

재료동특성에 기초한 방사성물질 운반용기 충격완충체의 치수최적설계

최우석[†] · 남경오^{*} · 서기석^{**}

Size Optimization of Impact Limiter in Radioactive Material Transportation Package Based on Material Dynamic Characteristics

Woo-Seok Choi[†], Kyoung-O Nam^{*}, and Ki-Seog Seo^{**}

ABSTRACT

According to IAEA regulations, a transportation package of radioactive material should perform its intended function of containing the radioactive contents after the drop test, which is one of hypothetical accident conditions. Impact limiters attached to a transport cask absorb the most of impact energy. So, it is appreciated to determine properly the shape, size and material of impact limiters. A material data needed in this determination is a dynamic one. In this study, several materials considered as those of impact limiters were tested by a drop weight facility to acquire dynamic material characteristics data. Impact absorbing volume of the impact limiter was derived mathematically for each drop condition. A size optimization of impact limiter was conducted. The derived impact absorbing volumes were applied as constraints. These volumes should be less than critical volumes generated based on the dynamic material characteristics. The derived procedure to decide the shape of impact limiter can be useful at the preliminary design stage when the transportation package's outline is roughly determined and applied as input value.

Key Words : Transportation package (운반용기), Impact limiter(충격완충체), Size optimization(치수최적설계)

1. 서론

IAEA Safety Standards Series No. TS-R-1에서는 운반용기의 운송시 예상치 못했던 사고조건에서의 구조건전성 유지여부를 평가하기 위하여 낙하시험을 수행할 것을 권고하고 있다¹⁻⁴⁾. 운반용기의 낙하시험시 발생하는 충격에너지는 운반용기의 위아래에 부착된 충격완충체가 흡수한다. 충격완충체를 특징짓는 항목에는 (1) 충격흡수 성능이 좋은 완충재질, (2) 충격완충체의 형상 및 치수, (3) 충

격흡수효과를 높이기 위한 구조와 같은 것들이 있다. 효율적인 충격완충체의 설계를 위해서는 위의 항목들을 적절히 고려하여 조합해야 한다. 충격완충체의 재질 (1)번이 정해지면 이를 바탕으로 (2)번의 충격완충체의 대략적인 형상 및 치수를 결정할 수 있다. 반대로 (2)가 결정되면 요구되는 재질 (1)이 계산될 수는 있지만 그와 같은 충격흡수능을 가진 재질이 존재하는지의 여부는 확인할 수 없다. 따라서, (1)번을 바탕으로 (2)번을 선정하여야 한다. (3)번 항목은 충격흡수효과를 높이기 위해 특별히 구조를 변경하거나 완충재질을 특수하게 배치하는 것 등이 해당한다.

충격완충체의 설계시 사용되는 완충재질의 물성치는 정적인 물성치가 아닌 동적인 물성치를 사용해야 한다. 인장시험에서 얻은 어떤 재질의 정적

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구원

E-mail : wschoi@kaeri.re.kr

TEL : (04)868-4980 FAX : (042)861-1567

^{*} 국가핵융합연구소

^{**} 한국원자력연구원

인 물성치는 9 m 높이에서 단단한 바닥에 떨어질 때 재료가 나타내는 동적인 물성치와는 다르기 때문이다. 그러나 재료의 동특성 자료는 데이터베이스화 되어 있는 것이 거의 없다.

본 연구에서는 재료동특성에 기초하여 낙하시 충격완충체의 충격흡수체적을 수학적으로 계산하고 이를 기초로 한 제한조건을 적용하여 충격완충체의 치수최적화를 수행한다. 2장에서는 충격완충체의 예비재질에 대한 동특성 자료 취득을 위한 하중낙하시험장치의 제작, 동특성 시험 및 그 결과에 대해 기술하고, 3장에서는 수직, 수평, 모서리 낙하 각각에 대한 충격흡수체적을 수학적으로 계산한다. 이를 바탕으로 4장에서는 충격완충체의 주요설계변수에 대하여 충격에너지를 계산하는 평가프로그램을 제작하고 충격완충체의 치수 최적화를 수행한 내용에 대하여 기술한다.

2. 완충재질의 재료동특성 시험

충격완충체의 재질로서 사용되는 재료에 대한 재료 동특성 자료를 얻기 위한 시험이 진행되었다. 동특성 자료를 얻기 위한 시험재료로는 Table 1과 같이 현재 완충체의 재질로 사용되고 있거나 사용가능성을 타진 중인 우레탄폼(UF), 하니콤(Honeycomb), 발사우드(Balsa Wood) 등이 선택되었다. 선택된 재질의 동특성 시험 데이터를 얻기 위하여 ASTM E 208-06⁵⁾에 따라 Fig. 1과 같은 하중낙하시험장치를 제작하였다. 낙하시험에 사용된 시편의 치수는 5 cm × 5 cm × 5 cm이며 Fig. 2와 같다. 하중낙하시험을 통하여 얻은 각각의 재질에 대한 응력-변형률 곡선은 Figs. 3 ~ 5와 같다. 얻어진 응력-변형률 곡선은 정상운반조건에서의 낙하조건인 1 m 낙하높이에 대한 재료동특성 데이터이다. 사고조건 중 하나인 낙하시험을 모사하는 낙하높이는 9 m이다. 낙하높이 9 m인 경우에 대한 재료동특성 데이터 취득을 위한 시험장치 및 시험은 현재 진행중이다. 본 연구에서는 사용되는 재료동특성 데이터는 낙하높이 1 m에 대한 것으로 한정한다. 각각의 재질에 대하여 충격흡수에너지를 계산하기 위하여 재료동특성 그래프에서 일정하게 유지하는 응력의 크기와 변형률을 곱하여 단위체적당 충격흡수에너지를 계산하였다. 이는 Table 2에

Table 1 Specimen for drop weight test

| 시편재질 | 시편종류 | 수량 | 시편 ID |
|---------------|---------|-----------------------------|---------------|
| Urethane Foam | 밀도 | 26 kg/m ³ | 3 UF26#1,2,3 |
| | | 28 kg/m ³ | 3 UF28#1,2,3 |
| | | 40 kg/m ³ | 3 UF40#1,2,3 |
| | | 226 kg/m ³ (난연성) | 3 UF226#1,2,3 |
| Balsa Wood | 방향 | 축방향 | 3 BAAX#1,2,3 |
| | | 반경방향 | 3 BARA#1,2,3 |
| | | 원주방향 | 3 BATA#1,2,3 |
| Honeycomb | Core 크기 | 1/4인치 | 3 H014#1,2,3 |
| | | 1/2인치 | 3 H012#1,2,3 |
| | | 1인치 | 3 H100#1,2,3 |

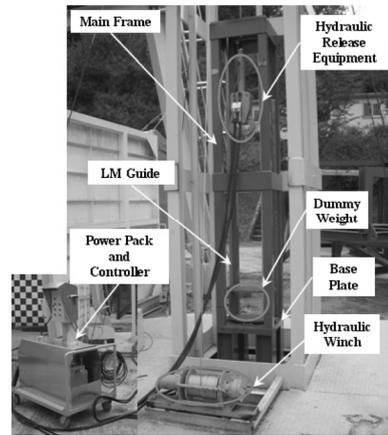


Fig. 1 Drop weight facility



Fig. 2 Specimen for dynamic material characteristics

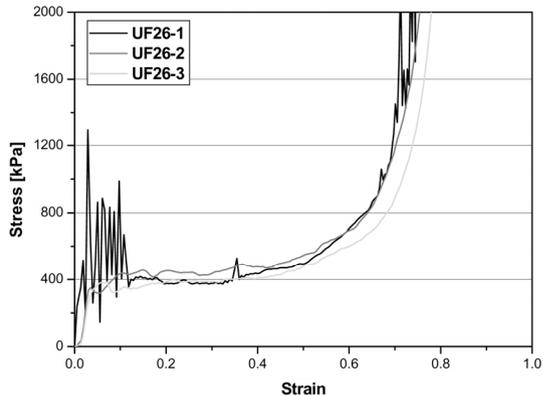


Fig. 3 Dynamic characteristics of urethane form

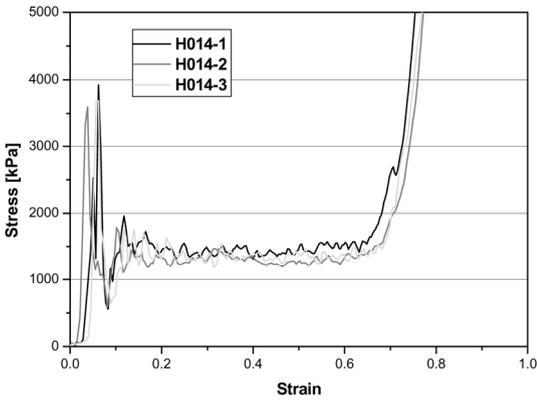


Fig. 4 Dynamic characteristics of honeycomb (1/4 inch size)

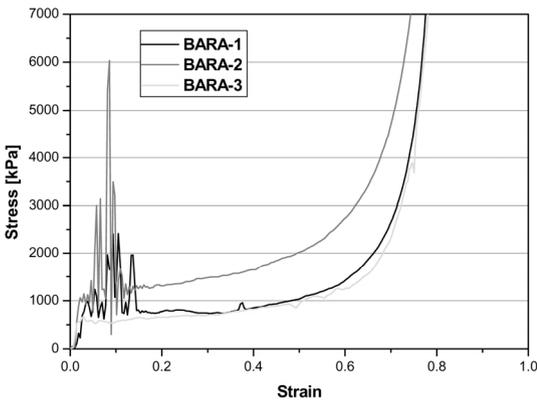


Fig. 5 Dynamic characteristics of balsa wood (radial direction)

Table 2 Specific impact absorbing energy of each material

| | Stress (kPa) | Strain (m/m) | Specific Energy (Joule/m ³) |
|------|--------------|--------------|---|
| UF26 | 400 | 0.51 | 204,000 |
| HO14 | 1,360 | 0.70 | 952,000 |
| BAAX | 5,000 | 0.52 | 2,600,000 |
| BARA | 950 | 0.51 | 484,500 |

나타나 있다. 단위체적당 충격흡수에너지가 가장 큰 재질은 발사우드(축방향)로 나타났다. 실제 충격완충체의 재질로 사용되기 위해서는 제작성, 가공성 등을 고려하여 선정하여야 하나 본 연구에서 충격완충체의 치수최적화를 위한 재질로 일단 발사우드(축방향)를 선택하였다.

3. 충격완충체적의 유도

충격완충체를 포함한 운반용기의 낙하시험시 낙하높이에 따른 위치에너지가 낙하가 진행되면서 점점 운동에너지로 변환된다. 운반용기가 타겟면에 충돌하면서 운반용기가 가지고 있는 모든 에너지가 충격에너지로 작용한다. 이러한 충격에너지의 대부분은 일반적으로 충격완충체가 변형되면서 흡수하도록 설계되어 있다. 본 장에서는 각각의 낙하방향에 따라 충격에너지를 흡수하는 완충체의 체적을 수학적으로 계산하고자 한다. 일반적으로 운반용기의 낙하시험시 운반용기가 받는 총 충격에너지는 위치에너지와 동일하며 식 (1)과 같다.

$$E = mgh \tag{1}$$

식 (1)의 총 충격에너지를 각각의 낙하방향에 따른 충격흡수 체적으로 나누면 충격에너지를 흡수하기 위해 필요한 완충재료의 단위체적당 에너지 흡수율을 계산할 수 있다. 또는 총 충격에너지를 단위체적당 에너지 흡수율로 나누면 충격에너지를 흡수하기 위해 필요한 충격흡수 체적을 계산할 수 있고 이를 바탕으로 완충체의 치수를 계산할 수 있다. 충격완충체의 형상을 결정짓는 설계인자(Design Parameter)로는 Fig. 6을 참고하여 H_1 , H_2 , W 를 선정하였다. 일반적인 충격완충체의 경우 세 가지 설계인자에 의해 그 형상이 결정된다고 볼 수 있다.

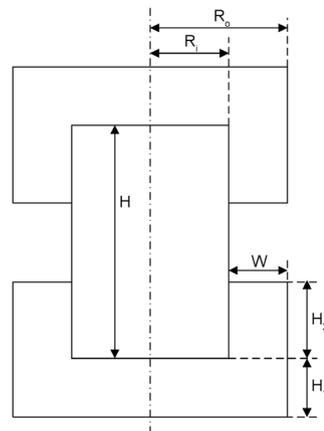


Fig. 6 Parameters of impact limiter

3.1 수직낙하시 충격흡수 체적

충격완충체는 운반용기의 수직낙하시 발생하는 식 (1)의 충격에너지를 완충체의 밀면으로 흡수한다. 에너지를 흡수하여 변형되는 체적은 Fig. 7에서 진한색으로 표시되고 식 (2)와 같이 계산된다.

$$V = A \cdot H_1 = \pi R_o^2 H_1 = \pi (R_i + W)^2 H_1 \quad (2)$$

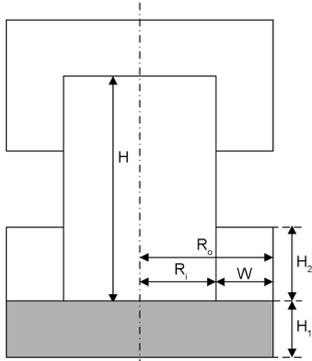


Fig. 7 Shock absorbing volume during end drop

3.2 수평낙하시 충격흡수 체적

충격완충체는 운반용기의 수평낙하시 발생하는 충격에너지를 완충체의 옆면으로 흡수한다. 에너지를 흡수하여 변형되는 체적은 Fig. 8에서 진한색으로 표시하였다. Fig. 8의 오른쪽에서 회색으로 표시되는 면적을 A라 하면 면적 A는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$A = 2 \int_{R_i}^{R_o} \sqrt{R_o^2 - x^2} dx \quad (3)$$

수학 formula에 의해 주어진 적분은 식 (4)와 같다.

$$\int \sqrt{a^2 - u^2} du = \frac{1}{2} u \sqrt{a^2 - u^2} + \frac{1}{2} a^2 \sin^{-1} \frac{u}{a} \quad (4)$$

따라서, 식 (3)은 식 (5)와 같이 표현되며, 충격 흡수체적 V는 식 (5)의 면적 A에 완충체의 높이를 곱하여 계산되고 식 (6)과 같이 표현된다.

$$A = R_o^2 \cdot \frac{\pi}{2} - \left\{ R_i \sqrt{R_o^2 - R_i^2} + R_o^2 \sin^{-1} \frac{R_i}{R_o} \right\} \quad (5)$$

$$V = A \cdot 2(H_1 + H_2) = 2 \left[(R_i + W)^2 \cdot \frac{\pi}{2} - \left\{ R_i \sqrt{2R_i W + W^2} + (R_i + W)^2 \sin^{-1} \frac{R_i}{R_i + W} \right\} \right] \cdot (H_1 + H_2) \quad (6)$$

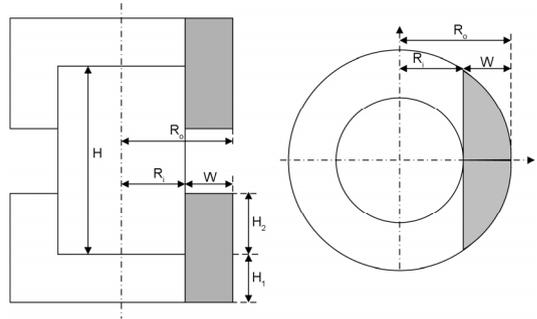


Fig. 8 Shock absorbing volume during side drop

3.3 모서리낙하시 충격흡수 체적

충격완충체는 운반용기의 모서리낙하시 발생하는 충격에너지를 완충체의 모서리로 흡수한다. 에너지를 흡수하여 변형되는 체적은 Fig. 9에서 진한색으로 표시된다. 이 때 하나의 전제조건은 H₂의 높이가 충분해서 변형하는 모서리 부위를 모두 포함할 수 있어야 한다는 것이다. H₂의 높이가 충분하지 않으면 변형부위가 Fig. 9의 오른쪽 그림과 같이 표현될 수 없을 것이다. Fig. 9에서 일반적인 충격흡수 체적을 V라 하고 단면의 넓이를 S(x)라 하면 체적 V는 다음과 같이 나타난다.

$$V = \int_{-x_1}^{x_1} S(x) dx \quad (7)$$

이 때 S(x)는 Fig. 9의 오른쪽의 삼각형 ΔPQR의 면적을 의미한다. ∠PQR=90°이므로 ΔPQR의 면적은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta PQR = S(x) = \frac{1}{2} PQ \cdot QR \quad (8)$$

이 때, 밑변 PQ의 길이는 원 $x^2 + (y+a)^2 = R_o^2$ 의 임의의 x값에 대한 y값에 해당한다. 따라서 PQ는 식 (9)와 같고, Fig. 9에서 $\tan \theta$ 는 식 (10)과 같이

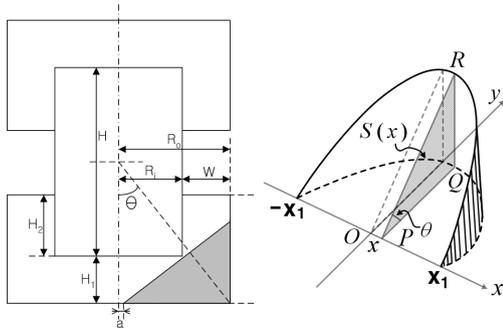


Fig. 9 Shock absorbing volume during corner drop

표현된다. 또한 높이 QR은 식 (11)과 같다. 식 (9)와 (11)을 식 (8)에 대입하면 S(x)는 식 (12)와 같다.

$$PQ = y = \sqrt{R_0^2 - x^2} - a \quad (9)$$

$$\tan \theta = \frac{R_i + W}{\frac{H}{2} + H_1} \quad (10)$$

$$QR = PQ \tan \theta = \left(\sqrt{R_0^2 - x^2} - a \right) \cdot \frac{R_i + W}{\frac{H}{2} + H_1} \quad (11)$$

$$S = \frac{1}{2} \cdot PQ \cdot QR = \frac{1}{2} \left(\sqrt{R_0^2 - x^2} - a \right)^2 \cdot \frac{R_i + W}{\frac{H}{2} + H_1} \quad (12)$$

Fig. 10에서 a값은 운반용기 및 충격완충체의 형상을 나타내는 치수에 의해 결정되는 값이다. a 값을 계산하기 위하여 충격완충체를 옆면에서 본 개략도를 표현하면 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 점 (R_i, H₁)를 통과하는 선의 방정식은 식 (13)과 같다. a값은 y=0 일 때의 x절편의 값과 같으므로 a는 식 (14)와 같다.

$$(y - H_1) = \frac{R_i + W}{\frac{H}{2} + H_1} (x - R_i) \quad (13)$$

$$a = R_i - H_1 \cdot \frac{\frac{H}{2} + H_1}{R_i + W} \quad (14)$$

식 (7)을 이용하여 모서리낙하시 충격흡수 체적을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V &= 2 \int_0^{x_1} S(x) dx = \frac{R_i + W}{\frac{H}{2} + H_1} \int_0^{x_1} \left(\sqrt{R_0^2 - x^2} - a \right)^2 dx \\ &= \frac{R_i + W}{\frac{H}{2} + H_1} \left[(R_i + W)^2 x_1 - \frac{x_1^3}{3} + a^2 x_1 \right. \\ &\quad \left. - a \left(x_1 \sqrt{(R_i + W)^2 - x_1^2} + (R_i + W)^2 \sin^{-1} \frac{x_1}{R_i + W} \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

Where,

$$a = R_i - H_1 \cdot \frac{\frac{H}{2} + H_1}{R_i + W}, \quad x_1 = \sqrt{(R_i + W)^2 - a^2}$$

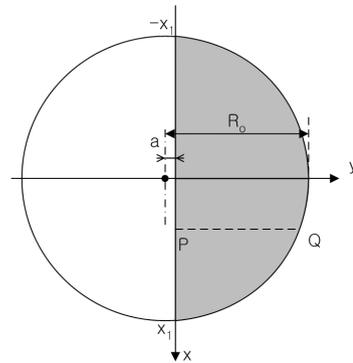


Fig. 10 Shape of bottom during corner drop

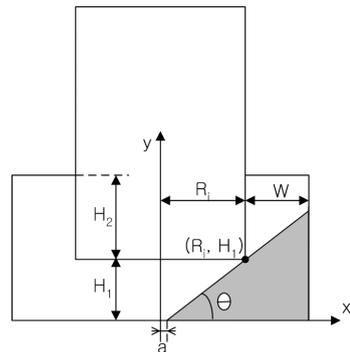


Fig. 11 Shape of side during corner drop

그리고, H₂의 높이가 충분해서 변형하는 모서리 부위를 모두 포함할 수 있어야 한다는 전제조건을 식으로 표현하면 Fig. 11에서 x=R_i+W 일 때 y값

이 H_1+H_2 보다 작아야 한다고 할 수 있다. 이를 위해 식 (13)에 $x=R_i+W$ 를 대입하면 식 (16)과 같고, 이 때, y 값이 H_1+H_2 보다 작아야 하므로 이는 식 (17)로 표현된다. 식 (17)을 정리하면 식 (18)과 같다.

$$(y-H_1) = \frac{R_i+W}{\frac{H}{2}+H_1}(R_i+W-R_i) \quad (16)$$

$$y = \frac{R_i+W}{\frac{H}{2}+H_1}W + H_1 \leq H_1 + H_2 \quad (17)$$

$$\frac{R_i+W}{\frac{H}{2}+H_1}W \leq H_2 \quad (18)$$

4. 충격완충체의 치수최적화

4.1 설계인자 영향 평가

2장에서 시험을 통하여 얻은 각각의 재료에 대한 단위체적당 에너지 흡수율을 바탕으로 충격완충체의 재질을 선정한다. 선정된 재료에 대한 단위체적당 에너지 흡수율로 낙하시험시의 총 충격에너지를 나누면 충격에너지 흡수를 위해 요구되는 체적을 계산할 수 있다. 3장에서 수직, 수평, 모서리낙하시 충격흡수 체적을 수학적으로 유도하였다. 각각의 충격흡수 체적 V_1, V_2, V_3 는 충격 에너지 흡수를 위해 요구되는 임계체적보다 커야 한다. 이를 제한조건으로 적용하고 충격완충체의 형상을 결정짓는 몇 가지 설계변수를 선정하여 치수 최적화를 수행하고자 한다. 이에 앞서 각각의 설계변수의 충격흡수체적에 대한 영향을 평가하고자 한다. 수직, 수평, 모서리 낙하시 충격흡수체적 V_1, V_2, V_3 는 다음과 같다.

$$V_1 = \pi(R_i+W)^2 H_1 \quad (19)$$

$$V_2 = 2 \left[(R_i+W)^2 \cdot \frac{\pi}{2} - \left\{ R_i \sqrt{2R_i W + W^2} + (R_i+W)^2 \sin^{-1} \frac{R_i}{R_i+W} \right\} \right] \cdot (H_1 + H_2) \quad (20)$$

$$V_3 = \frac{R_i+W}{\frac{H}{2}+H_1} \left[(R_i+W)^2 x_1 - \frac{x_1^3}{3} + a^2 x_1 - a \left(x_1 \sqrt{(R_i+W)^2 - x_1^2} + (R_i+W)^2 \sin^{-1} \frac{x_1}{R_i+W} \right) \right] \quad (21)$$

충격흡수체적 V_1, V_2, V_3 와 설계인자 H_1, H_2, W 사이의 관계를 표현하면 식 (22)와 같다. 여기서, X 는 상응하는 두 인자간에 “영향이 존재함”을, O 는 “영향이 없음”을 의미한다. 수직 및 모서리낙하시 충격흡수체적은 H_1 과 W 의 함수이고, 수평낙하시의 충격흡수체적은 H_1, H_2, W 의 함수임을 나타낸다.

$$\begin{Bmatrix} V_1(Ver) \\ V_2(Hor) \\ V_3(Cor) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & X \\ X & X & X \\ X & O & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ W \end{Bmatrix} \quad (22)$$

운반용기의 대략적인 치수 및 중량이 결정되고, 충격완충체를 결정짓는 3개의 인자 H_1, H_2, W 의 설계값을 입력하면 각각의 낙하방향에 대해서 흡수가능한 충격에너지를 계산하는 평가프로그램을 Fig. 12와 같이 작성하였다. Fig. 12는 한국원자력 연구원에서 현재 설계중인 핫셀에 접속하는 신규 운반용기에 대해 충격완충체 치수를 변화시켜 가며 각각의 낙하조건하에서 충격흡수체적의 적절성을 평가하는 내용이다. 평가프로그램은 충격완충체의 초기치수에 대한 적절성의 결과를 보여주고 있다. 총 충격에너지는 308.7 kJ이고, 모서리 낙하의 경우 흡수가능 충격에너지가 153.7 kJ이다. 이는 초기치수의 충격완충체는 모서리 낙하시 총 충격에너지를 모두 흡수할 수 없음을 의미한다. 실제 유한요소모델에 대하여 모서리 낙하해석을 한 결과는 Fig. 13과 같다.

엄밀한 의미에서 평가프로그램에 사용된 응력-변형률 곡선에 기초한 단위체적당 흡수가능한 충격에너지는 일부 구간만을 반영했기 때문에 전 변형구간에 대한 값보다는 작다. 또한, 충격완충체 질로 사용된 Balsa Wood를 감싸고 있는 얇은 steel도 충격을 흡수하는데 기여했지만 이는 평가프로그램에는 반영되어 있지 않다. 반면에 유한요소해석 결과에는 이러한 점들이 모두 반영되어 있기

때문에 평가프로그램보다 보수적인 결과가 도출되었다. 유한요소해석 결과가 보수적임에도 불구하고 Fig. 13에서 충격완충체가 완전히 변형되어 본체가 낙하타겟에 거의 충돌하려 하고 있고, 그 부근의 요소는 심하게 왜곡되어 변형되어 있다. 이러한 현상들을 종합해 볼 때, 평가 프로그램은 충격완충체의 치수에 대하여 적절한 평가를 수행하고 있다고 판단할 수 있다.

Fig. 14는 수직낙하해석의 경우이다. Fig. 12에서

| | A | B | C | D | E | F | G |
|----|--|-----------------|----------------|----------------------------------|---|------|---|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | Mass | 3500 | | H(CanisterHeight) | | 1.14 | |
| 3 | g | 9.8 | | Height1 | | 0.2 | |
| 4 | h | 9 | | Height2 | | 0.32 | |
| 5 | Energy | 308700 | | Rk(OuterRad-W) | | 0.42 | |
| 6 | | | | W(Width) | | 0.2 | |
| 7 | | | | Ro(OuterRad) | | 0.62 | |
| 8 | | | | CanisterOuterDia | | 0.84 | |
| 9 | | | | ImpacterOuterDia | | 1.24 | |
| 10 | Find Specific Energy for Various Materials | | | | | | |
| 11 | | Stress | Strain | Energy (Joule) | Specific Energy (Joule/m ³) | | |
| 12 | BAAx | 5,000,000 | 0.520 | 325 | 2,600,000 | | |
| 13 | Absorbing Energy for Vertical Drop Test | | | | | | |
| 14 | | | | Area | Vol_Ver | | |
| 15 | | | | 1,207016 | 0,2414032 | | |
| 16 | | Specific Energy | | AbsorbingEnergy | | | |
| 17 | BAAx | 2,600,000 | | 627,648 | | | |
| 18 | Absorbing Energy for Horizontal Drop Test | | | | | | |
| 19 | | | | First Integatic Second Inte Area | Vol_Hor | | |
| 20 | | 0,6038141 | 0,477639 | 0,1261754 | 0,13122245 | | |
| 21 | | Specific Energy | | AbsorbingEnergy | | | |
| 22 | BAAx | 2,600,000 | | 341,178 | | | |
| 23 | Absorbing Energy for Corner Drop Test | | | | | | |
| 24 | | a | x(x1_bouncArea | Vol_Cor | | | |
| 25 | | 0,1716129 | 0,595776 | | 0,05910545 | | |
| 26 | | Specific Energy | | AbsorbingEnergy | | | |
| 27 | BAAx | 2,600,000 | | 153,674 | | | |
| 28 | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | |

Fig. 12 Probable absorbing energy evaluation program

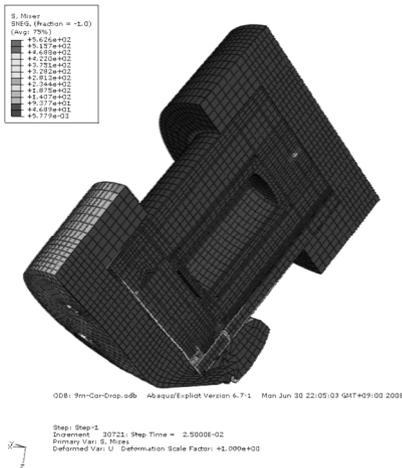


Fig. 13 Deformed shape under corner drop analysis

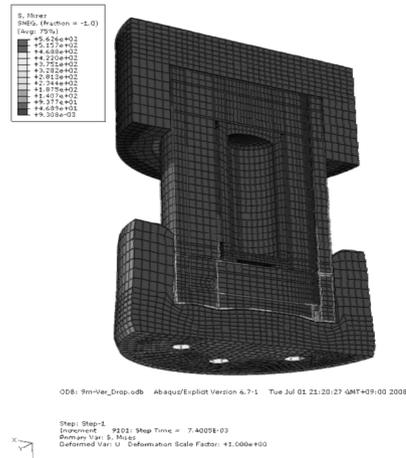


Fig. 14 Deformed shape under vertical drop analysis

수직낙하의 경우 흡수가능 충격에너지는 627.6 kJ 로 총 충격에너지보다 크다. 이는 초기치수의 충격완충체로 수직낙하시 총 충격에너지를 충분히 흡수할 수 있음의 의미한다. Fig. 14에서 보면 충격완충체의 변형이 상대적으로 작고, 추가적인 충격에너지도 흡수할 수 있을 정도로 흡수체적에 여유가 있음을 알 수 있다.

4.2 최적화를 위한 가정사항

(1) 최적화시 설계변수는 H_1 , H_2 , W 로 선정하였다. 제한조건에 설계변수로 표현되는 충격흡수체적은 낙하방향에 따라 여러 가지 형상을 가진다. 반면에 충격흡수체적의 임계값은 2장의 시험에서 사용된 정형화된 시험의 체적에 기초하여 계산되었다. 따라서 이 두 체적을 정량적으로 비교한다는 것은 적절치 못한 면이 있다. 또한, 치수최적화 결과는 충격에너지의 흡수가능여부에 초점이 맞추어져 있으므로 실제 시험하에서의 본체의 구조적 건정성의 유지여부에 대한 판단과는 서로 다른 관점일 수 있다.

(2) 최적화를 통한 최적해는 충격을 흡수하기 위한 최소의 체적을 만족하는 설계값이다. 따라서, 최적화된 충격완충체하에서 충격은 운반용기 바로 앞까지 전달되어 온다는 의미일 수 있다. 따라서 실제 설계에서는 여유도를 주기 위한 방법이 필요하다. 예로써, 최적화 과정 내에서 임계체적값에 여유를 주는 방법과 운반용기의 외곽치수 R_i 와 H 를 입력할 때 여유를 주는 방법 등을 생각할 수 있다.

4.3 최적화 정식화 및 최적화 결과

최적화를 위한 정식화(formulation)는 식 (23)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} && W, H_1, H_2 \\
 & \text{Min.} && \text{Weight of Impact limiter} \\
 & \text{s.t.} && V_i \geq V_{crit} \quad (i = 1, 2, 3) \\
 & && \frac{R_i + W}{2} W \leq H_2
 \end{aligned} \tag{23}$$

최적화 알고리즘 가운데 RQP(Recursive Quadratic Programing) 방법을 사용하여 현재 개발중인 새로운 핫셀 운반용기의 충격완충체의 치수 최적화를 수행하였다. 신규 핫셀 운반용기의 높이 H와 반경 R_i는 각각 1.14m와 0.42m이다. 충격완충체의 초기치수 W, H₁, H₂는 모두 0.2m이었다. 11번의

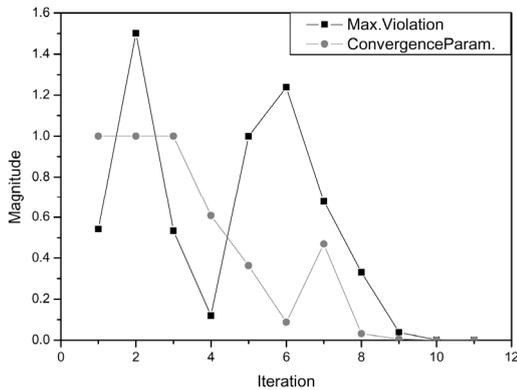


Fig. 15 Max. violation & convergence parameter @ each iteration

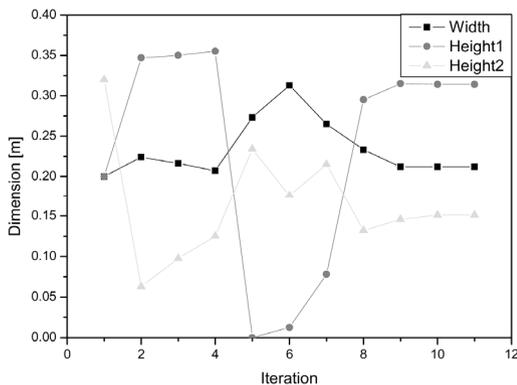


Fig. 16 Design variables' change @ each iteration

Table 3 Initial and optimum value of design variables

| | Initial value | Optimum value |
|----------------|---------------|---------------|
| W | 0.2 | 0.212 |
| H ₁ | 0.2 | 0.314 |
| H ₂ | 0.2 | 0.151 |

iteration을 거쳐 최적화로 수렴하였다. 각 iteration에서의 제한조건의 최대위배량 및 수렴인자값 및 설계변수가 수렴해 가는 과정이 Fig. 15와 Fig. 16에 나타나 있다. 설계변수의 초기값 및 최적값은 표 3에 나타나 있다.

4.4 최적화 결과 고찰

초기설계와 최적해의 개략도는 Fig. 17과 같다. Fig. 12에서 보면 9 m 낙하높이에 대한 충격에너지는 308,700 J이고, 초기설계가 모서리낙하조건에 대하여 흡수가능한 충격에너지는 153,678 J로써, 초기설계의 충격흡수체적이 부족하였다. 수직낙하 및 수평낙하조건에 대하여는 문제가 발생하지 않았다. 최적해의 결과를 보면 모서리낙하조건에 대하여 부족했던 충격흡수체적을 보완하기 위하여 H₁의 치수가 크게 증가하였다. H₁의 증가로 인해 수평낙하조건에 대하여 충격흡수체적이 과도하게 커졌는데 이를 감소시키기 위해 H₂의 값은 감소하였다. H₁의 증가로 수직방향 충격흡수체적도 증가하였지만 이는 비활성화 제한조건(inactive constraint)으로 작용하여 최적화에 영향을 주지 못하였다. 달리 표현하면, 식 (22)에서 수직방향 충격흡수체적에 영향력 있는 인자는 H₁과 W인데 W를 감소시키면 수평방향 및 모서리방향의 충격흡수체적에 영향을 주므로 개선되지 못하였다.

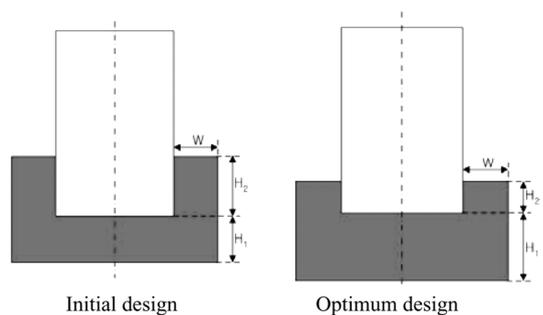


Fig. 17 Design variables' change @ each iteration

5. 결 론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 충격완충체 설계시 고려하는 완충재질에 대한 물성치는 일반적인 인장시험에서 얻은 정적인 물성치가 아닌 동특성 자료가 사용되어야 한다. 본 연구에서는 동특성 자료를 취득하기 위한 하중낙 하장치를 ASTM E 218-06에 따라 제작하고, 충격완충체의 재질로 고려되는 우레탄폼(UF), 하니콤(Honeycomb), 발사우드(Balsa Wood)에 대하여 1 m 낙하높이에 대한 동특성 자료를 취득하였다.

(2) 수직, 수평 및 모서리 낙하시 충격완충체의 충격흡수체적을 수학적으로 유도하였다.

(3) 충격완충체의 형상을 결정짓는 대표적인 설계변수 H_1 , H_2 , W 를 선정하고 (2)에서 유도된 충격흡수체적에 대한 설계변수의 영향을 평가하였으며 설계변수에 값을 입력하면 충격흡수에너지를 계산하는 평가프로그램을 작성하였다.

(4) (2)에서 계산된 충격흡수체적이 (1)에서 취득한 동특성자료에 근거한 충격흡수체적 임계값보다 커야한다는 제한조건하에서 현재 한국원자력연구원에서 개발중인 신규 핫셀운반용기의 충격완충체에 대한 치수최적화를 수행하였다.

(5) 충격완충체의 치수최적화 결과값은 초기설계값 대비 모서리 낙하시의 충격완충체적을 증가시키는 방향으로 진행되었고 계산된 최적해는 수직, 수평 및 모서리 낙하시 요구되는 충격흡수체적을 모두 만족하였다.

(6) 개발된 방법은 운반용기의 외곽치수 및 중량 등을 입력하여 각각의 낙하방향에 대한 필요한 충격흡수체적을 갖는 충격완충체의 치수를 초기 선정할 때 유용할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. 2005.
2. IAEA Safety Standard Series No. TS-G-1.1(ST2), Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material. 2002.
3. Korea Most Act. 2001-23, Regulations for Packaging and Transport of Radioactive Material. 2001.
4. U.S. Code of Federal Regulations, Packaging and Transportation of Radioactive Material, Title 10, Part 71, 1997.
5. ASTM E 208-06, "Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels", 2000.
6. 최우석, 남경오, 서기석, 2008, "방사성물질 운반용기 완충체 설계", KPVP 2008 연차학술대회