

# 재료 불확실성을 고려한 충격완충체의 최적설계

임종민, 최우석\*

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*wschoi@kaeri.re.kr

## 1. 서론

IAEA Safety Standards [1]에 따라 방사성 운반 용기는 9m 자유 낙하시험이 수행되며, 이를 통해 가상사고조건에서의 구조 건전성을 평가한다. 충돌 시 용기로 전해지는 하중을 감소시키기 위해 주로 나무로 이루어진 충격완충체가 용기 상하부에 설치되며, 충격완충체의 사이즈에 따라 각 낙하 방향에 따른 충격 성능이 결정된다. 나무재질은 일반적으로 다양한 요인에 의해, 기계적 성질이 큰 변동특성을 가진다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 재료 불확실성을 확률변수로 나타내고, 목표 신뢰성을 만족하는 충격완충체의 최적설계를 수행한다.

## 2. 본론

### 2.1 충격완충체의 충격 흡수 성능 계산

본 연구에서 고려되는 운반용기와 충격완충체는 Fig. 1과 같으며, 충격완충체는 Balsa와 Red wood로 이루어져 있다.

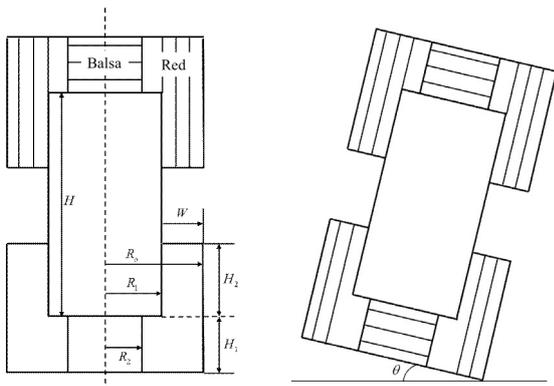


Fig. 1. Transportation cask and drop angle.

충격완충체의 충격 흡수 성능을 나타내는 최대 소산에너지는 식 (1)과 같이 단위 체적당 소산에너지와 충돌 시 충격완충체가 으깨지는 최대 체적을 통해 계산된다.

$$E_{Abs}(\theta) = e_{Red}(\theta) V_{Red}(\theta) + e_{Balsa}(90^\circ - \theta) V_{Balsa}(\theta) \quad (1)$$

### 2.2 충격완충체의 설계최적화

가용설계를 얻기 위해 최적설계에서는 설계제한 조건을 부여해야한다. 이를 위해 본 연구에서는 식 (2)와 같은 조건을 설계기준으로 삼았으며, 이는 충격 성능을 나타내는 충격완충체의 최대소산에너지가 충돌에너지보다 커야한다는 것을 의미한다.

$$G = \max_{0 \leq \theta \leq 90^\circ} [E_{Imp} - E_{Abs}(\theta)] \leq 0 \quad (2)$$

충격완충체의 최적설계를 위해서 Fig. 1의 치수 중  $W$ 와  $H_1, H_2$ 가 설계변수로 선택되었으며, 최적 설계 과정 중 설계변수의 갱신을 통해 충격완충체의 전체 체적과 제한조건 만족여부가 조절된다. 설계최적화를 위한 충격완충체 설계의 정식화는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Find} \quad \mathbf{d} = [W, H_1, H_2] \\ & \text{minimize} \quad f(\mathbf{d}) \\ & \text{subject to} \quad G = \max_{0 \leq \theta \leq 90^\circ} [E_{Imp}(\mathbf{d}) - E_{Abs}(\mathbf{d}, \theta)] \leq 0 \\ & \quad \quad \quad W \geq W^{Up}, H_1 \geq H_1^{Up}, H_2 \geq H_2^{Up} \end{aligned} \quad (3)$$

설계가 추구하는 목표로 볼 수 있는 목적함수는 설계 목적에 따라 아래와 같이 다양하게 선택될 수 있다.

- 1) 수송-저장 상의 이유로 특정 길이 최소화
- 2) 현재 설계로부터의 설계 변화 최소화
- 3) 재료 사용량 최소화

위와 같은 설계목적을 부합하며, 설계제한조건을 만족하는 설계를 도출하기 위해 본 연구에서는 최적화 기법 중 하나인 SQP를 이용했으며, 도출 결과는 Fig. 2와 같다. 도출된 모든 설계는 식 (2)의 설계기준을 만족했으며, 이는 충격완충체가 충돌에너지의 전체를 흡수할 수 있음을 의미한다. 도출된 설계해에서 충돌에너지 대비 소산가능에너지의 비인 안전여유는 1이며, 재료 불확실성을 대비하기 위한 적절한 안전여유를 추가할 필요가 있다.

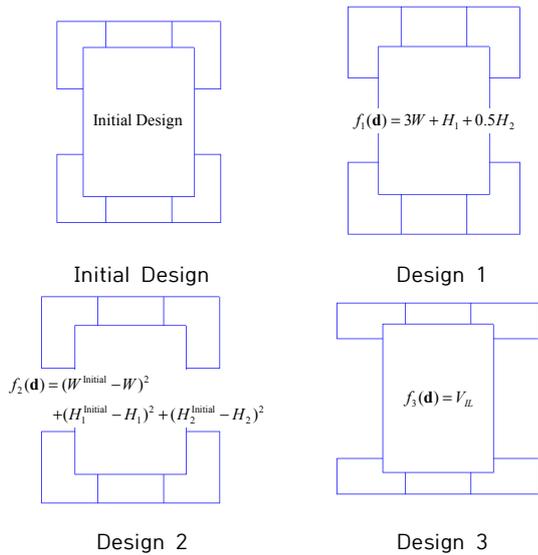


Fig. 2. Optimal Design of impact limiter.

### 2.3 재료 불확실성을 고려한 충격완충체 최적설계

나무재료는 일반적으로 다양한 요인에 의해 기계적 성질이 크게 영향을 받는다고 알려져 있으며, 이는 재료의 불확실성이 크다는 것을 의미한다. 이러한 불확실성은 설계 후 의도치 않은 성능 저하 및 파손을 야기 할 수 있으므로, 일반적으로 설계 시 적절한 안전여유가 요구된다. 본 연구에서는 본 설계 문제에 존재하는 불확실성을 고려한 적절한 안전여유를 위해 확률론적 설계방법을 이용해 충격완충체의 최적설계를 수행한다. 이러한 불확실성은 Table 2와 같이 확률변수로 표현할 수 있다.

Table 2. Random variables

Uncertainty	CoV
Specific Absorbable Energy	20%
Crushed Volume	5%
Total Mass	5%

확률제한조건이 포함된 충격완충체의 최적설계를 위한 정식화는 식 (4)와 같다. 확률론적 설계방법에서는 불확실성으로부터의 시스템의 안전성을 정량화하기 위해 파손확률을 계산하고, 이를 목표 파손 확률과 비교함으로써 확률 이론에 기반한 안전여유를 산정한다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find } \mathbf{d} = [W, H_1, H_2] \\
 &\text{minimize } f(\mathbf{d}) \\
 &\text{subject to } P_f = \Pr \left[ \max_{0 \leq \theta \leq 90^\circ} [E_{\text{Imp}} - E_{\text{Abs}}(\theta)] > 0 \right] \leq P_f^{\text{Target}} \quad (4) \\
 &W \geq W^{\text{Up}}, H_1 \geq H_1^{\text{Up}}, H_2 \geq H_2^{\text{Up}}
 \end{aligned}$$

식 (5)의 신뢰성은 1에서 파손확률을 뺀 값이며, 몬테카를로 모의실험법을 통해 계산한다.

$$R = \Pr[G = E_{\text{Imp}} - E_{\text{Abs}}(\theta^*) \geq 0] = \int_{G \geq 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (5)$$

목표 신뢰도에 따른 충격완충체의 확률론적 최적 설계 결과는 Fig. 3과 같다. 확률론적 최적설계를 통해 도출된 설계해들은 1.5에서 2.7 사이의 안전여유를 보였다.

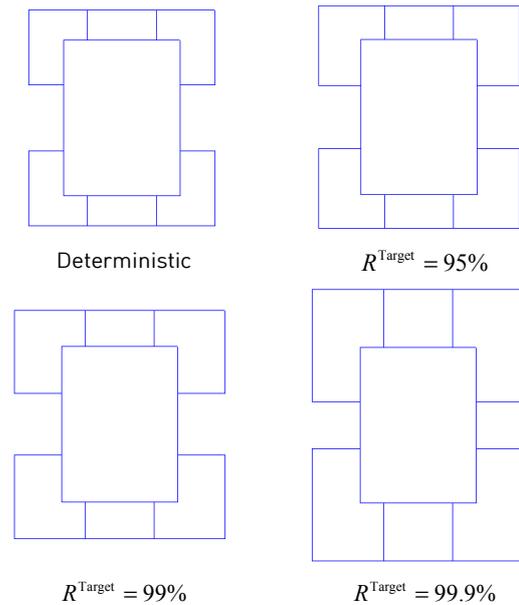


Fig. 3. Results of probabilistic design.

### 3. 결론

본 연구에서는 충격완충체 설계를 위해 재료 불확실성을 고려한 확률론적 최적설계 방법을 적용했다. 운반용기의 구조적 건전성을 제고하기 위해 충돌 에너지를 적절히 흡수할 수 있는 충격완충체를 설계하였으며, 설계 시 재료 불확실성을 고려하여 목표 신뢰성을 만족할 수 있는 안전여유를 산정했다. 확률 이론에 기반하여 산정된 안전여유를 통해 공학 시스템에 존재하는 재료 불확실성으로부터 야기되는 시스템의 성능저하로 인한 구조적 건전성 악화를 방지할 수 있다.

### 4. 참고문헌

- [1] IAEA safety standard series TS-R-1, "Regulation for the safe transport of Radioactive Material" 2009.