

# 사용후핵연료 운반용기 용접부 파괴인성 평가

정성환\*

한국수력원자력(주) 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

\*sunghchung@khnp.co.kr

## 1. 서 론

원전 사용후핵연료를 18다발까지 운반할 수 있는 KN-18 사용후핵연료 운반용기(Fig.1)의 본체재료는 저합금 탄소 단조강(SA350 LF3)으로, 운반용기에 대한 9 m 자유낙하, 1 m 파열 등 운반사고조건 및 -40°C 저온조건에 견딜 수 있는 충격특성 및 파괴인성이 뛰어나다. ASME Sec.III Div.3 및 US NRC RG 7.11 파괴인성요건에 따르면 SA350 LF3의  $RT_{NDT}$ (기준무연성천이온도)는 -107°C인데, 운반용기 본체재료의  $RT_{NDT}$ 는 ASTM E208의 낙중시험(drop weight test)에서 -107°C를 확인하였다. 운반용기 본체의 상부와 하부는 girth seam 방식으로 용접되는데(Fig.2), 사용되는 용접봉 역시 본체재료와 동등한 파괴인성이 요구된다. 그러나 전 세계적으로 본체재료와 동등한 파괴인성에 해당하는  $RT_{NDT}$ 인 -107°C를 만족하는 용접봉이 없고 -101°C가 최대이었다. 따라서 본체재료의  $RT_{NDT}$  요건과 다른 용접봉을 사용하여 용접한 경우에 대하여 당초의 파괴인성을 만족시킬 수 있는 지 평가하였다.



Fig. 1. KN-18 cask. Fig. 2. Welding on the cask body.

## 2. 본 론

운반용기 용접부에 대하여 낙중시험을 수행하여  $RT_{NDT}$ 를 구하고 파괴인성을 평가하는 것이 일반적이라고 할 수 있으나, ASTM E399에 따른 주변형률(plain strain) 파괴인성시험을 저온운전 온도요건인 -40°C에서 수행하여 다음과 같은 방법으로 용접부의 파괴인성을 평가하였다 :

- ASTM E399에 따른 주변형률 파괴인성시험의 결과치와 ASME Sec.III Div.3의 파괴인성요건과 비교하여 상대적 파괴인성치가 적합한지 평가
- ASME Sec.XI App.A에 따라  $K_I$ (응력집중계수)를 구하고 이를 주변형률 파괴인성시험의 결과치와 비교하여 파괴인성치가 적합한지 재평가

주변형률 파괴인성시험은 운반용기 본체재료에 대한 최저운전온도(LST)인 -40°C에서 ASTM E399에 따른 compact 시편으로 수행하였다. 시편은 두께 24 mm로 하여 용접부(weld), 열영향부(HAZ), 모재(base) 등 6개소에서 채취하였다(Fig.3). 상온에서의 파괴인성치와 -40°C에서의 파괴인성치를 서로 비교하여 변화추이를 평가하였다. 각 시편에 대한 시험조건은 Table 1에 나타내었다.

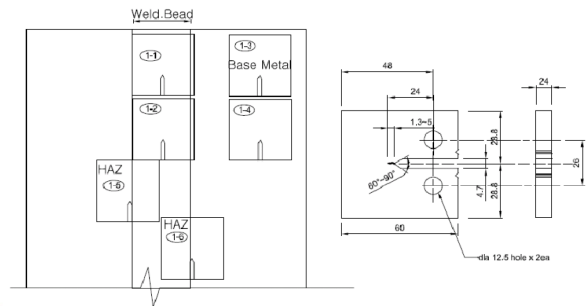


Fig. 3. Test specimens.

Table 1. Test conditions

Specimen	Temp. (°C)	Crack length (mm)	Crack load (MPa·m <sup>1/2</sup> )	Load rate (MPa·m <sup>1/2</sup> )
Weld	-40	23.5	2.70	1.75
HAZ	-40	23.5	2.20	1.78
Base	-40	23.5	2.24	1.76
Weld	23	23.5	1.50	1.77
HAZ	23	23.5	2.70	1.79
Base	23	23.5	1.47	1.70

파괴인성치  $K_Q$  값은 는 ASTM E399에 따라 다음 식으로 구하여 Table 2에 나타내었다.

$$K_Q = (P_Q/BW^{3/2})f(a/W)$$

$$f(a/W) = \frac{(2 + a/W)(0.886 + 4.64a/W - 13.32a^2/W^2 + 14.72a^3/W^3 - 5.6a^4/W^4)}{(1 - a/W)^{3/2}}$$

$P_Q$  = load as determined in 9.1.1, klf (kN),  
 $B$  = specimen thickness as determined in 8.2.1, in. (cm),  
 $W$  = specimen width, as determined in A4.4.1, in. (cm),  
 and  
 $a$  = crack length as determined in 8.2.2 and A4.4.1, in. (cm).

Table 2. Fracture toughness values ( $K_{Ic}$ )

Specimen	Temperature(°C)	Fracture toughness(MPa·m <sup>1/2</sup> )
용접부	-40	96.5
열영향부	-40	92.1
모재	-40	74.1
용접부	23	93.8
열영향부	23	80.1
모재	20	78.3

Table 3(ASME Sec.III Div.3 Table WB-2331.2-2)에서 시편두께 25 mm일 때 파괴인성치 70 MPa·m<sup>1/2</sup>에 대하여 시편두께 24 mm에 대한 파괴인성 요구치는 68.3 MPa·m<sup>1/2</sup>이므로, 각 위치별 시편에 대한 시험결과 파괴인성치가 모두 이 요구치를 초과하므로 최저운전온도 -40°C에서 용접부에 대한 파괴인성이 충분히 확보된 것을 알 수 있다. 용접부에 대하여 -40°C에서의 파괴인성치와 상온에서의 파괴인성치를 비교하면 -40°C에서의 값이 상온에 비하여 감소하지 않기 때문에 상온에서 -40°C까지 파괴인성이 충분히 보장된다.

Table 3. ASME Sec.III Div.3 Table WB-2331.2-2  
REQUIRED FRACTURE TOUGHNESS VALUES FOR FERRITIC STEEL MATERIAL FOR CONTAINMENTS HAVING A SPECIFIED YIELD STRENGTH OF 50 ksi (350 000 kPa) OR LESS AT 100°F (38°C)

Nominal Wall Thickness		Rapid-load Fracture Toughness [Note (1)]	
in.	(mm)	ksi√in.	(MPa)√mm
5/8	(16)	50	(55)
1	(25)	64	(70)
2	(50)	94	(103)
3	(75)	113	(124)
4	(100)	130	(143)

ASME Sec.XI에 따르면 단조강의 초음파검사 결함한계의 미소결함을 가정하여 결함선단에 집중되는 응력집중계수  $K_I$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$K_I = [\sigma_m M_m + \sigma_b M_b] \sqrt{\pi a/Q}$$

$$Q = 1 + 4.593 (a/\ell)^{1.65} - q_y$$

$$q_y = [(\sigma_m M_m + \sigma_b M_b) / \sigma_{ys}]^2 / 6$$

$\sigma_m, \sigma_b$  = membrane and bending stresses, in accordance with A-3200(a)  
 $a$  = one-half the axis of elliptical flaw  
 $M_m$  = correction factor for membrane stress from Fig. A-3310-1  
 $M_b$  = correction factor for bending stress from Fig. A-3310-2  
 $\ell$  = the major axis of the flaw  
 $a/\ell$  = the flaw aspect ratio  $0 \leq a/\ell \leq 0.5$   
 $\sigma_{ys}$  is the material yield strength.

응력값은 KN-18 운반용기의 9 m 자유낙하조건에서의 최대응력인 330 MPa를 적용하면,

$$Q = 1 + 4.593(a/\ell)^{1.65} - q_y$$

$$= 1 + 4.593(a/\ell)^{1.65} - (330/26)^2/6$$

$$= 0.828 \text{ 이므로,}$$

$$K_I = 330 \times (\pi a/Q)^{1/2}$$

$$= 30.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} (28.0 \text{ ksi}\cdot\text{m}^{1/2}) \text{ 이다.}$$

ASTM E399에 따른 시험으로 구한 파괴인성치에서 -40°C 용접부의  $K_{Ic}$ 와 비교하면 -40°C 용접부의  $K_{Ic}$ 는 96.5 MPa·m<sup>1/2</sup>이므로 계산된  $K_I$  보다 큰 값이다. 따라서 KN-18 운반용기의 상부와 하부에 대한 용접부는 최저운전온도인 -40°C에서 파괴인성이 확보되었다고 할 수 있다.

### 3. 결론

ASME Sec.III Div.3에서 시편두께가 24 mm인 경우 파괴인성 요구치는 68.3 MPa·m<sup>1/2</sup>이며, ASTM E399에 따른 시험으로 구한 시편별 파괴인성치  $K_{Ic}$ 가 모두 68.3 MPa·m<sup>1/2</sup>를 초과하므로 KN-18 운반용기 용접부는 최저운전온도인 -40°C에서 파괴인성이 확보되었다고 할 수 있다. 또한 ASTM E399에 따른 시험에서 -40°C에서의 용접부에 대한 파괴인성치  $K_{Ic}$ (96.5 MPa·m<sup>1/2</sup>)가 ASME Sec.XI에 따른 요구치  $K_I$ (30.8 MPa·m<sup>1/2</sup>) 보다 높기 때문에 KN-18 운반용기의 용접부는 -40°C 최저운전온도에서 사용이 적합한 파괴인성이 확보되었다고 할 수 있다.

따라서 KN-18 운반용기 본체재료인 SA350 LF3의 RT<sub>NDT</sub>와 상이한 용접봉을 사용하여 실시한 용접부 역시 -40°C 최저운전온도에서 충분한 파괴인성을 확보하였다고 판단하였으며, 이에 대하여 규제기관으로부터 승인을 획득하여 운반용기의 제작에 적용하였다.

### 4. 참고문헌

- [1] ASME BPVC Sec.III Div.3, Containments for Transportation and Storage of SNF and HLW, 2010 Edition.
- [2] ASME BPVC Sec.XI, Rules for In-service Inspection of NPP Components, 2010 Edition.
- [3] ASME SA350, Specification for Low-alloy Steel Forgings, Requiring Notch Toughness Testing for Piping Components, 2010.
- [4] ASTM E208, Standard Test Method for Conducting Drop Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferric Steels, 2010.
- [5] ASTM E399, Standard Test Method for Linear-Elastic Plain-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of Metallic Materials, 1997.