

원전 역지 밸브/배관 맞대기 용접부와 밸브 몸체의 취성 파괴에 미치는 잔류응력 및 Charpy V-노치 충격에너지의 영향 고찰

김종성[†] · 김현수^{*}

Investigation on Effects of Residual Stresses and Charpy V-Notch Impact Energy on Brittle Fractures of the Butt Weld between Close Check Valve and Piping, and of the Valve Body in Nuclear Power Plants

Jong-Sung Kim[†] and Hyun-Su Kim^{*}

(Received 12 June 2015, Revised 25 June 2015, Accepted 25 June 2015)

ABSTRACT

The study investigated effects of residual stresses and Charpy impact energy on brittle fractures of the butt weld between the valve and the piping, and of the valve body in nuclear power plants via a linear elastic fracture mechanics approach in the ASME B&PV Code, Sec.XI and finite element analysis. Weld residual stress in a butt weld between close check valve and piping, and residual stress in the valve due to casting process were assumed to be proportional to yield strength of base metal. Operating stresses in the butt weld and the valve body were calculated using approximate engineering formulae and finite element analysis, respectively. Applied stress intensity factors were calculated by assuming postulated cracks with specific sizes and then by substituting the residual stresses and the operating stresses into engineering formulae presented in the ASME B&PV Code, Sec.III. Plane strain fracture toughness was derived by using a correlation between Charpy V-notch impact energy and fracture toughness. Structural integrity of the weld and the body against brittle fracture was assessed by using the applied stress intensity factors, plane strain fracture toughness and the linear elastic fracture mechanics approach. As a result, it was identified that the structural integrity was maintained with decreasing the residual stress levels and increasing the Charpy V-notch impact energy.

Key Words : Nuclear Power Plant (원자력 발전소), Brittle Fracture (취성파괴), Close Check Valve (역지 밸브), Piping (배관), Butt Weld (맞대기 용접부), Valve Body (밸브 몸체), Residual Stress (용접 잔류응력)

기호설명

B = Thickness of section
C_V = Charpy V-notch impact energy
CVN = Charpy V-notch
K_I = Mode I applied stress intensity factor

K_{Ic} = Plane strain fracture toughness
K_{mat,25} = K-based fracture toughness corresponding to thickness 25 mm

1. 서론

최근 용접 후열처리와 관련하여 원전 밸브-배관 용접부의 용접 잔류응력, 구조 공정에 기인하여 발생하는 밸브 몸체의 잔류응력과 Charpy V-노치 충격에너지가 해당 기기 용접부와 밸브 몸체의 구조적 건전성

[†] 회원, 순천대학교 기계우주항공공학부
kimjsbat@sunchon.ac.kr
TEL: (02)123-1234 FAX: (02)123-1234

^{*} 한국전력기술(주)

에 미치는 영향이 현안으로 대두된 바 있다⁽¹⁾. 다양한 기기 몸체와 용접부의 결합에 대한 잔류응력과 파괴인성치(Charpy V-노치 충격에너지 포함)가 취성 파괴에 미치는 영향을 고찰한 몇몇 연구⁽²⁻⁴⁾가 존재하나 대부분 상세 해석을 통해 그 영향을 고찰하였다. 현장에서 매우 간편하게 평가할 수 있는 공학적 수단을 이용하여 그 영향을 고찰한 연구는 찾아보기 힘들다.

본 연구에서는 다음 주기까지 운전 가능성을 보수적 관점에서 평가하기 위해 가상의 균열이 존재하는 것으로 가정하고 ASME B&PV Code, Sec.XI⁽⁵⁾에 제시된 선형탄성 파괴역학 접근론과 유한요소 해석을 수행하여 잔류응력과 Charpy V-노치 에너지가 원전 역지밸브-배관 용접부와 역지밸브 몸체의 취성파괴에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 평가 대상 및 방법

2.1 평가 대상

평가 대상은 원전 주급수계통 역지밸브-배관 용접부이다. 외경은 323.9 mm, 두께는 15.30 mm이다. 평가 대상 밸브와 배관의 재질은 페라이트계 강으로써 ASME Code, Sec.XI, Subsec.IWC, Article IWC-3514.2에 따르면 균열의 허용크기는 안전 1등급 기준을 적용하여야 한다. 비파괴 검사 결과, 해당 용접부에 균열이 존재하지 않지만, 보수적인 측면에서 균열 깊이를 벽 두께의 10%, 20% 및 25%로 가정하였다. 균열 깊이 대비 균열 길이 비가 0.167인

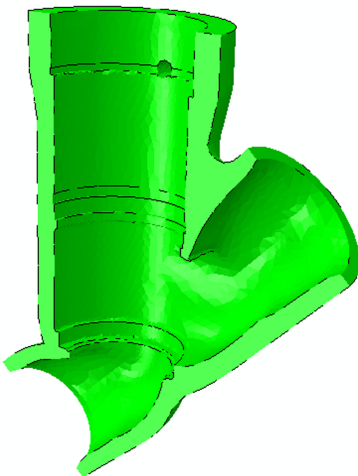


Fig. 1 Schematic configuration of the close check valve in the main feedwater system.

반 타원형 원주방향 균열로 가정하였다. Fig. 1은 주급수 역지밸브의 형상을 제시하고 있다. 밸브 모체에 대한 Charpy V-노치 충격에너지 실험 결과, 최소값과 평균값은 각각 10.94J와 18.47J로 측정되었다.

2.2 평가 방법

밸브-배관 용접부는 개략 평가 방법을, 밸브 몸체는 준상세 평가 방법을 적용하였다. 개략적인 방법은 ASME Code, Sec.XI의 평가식, K_{Ic}-CVN 충격에너지 관계식 등을 이용하여 보수적으로 평가하는 것이며 준상세 방법은 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS⁽⁶⁾을 이용한 유한요소 탄성 응력해석을 통해 응력분포를 도출하고 이를 ASME Code, Sec.XI의 선형탄성파괴역학 평가식에 대입하여 건전성을 평가하는 방법이다.

본 평가에서 수행된 주요 절차는 다음과 같다.

- 보수적인 측면에서 이차 막응력은 일차 막응력으로 간주
- 보수적인 측면에서 이차 굽힘응력은 일차 굽힘응력으로 간주
- Level D 운전조건에 대한 하중이 Level B 조건에 비해 크기는 하나 ASME 코드에서 명시된 안전계수(SF: safety factor)를 고려할 경우 Level B의 하중이 Level D의 하중보다 크므로 Level B 조건에 대한 평가만 수행하였음
- 모드 1 작용 응력확대계수 KI은 ASME B&PV Code, Sec.XI, App. C-7300의 절차에 따라 평가
- 평면변형을 파괴인성치 K_{Ic}는 다음과 같은 CVN 흡수에너지와 파괴인성치 사이의 관계식⁷으로부터 도출

$$K_{mat,25} = 12 \sqrt{CV} \quad (1)$$

$$K_{Ic} = (K_{mat,25} - 20)(25/B)^{1/4} + 20 \quad (2)$$

여기서 K_{mat,25}는 두께 25 mm에 대한 K 기반 파괴인성치 (MPa·m^{0.5}) 이고, CV는 Charpy V-노치 충격에너지 (J), B는 단면의 두께 (mm)임

- 축방향 잔류응력은 막응력의 형태로 두께에 일정한 크기로 작용하고, 그 크기는 재료의 항복응력 (보수적 측면에서 측정치 중 최대값인 512.22 MPa 적용)의 100%, 75%, 50%, 25%로 변화시켜 평가
- Fig. 2는 상세 유한요소 탄성 응력해석을 위한 유한요소 모델을 제시하고 있다. 사용한 유한요소는

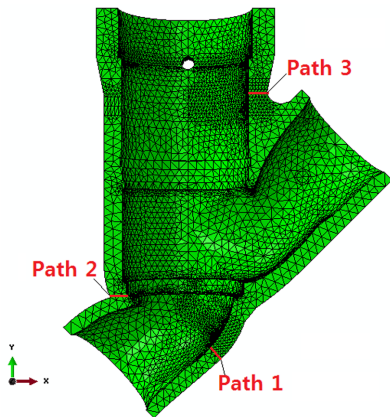


Fig. 2 Finite element model of the close check valve body.

4절점 선형 삼각뿔 요소(4-node linear tetrahedron element)이다. 요소 수와 절점 수는 각각 89,707개와 18,844개다. 효율적인 평가를 위해 형상과 하중 조건을 고려하여 Half 모델링을 수행하였다. 그림 상의 Path들은 균열 전파 경로가 짧고 응력집중이 예상되는 부위에 설정된 가상 균열 전파 경로이다.

본 평가에서는 Sequentially- Coupled 유한요소 온도-응력 해석을 수행하였다. 밸브의 외표면이 단열되지 않으므로 정상상태에서의 온도분포를 설계온도와 동일하게 설정할 수 없으므로 유한요소 열전도 해석을 통해 정상상태에서의 온도분포를 도출하여야 한다. 열전도 해석을 위한 열적 경계조건은 다음과 같다.

- 밸브 내표면은 설계온도인 301.7°C(=575°F)의 주 급수와 접하는 강재대류(대류계수 500W/m²°C)
- 밸브 외표면은 25°C의 주위 대기와 접하는 자연 대류(대류계수 10W/m²°C)
- 밸브 절단면은 단열

Fig. 3은 유한요소 탄성 응력해석시 설정한 기계적 경계조건을 제시하고 있다. 좌측 하단 밸브 끝단의 절점들은 밸브 축 방향과 원주 방향 변위들을 고정하였고, 대칭 모델을 위해 절단한 면의 z 방향 변위를 고정하였다. 밸브 내표면에 설계 내압인 9.53 MPa에 Level B에 해당하는 SF 값인 2.4를 곱한 값을 작용시켰으며, 상단 밸브 끝단과 우측 상단 밸브 끝단에 설계 내압에 의해 발생하는 End-Cap 압력에 2.4를 곱해 작용시켰다. 또한, Level B에 해당하는 외부 하중(SF 반영)으로써 밸브 축방향 하중 167,502 N과 모멘트 261,228,178 Nmm를 우측 상단 밸브 끝단에

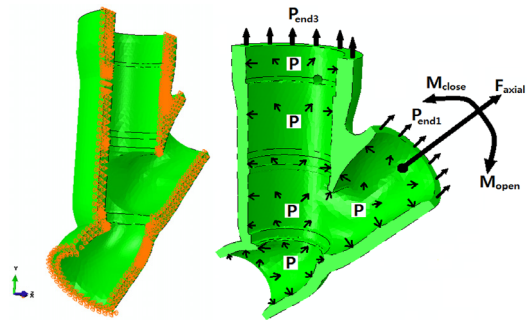


Fig. 3 Mechanical boundary conditions.

작용시켰다. 모멘트의 경우, 밸브 끝단이 열리는 방향과 닫혀지는 방향, 두가지로 고려하였다. 여기서 P는 내압, P_{end1}은 우측 상단 밸브 끝단에 작용하는 End-Cap 압력, P_{end3}은 상단 밸브 끝단에 작용하는 End-Cap 압력, F_{axial}은 우측 상단 밸브 끝단에 작용하는 밸브 축방향 외부하중, M_{open}은 우측 상단 밸브 끝단에 작용하는 열리는 방향으로의 외부 모멘트, M_{close}는 우측 상단 밸브 끝단에 작용하는 닫히는 방향으로의 외부 모멘트이다.

3. 해석 결과

3.1 개략 해석

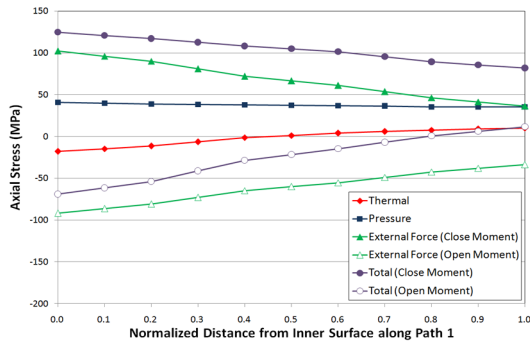
Table 1은 역지밸브-배관 용접부에 대한 평가 결과를 제시하고 있다. Table 1에서 보듯이 균열 깊이가 10%로 작고 평균 CVN 충격에너지가 작으며 잔류응력 수준이 항복강도의 75% 이하로 가정한 경우, 허용기준을 만족하나, 그 이외의 경우에는 허용기준을 만족하지 못하는 경우가 발생하는 것으로 평가되었다. 가정된 균열 깊이비가 클수록, 잔류응력 수준이 높을수록, CVN 충격에너지 값이 작을수록 건전성이 유지되지 못함을 알 수 있다.

3.2 준상세 해석

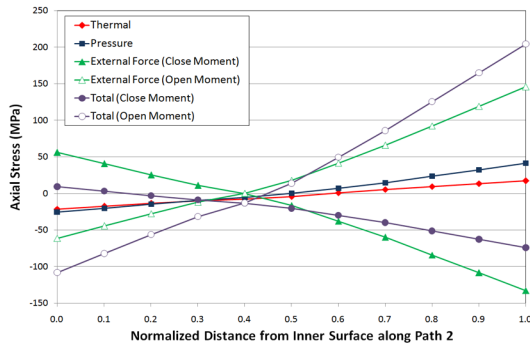
Fig. 4는 Fig. 2에 제시된 Path들 상의 주급수계통 역지밸브 몸체의 축방향 (밸브 각 분기별 중심축을 따른 방향) 응력분포를 제시하고 있다. Path 1 경우, 경로 전체에 걸쳐 다른 인자에 의한 응력분포들보다 외부 축방향 하중과 외부 폐쇄 모멘트가 작용하는 경우 가장 큰 응력분포를 보인다. Path 2 경우, 경로의 내표면 쪽에서 다른 인자에 의한 응력분포들이 보이는데 반면 외부 축방향 하중과 외부 폐쇄

Table 1 LEFM analysis results of the close check valve- piping weld in the main feedwater system.

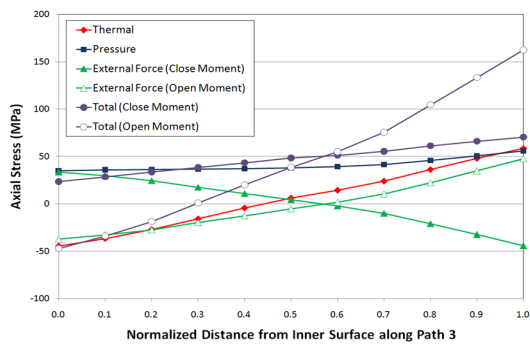
Crack depth ratio (%)	SIF/Toughness ratio		Residual stress level to yield strength (%)				
			20	30	50	75	100
10	K_I / K_{Ic}	$C_v = 10.94J$	0.75	0.83	1.00	1.22	1.40
		$C_v = 18.47J$	0.57	0.63	0.76	0.92	1.09
20	K_I / K_{Ic}	$C_v = 10.94J$	1.08	1.20	1.44	1.75	2.05
		$C_v = 18.47J$	0.82	0.91	1.10	1.33	1.55
25	K_I / K_{Ic}	$C_v = 10.94J$	1.21	1.35	1.62	1.96	2.30
		$C_v = 18.47J$	0.92	1.02	1.23	1.49	1.75



(a) Path 1



(b) Path 2



(c) Path 3

Fig. 4. Stress distributions for each path.

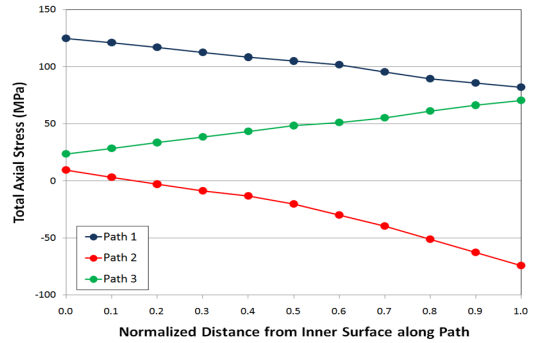


Fig. 5. Total axial stress distributions along the paths of the close check valve body.

모멘트가 작용하는 경우 양의 값을 보인다. Path 3 경우, 경로의 내표면 쪽에서 내압 작용 경우와 외부 축방향 하중과 외부 폐쇄 모멘트가 작용하는 경우 양의 응력 값을 보이는 반면 다른 인자의 경우에는 음의 응력 값을 보인다.

본 평가에서 고려되는 균열 깊이가 깊지 않으므로 (두께의 25% 이하) 내표면 쪽에서 큰 응력 값을 도출하는 외부 폐쇄 모멘트 경우에 대해서만 각 Path별 축 방향 응력분포를 비교해 보았다. Fig. 5는 외부 축방향 하중과 외부 폐쇄 모멘트가 작용하는 경우 각 Path 별 밸브 축 방향 응력분포를 비교 제시하고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 Path 1의 응력 분포가 가장 큰 응력 값을 나타낼을 알 수 있다. 또한 각 Path별 두께 차이가 크지 않아 (Path 1: 41.4 mm, Path 2: 43.8 mm, Path 3: 48.3 mm) 두께 차이로 인해 발생하는 파괴인성치의 편차가 작을 것이므로 선형탄성 파괴역학 평가는 Path 1에 대해서만 수행하였다.

상기 경로의 응력분포를 ASME Code, Sec.XI의 선형탄성파괴역학 평가식에 대입하여 평가한 결과를

Table 2 LEFM analysis results of the close check valve body in the main feedwater system.

Crack depth ratio (%)	SIF/Toughness ratio		Residual stress level to yield strength (%)				
			20	30	50	75	100
10	K _I / K _{Ic}	C _v = 10.94J	0.71	0.87	1.19	1.62	2.10
		C _v = 18.47J	0.56	0.68	0.93	1.27	1.64
20	K _I / K _{Ic}	C _v = 10.94J	1.03	1.26	1.74	2.37	3.07
		C _v = 18.47J	0.81	0.99	1.36	1.85	2.40
25	K _I / K _{Ic}	C _v = 10.94J	1.18	1.44	1.98	2.71	3.52
		C _v = 18.47J	0.92	1.12	1.55	2.11	2.75

Table 2에 제시하고 있다. Table에서 보듯이 주급수 계통 역지 밸브 몸체가 건전성을 유지하려면 작은 균열 깊이비와 높지 않은 잔류응력 수준을 가져야 하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

주급수계통 역지밸브-배관 용접부와 역지밸브 몸체의 취성파괴에 대한 구조 건전성을 응력해석과 선형탄성 파괴역학 해석을 통해 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

가정된 균열 깊이비가 작을수록, 잔류응력 수준이 낮을수록, CVN 충격에너지 값이 클수록 건전성이 유지됨

주급수 Closde Check 밸브 몸체가 보수적으로 건전성을 유지하려면 10% 이하의 작은 균열 깊이비와 30% 이하의 높지 않은 잔류응력 수준을 가져야 함

참고문헌

- (1) KEPCO-E&C, 2014, *Structural Integrity Assessment of Close Check Valves*.
- (2) Wu, X.R., 1984, "The Effect of Welding Residual Stress on Brittle Fracture of Plates with Surface Cracks," *Eng. Frac. Mech.*, Vol.19, pp.427~439.
- (3) Panontin, T.L. and Hill, M.R., 1996, "The Effect of Residual Stresses on Brittle and Ductile Fracture Initiation Predicted by Micromechanical Models," *Int. J. of Frac.*, Vol.82, pp.317~333.
- (4) Hurlston, R.G., Sharples, J.K., and Sherry, A.H., 2011, "Investigation into the Effect of Residual Stress on Crack-Tip Constraint and Brittle Fracture," *Proceedings of ASME PVP2011*, PVP2011-57590.
- (5) ASME B&PV Code Committee, 2007, ASME B&PV Code, Sec.XI.
- (6) Dassault Systems, 2013, *Simulia, User's Manuals for ABAQUS*, Ver.6.13.
- (7) British Steel, 1998, *Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry, SINTAP, Sub-Task 3.3 Report: Final Issue Determination of Fracture Toughness from Charpy Impact Energy: Procedure and Validation*.