 상대속도
$F(t)$: 수직 충격력 성분
$Q(t)$: 접선 충격력 성분
μ	: 마찰계수
γ	: 충돌각도
L	: 처분용기 길이(높이)
e	: 반발계수
T	: 충돌시간

1. 서 론

사용 후 핵연료(SNF: spent nuclear fuel)와 같은 고준위폐기물의 관리를 위하여 가장 가능하고 안전한 해결방법으로 현재 고려되고 있는 심지층 처분기술의 핵심기술 중 하나인 고준위폐기물 처분용기(SNF disposal canister)가 한국원자력연구원이 중심이 되어 개발되었다.^(1,2) 그러나 기 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)⁽³⁾에 의하면 고준위폐기물과 같은 방사성물질들을 담고 있는 처분용기는 운반 중 추락낙하 하여 지면 등과 충돌 시 가장 약한 부분이 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 구조해석을 수행하여 처분용기 추락낙하 시 지면 등과의 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 충격력이다. 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 구성부분들이 추락낙하 충돌 충격 시 처분용기에 가해지는 충격력을 충분히 견딜 수 있도록 처분용기가 설계되어야 한다. 이를 위해서는 추락낙하 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력을 정확하게 알아야 한다. 실제 처분용기 구조는 단순 원통형 구조형상이 아니고 복잡한 여러 구조형상⁽⁴⁾을 가지고 있을 뿐 아니라 처분용기가 처분장에서 사고로 추락낙하 하여 지면 등과 충돌하는 반응은 매우 동적이다. 이와 같은 고준위폐기물 처분용기의 추락낙하 문제 이외에도 핸드폰이나 컴퓨터 등 전자제품과 같은 현대의 수많은 제품개발에 있어 추락낙하 충돌문제⁽⁵⁾는 주요한 관심사항이고 제품설계 단계에서 매우 중요한 해석문제이다.⁽⁶⁾ 본 논문에서는 일반적인 기구동역학이론 및 접촉이론을 적용하여 처분용기가 추락낙하 하여 지면 등과 충돌하는 문제를 다룬다. 비록 물체가 충돌 시의 충격력에 의하여 충돌 후 심각한 변형이 발생하더라도 충돌하는 시간은 극히 매우 짧은 순간이고 이 순간 발생하는 변형은 충돌부위의 극히 작은 미소한 일부분에 국한되고 나머지 물체의 대부분은 변형이 발생하지 않기 때문에 충돌하는 매우 짧은 순간에는 충돌물체를 강체로 취급하는 것이 타당함이 알려져 있으며⁽⁷⁾ 충돌직후 충격에 의한 구조물의 변형반응은 이 충격력에 의한 충격반응으로 해석함이 옳음이 알려져 있다.⁽⁵⁾ 그러나 충돌 시 충돌 부위에 발생하는 국부적인 변형에 따라서 충격력이 결정되기 때문에 강체 충돌 시 충격이론과 함께 충돌에 의한 국부변형과 충격력과의 관계를 알아야 한다. 이에 대한 대표적인 이론은 Hertz의 접촉이론이다.^(8,9) 따라서 본 논문에서는 Hertz의 접촉이론(contact theory)을 강체 충격이론과 함께 적용하여 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력에 대한 수학적 이론해를 구하였다. 이와 같은 이론해는 학술적으로 접촉 및 충격역학(contact and impact mechanics)의 연구에 그 목적이 있으며 많은 연구자들에 의해 연구⁽⁸⁻¹²⁾되어오고 있다. 또한 이를 바탕으로 한 구조물의 균열(crack), 파괴(fracture)에 대한 연구에 공학적, 실용적 목적이 있다. 더 나아가 구조물의 강성(내구성)설계 및

최적설계(optimum design)가 최종목적이다. 본 논문에서는 이와 같은 수학적 이론해를 국내에서 개발 중인 고준위폐기물 처분용기의 추락낙하 충격 건전성을 IAEA규정에 따라 실제 형상을 고려하여 평가하는데 적용하고자 한다. 처분용기의 추락낙하 충격 건전성에 대한 연구는 국내외에서 이론적, 수치 해석적, 실험적 연구가 수행되어오고 있다. 이론적 연구에는 Teper와 Suavé,⁽¹³⁾ Miller⁽¹⁴⁾ 등의 연구가 있다. 운송 중 발생할 수 있는 추락낙하 사고 시 처분용기에 가해지는 충격력을 흡수하기 위하여 종종 처분용기에 충격 흡수체(impact limiter)를 부착하기도 한다. 이 경우 처분용기의 전체 중량 및 재료비등이 증가하여 제작단가가 고가가 되어 한 두 개의 운송 시에는 큰 부담이 없으나 현재 원자력발전소에 저장되어 있는 대량의 고준위폐기물을 처리 운송할 경우에는 엄청난 비용이 유발되는 문제가 있다. 그러나 이러한 충격 흡수체 없이 현재 설계된 고준위폐기물 처분용기에 대한 추락낙하 건전성 평가를 위한 실험은 현실적으로 어렵고 위험하기 때문에 추락낙하 건전성 평가를 위한 실험적 연구는 충격 흡수체를 부착한 처분용기에 대하여 수행^(15,16)되고 있는 실정이다. 수치 해석적 연구도 이와 같이 처분용기에 충격 흡수체를 부착한 구조형상에 대하여 수행^(17,18)되고 있다. 기 수행한 이론 연구^(13,14)의 주된 내용은 특정한 형상의 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 발생하는 국부변형을 완전소성변형으로 가정하고 이때 처분용기에 가해지는 충격력의 최대값만을 구하였다. 본 연구에서는 역시 특정한 형상인 원통형 처분용기가 운송차량에서 추락 낙하하여 지면과 충돌하는 문제를 다루고 있다. 그러나 지면과 충돌 시 처분용기에 발생하는 국부변형을 탄소성변형으로 가정하였으며 이때 처분용기에 가해지는 충격력을 충돌시간의 함수로 구하였다. 따라서 본 연구를 통하여 충돌 시 발생하는 충격력의 최대값 뿐만 아니라 충돌시간 중 변화하는 충격력의 동적 특성을 정확하게 파악할 수 있다.

2. 강체 충돌 시 충격이론

2.1 강체 운동학(rigid body kinematics)

한 물체의 각속도 $\vec{\omega}$ 는 Fig. 1에 표시된 바와 같이 공간에 고정된 기저행렬 \underline{e} 에 대한 물체에

고정 부착된 기저행렬 \underline{e}^2 의 관점에서 측정된 물체의 회전률로 정의된다. 강체가 회전할 때 회전각도는 여러 방법으로 표시될 수 있다. 따라서 각속도 $\vec{\omega}$ 도 측정되는 회전각도에 따라 여러 방법으로 표현될 수 있다. 물체에 고정 부착된 기저행렬 \underline{e}^2 관점에서 $\vec{\omega}$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\vec{\omega} = \omega_1 \underline{e}_1^2 + \omega_2 \underline{e}_2^2 + \omega_3 \underline{e}_3^2 \quad (1)$$

물체에 고정 부착된 기저행렬 \underline{e}^2 의 시간에 대한 미분은 다음 식으로 유도할 수 있다.

$$\dot{\underline{e}}_i^2 = \vec{\omega} \times \underline{e}_i^2, \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

식 (2)를 이용하면 임의벡터 $\vec{p} = p_1 \underline{e}_1^2 + p_2 \underline{e}_2^2 + p_3 \underline{e}_3^2$ 의 시간에 대한 미분은 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{\partial \vec{p}}{\partial t} + \vec{\omega} \times \vec{p}, \quad \frac{\partial \vec{p}}{\partial t} = \dot{p}_1 \underline{e}_1^2 + \dot{p}_2 \underline{e}_2^2 + \dot{p}_3 \underline{e}_3^2 \quad (3)$$

Fig. 1에서 \underline{e} 은 임의의 관성기저(inertial base)행렬이며 이 기저행렬에 대하여 물체계가 관찰되고 있다. 다른 기저행렬 \underline{e}^2 가 물체계의 물체 중 하나인 물체 i 에 고정부착된 중심 A 인 기저행렬이라 하자. 점 P 는 물체 i 위에서 움직이는 점이다. Fig. 1에 표시된 부호들을 이용하여 점 P 의

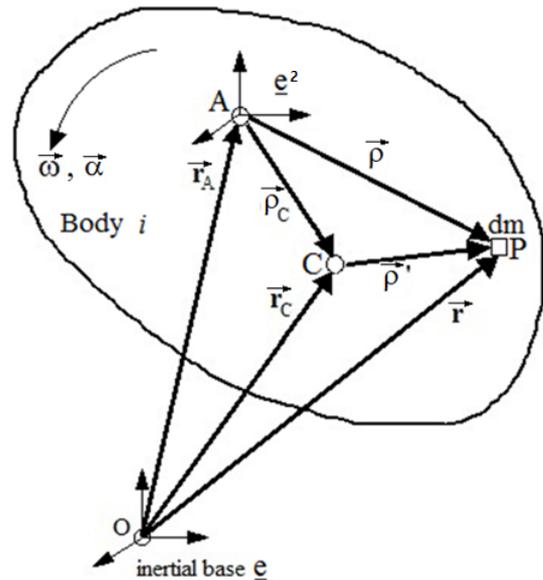


Fig. 1 Position vector of a mass dm on a rigid body i and bases. C: mass center

위치 \vec{r} 을 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\vec{r} = \vec{r}_A + \vec{\rho} = \vec{r}_A + \vec{\rho}_C + \vec{\rho}' = \vec{r}_C + \vec{\rho}' \quad (4)$$

식 (3)을 이용하면 점 A 가 물체의 질량중심 C 와 일치하고 물체 i 가 강체면 다음과 같이 점 P 의 위치, 속도, 가속도식을 얻을 수 있다.

$$\vec{r} = \vec{r}_C + \vec{\rho}, \quad \vec{v} = \vec{v}_C + \vec{\omega} \times \vec{\rho}, \quad \vec{a} = \vec{a}_C + \vec{\alpha} \times \vec{\rho} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{\rho}) \quad (5)$$

2.2 강체 운동방정식(rigid body equation of motion)

강체의 운동에 대한 방정식을 유도하는 방법에는 가상일의 원리(principle of virtual work)를 이용하여 유도하는 방법, 재귀적 방법(recursive method)을 이용하여 유도하는 방법 등이 있다. 이들 방법들을 이용하면 물체계에 대한 운동방정식을 유도할 때 여전히 라그랑주 승수(λ)를 식에 포함하고 있는 불편함이 있다. 그래서 이러한 불편함이 없이 운동방정식을 유도하기 위해서는 가상 일률의 원리(principle of virtual power)를 이용하여 운동방정식을 유도하는 것이 편리하다.⁽⁷⁾ 단일물체에 대한 가상 일률의 원리는 다음 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\int_m \delta \vec{v} \cdot (d\vec{F} - \vec{a} dm) = 0 \quad (6)$$

식 (6)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int_m (\delta \vec{a}_A + \delta \vec{\omega} \times \vec{\rho}) \cdot \left[(\vec{a}_A + \frac{d^2 \vec{\rho}}{dt^2}) dm - d\vec{F} \right] = 0 \quad (7)$$

식 (7)을 전개하여 정리하면 다음과 같은 단일물체에 대한 가상 일률의 원리(principle of virtual power) 식을 얻을 수 있다.

$$\delta v_A \cdot (m \vec{a}_C - \vec{F}) + \delta \vec{\omega} \cdot \left[m \vec{\rho}_C \times \vec{a}_A + J^A \cdot \vec{\alpha} + \vec{\omega} \times (J^A \cdot \vec{\omega}) - \vec{M}^A \right] = 0 \quad (8)$$

여기서 J^A 는 물체에 고정 부착된 기저행렬 e^2 의 중심 A 에 대한 물체의 관성텐서(inertia tensor)이

며 다음 식으로 정의된다.

$$J^A = \int_m ((\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) I - \vec{\rho} \vec{\rho}) dm, \quad I: \text{항등텐서} \quad (9)$$

만일 강체가 구속되어 있지 않으면 가상속도와 가상각속도는 서로 무관하기 때문에 식 (8)로부터 뉴턴의 운동방정식과 회전에 대한 오일러의 방정식을 얻는다. 만약에 점 A 가 물체의 질량중심 C 와 일치하면 식 (8)은 다음과 같이 된다.

$$\delta \vec{v}_C \cdot (m \vec{a}_C - \vec{F}) + \delta \vec{\omega} \cdot [J^C \cdot \vec{\alpha} + \vec{\omega} \times (J^C \cdot \vec{\omega}) - \vec{M}^C] = 0 \quad (10)$$

역시 만일 강체가 구속되어 있지 않으면 가상속도($\delta \vec{v}_C$)와 가상각속도($\delta \vec{\omega}$)는 서로 무관하기 때문에 식 (10)으로부터 단일 물체에 대한 뉴턴의 운동방정식과 회전에 대한 오일러의 방정식을 다음과 같이 얻는다.

$$m \vec{a}_C = \vec{F} \quad (11)$$

$$J^C \cdot \vec{\alpha} + \vec{\omega} \times (J^C \cdot \vec{\omega}) = \vec{M}^C \quad (12)$$

여기서 관성텐서 J^C 는 물체의 질량중심 C 에 대한 것이다. 본 논문에서 다루고 있는 고준위폐기물 처분용기가 추락낙하 하여 지면과의 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력을 이론적으로 구하기 위해서는 위에서 유도한 뉴턴의 운동방정식과 오일러의 운동방정식을 직접 적용하는 것이 편리하다.

2.3 강체의 충돌 시 충격이론

본 절에서는 Fig. 2와 같이 다 물체계 내 임의 형상의 두 강체 물체 1과 2가 충돌하여 충격력 $\vec{F}(t)$ 가 작용하는 경우를 고려한다. 충돌 물체의 질량중심 C 에 대해서 위치벡터가 $\vec{\rho}_O$ 인 충돌 점 O 에 충격력 $\vec{F}(t)$ 가 작용하면 그 결과 질량중심 C 에 대하여 $\vec{\rho} \times \vec{F}$ 의 토크가 작용하고 동시에 질량중심에 충격력 \vec{F} 가 작용한다. 이때 물체 1에 작용하는 충격력과 물체 2에 작용하는 충격력은 크기가 같고 방향이 반대이다. 또한 별도의 토크 \vec{M} 가 충돌물체에 작용할 수도 있다. Fig. 2에서 좌표계는 충돌 점 O 가 원점인 직각좌표계로 x-y

좌표 평면은 충돌 점에서 두 충돌물체에 접하는 접선 면을 형성하고 z축은 접선 면에 수직으로 물체 1쪽으로 향하고 있다. 따라서 충돌에 의하여 발생하는 충격력은 각 좌표성분으로 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\vec{F}(t) = F_x(t)\mathbf{i} + F_y(t)\mathbf{j} + F_z(t)\mathbf{k} \quad (13)$$

따라서 $F_x(t)$ 와 $F_y(t)$ 는 접선충격력, $F_z(t)$ 는 수직 충격력을 나타낸다. 그러면 충돌 시 충돌물체 각각의 충격을 지배하는 식을 다음과 같이 유도할 수 있다. 서론에서 언급했듯이 비록 물체가 충돌 시의 충격력에 의하여 충돌물체 1, 2에 충돌 후에 심각한 변형이 발생하더라도 충돌 시 충돌시간(impact period or impact time; T)은 극히 매우 짧은 순간($T \approx 0$)이고 이 순간 발생하는 변형은 충돌부위의 극히 작은 일부분에 국한 되고 이 미소한 국소 부위 이외 나머지 물체의 대부분은 변형이 아직 발생하지 않기 때문에 충돌 시 극히 짧은 충돌시간 중에 충돌물체를 강체로 취급하는 것이 타당하다.^(5,6,7) 따라서 충돌 중 충돌물체 내 임의 점의 위치변화 $\vec{\rho}$ 는 일정하다, 즉 $d\vec{\rho}/dt = 0$ 이다. 단지 충돌 중에 충돌물체의 속도와 각속도만 충격력에 의하여 급격히 변하게 된다. 따라서 충돌 점 O의 위치, 속도, 가속도는 각각의 충돌물체 1, 2에 대하여 식 (5)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

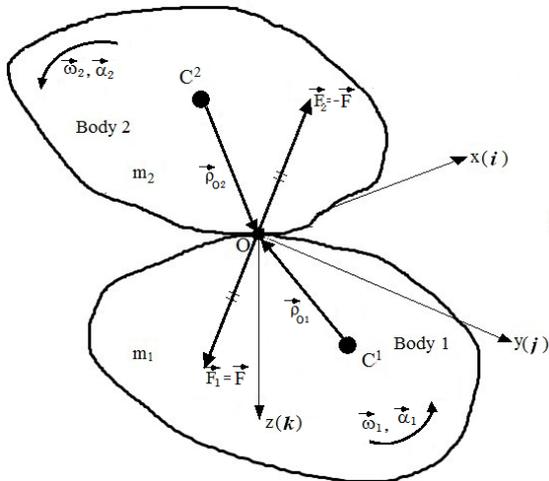


Fig. 2 Collision between two moving bodies with arbitrary geometries and a coordinate system where $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ are orthonormal unit vectors(C: mass center)

$$\begin{aligned} \vec{r}_{O1} &= \vec{r}_{C1} + \vec{\rho}_{O1}, \quad \vec{v}_{O1} = \vec{v}_{C1} + \vec{\omega}_1 \times \vec{\rho}_{O1}, \\ \vec{a}_{O1} &= \vec{a}_{C1} + \vec{\alpha}_1 \times \vec{\rho}_{O1} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_{O2} &= \vec{r}_{C2} + \vec{\rho}_{O2}, \quad \vec{v}_{O2} = \vec{v}_{C2} + \vec{\omega}_2 \times \vec{\rho}_{O2}, \\ \vec{a}_{O2} &= \vec{a}_{C2} + \vec{\alpha}_2 \times \vec{\rho}_{O2} \end{aligned} \quad (15)$$

또한 각 물체에 대한 뉴턴의 운동방정식 (11)은 다음과 같이 된다.

$$\vec{a}_{C1} = \frac{\vec{F}(t)}{m_1}, \quad \vec{a}_{C2} = -\frac{\vec{F}(t)}{m_2} \quad (0 \leq t \leq T) \quad (16)$$

오일러의 운동방정식 (12)도 각 물체에 대하여 다음과 같이 된다.

$$J_1^C \cdot \vec{\alpha}_1 + \vec{\omega}_1 \times (J_1^C \cdot \vec{\omega}_1) = \vec{M}_1^C = \vec{\rho}_{O1} \times \vec{F}(t) \quad (17)$$

$$J_2^C \cdot \vec{\alpha}_2 + \vec{\omega}_2 \times (J_2^C \cdot \vec{\omega}_2) = \vec{M}_2^C = -\vec{\rho}_{O2} \times \vec{F}(t) \quad (18)$$

식 (16)~(18)을 매우 작은 시간 구간 $t(0 \leq t \leq T)$ 에 대하여 적분한 후 $t \rightarrow 0$ 인 극한을 취하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$m_1\{\vec{v}_{C1}(t) - \vec{v}_{C1}(0)\} = \hat{F}(t) = -m_2\{\vec{v}_{C2}(t) - \vec{v}_{C2}(0)\} \quad (19)$$

$$\text{혹은 } m_1\vec{v}_{C1}(t) + m_2\vec{v}_{C2}(t) = m_1\vec{v}_{C1}(0) + m_2\vec{v}_{C2}(0) \quad (20)$$

$$J_1^C \cdot \vec{\omega}_1(t) - \vec{\rho}_{O1} \times m_1\vec{v}_{C1}(t) = J_1^C \cdot \vec{\omega}_1(0) - \vec{\rho}_{O1} \times m_1\vec{v}_{C1}(0) \quad (21)$$

$$J_2^C \cdot \vec{\omega}_2(t) - \vec{\rho}_{O2} \times m_2\vec{v}_{C2}(t) = J_2^C \cdot \vec{\omega}_2(0) - \vec{\rho}_{O2} \times m_2\vec{v}_{C2}(0) \quad (22)$$

$$\hat{F}(t) \equiv \lim_{t \rightarrow 0} \int_0^t F(t) dt = \hat{F}_x \mathbf{i} + \hat{F}_y \mathbf{j} + \hat{F}_z \mathbf{k} : \text{충격량} \quad (23)$$

한편 충돌 시 두 충돌물체 사이에 마찰이 존재하면 식 (13)의 접선충격력 $F_x(t)$ 와 $F_y(t)$ 는 수직 충격력 $F_z(t)$ 와 다음과 같은 마찰조건(friction condition)식을 만족해야 한다.

$$F_x(t) = \mu_x F_z(t), \quad F_y(t) = \mu_y F_z(t), \quad \mu_x, \mu_y : \text{마찰계수} \quad (24)$$

혹은 식 (24)를 역시 매우 작은 시간 구간 $t(0 \leq t \leq T)$ 에 대하여 적분한 후 $t \rightarrow 0$ 인 극한을 취하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\hat{F}_x(t) = \mu_x \hat{F}_z(t), \hat{F}_y(t) = \mu_y \hat{F}_z(t) : \text{충격량} \quad (25)$$

만약에 충돌 시 충격에 의하여 발생하는 국부변형이 탄소성변형이면 식 (25)에 추가하여 다음과 같은 반발(튀김)조건(rebound condition)을 고려할 수 있다.

$$\frac{v_{Rz}^O(T)}{v_{Rz}^O(0)} = -e, 0 \leq e \leq 1, e : \text{반발계수} \quad (26)$$

여기서 $v_{Rz}^O(t)$ 는 충돌 점 O에서의 두 충돌 물체의 수직방향(z축 방향)의 상대속도이다. 식 (14)~(18) 혹은 식 (19)~(26)을 풀면 충돌 중 충돌물체들의 속도, 가속도, 각속도, 각가속도들을 충격력 $\vec{F}(t)$ 의 함수로 구할 수 있다. 그러나 충격력 $\vec{F}(t)$ 는 충돌 시 발생하는 국부변형에 따라서 변하기 때문에 충격력은 국부변형을 고려하여야 명확히 구할 수 있다. 그러나 충돌 시 발생하는 국부변형이 탄소성변형이면 반발조건 (26)을 이용하여 전 충격량(total impulse) $\hat{F}(T)$ 을 충격력을 구하지 않고도 구할 수 있다. 만약에 수직 충격력 $F_z(t)$ 를 알면 접선충격력 $F_x(t)$ 와 $F_y(t)$ 는 마찰조건 (24)로부터 구할 수 있다. 따라서 수직방향 충격력 $F_z(t)$ 을 알면 전체 충격력 $\vec{F}(t)$ 을 구할 수 있다. 일반적으로 수직방향 충격력 $F_z(t)$ 는 뉴턴의 운동법칙으로부터 다음 식을 만족한다.

$$a_{Cz1} = \frac{dv_{Cz1}}{dt} = \frac{F_z(t)}{m_1}, a_{Cz2} = \frac{dv_{Cz2}}{dt} = -\frac{F_z(t)}{m_2} \quad (27)$$

혹은

$$a_{Cz2} - a_{Cz1} = \frac{d}{dt}(v_{Cz2} - v_{Cz1}) = -\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} F_z(t) \quad (28)$$

한편 충돌 점 O에서 발생하는 두 충돌물체의 수직 변형을 각각 δ_{z1} 과 δ_{z2} 라고 하면 두 충돌 물체의 수직방향 접근거리 δ_z 는 다음 식으로 주어진다.

$$\delta_z = \delta_{z2} - \delta_{z1} \quad (29)$$

따라서 두 물체의 접근가속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{d^2 \delta_z}{dt^2} = a_{Oz2} - a_{Oz1} \quad (30)$$

여기서 두 충돌 물체의 접근가속도는 식 (14)~식 (16)으로부터 구할 수 있다. 따라서 식 (14), (15), (16), (28), (30)을 이용하면 수직 충격력 $F_z(t)$ 와 접근거리 δ_z 의 관계식을 유도할 수 있다. 만약에 $F_z(t)$ 와 δ_z 의 관계를 알면 이 유도된 식으로부터 법선방향 충격력과 수직방향 접근거리인 $F_z(t)$ 과 δ_z 를 구할 수 있다.

3. 사고로 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 고준위폐기물 처분용기에 가해지는 충격력에 대한 수학적 이론해

본 절에서는 앞 절에서 유도한 강체충돌 시의 충격이론을 고준위폐기물 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력에 대한 수학적 이론해를 구하는 문제에 적용하기로 한다.

3.1 처분용기 추락낙하 충돌·충격 문제의 구성

처분장에서 운반차량에 고준위폐기물 처분용기를 운반하는 중에 사고에 의하여 처분용기가 지면으로 추락낙하 하는 경우 처분용기가 지면과의 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력을 구하는 문제를 생각한다. 이러한 문제의 목적은 지면과의 충돌 시 충격력에 의하여 처분용기가 파괴되지 않도록 처분용기의 강건 설계에 요구되는 충격력을 구하는 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 충격력을 엄밀하게 구하기 위해서는 운반차량과 처분용기의 운동을 모두 고려하여 삼차원 해석을 수행하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 삼차원 해석은 이론적 수학적 방법으로는 매우 난해하다. Fig. 4는 기 설계된 고준위폐기물 처분용기를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 처분용기는 내부에 보호되고 있는 4개의 정사각형 단면의 폐기물 다발을 제외하면 원형단면의 긴 원통형 구조로 되어 있다. 등가질량(m), 길이(L), 반경(R), 그리고 관성모멘트(J_{yy})를 사용하면 단순 원통형 구조로 근사해도 큰 문제가 없다고 사료된다. 따라서 본 연구에서는 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 고준위폐기물 처분용기를 일차원 원형 균일 단면 보(prismatic

beam)로 가정하여 앞 절에서 유도한 충격이론을 적용하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력에 대한 수학적 이론해를 구하기로 한다. 이를 위하여 Fig. 5와 같이 반경 R 길이 L 의 원형 균일단면보가 추락낙하 하여 지면과 $\gamma(0^\circ < \gamma \leq 90^\circ)$ 의 각도로 충돌하는 문제를 생각한다. Fig. 5에서 x - y - z 는 충돌 점 O 가 원점인 지면에 고정된 직각좌표계이고(Fig. 2참조) x_2 - y_2 - z_2 는 원점이 원형 균일 단면 보의 무게중심 C 이고 원형 균일 단면 보에 고정된 직각좌표계이다. 이때 처분용기가 지면과 충돌하는 충돌속도는 수직방향(z 축 방향)으로 V_0 , 수평방향(x 축 방향)으로 U_0 이다. 이들 값들은 처분용기의 추락낙하 높이 등 추락낙하에 대한 초기조건을 알면 에너지 보존의 법칙과 운동량 보존의 법칙으로부터 구할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이들 값들은 이미 알고 있는 충돌 시 초기조건으로 가정한다. 또 충돌 시 처분용기와 지면과의 마찰계수는 μ 로 가정한다. 또한 원형 균일 단면 보를 길이가 짧은 유한한 길이의 보로 가정하는 경우 보를 삼차원으로 취급해야하기 때문에 앞서 언급한 바와 같이 이 경우 수학적 이론해를 구하는 것은 매우 어렵다. 해석대상인 기 설계된 고준위폐기물 처분용기의 길이(L)가 원형단면의 반경(R)에 비하여 크기 때문에 ($L=483\text{cm}$, $R=51\text{cm}$) 본 논문에서는 원형단면 보를 길이가 길고 단면이 원형으로 일정한 일차원 균일 단면 보로 가정하여 수학적 근사해를 구한다. 이 경우 추락낙하 문제는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 2차원 문제로 취급할 수 있다. 충돌 각 γ 는 본 논문에서는 0° 보다 큰 값을 갖는다고 가정하며 그 최대값은 90° 인데 충돌 각이 90° 인 경우

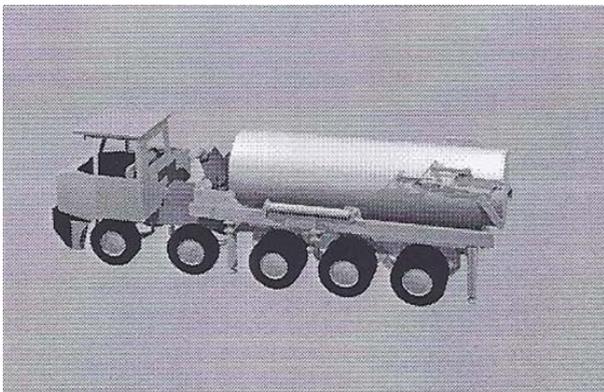


Fig. 3 Transport vehicles carrying SNF(spent nuclear fuel) disposal canister in the repository

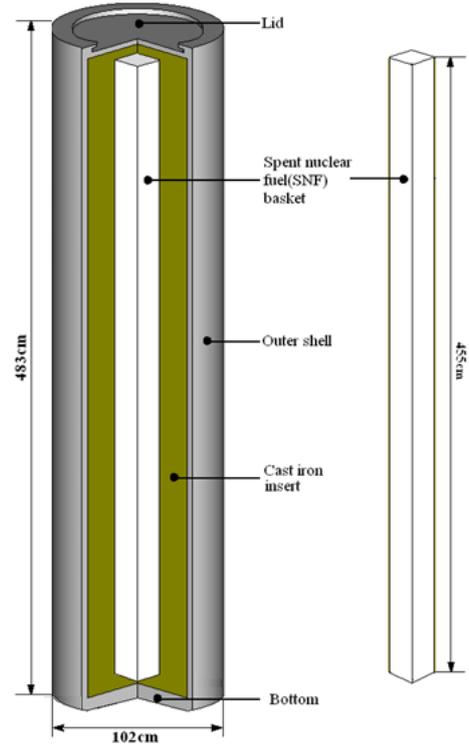


Fig. 4 Korean Spent Nuclear Fuel Disposal Canister (KDC: PWR SNF disposal canister)

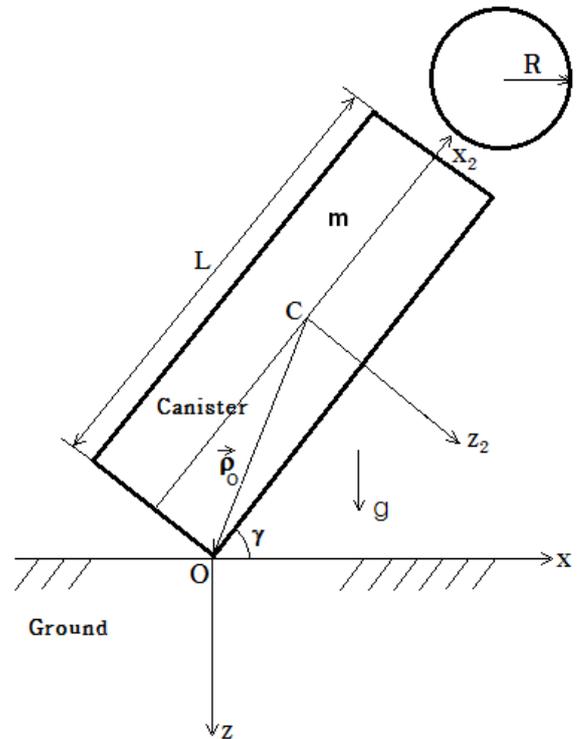


Fig. 5 Sketch of the SNF disposal canister as a cylindrical prismatic beam that accidentally drops and collides onto the ground

는 처분용기가 지면과 정면충돌하는 경우로 처분용기의 윗면 혹은 밑면이 지면과 충돌하거나 옆면이 일자형으로 지면과 충돌하는 경우로 사료된다. 이 경우 처분용기는 질량 m 인 한 개의 입자로 지면과 정면충돌하는 것과 동일한 것으로 취급될 수 있다.

3.2 처분용기가 받는 충격력에 대한 수학적 근사해

2절에서 유도된 충격에 대한 일반이론인 충격이론을 Fig. 5의 고준위폐기물 처분용기의 추락낙하 충돌문제에 적용하기로 한다. 지면(ground)을 물체 1, 처분용기를 물체 2로 한다. 그러면 지면은 충돌지점에서만 충돌 시 약간의 국부 변형이 발생하고 충돌 전후에 걸쳐 전혀 변화가 없다고 가정할 수 있다. 또한 지면의 질량은 처분용기의 질량보다 무한히 크기 때문에 지면의 질량은 무한대, 즉 $m_1 = \infty$ 가 된다. 따라서 물체 1(지면)에 대하여 다음과 같은 값들을 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned} m_1 = \infty, \rho_{Ox1} = \rho_{Oy1} = 0, \rho_{Oz1} = \infty, v_{Ox1} = v_{Oy1} = v_{Oz1} = 0, \\ \omega_{x1} = \omega_{y1} = \omega_{z1} = 0, a_{x1} = a_{y1} = a_{z1} = 0, \alpha_{x1} = \alpha_{y1} = \alpha_{z1} = 0 \\ F_{x1} \equiv Q(t) \neq 0, F_{y1} = 0, F_{z1} \equiv F(t) \neq 0 \end{aligned} \quad (31)$$

여기서 $F(t)$ 는 충돌 시 지면에 가해지는 수직 충격력(또는 반대방향으로 처분용기에 가해지는 수직 충격력)이고 $Q(t)$ 는 충돌 시 처분용기와 지면의 마찰에 의해 발생하는 접선충격력이다. 일반적으로 접선충격력 $Q(t)$ 는 식 (24)로부터 다음과 같이 마찰조건을 만족한다.

$$Q(t) = \mu F(t), \quad \mu: \text{마찰계수} \quad (32)$$

이들을 식 (16)~(18)에 적용하면 이들은 모두 식 (16)~(18)을 만족함을 알 수 있다. 다음에 물체 2인 처분용기에 대하여서는 처분용기의 길이(L)이 반경(R)에 비하여 매우 크기 때문에 $R/L \approx 0$ 이라는 가정 하에 다음과 같은 값들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} m_2 = m, \rho_{Ox2} = -\frac{L}{2} \cos \gamma, \rho_{Oy2} = 0, \rho_{Oz2} = \frac{L}{2} \sin \gamma, \\ \omega_{x2} = \omega_{z2} = 0, \omega_{y2} = \omega(t) \neq 0, \alpha_{x2} = \alpha_{z2} = 0, \alpha_{y2} = \alpha(t) \neq 0, \\ v_{x2}(0) = U_0, v_{y2}(0) = 0, v_{z2}(0) = V_0, \omega(0) = \omega_0 \\ a_{x2} = a_{y2} = 0, a_{z2} = a(t), F_{x2} = -Q(t), F_{y2} = 0, \end{aligned}$$

$$F_{z2} = -F(t), \quad J_{yy2}^C = \frac{1}{12} mL^2 \quad (33)$$

여기서 U_0, V_0, ω_0 는 충돌속도 및 충돌각속도이다. 이들을 식 (14)~(18)에 적용하면 다음 식들을 얻을 수 있다.

$$a_{Cx2} = -\mu \frac{F(t)}{m}, \quad a_{Cy2} = 0, \quad a_{Cz2} = -\frac{F(t)}{m} \quad (34)$$

$$\alpha(t) = -\frac{6F(t)}{mL} (\cos \gamma + \mu \sin \gamma) \quad (35)$$

식 (34)와 (35)를 이용하면 식 (15)로부터 충돌 점에서의 가속도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} a_{Ox2}(t) &= -\frac{F(t)}{m} \{3 \sin \gamma \cos \gamma + \mu(1 + 3 \sin^2 \gamma)\}, \\ a_{Oy2}(t) &= 0, \\ a_{Oz2}(t) &= -\frac{F(t)}{m} (1 + 3 \cos^2 \gamma + 3 \mu \sin \gamma \cos \gamma) \end{aligned} \quad (36)$$

식 (35)를 시간에 대하여 적분하면 충돌중 처분용기의 회전 각속도 $\omega(t)$ 를 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$\omega(t) = -\frac{6\hat{F}(t)}{mL} (\cos \gamma + \mu \sin \gamma) + \omega_0 \quad (37)$$

또한 식 (36)으로부터 충돌 점의 수직속도를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$v_{Oz2}(t) = V_0 + \frac{\omega_0 L}{2} \cos \gamma - \frac{\hat{F}(t)}{m} \{1 + 3(\cos^2 \gamma + \mu \sin \gamma \cos \gamma)\} \quad (38)$$

만약에 추락낙하 충돌 시 처분용기의 충돌 점에 발생하는 국부변형이 탄소성변형이면, 반발조건 (26)과 식 (38)로부터 총 충격량(total impulse) $\hat{F}(T)$ 을 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\hat{F}(T) = \frac{(1+e)m(V_0 + \frac{\omega_0 L}{2} \cos \gamma)}{1 + 3(\cos^2 \gamma + \mu \sin \gamma \cos \gamma)} \quad (39)$$

비록 탄소성 충격변형에 대하여 총 충격량을 식 (39)로 구할 수 있더라도 충돌 시 충격력 $F(t)$ 는 강체 충돌해석 만으로는 여전히 구할 수 없다.

한편 충돌 점에서 지면의 수직속도는 0임을 고려하면 식 (36)을 이용하여 식 (30)으로 주어진 접근가속도를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{d^2\delta_z}{dt^2} = -\frac{F(t)}{m^*}, m^* \equiv \frac{m}{1+3(\cos^2\gamma + \mu\sin\gamma\cos\gamma)} \quad (40)$$

상기 식에서 충격력 $F(t)$ 와 접근거리 $\delta_z(t)$ 의 관계를 알면 식 (40)을 풀어서 충격력 $F(t)$ 를 구할 수 있다. 한편 Fig. 4에 보인 바와 같이 고준위폐기물 처분용기 외곽 셸은 구리로 되어 있으며 외곽 셸 내부에 주철 삽입물이 내부 고준위폐기물 다발을 감싸 밀폐 보호하고 있다. 따라서 처분용기는 전체가 금속으로 되어 있다고 볼 수 있다. 그런데 외력에 의하여 대부분의 금속구조물에는 탄소성변형이 발생한다. 실제 처분장에서 고준위폐기물이 운송차량에서 수송 중 발생하는 추락낙하하는 처분용기가 지면에 충돌하는 속도가 그리 크지 않다. 왜냐하면 낙하높이가 3~4m에 불과하기 때문이다. 따라서 이런 경우 충돌 시 충격력에 의하여 처분용기의 충돌 점에 발생하는 국부 변형은 탄소성변형으로 취급할 수 있다. 이런 경우 Hertz의 접촉이론(contact theory)에 의하여 수직 충격력 $F(t)$ 와 접근거리 $\delta_z(t)$ 의 관계는 다음의 비선형식으로 주어짐이 알려져 있다.⁽⁸⁾

$$F(t) = K\delta_z(t)^{\frac{3}{2}}, K \equiv \frac{4}{3}R^{*\frac{1}{2}}E^* \quad (41)$$

여기서

$$R^* \equiv \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)^{-1}, E^* \equiv \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)^{-1} \quad (42)$$

R_1 과 R_2 는 두 충돌물체의 충돌 점에서 접촉하는 충돌면의 곡률반경이고 E_1, E_2 는 두 충돌물체의 충돌 점에서의 탄성계수, ν_1, ν_2 는 두 충돌물체의 푸와송비이다. 식 (41)을 식 (40)에 대입하고 접근거리 $\delta_z(t)$ 에 대한 다음의 초기조건을 이용하면 접근거리 $\delta_z(t)$ 에 대한 수학적 이론해를 구할 수 있다.

$$\delta_z(0) = 0, \frac{d\delta_z}{dt}(0) = V_0 + \frac{\omega_0}{2}L\cos\gamma \equiv V_z \quad (43)$$

식 (40) 및 초기조건 (43)을 만족하는 $\delta_z(t)$ 에 대

한 수학적 이론해를 구하는 방법은 매우 복잡하며 난해한 특이적분(improper integral)을 풀어야 되는데 Hunter⁽¹⁰⁾가 수치적으로 제시한 방법을 이용하면 본 논문에서 취급하는 처분용기에 대하여 수학적 이론해를 다음과 같이 근사적으로 얻을 수 있다.

$$\delta_z(t) = \delta_z^* \sin\left(\frac{\pi V_z}{2.94\delta_z^*}t\right), \delta_z^* \equiv \left(\frac{15}{16}\right)^{\frac{2}{5}} m^{*\frac{2}{5}} R^{*\frac{-1}{5}} E^{*\frac{-2}{5}} V_z^{\frac{4}{5}} \quad (44)$$

이를 식 (40)에 대입하면 수직 충격력 $F(t)$ 에 대한 수학적 이론해는 다음과 같이 구해진다.

$$F(t) = F_{\max} \sin\left(\frac{\pi V_z}{2.94\delta_z^*}t\right), F_{\max} \equiv 1.17 m^{*\frac{3}{5}} R^{*\frac{1}{5}} E^{*\frac{2}{5}} V_z^{\frac{6}{5}} \quad (45)$$

또한 이때 충돌시간(impact period) T 는 다음 식으로 구해진다.

$$T = 2.94 \frac{\delta_z^*}{V_z} = 2.865 m^{*\frac{2}{5}} E^{*\frac{-2}{5}} R^{*\frac{-1}{5}} V_z^{\frac{-1}{5}} \quad (46)$$

식 (45)로 구한 충격력이 본 논문에서 얻고자 하는 수학적 이론해이다. 이는 처분용기를 일차원 원형 단면의 균일 단면 보(prismatic beam)로 가정했기 때문에 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 수학적 근사해로 볼 수 있다. 접선 충격력 $Q(t)$ 는 식 (45)와 식 (32)를 이용하면 구할 수 있다. Hertz의 접촉이론을 이용하여 본 논문에서 구한 수학적 근사 이론해인 (44)~(46)의 실험적 타당성은 Crook⁽¹⁹⁾의 연구를 통하여 확인할 수 있다. Crook⁽¹⁹⁾의 연구는 비록 충돌하는 두 물체의 구조형상은 본 논문과는 다르지만 완전 탄성체인 두 구리원통의 충돌 실험을 통하여 구한 실험값과 Hertz의 접촉이론을 이용하여 구한 이론값이 잘 일치함을 Table 1 및 Fig. 6과 같이 보여주고 있다. 물론 두 충돌물체가 탄소성체가 아닌 탄소성 및 점탄성(viscoelasticity)을 갖는 물체인 경우 Hertz의 접촉 모델을 접근속도($\dot{\delta}_z$)를 고려하여 수정한 좀 더 일반적인 모델⁽²⁰⁾을 이용하여 충격력을 구할 수 있다. Calvit⁽²¹⁾은 이와 같은 점탄성을 고려한 접촉

Table 1 Comparison between the experimental value and theoretical value for the impact between 1 in. diameter copper cylinders at 10 cm/sec velocity of approach^(11,19)

	Time (μsec)	Experimental value	Theoretical value
Impact force (LB)	0.0	0.0	0.0
	14.2857	4.95652	4.17391
	26.7857	9.13043	8.0
	37.5	14.4248	12.65487
	50.892857	20.35088	20.35088
	65.17857	28.42105	28.42105
	86.607142	34.69565	35.73913
	108.84956	38.08696	39.39130
	120.35398	39.21739	39.91304
	142.47788	37.65217	39.21739
	161.9469	34.69565	36.60870
	189.38053	26.92982	29.12281
	214.91228	19.02655	21.22807
	242.10526	12.65487	14.77876
	277.19281	6.173913	7.739130
	299.12281	2.782609	4.521739
312.42857	0.695652	1.565217	
350	0.0	0.0	

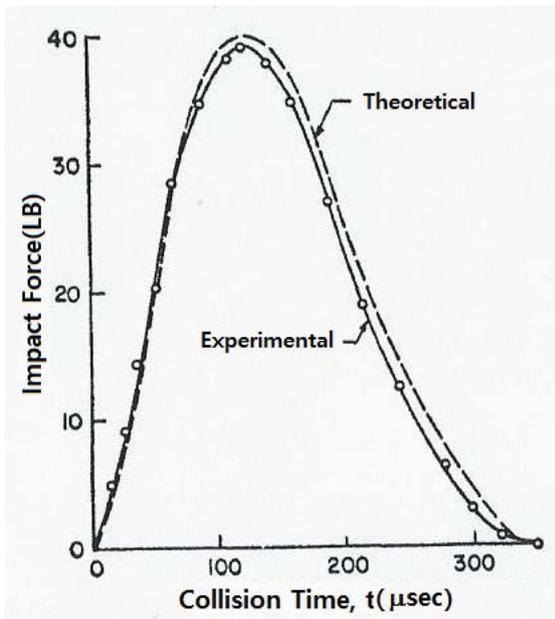
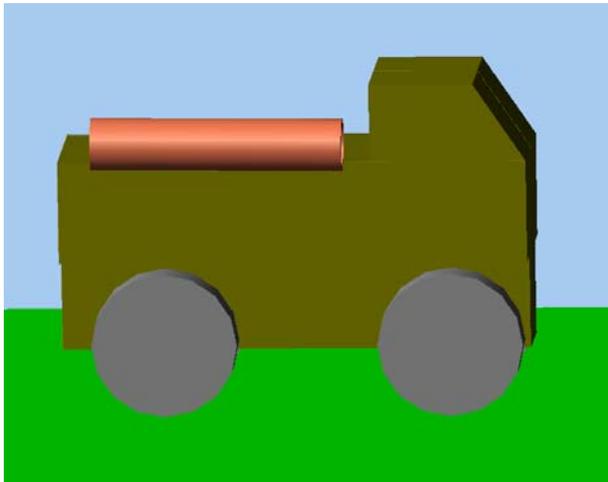


Fig. 6 Impact force-time curve for the impact of two 1-in-diameter crossed copper cylinders at an collision initial velocity 10 cm/sec^(11,19)

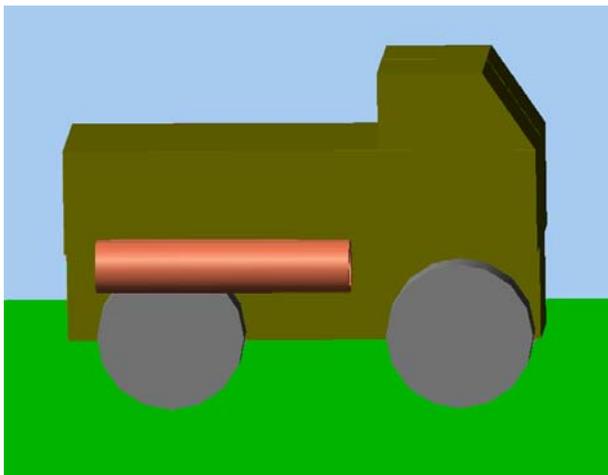
모델을 이용하여 강체구와 점탄성 평면과의 충돌 시 발생하는 충격문제를 수치적 방법으로 구한 해와 실험으로 구한 값이 잘 일치함을 보였다.

4. 수치해 및 비교

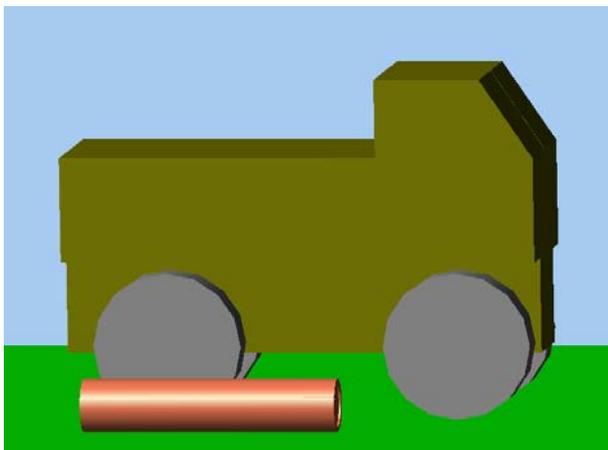
본 절에서는 앞 3절에서 수학적으로 구한 충격력에 대한 이론해의 비교검증차원에서 운반차량에서 사고로 추락낙하 하여 지면과 충돌하는 처분용기에 대하여 컴퓨터해석 코드인 RecurDyn을 이용하여 컴퓨터 모의실험을 수행하여 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력에 대한 수치해를 구하고 이를 수학적 이론해와 비교하기로 한다. 좀 더 정확한 검증을 위해서는 실제 실험을 수행하는 것이 바람직하나 실제 설계한 처분용기의 무게가 26톤 정도에 달하고 이를 적재하는 차량 등을 구하는 어려움 등을 고려할 때 실험을 수행하는 것은 비용적인 측면이나 그 밖의 제반 안전성문제 때문에 거의 가능하지 않다. 다행히도 컴퓨터해석 코드인 RecurDyn으로 모의실험이 가능하기 때문에 실제 실험을 이로 대체하기로 한다. RecurDyn을 이용한 해석결과의 타당성은 이미 최근의 연구^(22,23)를 통하여 검증된바 있다. RecurDyn을 이용한 자세한 컴퓨터 모의실험과정 에 대한 기술은 거의 한편의 논문을 작성해야 하는 번거로움이 있기 때문에 여기서는 그 결과만 기술하기로 한다. 특히 여러 가지 해석결과 중 충돌 각 γ 가 90° 인 지면과의 정면충돌 경우만을 비교하기로 한다. 이는 이 경우가 비교적 그 결과가 단순하여 비교하기가 용이하기 때문이다. Fig. 7은 RecurDyn으로 수행한 일련의 컴퓨터 모의실험과정을 나타낸다. 처분장에서 처분용기가 사고로 운송차량에서 추락낙하하여 지면과 정면충돌하는 과정을 보여주고 있다. 본 처분용기 추락낙하 문제에서는 충돌물체 1은 충돌 면이 편평한 지면이므로 $R_1 = \infty$ 이고 $E_1 = \infty$ 으로 근사할 수 있고, $R_2 = R$ 이므로 $R^* = R$, $E^* = E/(1-\nu^2)$ 로 근사할 수 있다. E 와 ν 는 처분용기의 탄성계수와 푸와송비이다. Table 2에 RecurDyn으로 수행한 처분용기의 추락낙하에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 수치해석 값들과 본 논문에서 유도한 수학적 이론해로 계산한 이론값들과의 비교결과가 나타나 있다. Table 2의 계산에 사용된 처분용기의 질량은 $m = 26,581.3\text{Kg}$, 처분용기의 높이는 $L = 4.83\text{m}$, 탄성계수는 $E^* = 27.56\text{GPa}$, 반경은 $R^* = 0.51\text{m}$ 이다. 이들 값들을 이용하여 식 (45)와 식 (46)으로 구한 최대 충격력은 $F_{\text{max}} = 108.47\text{MPa}$ 이고 충돌시간은 $T = 0.00813174\text{sec}$



(a) beginning of falling down from vehicle



(b) during falling down



(c) direct colliding on the ground

Fig. 7 Computer simulation of the SNF disposal canister that accidentally drops and directly collides onto the ground using RecurDyn

Table 2 Comparison between the numerical value and the theoretical value for the direct collision of the canister on the ground

	Time (sec)	Numerical Value	Theoretical Value
Impact force (MN)	0.0	0.0	0.0
	0.00175	18.88	14.16
	0.00275	55.61	47.98
	0.003375	82.39	76.70
	0.004	105.86	97.28
	0.004625	120.43	107.54
	0.004875	122.84	108.47
	0.005125	121.98	107.79
	0.00525	120.68	106.94
	0.005875	106.88	97.73
	0.006625	84.13	80.88
	0.00725	57.63	57.71
	0.007875	32.88	30.03
	0.008125	24.56	18.17
0.009125	2.51	1.69	
0.00975	0.0	0.0	
Impact Impulse (KN-sec)		556.87	526.28
Impact Period(sec)		0.00975	0.00813174

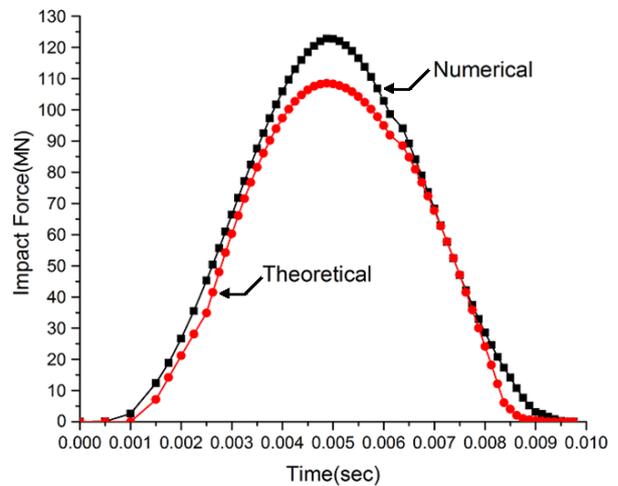


Fig. 8 Comparison between the numerical value and the mathematical approximate (theoretical) value for the impact force occurring to the canister accidentally dropped and directly collided on the ground

이다. 이는 수치해석으로 구한 값인 $F_{\max}=122.84$ MPa, $T=0.00975\text{sec}$ 와 거의 일치한다. 또한 식 (39)로부터 정면충돌($g=90^\circ$)인 경우에 대한 전체 충격량(total impulse) $\hat{F}(t)$ 를 구할 수 있다. $g=90^\circ$ 인 경우 식 (39)는 다음 식으로 간단해진다.

$$\hat{F}(T) = (1+e)m\sqrt{2gH}, \quad V_0 = \sqrt{2gH} \quad (47)$$

탄성충돌인 경우 $e=1$ 이므로 식 (47)은 다음식이 된다.

$$\hat{F}(T) = 2m\sqrt{2gH} \quad (48)$$

충격량(total impulse) $\hat{F}(t)$ 는 식 (45)로 주어진 충격력 $F(t)$ 를 직접 충돌시간 T 초 시간에 대하여 적분함으로써도 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{F}(T) &= \int_0^T F(t)dt = 1.067m V_0(1 - \cos\pi) = 2.134m\sqrt{2gH} \\ &\approx 2.0m\sqrt{2gH} \end{aligned} \quad (49)$$

$g=9.8\text{m/sec}^2$ (중력가속도), $H=5\text{m}$ (처분용기의 추락 낙하높이)를 이용하여 충격량을 구하면 식 (48)로부터 $\hat{F}(t)=526.28\text{KN-sec}$ 임을 알 수 있는데 이는 수치적으로 구한 $\hat{F}(t)=556.87\text{KN-sec}$ 와 거의 일치함을 알 수 있다. Table 2에 표시한 충격력을 그래프로 나타내면 Fig. 8과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 수치해석으로 구한 충격력과 본 논문에서 이론적으로 구한 수학적 근사해가 잘 일치함을 알 수 있다. 약간의 차이를 보이는 것은 처분용기를 일차원 원형 균일 단면 보(prismatic beam)로 근사하였기 때문으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 기 설계된 원통형 구조의 고준위폐기물 처분용기의 구조 안정성 설계를 위하여 고준위폐기물 처분장에서 운송중인 고준위폐기물 처분용기가 사고로 운반차량에서 추락낙하 하여 지면과의 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력에 대한 수학적 이론해를 구하는 문제를 다루었다. 그 주요 내용은 다음과 같다.

첫째, 임의 형상의 강체의 충돌 시 충돌지점의 국부적인 변형을 제외한 나머지 부분은 여전히 변형이 발생하지 않은 강체임을 고려하여 충돌에 의한 충격을 지배하는 일반적인 충격이론을 유도하였다.

둘째, 유도된 충격이론을 처분장에서 사고로 운송차량에서 처분용기가 추락낙하 하여 지면과 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력에 대한 수학적 이론해를 구하는 문제에 적용하였다.

셋째, 충격이론 적용 시 복잡한 내부구조를 가지고 있는 원통형 처분용기를 단면이 원형으로 일정하고 반경에 비하여 길이가 긴 일차원 균일 단면 보(prismatic beam)로 가정하였다.

넷째, 충돌 시 충돌지점에 발생하는 국부적인 충격변형은 탄소성변형으로 가정하여 Hertz의 접촉이론을 적용하였다.

다섯째, 이론해석과 동시에 기구동역학 컴퓨터 해석 코드인 RecurDyn을 이용하여 운반차량에서 사고로 추락낙하 하는 처분용기에 대한 컴퓨터모의실험을 수행하여 수치적으로 구한 충격력에 대한 수치해를 본 논문에서 유도한 수학적 이론해로 구한 근사해와 비교하여 검증하였다.

결론적으로 처분장에서 운반차량에 처분용기를 운반하는 중에 사고에 의하여 처분용기가 지면으로 추락낙하 하는 경우 처분용기가 지면과의 충돌 시 처분용기에 가해지는 충격력을 구하기 위해서는 본 논문에서 유도한 강체의 충돌에 의한 충격이론을 적용할 수 있음을 알 수 있었으며 또한 이를 적용하여 이론적으로 구한 충격력에 대한 수학적 근사해를 어려운 위험한 실험이나 고가의 수치적 해석 대신에 공학적으로 이용할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 2014학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Lee, J. Y., Cho, D. K., Choi, H. J. and Choi, J. W., 2007, "Concept of a Korean Reference Disposal System for Spent Fuel," *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 44, No. 12, pp. 1565~1573.
- (2) 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*, Vol. 164, pp. 264~296.
- (3) IAEA(International Atomic Energy Agency), 1985, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, Vienna, Austria.
- (4) Salo, J. P. and 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.
- (5) Zhou, C. Y., Yu, T. X. and Lee, Ricky S. W., 2008, "Drop/Impact Tests and Analysis of Typical Portable Electronic Devices," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, pp. 905~917.
- (6) Jaeger, J., 1994, "Analytical Solutions of Contact Impact Problems," *Applied Mechanics Review*, Vol. 47, No. 2, pp. 35~54.
- (7) Wittenburg, J., 2007, Dynamics of Multibody Systems, Springer, New York, p. 223.
- (8) Johnson, K. L., 1985, Contact Mechanics, Cambridge University Press, UK, p. 447.
- (9) Johnson, W., 1972, Impact Strength of Materials, Edward Arnold, London, UK, p. 361.
- (10) Hunter, S. C., 1957, "Energy Absorbed by Elastic Waves during Impact," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 5, pp. 162~171.
- (11) Goldsmith, W., 2001, Impact, Dover Publications, Inc., Mineola, New York, USA, p. 309.
- (12) Stronge, W. J., Impact Mechanics, Cambridge University Press, UK, p. 280.
- (13) Teper, W. W. and Suavé, R. G., 1989, "Simplified Method for Predicting Impact Loads of Solid-walled Transportation Packagings for Radioactive Materials," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 111, pp. 316~321.
- (14) Miller, G. K., 1993, "Calculation of Impact Loads for High Energy Drops of Cylindrical Containers," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 511~526.
- (15) Aquaro, D. and Forassasi, G., 1983, "Impact Tests on Scale Models of a Shock Absorber for LWR Spent Fuel Transport Packaging," In: 7th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Chicago, USA.
- (16) Dierch, R., Weiss, M. and Dreier, G., 1994, "Investigation of the Impact Behaviour of Wooden Impact Limiter," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 150, pp. 341~348.
- (17) Choi, W. S. and Seo, K. S., 2010, "A Simple Sizing Optimization Technique for an Impact Limiter Based on Dynamic Material Properties," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, pp. 925~932.
- (18) Pugliese, G., Frano, R. L. and Forassasi, G., 2010, "Spent Fuel Transport Cask Thermal Evaluation under Normal and Accident Conditions," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 240, pp. 1699~1706.
- (19) Crook, A. W., 1952, "A Study of Some Impacts between Metal Bodies by a Piezo-Electric Method," *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 212, No. 1110, pp. 377~390.
- (20) Ahn, K. Y. and Ryu B. J., 2005, "A Modeling of Impact Dynamics and its Application to Impact Force Prediction," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 422~428.
- (21) Calvit, H. H., 1967, "Numerical Solution of the Problem of Impact of a Rigid Sphere onto a Linear Viscoelastic Half-Space and Comparison with Experiment," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 3, pp. 951~966.
- (22) 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," *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 26, No. 5, pp. 373~384.
- (23) Kwon, Y. J., 2016, "Theoretical and Numerical Computation of Impact Impulse Occurring due to Frictionless Collision Experienced by a Spent Nuclear Fuel Disposal Canister Accidentally Dropped on the Ground," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, No. 2, pp. 637~642.