

'98 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 수송용기 충격완충체 케이스 용접부의 접합강도 평가

구정희, 민덕기

한국원자력연구소

대전시 유성구 덕진동 150

남재영, 이종경, 김영진

성균관대학교

경기도 수원시 장안구 천천동 300

### 요 약

사용후핵연료 수송용기는 자유낙하 충돌사고에 대비해 양 끝단에 충격완충체를 부착하는데 이 충격완충체의 충격흡수특성은 수송용기의 구조적 안전성에 크게 영향을 미친다. 충격완충체의 충격흡수재를 감싸주는 철제 케이스와 내부 격막판의 용접 접합부는 제작공정상 일부 부분이 부분 접합 형태를 갖기 때문에 완전 접합된 부분이나 모재인 판재 부분에 비해 강도가 약하다. 따라서, 본 연구에서는 충격완충체의 부분접합부와 같은 조건의 접합상태를 고려한 용접시편의 시험을 통해서 충격완충체 케이스의 용접 접합부에 대한 접합강도와 기계적 특성을 분석하고, 접합부의 강도특성이 수송용기의 자유낙하 충돌거동에 미치는 영향을 예측하였다.

### 1. 서 론

사용후핵연료를 운반하는 B형 수송용기는 9 m 높이에서 자유낙하하여 충돌하는 가상사고조건에서도 구조적 건전성을 유지하여야만 된다[1]. 수송용기의 충돌문제에 있어서 가장 중요한 역할을 하는 것은 충격완충체(impact limiter)로서, 충격완충체의 성능은 충돌체(impactor)가 충돌 직전에 가지고 있는 운동에너지를 충격완충체의 소성변형을 통한 변형에너지로 얼마나 잘 흡수하는가에 달려있다[2]. 수송용기의 충격완충체에는 발사나무(balsa wood), 적송(red wood) 및 폴리우레탄 폼(polyurethane foam) 등 가볍고 압축강도가 비교적 작고 압축률이 큰 다공성 재료(cellular material)를 이용하고 있다. 한편 자동차 산업의 발달과 함께 다른 분야에서는 사각형이나 원통형 튜브 등 박판 구조물의 좌굴변형이나 박판 구조물의 좌굴과 다공성 재료의 소성압축특성을 서로 결합한 형태의 압축변형을 이용한 충격흡수거동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 방

범중 어떠한 방법을 사용하든 충격완충체의 충격흡수특성은 하중-변위 특성과 압축거리에 지배되며 에너지 흡수밀도 및 파손시까지의 일정한 감속비의 압축거동 등이 주요 요소로 꼽힌다[3].

내부가 채워진 박판구조물의 압축변형은 소성좌굴과 접촉문제가 복합된 문제로서 박판 구조물의 충격흡수에서는 주로 원통이나 사각형 튜브의 소성좌굴(post-buckling)이 충격을 흡수하는 역할을 하고 튜브 내부에 채워진 폴리우레탄 폼이나 나무는 부가적으로 충격을 흡수하는 것에 초점을 두고, 튜브의 길이가 긴 경우의 연구에 집중되었다[4~7]. 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 하며 주로, 탄소강이나 스테인리스 강판을 사용하고 있으며, 사각형의 단순한 구조보다는 복잡한 다각구조를 가지고 있다. 따라서 지금까지는 수송용기의 충돌문제에 대한 연구에서는 주로 충격흡수재의 특성에 관심을 두었다[8].

박판 구조물을 이용한 충격완충체의 충격해석에서는 주로 튜브재의 용접 접합부가 완전히 용접된 것으로 가정하고 있지만, 실제로는 수송용기의 충격완충체는 내부에 채워진 발사나무나 폴리우레탄 폼 등의 충격흡수재가 용접시 열로 인해 연소되지 않도록 하기 위하여 케이스와 격막판 등의 일부 접합부가 부분접합의 상태를 갖게 된다. 이러한 부분 접합부는 다른 부분에 비해 강도가 약하므로 충격완충체의 변형시 용접부의 일부가 파손된다. 따라서 본 연구에서는 충격완충체의 케이스와 케이스 내부의 철제 격막판 용접부의 접합강도가 수송용기의 충격흡수거동에 미치는 영향을 파악하고 충격완화에 기여할 수 있는 인자들의 상호영향을 분석하였다.

## 2. 용접 접합부의 접합강도평가 시험

### 2.1 시험방법

수송용기 충격완충체의 용접 접합부의 접합강도를 평가하기 위해서 ASTM E8[9]과 ASME Sec. IX에 제시된 기준에 따라 인장 및 전단실험을 수행하였다. 충격완충체에서는 주로 두께가 5 mm이하인 스테인리스강 판재를 사용하기 때문에, 본 연구에서는 Type 304스테인리스강 판재를 시험재료로 하였다. 시험재료의 기계적 물성치를 측정하기 위하여 0.13 ~ 16 mm의 두께에 대해 적용하는 박판형 시편(sheet-type specimens)에 대한 표준시편을 제작하여 인장시험을 수행하였으며, 충격완충체의 용접조건에 따른 영향을 평가하기 위해 각각의 조건별로 용접 접합된 시편을 제작하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 용접시편의 형상을 나타내고 있다. 용접부위는 충격완충체의 부분용접부와 같이 하였고, 용접부의 수와 모재의 두께에 따른 영향을 평가하기 위하여 두께가 3 mm와 5 mm인 두 가지 재료를 사용하여 인장과 전단 하중에 대하여 용접부의 수가 4 ~

6개인 경우에 대하여 시험하였다. 스테인리스강은 연성이 높아 판재가 늘어나면서 두께가 줄어들기 때문에 썸기형 조임쇠(wedge grip)를 사용하였으며, 변위제어방식으로 시험을 수행하였고, 항복응력은 0.2 % 오프셋법(offset method)을 사용하여 구하였다. 시험온도는 상온을 기준으로 하였으며, 시험 결과의 신뢰성을 높이기 위해 각 시편의 종류별로 3개씩 시험을 수행하였다. 시험기기는 전기유압식 피로시험기(Instron 1332)를 사용하였으며, 용접 접합부는 변형률을 측정하기가 불가능하기 때문에 용접부에서 어느 정도 떨어진 곳의 모재의 변형률을 측정하여 용접부의 파단 직전까지 시편에 발생하는 응력을 구하고, 파단시까지 용접부재가 받는 최대하중을 구하였다.

## 2.2 시험결과

표준 인장시편을 사용한 인장시험 결과 Type 304 스테인리스강의 기계적 물성치를 구하였는데 두께가 3 mm인 경우와 5 mm인 경우 항복강도와 인장강도는 각각 272 MPa와 597 MPa로서 거의 차이가 없었지만 파단이 일어나기 시작할 때의 변형률이 두께가 3 mm인 경우 약 0.48이었으며 두께가 5 mm인 경우에는 약 0.62로 두께가 두꺼울수록 연신률이 증가하는 경향을 보였다. 부분접합 형태의 용접부를 가진 시편의 인장과 전단하중에 대한 시험결과는 Table 1에 정리하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 용접시편의 인장시험과 전단시험 장면을 나타내고 있는데, 전단시험에서는 시편의 고정을 위해 별도의 지그(jig)를 제작하여 사용하였다. 인장시험에서는 하중이 증가하며 용접부의 일부가 파단이 되면서 남아있는 용접부가 약 1~2 mm 정도까지 늘어나며 파단이 천천히 일어나지만 전단하중에서는 용접부에 변형이 거의 발생하지 않는 상태에서 순간적으로 파단이 일어나는 취성파괴의 경향을 보였다. 한편 3 mm 두께의 전단시편의 경우 Fig. 3과 같이 지그와 시편의 두께 사이의 간격으로 인해 바닥 판재에 약간의 굽힘변형이 발생하였다. Fig. 4는 인장 및 전단시편의 파단된 모습을 보여주고 있다. Fig. 5와 Fig. 6은 두께가 3 mm와 5 mm인 인장시편의 파단시까지 용접부재에 발생하는 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다.

## 3. 시험결과 고찰

수송용기 충격완충체의 용접 접합부와 같은 부분접합 형태를 갖는 Type 304 스테인리스강 시편을 이용한 인장과 전단시험 결과 하중형태와 관계없이 용접부가 모재인 판재 부분보다 약해서 용접부에서 파단이 먼저 발생함을 알 수 있었다. 그러나 판재의 두께가 얇을 경우 판재 부분이 어느 정도 소성변형이 진행될 때까지 용접부가 함께 하중을 지탱하므로 충격완충체의 압축변형시 일정 몫을 함께 할 수 있게 된다. 이것은 판재가 얇아질 경우 용접부의 강도와 판재부의 강도와 차이가 적어지기 때문이다.

Table 1의 결과에서 보듯이 인장시편이 전단시편에 비해 큰 하중을 견디는 것으로 나타났고, 시편이 두꺼울수록 최대하중이 증가하는 경향을 보였다. 인장하중의 경우 두께가 5 mm인 시편이 3 mm 시편에 비해 약 21 % 강도가 증가하였지만 전단하중의 경우 약 3.6 % 증가에 그쳐 전단 하중에서는 시편의 두께가 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. Fig. 5에서 용접 접합부의 수가 4개인 경우에는 판재에 항복이 일어나면서 용접부가 곧바로 파단되지만 용접부가 6개로 증가할 경우 모재에 소성변형이 발생하는 중간에 용접부가 파단되는 것을 알 수 있다. 이것은 판재 부분이 약 40.8 kN에서 항복이 시작되어 파단시까지 받을 수 있는 하중이 약 89.5 kN인데 용접부가 49.0 kN에서 파단되기 때문에 판재가 소성영역에 들어가서 변형이 되는 중간에 용접부가 파단됨을 말한다. 그러나 시편의 두께가 5 mm인 경우 Fig. 6에서 보듯이 판재에 거의 소성이 발생하지 않은 상태에서 용접부가 파단된다. 전단시험의 경우에도 인장시편의 경우와 비슷한 경향을 보였는데 인장시편의 경우보다 작은 하중에서 파단되었다. 두께가 3 mm인 경우에는 판재에 항복이 시작된 이후에 파단이 발생하지만, 시편의 두께가 5 mm인 경우에는 판재가 항복강도에도 이르지 않은 상태에서 용접부가 파단되는 결과를 보였다. 또한 인장과 전단의 경우 모두 용접 접합부의 수가 증가할수록 파단에 필요한 하중은 증가하지만 단위 용접개소당 견딜 수 있는 하중값은 약간씩 감소하는 경향을 보였다. Table 1의 T34, T35, T36의 인장시편과 S54, S55, S56 시편의 결과에서 보듯이 판재부분이 항복강도를 넘어섰을 때 용접부가 파단되는 인장의 경우와 판재부가 항복강도 이내에서 용접부가 파단되는 전단의 경우에는 단위 용접개소당 파단소요하중이 거의 일정한 값을 보였다.

#### 4. 결 론

수송용기 충격완충체에 적용되는 부분접합 형태를 갖는 용접시편을 이용한 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 충격흡수재를 감싸고 있는 충격완충체의 케이스와 내부의 격막판 등의 용접 접합부는 모재의 강도를 고려하여 수송용기의 충돌시 케이스가 소성영역에 들어갈 때까지 함께 강도를 유지할 수 있도록 하여야 한다.

(2) 수송용기 충격완충체의 케이스와 내부 격막판의 부분용접부는 다른 부분에 비해 강도가 낮기 때문에 이 부분의 파단강도를 고려하지 않을 경우에는 충격완충체의 강도가 과장되므로, 응력 발생량 및 충격량 등이 지나치게 보수적으로 계산될 수 있다.

(3) 충격완충체의 부분접합되는 용접부의 위치의 선정과 용접강도의 결정은 충격흡수재의 구속 효과를 적절히 유지하는 역할을 하므로 충돌의 후반부에 발생하는 최대충격력을 감소시킬 수 있게 된다.

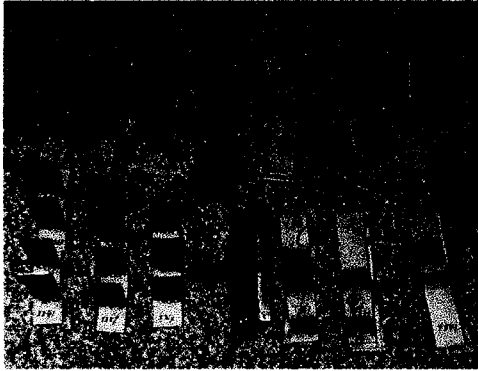


Fig. 1 Specimens for welded joint strength test.



Fig. 2 Tensile test of T- specimens.

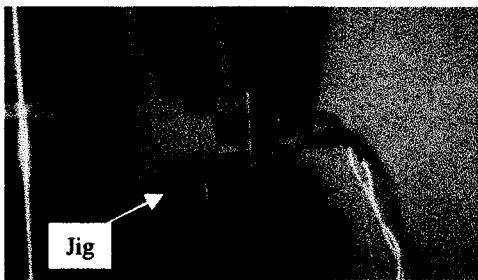


Fig. 3 Shear test of S- specimens.

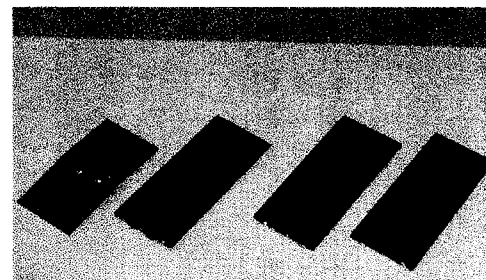


Fig. 4 Specimens after test.

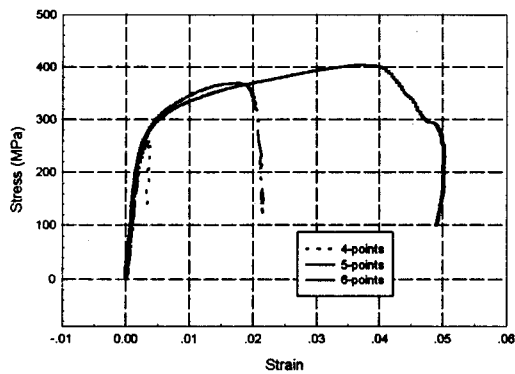


Fig. 5 Comparisons of stress-strain curves according to the welding points for 3 mm thick tension specimens.

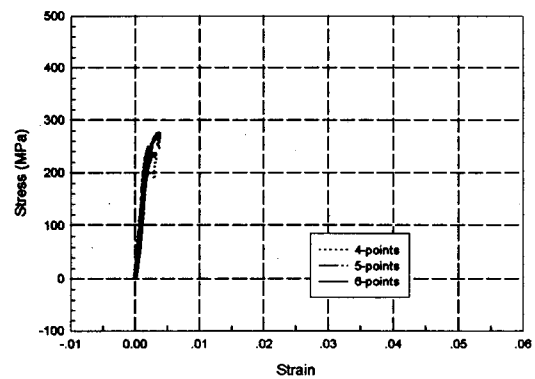


Fig. 6 Comparisons of stress-strain curves according to the welding points for 5 mm thick tension specimens.

Table 1. Specifications and test results of spot welded test specimens

Loading	Specimen	No. of Weld Points	Thickness (mm)	$\sigma_{\max}$ at Failure (MPa)	$P_{\max}$ (kN)	$P_{\max} /$ weld point (kN)
Tension	T34	4	3.0	265.5	40.44	10.11
	T54	4	5.0	210.5	52.38	13.10
	T35	5	3.0	352.0	53.39	10.68
	T55	5	5.0	256.0	62.18	12.44
	T36	6	3.0	395.5	60.17	10.03
	T56	6	5.0	279.3	70.90	11.82
Shear	S34	4	3.0	263.7	40.28	10.07
	S54	4	5.0	139.7	36.03	9.01
	S35	5	3.0	284.5	43.67	8.73
	S55	5	5.0	184.0	47.27	9.45
	S36	6	3.0	311.8	49.01	8.17
	S56	6	5.0	221.5	56.82	9.47

#### 참고문헌

- (1) IAEA, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials," *IAEA Safety Standards Series No. ST-1*, pp.81~98 (1996).
- (2) Johnson, W. and Reid, S. R., "Metallic Energy Dissipating Systems," *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 31, No. 3, pp. 277~288 (1978).
- (3) Lampinen, B. E. and Jeryan, R. A., "Effectiveness of Polyurethane Foam in Energy Absorbing Structures," *Trans. SAE 91*, pp. 2059~2076 (1982).
- (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) Meng, Q., et al., "Axial Crushing of Square Tube," *Int. J. Mech Science*, Vol. 25, No. 9-10, pp. 743~773 (1983).
- (6) Abramowicz, W. and Weirzbicki, T., "Axial Crushing of Foam-Filled Columns," *Int. J. of Mech. Science*, Vol. 30, No.3, pp.263~271 (1988).
- (7) 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).
- (8) Wellman, G. W., "Transportation System Impact Limiter Design using Rigid Polyurethane Foam," *SAND84-2271 DE85 015088*, Sandia National Laboratories (1984).
- (9) ASTM STANDARDS Vol. 03.01 Metals-Mechanical Testing, E8M, "Standard Methods for Tension Testing of Metallic Materials [METRIC]," pp.146~169 (1986).