

## 수송용기 충격완충체 용접강도의 충돌거동 영향 평가

구정희, 서기석, 구대서, 민덕기

한국원자력연구소

대전시 유성구 덕진동 150

김영진

성균관대학교

경기도 수원시 장안구 천천동 300

### 요 약

사용후핵연료 수송용기의 충돌사고에 대한 안전성은 충격완충체의 충격흡수특성에 지배되며, 충격완충체의 충격흡수특성은 외부의 케이스와 내부 격막판 등의 철제 구조물과 내부에 삽입된 충격흡수재의 변형특성에 지배를 받는다. 충격흡수재를 감싸주는 철제 케이스와 내부 격막판의 용접 접합부는 일부 부분이 제작공정상 부득이 부분용접의 접합형태를 갖기 때문에 판재나 완전 용접된 부분에 비해 강도가 약해 충돌사고시 취약부위가 파단된다. 이러한 케이스 용접부의 파단은 충격완충체의 변형특성을 변화시켜 충격흡수거동이 달라지는 원인이 된다. 따라서, 본 연구에서는 용접 접합부의 강도특성을 수송용기의 자유낙하 충돌해석에 적용할 수 있는 해석모델을 구성하고 부분용접된 접합부의 파단강도가 수송용기의 충돌거동에 미치는 영향을 분석하였다.

### 1. 서 론

사용후핵연료 수송용기의 자유낙하 충돌사고와 같이 물체가 높이  $h$  에서 낙하하여 충돌할 때 두께가  $l_0$  인 충격완충체가 일정한 압축강도를 가지고 완전히 압축된다고 가정하면, 에너지 보존의 법칙으로부터  $mgh = mGh_2$  로 계산된다. 여기서 감속구간  $h_2$  는 충격완충체의 변형길이  $\delta_a$  로서 이론상 충격완충체의 두께는  $l_0 = h_2 = \delta_a = h/G$  로 계산된다. 그러나 충격저항력은 압축량에 비례하며 대부분 충격흡수재는 일정한계까지만 압축되므로, 완충계수(cushioning factor)  $c$  를 도입하여  $l_0 = ch/G$  로 계산한다. 여기서 감속도  $G$  는 중력가속도  $g$  와의 비로써 나타낸다[1].

자동차 산업의 발달과 함께 주로 원통이나 사각형 튜브의 소성좌굴(post-buckling) 변형을 이용

한 충격흡수에 대한 연구가 많이 진행되어 왔는데, 튜브의 변형이 주로 에너지를 흡수하는 역할을 하고 튜브 내부에 채워진 폴리우레탄 폼(foam)이나 나무는 부가적으로 충격을 흡수하는 것에 초점을 두었고 튜브의 길이가 긴 경우에 집중되었다[2~4]. 한편 사용후핵연료 수송용기의 충격완충체의 경우에는 원통형의 케이스 내부에 보강격막판을 설치하고 그 내부 공간에 충격흡수재를 삽입한다. 이러한 케이스와 격막판은 충격흡수재를 보호하고 취급시 적정 강도를 유지하는 역할을 한다. 이러한 수송용기의 충격완충체에 대한 연구에서는 주로 충격흡수재의 특성에 관심을 두었다[5]. 폴리우레탄 폼(foam)이 채워진 튜브 구조의 압축에 대해서 정적 평균압축하중은 철제 구조물의 압축강도와 폼의 압축강도의 합인  $P_m = P_{m\ steel} + P_{m\ foam}$ 으로 가정하고 있다. 그러나 실제의 경우 내부에 삽입된 폴리우레탄 폼은 튜브가 주름지며 찌그러지는 것을 방해하는 역할을 하기 때문에 튜브의 경계조건과 좌굴형태가 달라지게 된다. 이러한 해석에서는 이음매가 없는 튜브나 용접 접합부가 모재와 거의 같은 강도를 가지는 것으로 가정하고 있으나 수송용기의 충격완충체는 케이스의 전체부분을 완전히 용접할 수 없기 때문에 케이스와 내부 격막판을 구성한 후에 내부에 충격완충체를 채운 후에 일부 연결부를 부분용접으로 접합한다. 이것은 제작공정상의 문제와 내부에 채워진 발사나무나 폴리우레탄 폼 등의 충격흡수재가 용접시 열로 인해 연소되지 않도록 하기 위한 것이다. 이러한 부분 접합부는 다른 부분에 비해 강도가 약하고 충격완충체의 변형시 응력집중원이 되기 때문에 용접부의 일부가 파손된다. 따라서 본 연구에서는 충격완충체의 케이스와 케이스 내부의 철제 격막판의 용접부 파손이 수송용기의 충돌거동에 미치는 영향을 분석하고, 부분접합 용접부의 적정한 접합강도의 영향을 분석하였다.

## 2. 수송용기의 유한요소 충돌해석

### 2.1 해석모델

본 연구에서는 길이가 약 5.3 m이고 외경이 약 1.6 m이며, 중량이 약 70톤인 중형 수송용기를 대상으로 수직자유낙하 충돌하는 조건에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다. 충격완충체는 Type 304 스테인리스강으로 된 케이스와 내부에 8개의 격막판이 있고, 내부에 충격흡수재로 balsa wood와 red wood가 각각 중심부와 외곽에 삽입된 것으로 가정하였다. 해석코드로는 LS-DYNA를 사용하였으며, 해석모델은 수송용기의 대칭성을 이용해 1/4 단면을 3차원 요소로 모델링하였다. 철제 케이스에 격막판을 가진 충격완충체에서 부분접합 용접부를 고려한 모델의 경우 13,316개의 절점과 9,344개의 솔리드 요소와 1,504개의 셀 요소로 모델을 구성하였다.

재료의 기계적 물성치는 모두 인장 및 압축시험으로부터 구한 물성치를 이용하여 탄소성으로 고려하였으며, 수송용기 본체는 등가의 중량을 갖는 탄성체로 가정하였다. 스테인리스강 케이스와

내부의 충격흡수재 및 수송용기 본체 등 소재간의 모든 접촉부분은 단일면접촉(single surface contact) 요소를 사용하여 모델링하였다. 수송용기의 충돌면은 강제 수평면으로 가정하였고, 하중 조건으로는 9 m의 높이에서의 자유낙하로 인해 충돌직전에 갖는 초기속도 13.3 m/s를 고려하여 모든 질점이 13.3 m/s의 속도로 충돌면에 충돌하는 것으로 해석하였다.

## 2.2 수송용기의 충돌거동

수송용기가 9 m의 높이에서 자유낙하 하여 수평면 위에 충돌하면 수송용기가 충돌직전에 갖는 운동에너지는 충격완충체의 변형을 통해 변형에너지로 전환되며 충격을 흡수하게 된다. Fig. 1은 케이스의 내부에 부분용접 접합부를 갖는 충격완충체를 부착한 수송용기가 강제 평면에 충돌할 때 충격완충체에 발생하는 변형과 응력의 분포를 나타내고 있다. 여기서 수송용기 바닥면의 모서리와 접촉하는 부분은 케이스의 용접 접합부가 있어, 철제 케이스의 외측부가 외측의 충격흡수재인 적송(redwood) 부분을 함께 압축변형을 일으키게 하기 때문에 응력이 집중됨을 알 수 있다.

Fig. 2는 충격완충체 케이스의 용접부를 완전 접합된 상태로 고려한 경우와 부분접합된 부분의 파단을 고려한 모델에서의 수송용기의 변위이력을 비교한 것이다. 수송용기를 탄성으로 가정했기 때문에 최대변위는 충격완충체의 최대 변형량을 나타낸다. 충격완충체의 부분용접 접합부의 파단을 고려한 경우 충격완충체의 변형은 14.3 cm로서 완전용접 접합부로만 고려한 경우의 13.1 cm에 비해 변형량이 약 10 % 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 3과 Fig. 4는 각각 두 가지 모델에 대해서 수송용기에 발생하는 에너지의 변화를 나타내고 있다. 수송용기가 충돌 직전에 가지고 있던 운동에너지는 충돌하는 동안 충격완충체의 변형에너지로 전환되며 수송용기가 반발을 일으키며 충돌면에서 튀어 오르며 다시 운동에너지로 회복하게 되는데 충돌체가 소성이거나 대변형이 발생할 경우 에너지의 손실이 증가하게 된다[6]. Fig. 3에 비해 Fig. 4에서 충돌 후 약 12 ms부터 전체 에너지가 더 크게 감소하는 것은 부분접합된 용접부가 파단을 일으키며 에너지가 소실되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 두 가지의 용접부 조건에 대한 충격완충체 케이스에 발생하는 응력의 분포를 비교한 것이다. Fig. 5(a)에서 내부 케이스의 하부에는 응력이 크게 집중되었지만 Fig. 5(b)에서는 하부에 발생하는 응력이 크게 감소된 것을 알 수 있다. 이것은 부분접합된 용접부가 파단되면서 더 이상 내부의 충격흡수재인 발사나무의 변형을 완전히 구속하지 못하고 함께 변형이 되기 때문이다.

## 2.3 용접 접합강도와 수송용기의 충돌거동

충격완충체의 용접부의 강도특성이 수송용기의 충돌거동에 미치는 영향에 대해서 충격완충체의 충격흡수재를 감싸고 있는 충격완충체의 철제 케이스에 대하여 내외부 케이스만 고려한 경우, 케

이스와 내부 격막판을 고려한 경우, 케이스의 부분접합부를 한 군데 고려한 경우, 그리고 바닥면의 용접부를 전부 부분용접으로 고려한 네 가지의 경우로 모델을 구성하였다. 부분용접된 접합부의 강도특성은 부분용접시편을 이용한 시험결과를 이용하였다.

Fig. 6은 충격완충체 케이스의 조건변화에 따른 충돌면에 작용하는 충격력의 이력의 변화를 비교한 것이다. Table 1에는 이들 조건변화에 따른 충격완충체의 최대변형량, 수송용기의 최대가속도, 그리고 충돌면에 작용하는 최대충격력 등의 해석결과를 제시하였다. Fig. 6에서 충격완충체의 케이스가 완전용접된 것으로 가정하고 케이스 내부의 격막판을 고려하지 않은 경우가 최대 충격력이 가장 크게 나타났다. 그리고 충격완충체 바닥면의 용접부를 모두 부분용접으로 접합되어 파단되는 것으로 고려한 경우는 충격완충체의 변형량이 가장 크고 충격력은 가장 작게 나타났다. Fig. 6에서 충돌후 충격력이 급격히 증가하기 시작하는 시간이 약간 지연된 것은 충돌면과 수송용기 충격완충체 사이에 틈을 고려하였기 때문이다.

### 3. 해석결과 고찰

충격완충체의 케이스는 내부에 삽입된 충격흡수재를 보호하고 취급시 구조적 강도를 유지하는 역할을 하지만, 수송용기의 충돌시에는 좌굴변형을 일으키며 내부의 충격흡수재의 변형과 함께 충격을 흡수한다. 결국 철제 케이스는 자신의 좌굴변형으로 충격을 흡수하는 역할을 함과 동시에 충격흡수재의 변형을 방해하는 역할도 하기 때문에 케이스의 강성은 충격흡수거동에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 케이스의 용접부의 강도는 케이스의 변형에 대한 경계조건을 좌우하고 충격흡수재의 변형을 구속조건을 변화시키게 되므로 충격완충체의 평균압축강도를 변화시키게 된다.

Fig. 6에서 충격력이 초기에 급격히 증가했다가 감소하는 것은 충격완충체의 철제 케이스가 좌굴변형을 일으키기 전까지 큰 압축 저항력을 갖다가 좌굴변형이 시작되면서 저항력이 급격히 감소하기 때문이다. Table 1과 Fig. 6에서 충격완충체의 케이스만 완전용접으로 고려하고 내부의 격막판을 무시한 경우에 변형은 증가하지만 충격력은 오히려 격막판을 고려한 경우보다 증가하는 것은 격막판이 변형에너지로 충격을 흡수하는 것이 고려되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 케이스와 격막판을 모두 고려하고 용접조건에 따라 부분접합부를 고려한 경우에는 충돌 후 12 ms부터 격막판의 부분접합된 부분이 파단되면서 변형량이 증가하여 충격력이 급격히 감소하기 시작한다. 또한 케이스 바닥면 전체를 부분접합된 것으로 가정한 경우에는 충격완충체의 변형량도 크게 증가하고 충격력도 크게 감소하여 전자의 경우와 전혀 다른 거동을 보이고 있다. 따라서 같은 재질의 충격완충체라 하더라도 용접부의 강도가 모재인 판재부분이나 완전용접된 부분에 비해 취약해 파단이 발생하는 경우 충돌거동이 크게 달라지게 됨을 알 수 있다. 또한 이러한 용접부의 파단은 충격에너지를 효과적으로 감소시킬 수 있는 인자로 작용할 수 있음을 알 수 있다.

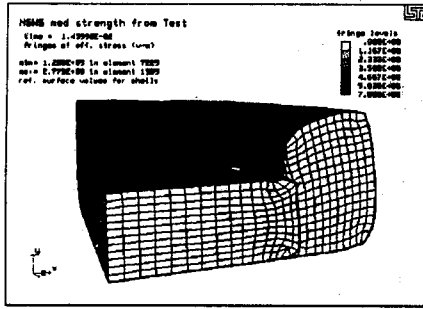


Fig. 1 Deformed shape and stress contour of impact limiter.

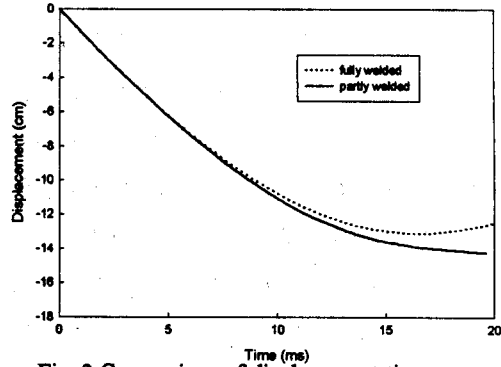


Fig. 2 Comparison of displacement-time histories according to the weld condition.

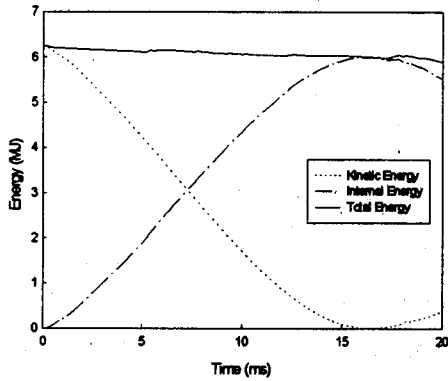


Fig. 3 Energy-time histories of fully welded impact limiter.

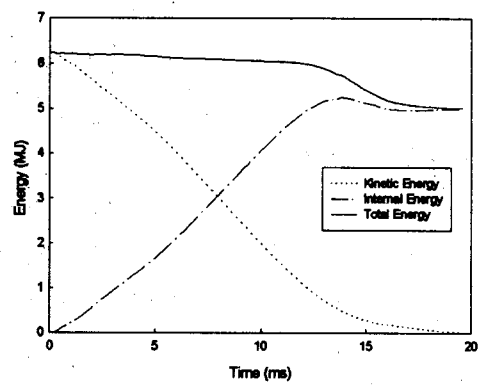
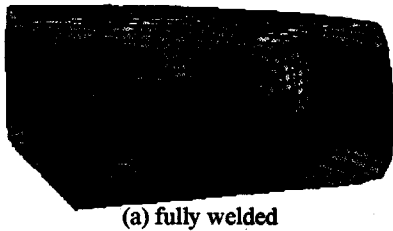


Fig. 4 Energy-time histories of partly welded impact limiter.



(a) fully welded



(b) partly welded

Fig. 5 Comparison of stress contour of impact limiter cases.

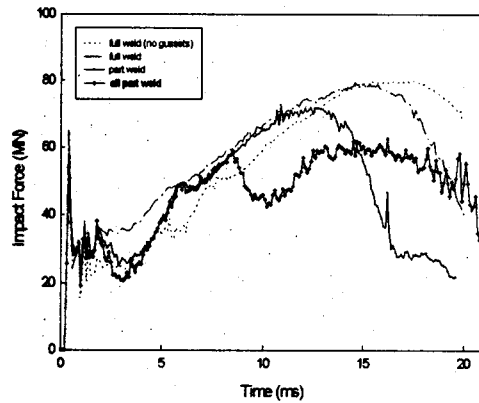


Fig. 6 Comparisons of impact force-time histories according to the welding condition of impact limiter.

#### 4. 결 론

수송용기의 충격완충체의 부분용접 접합부의 파단을 고려한 충돌해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 충격흡수재를 감싸고 있는 충격완충체의 케이스와 내부의 격막판 등은 수송용기의 충돌시 초기에는 좌굴변형을 일으키면서 초기충격력을 증가시키며, 변형이 진전됨에 따라 충격흡수재의 변형을 구속하여 수송용기에 작용하는 충격력을 증가시킨다.
- (2) 수송용기는 충격완충체의 케이스에 부분접합으로 다른 용접부나 관재 부분에 비해 낮은 강도에서 파단이 발생할 경우 충격흡수재의 변형을 구속하는 조건이 달라지게 되므로 수송용기의 충돌거동에 큰 영향을 미치게 된다.
- (3) 충격완충체 케이스의 부분 접합부에 적절한 파단강도를 부여하면 충격완충체의 변형량을 증가시켜 최대충격력이 발생하는 시간을 지연시키며 충격력을 감소시킬 수 있게 되어 완전용접된 경우보다 더 좋은 충격흡수효과를 얻을 수 있다.

Table 1. Comparison of analysis results according to the welding conditions.

Item \ Model	Full Weld -no gusset	Full Weld	Part Weld (one part)	Part Weld (all bottom)	Remark
Max. Displacement (cm)	14.7	13.1	14.3	15.2	
Max. Impact Force (MN)	80.0	79.4	72.7	59.9	
Max. Acceleration (g)	863.4	875.1	783.0	459.7	

#### 참고문헌

- (1) Johnson, W. and Reid, S. R., "Metallic Energy Dissipating Systems," *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 31, No. 3, pp. 277~288 (1978).
- (2) Lampinen, B. E. and Jeryan, R. A., "Effectiveness of Polyurethane Foam in Energy Absorbing Structures," *Trans. SAE 91*, pp. 2059~2076 (1982).
- (3) Reddy, T. Y. and Wall, R. J., "Axial Compression of Foam Filled Thin-Walled Circular Tubes," *Int. J. Impact Engineering*, Vol.7, No. 2, pp. 151~166 (1988)
- (4) Reid, S. R. "Plastic Deformation Mechanisms in Axially Compressed Metal Tubes Used as Impact Energy Absorbers," *Int. J. of Mech. Sci.*, Vol. 35, No. 12, pp. 1035~1052 (1993).
- (5) Henry, F. P. and Williams, C. W., "Rigid Polyurethane Foam for Impact and Thermal Protection," *PATRAM95*, pp. 1161~1168 (1995).
- (6) Zhong, Z. H., "*Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems*," Oxford University Press (1993).