

스텔라이트 용접접착부와 연결된 밸브몸체 침식부 건전성 평가

박치용 · 이성호 · 이정근

한전전력연구원 원자력발전연구소

1. 서 론

탄소강 재질로 이루어진 플랜트 산업의 배관, 밸브, 기타 내부기기 등은 유동가속부식에 의한 감육 손상이 발생할 가능성을 내포하고 있다. 본 논문에서는 탄소강 재질로 이루어진 밸브 몸체에 스텔라이트(Stellite)로 용접하여 생성된 밸브 시트면과 밸브 몸체(Body)사이에서 발생한 밸브몸체 침식부의 건전성을 평가하였다. 건전성 평가는 참조응력법을 사용하였고, 정상운전중에 시트면의 이탈가능성 및 이탈에 필요한 최대 침식깊이를 예측하였다.

2. 밸브 몸체의 침식

평가 대상인 밸브는 역지밸브(Check Valve)로서 정상운전중에는 건도가 약 95%로서 수증기를 함유하고 있는 증기상태의 압축성 유체가 흐른다. 설계압력은 3.55 MPa이고 설계온도는 260°C이나, 운전압력과 온도는 각각 3.3 MPa, 240°C이다. 정상상태에서 유량은 25,2041 Kg/hr의 유량이 형성되고 있다.

역지밸브의 형상은 그림 1에서 개략적으로 보여주는 바와 같은 형상으로 밸브 디스크가 열리고 닫혀 유량을 조절 및 개폐하는 역할을 하며, 맞닿는 부위를 시트면이라 한다. 손상부위는 그림에 도시한 바와 같이 시트면과 밸브 몸체와의 사이에서 발생하였다. 밸브 시트면의 제작은 스텔라이트와 같은 내마모성이 강한 재질을 용접하는 방법이 있고, 평가 대상과 같은 곳에서는 시트면이 구성될 부분에 스텔라이트 강으로서 육성용접을 하여 부피를 가지게 한 다음에 원하는 치수대로 가공하여 제작한다. 육성용접에 의한 가공의 방법을 취함으로서 접착성이 우수하다. 역지밸브 몸체의 재질은 ASTM A216-WCB로서 저탄소강으로 유동가속부식에 저항력이 강하지 않은 재료이며, 스텔라이트 재질은 코발트(Co) 합금의 일종으로 Cr 함량이 20-27%로서 감육 저항성이 매우 커서 감육이 발생하지 않는 재료이다. 스텔라이트 재질과 밸브 몸체의 용접연결부에서 그림 2 및 그림 3과 같이 깊이 3.8 mm의 폭 1.2 mm의 좁고 깊은 침식부가 전 원주방향으로 동일하게 발견되었다. 자세한 현장 측정 형상은 그림 3에 나타내었다.

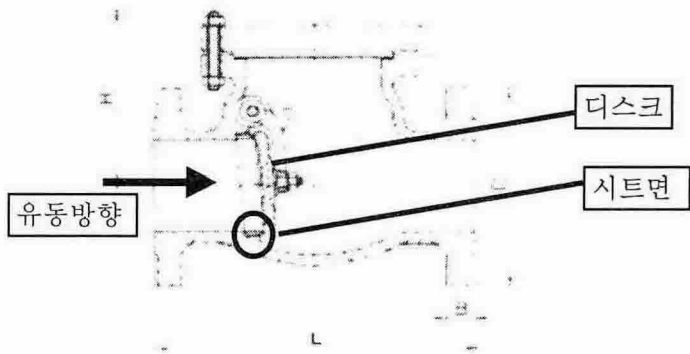


그림 1 역지밸브(Check Valve) 구조

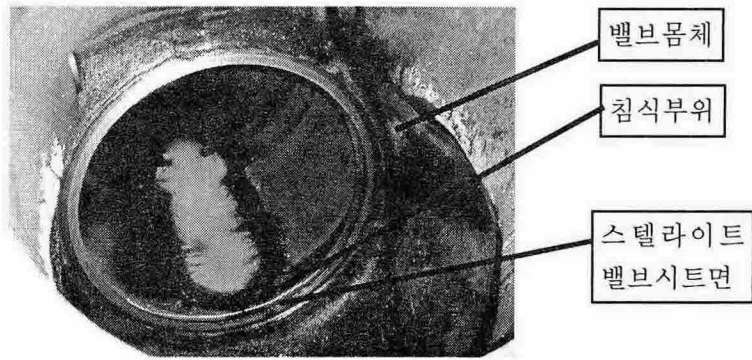


그림 2 밸브 손상부 사진

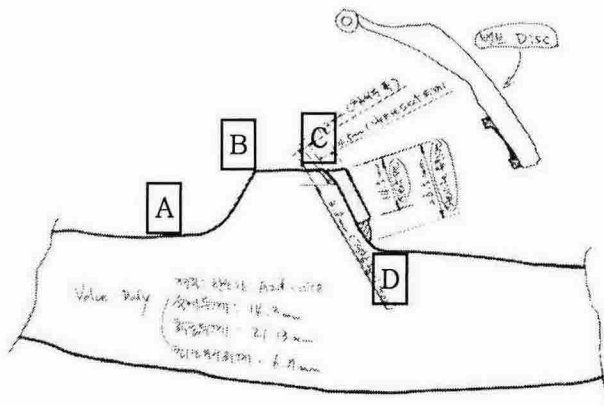


그림 3 밸브 몸체 손상부 스케치

3. 침식부 건전성 평가

침식부의 건전성 평가는 원인분석, 밸브몸체의 손상 가능성 평가, 스텔라이트 이탈 가능성 평가 및 스텔라이트 이탈에 필요한 최대 침식깊이 예측 등이 수행되었다. 건전성 평가시 적용된 주요 가정은 첫째로, 밸브는 지지대위에 고정되어 있기 때문에 밸브 몸체에는 굽힘모멘트가 작용하지 않고, 압력만 작용하며, 둘째로, 손상부위의 두께는 밸브 몸체에서의 설계 두께보다 상당히 두꺼우나, 보수적 평가를 위해 몸체의 설계 두께에 결함이 존재하는 것으로 가정하였다.

3.1 침식원인 분석

이종금속 (감속저항성 재료와 감속 비저항성 재료) 용접부의 감속 비저항성 재료 쪽에서의 감속 현상은 탄소강 감속 경험사례에서 많이 보고 되고 있다⁽¹⁾. 밸브 몸체의 스텔라이트 시트면부와의 연결부에서도 동일한 원인에서 감속발생 가능성을 내포하고 있다. 스텔라이트(Stellite)는 코발트(Co) 합금으로 Co(40-67%), Cr(20-27%), Ni(2-30%), Mo(0-6%) W(0-7%), 소량의 C, Fe, Mn, Si 등으로 구성된 합금이며, A216-WCB는 주조된 탄소강으로 감속 비저항성 재질이므로, 용접부는 급격한 Fe 이온 농도편차를 가지고 있기 때문에 감속, 즉 침부식의 재질적 원인을 제공하고 있다. 유동적인 관점에서 분석하면, A 부위를 지나는 유체는 B를 지나면서 속도가 빨라지고 중심부로 행하다가 C부위에서 표면위로 역류하는 소용돌이가 발생한다. 이로 인해 용접부 표면에서 난류가 증가되어 부식생성물이 Fe 이온을 이동시켜 침부식을 일으킬 수 있다. 결론적으로 C 부위에서의 침부식은 재질적 요인에 유동적 요소가 추가되어 2 상유체 침부식 특성에 따라 감속이 발생한 것으로 판단된다.

3.2 밸브 Body 손상가능성 평가

밸브 몸체를 간략화하여 배관과 같은 형상으로 가정하였다. 이는 밸브 몸체에서 국부적으로 두께가 두꺼운 분야를 고려하지 않아 보수적인 평가 결과를 초래할 것으로 예상된다. 한계하중방법에 의하여 그림 4와 같은 단순화된 형상으로 묘사하여 평가를 수행하였다. 공학적 평가식에 사용된 재료 응력 및 치수는 표1과 같다.

표 1. 공학평가에 사용된 재료 물성치 및 치수

재질	압력	응력				배관 직경			설계 두께
		인장	항복	유동	허용	외경	내경	평균반경	
SA216-WCB 주조재	3.55	482.6	248.2	365.4	96.5	457.2	428.6	221.45	14.3
단위	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	mm	mm	mm	mm

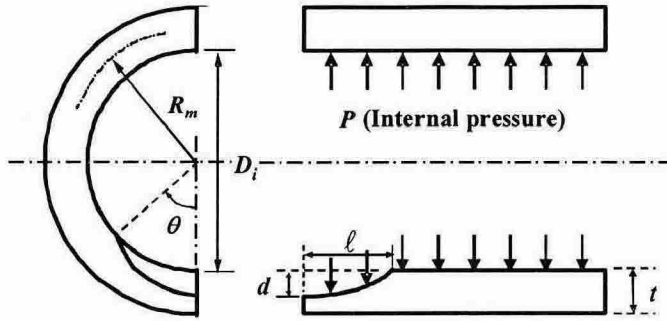


그림 4 밸브 몸체 손상부 스케치

감육부 형상은 감육량 3.8 mm이며, 밸브몸체에서 측정된 두께가 10.5 mm이므로 1주기 후에 예상되는 감육 두께는 10.2 mm이다. 그림 4에서의 감육 깊이 d=4.1 mm이며 원주방향으로 360도 전체에 감육된 경우이다. 축방향 감육길이는 3 mm와 1.2 mm의 두 가지 경우를 평가하였다.

3.2.1. 균열성 결함으로 가정한 공학적 평가

밸브몸체에 대한 최소요구두께는 8.287 mm이며, 차주기 예상두께가 10.2 mm로 밸브 몸체가 설계압력을 견딜 수 있는 필요두께는 유지하는 것으로 판단되나, 침식부 손상을 균열로 가정하여 평가를 수행하였다. 공학적 평가는 참조응력⁽²⁾을 사용하였으며, 평가식은 식(1)과 같다.

$$\sigma_{local} = \alpha \left(\frac{P}{P_L^* / \sigma_y} \right) \quad \text{----- (1)}$$

$$\frac{P_L^*}{\sigma_y} = \frac{t}{R_m} \frac{1}{\sqrt{A^2 - AB + B^2}} ; A = \frac{1}{\left(1 - \frac{d}{t} + \frac{d}{t} \frac{1}{\varphi} \right)} ; B = \frac{R_i}{2R_m} ; \varphi = \sqrt{1 + \frac{1.61\ell^2}{R_i t}} \quad \text{----- (2)}$$

표 1의 값 및 감육형상치를 대입하여 계산하면, 즉 σ_{local} 을 유동응력(365.4 MPa)을 대입하면, 감육폭이 3 mm인 경우 최대로 작용할 수 있는, 즉 파열압력은 19.40 MPa이고, 감육폭이 1.2 mm인 경우 파열압력은 19.43 MPa이다. 현재 운전압력이 3.3 MPa, 설계압력이 3.55 MPa이기 때문에, 설계압력 기준으로 5.465배의 안전여유를 가진다. 그러나 2차계통 구조물의 Structural Factor =3을 고려하면, 허용할 수 있는 압력 $P_{allowable} = 6.48 \text{ MPa}$ 로서 1.8배의 안전여유를 확보하고 있다.

3.2.2. 감육성 결함으로 가정한 공학적 평가

결함을 하중지탱능력의 감소를 일으키는 감육성 결함으로 가정하면, 식(1)과 식(2)를 사용하고, σ_{local} 을 인장응력(482.6 MPa)으로 계산하면, 감육폭이 3 mm인 경우 최대로 작용할 수 있는 압력은 25.62 MPa이고, 감육폭이 1.2 mm인 경우 파열압력은 25.66

MPa이다. 현재 운전 및 설계압력을 고려하면, 설계압력 기준으로 7.2배의 안전여유를 가진다. 그러나 구조물의 Structural Factor =3을 고려하면, 허용할 수 있는 압력 $P_{allowable} = 8.53 \text{ MPa}$ 로서 2.4배의 안전여유를 확보하고 있다.

3.3 스텔라이트의 이탈 가능성 평가

스텔라이트와 밸브몸체와의 결합은 용접봉으로 밸브몸체에 육성 용접하여 체적을 만든 후에 밸브 Disk의 단힘을 고려하여 Seat면 절삭가공으로 만들어진다. 따라서, 스텔라이트 전면이 용접되어 있어 이는 동일 물체로 가정하고 이탈 가능성을 평가하여야 한다. 이탈을 위한 작용하중은 유속에 의한 운동에너지에 의해 발생하는 하중만 고려한다. 압력은 양단 동일하기 때문에 이탈 하중으로 작용하지 못한다. 재료물성치는 보수적으로 스텔라이트 재질도 A216-WCB로 가정한다. 기하학적 형상을 단순화하면 원뿔형 실린더에서 외부에서 내부로 유동하중에 의해 모멘트가 작용하는 구조로 취급할 수 있다. 그림 5와 같은 원뿔형 실린더에 걸리는 모멘트 및 응력을 구하는 방법을 단순화하여, 내부 구멍을 가지는 원형판에 작용하는 분포하중을 고려하여 계산하였다.

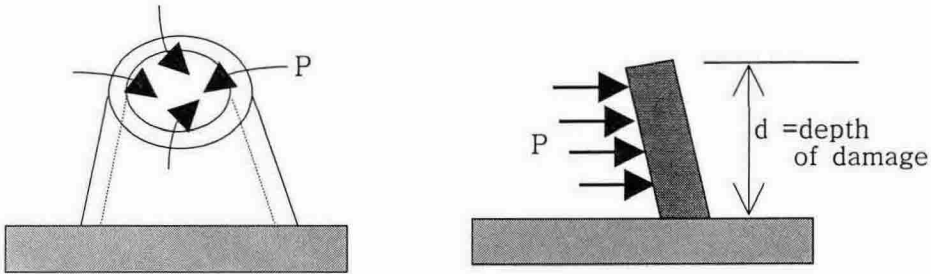


그림 5 단순화된 이탈평가 개념도

분포하중을 결정하기 위해 유동응력에 의한 Drag Force를 식(3)으로 계산하고, 작용하는 최대 모멘트는 식(4)를 이용하여 계산한다. 상수는 참고문헌에 나타나 있다.

$$F = \frac{C_D A_c \rho v^2}{2g_c} \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$M = -q R i^2 (L_{17} - (C_7/C_4) L_{14}) \quad \text{-----} \quad (4)$$

계산 결과 Drag Force는 30.205 kPa이 작용하며, 이 때 작용하는 최대 모멘트는 31.5 N-m으로 침식 손상부 끝단에서 작용하는 응력은 9.3 MPa로 예상된다. 따라서, 재료 항복응력이 248.2 MPa를 고려할 때 Stellite 이탈 가능성은 없는 것으로 평가된다.

3.4. 스텔라이트 이탈에 필요한 최대 침식깊이 예측

스텔라이트 이탈에 필요한 최대 침식깊이 예측하기 위하여 손상깊이 변수를 (depth) 라고 두고, 유동력에 의한 굽힘응력과 압력에 의한 인장응력의 합이 항복응력 이하가 될 때까지의 손상깊이 (depth)가 허용된다. 이는 $\sigma_{pressure} + \sigma_{bending} \leq \sigma_{yield}$ 로 표현되

고, 앞 절에서 계산한 방식을 이용하여 손상 침식부 깊이를 4.0mm에서 13.0mm까지 증가시켰을 때 구해지는 응력의 크기를 그림 6에 도시하였다. 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이, 침식부 깊이가 10mm 까지는 침식부가 건전성을 유지하고 있음을 알 수 있다. 그러나 안전성을 고려하여 ASME Sec.II의 허용응력(96.5 MPa)까지 사용한다고 할 때, 허용 균열 깊이는 6 mm까지 안전한 것으로 판단된다.

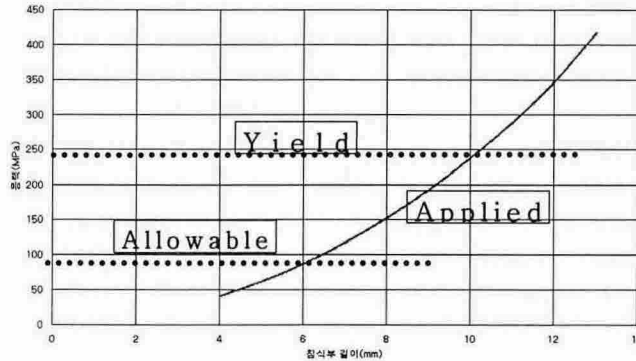


그림 6 침식부 균열 길이에 따른 응력변화

4. 결 론

탄소강 재질로 이루어진 밸브 몸체에 스텔라이트로 용접하여 생성된 밸브 시트면과 밸브몸체 사이에서 발생한 침식부의 건전성을 평가한 결과는 다음과 같다.

- 가. 결합손상을 감속으로 가정한 경우에는 2.4배의 안전여유가 있고, 균열로 가정한 경우에도 1.8배의 안전여유를 가진다.
- 나. 재료의 항복응력에 비해 유동하중에 의해 작용하는 응력은 약 3.75%로서 작은 응력이 작용되어 스텔라이트 시트면의 이탈 가능성은 없는 것으로 평가 되었다.
- 다. 스텔라이트 이탈에 필요한 최대 허용 균열 깊이는 6 mm까지 안전하다.

참고문헌

1. J.S. Horowitz, B.Chexal and L.F.Goyette, "A New Parameter in Flow-Accelerated Corrosion Modeling", *ASME, PVP-Vol.368*, 1998
2. Y.J.Kim, D.J.Shim, H.Lim and Y.J.Kim, " Reference Stress Based Approach to predict Failure Strength of Pipes with Local Wall Thinning under Single loading", *ASME, J of PVT*, Vol.126, pp.194-201, May 2004.
3. Warren C. Young, "*Roark's Formulas for Stress and Strain*", 6 Ed. McGraw-Hill. 1989.