

침식부식으로 인한 원전 2차측 배관의 잔여수명 예측 시스템 개발 및 적용

황경모 · 노회영 · 진태은
한국전력기술주식회사

요 약

원자력 발전소 2차측 배관에서 가장 심각한 문제로 대두되고 있는 침식부식 현상을 예측/감시하는 시스템을 개발하여 특정 원전 2차 계통의 전 부분을 망라하여 실제 평가를 수행하였으며, 이를 현장에서 초음파검사로 측정된 결과와 비교하였다. 본 시스템으로 평가한 침식부식률을 실제 측정으로 산출한 침식부식률과 비교해 본 결과, 오차 100% 이내에 포함되는 부위가 92%에 달하는 것으로 확인되었다. 본 시스템은 침식부식 이론 및 관련 변수들로부터 단상 및 2상유체 배관의 침식부식률과 ASME 코드 및 BS 코드의 허용기준에 따른 잔여수명을 예측할 수 있으며, 침식부식으로 인한 배관의 두께가 최소허용치 이하로 떨어질 경우에는 국부 배관감육평가를 수행할 수 있는 시스템의 형태로 개발하였다.

1. 서 론

최근 원자력 발전소 2차 계통에서 주로 사용되고 있는 탄소강 배관의 침식부식손상은 운전년 수 증가와 함께 심각한 문제로 대두되고 있다. 침식부식손상은 배관 뿐만 아니라 다른 주요 기기의 성능에도 영향을 미치며, 배관 누설이나 파열과 같은 사고 발생시 플랜트 전체의 손상은 물론 인명 피해도 발생할 수 있다. 이미 서구에서는 이러한 문제해결을 위하여 침식부식을 온라인으로 감시할 수 있는 시스템을 개발·완료한 후 현장에 설치하여 가동중인 곳도 있다. 국내에서도 다소 늦은 감은 있으나 침식부식손상 감시의 중요성을 인식하여 국내 최초로 한국전력기술(주)에서 온라인으로 배관의 침식부식 현상을 예측·감시할 수 있는 시스템을 개발하였으며, 실제 특정호기 2차측 전 계통의 배관수명을 평가한 바 있다. 본 시스템을 발전소에 직접 설치·활용할 경우 배관수명 예측은 물론 교체계획 및 수명단축 극소화 방안을 수립함으로써 각종 사고를 예방할 수 있으며, 기술적·경제적 효과도 기대할 수 있다.

따라서 본 고에서는 원전 2차측 배관의 침식부식손상 진단 및 평가의 중요성과 침식부식손상을 최적으로 평가할 수 있는 탄소강 배관의 수명평가 시스템을 소개하고, 아울러 특정 호기를 대상으로 실제 수행한 평가결과를 소개하고자 한다.

2. 침식부식 평가이론

침식부식은 부착력이 약한 다공성 마그네타이트 피막에서 유체의 흐름에 의해 가속화되는 재료의 부식현상으로서 건증기 배관에서는 발생하지 않고, 물과 습증기를 운반하는 배관에서 주로

발생한다. 침식부식 현상은 보통 2단계로 진행된다[1]. 첫 단계는 마그네타이트의 일부가 기공 및 표면에서 용해되는 현상으로서 용해도(r_k)는 온도, 수소이온 활동도 및 용액조성에 따라 변하며, 용해속도는 아레니우스(Arrhenius) 식으로 나타낼 수 있다.

$$r_k = r_o \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right) \quad (1)$$

여기서 E_k 와 R 은 각각 활성화에너지와 기체상수를 나타내며, r_o 는 $T = \infty$ 에서의 r_k 의 값이다. 두 번째 단계는 용해된 마그네타이트 피막의 철이온(Fe^{2+})이 물의 흐름에 의한 대류 물질전달로 인하여 용액 속으로 확산되어 배관재료의 손실을 가속화하는 것이다. 대류 물질전달 속도는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\frac{dm}{dt} = r_{MT} = K(C_s - C_b) \quad (2)$$

여기서 K 는 물질전달 계수이며, C_s 와 C_b 는 각각 표면과 유체 중의 철이온 농도를 나타낸다. 위의 두 단계는 연속적으로 일어나므로 침식부식률은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$r = \left(\frac{1}{r_k} + \frac{1}{r_{MT}} \right)^{-1} \quad (3)$$

상기의 이론을 근거로하여 원전의 주급수 계통이나 응축수 계통 등과 같은 단상유체가 흐르는 배관의 침식부식률은 아래의 KWU-Siemens 식으로 구할 수 있다[2].

$$r_1 = 6.25 \cdot K_c \cdot \{B \cdot e^{NW} \cdot [1 - 0.175(pH - 7)^2] 1.8 \cdot e^{(-0.118g)} + 1\} \cdot f(t) \quad (4)$$

여기서, $B = -10.5 h^{1/2} - 9.375 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0.79 \cdot T - 132.5$

$$N = -0.0875 h - 1.275 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 1.078 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2.15 \quad (0 \leq h \leq 0.5\%)$$

$$N = (-1.29 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0.109 \cdot T - 22.07) \cdot 0.154 \cdot e^{-1.2 \cdot h} \quad (0.5 < h \leq 5\%)$$

$$f(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3 : \text{보정계수}$$

$$C_1 = 0.9999934, C_2 = -0.3356901 \times 10^{-6}, C_3 = -0.5624812 \times 10^{-10}, C_4 = -0.3849972 \times 10^{-15}$$

위 식을 적용할 수 있는 유체의 pH 범위는 $7 \leq pH \leq 9.39$ 이며, t 는 노출시간, K_c 는 Keller 형상계수, W 는 유속(m/sec), g 는 산소농도(ppb), h 는 크롬과 몰리브덴 함량의 합(%)이다. 한편, 발전소의 TBN Bypass 계통과 같은 2상유체가 흐르는 탄소강 배관의 침식부식률은 아래의 Keller 식으로 구할 수 있다[3].

$$r_2 = W \cdot f(T) \cdot f(X) \cdot K_c - K_s \quad (5)$$

여기서, $f(T)$ 와 $f(X)$ 는 침식부식률에 대한 온도 및 습분의 영향을 알려주는 무차원 값이며, K_s 는 침식부식 현상이 시작되기 전에 $f(T) \cdot f(X) \cdot W \cdot K_c$ 값이 넘어야 할 초기값을 나타낸다.

3. 평가방법 및 절차

탄소강 배관의 침식부식 수명평가를 위해서는 우선 평가해야 할 부위를 선정하고, 침식부식 현상에 영향을 미치는 변수들의 값을 취득한 후 KWU-Siemens 식 및 Keller 식을 이용하여 배관부위의 침식부식률을 계산한다. 그후 평가시점의 배관두께를 공칭 배관두께(T_{nom}) 및 최소허용 배관두께(T_{min})와 비교한다. 본 연구에서 채택한 배관두께 허용기준치의 초과여부는 압력기준 방식을

채택하며, 배관설계시 ASME 코드를 적용하였을 경우에는 식 (6)을 적용하고 BS 코드를 적용하였을 경우에는 식 (7)을 적용하여 최소허용 배관두께를 계산한다[4, 5].

$$T_m = \frac{PD_o}{2(S_E + PY)} + A \quad (6)$$

$$T_m = \frac{PD_o}{2S_E + P} \quad (7)$$

여기서 P 는 내부 설계압력을 나타내며, S_E 는 설계온도에서의 내부압력과 이음효율에 대한 재료의 최대 허용응력을 나타낸다. 그리고 D_o 와 A 는 각각 배관외경 및 여유두께를 나타내며, Y 는 온도와 재료에 따른 계수이다. 한편, 배관두께가 T_{min} 보다 작고 $0.3T_{nom}$ 보다 클 경우에는 국부 배관감육 평가를 수행한다. ASME Code Sec.III의 NB-3213.10에는 국부 막응력(Local Membrane Stress)이 정의되어 있으며, NB-3221.2에는 허용응력강도가 제시되어 있다. 평가시의 배관두께(T_c)가 $0.3T_{nom} < T_c < T_{min}$ 범위 내에 있을 경우, 즉 배관 벽두께가 T_{min} 보다 작더라도 배관의 구조적 강도를 유지할 수 있다면 이 배관은 굳이 수리나 교체할 필요가 없다. 배관두께가 T_{min} 보다 작을 경우에는 세 가지 국부감육 기준, 즉 Axial Corrosion Rule, Branch Reinforcement Rule 및 Local Membrane Stress Rule을 적용하여 배관의 허용여부를 평가한다[6]. 만약 이들 세 가지 국부 배관감육 기준 가운데 어느 것에도 만족하지 않는다면 해당 배관은 즉시 교체하거나 수리를 해야 한다.

그림 3은 원전 2차측 배관의 잔여수명 예측 및 감시화면의 한 예를 보여주는 것으로서, Main Reheat & TBN Bypass 계통의 배관들 중 침식부식에 가장 민감한 곳으로 예상되는 T-형 배관을 선정하여 배관설치 시점부터 7.5년 운전한 결과 배관두께가 거의 직선적으로 감소하는 것으로 확인되었다.

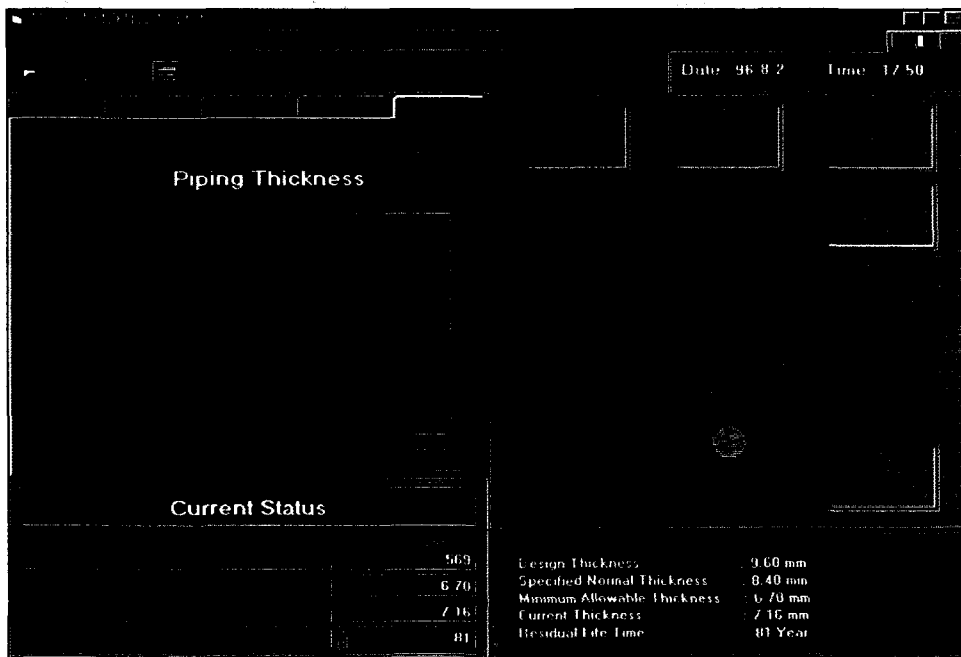


그림 1. 원전 2차측 배관의 잔여수명 예측 및 감시화면

4. 평가결과

본 연구에서 개발한 침식부식손상 평가 시스템의 기본적인 검증을 위하여, 국내 특정 원전 2차측 배관 중 12개 계통의 총 461개 부위를 대상으로 평가를 수행하였다. 평가 시스템을 운영하는데 요구되는 데이터는 계통에 설치된 센서들로부터 운전상황에 따라 변하는 입력데이터가 온라인으로 취득되어야 하지만 본 평가에서는 기존의 운전기록 데이터를 사용하였다.

표 1. 침식부식으로 인한 원전 2차측 배관의 수명평가 예

계 통	상분류	배관유형	사용재료	침식부식률, mm/yr		오 차 %
				계산값	측정값	
Condensate Blowdown Cooling Sys.	단상	90° Elbow	A106 Gr.B	0.11	0.10	3.15
Condensate Water Sys.	단상	Tee	BS3601 SAW410	0.14	0.09	37.39
	단상	45° Elbow	BS3601 SAW410	0.19	0.18	5.16
Aux. Feedwater Sys.	단상	Straight	A53 Gr.B	0.02	0.01	44.16
Main Feed Water Sys.	단상	90° Elbow	A106 Gr.B	0.15	0.13	13.62
	단상	90° Elbow	BS3602 HFS490	0.23	0.17	24.39
Feed Water Heater Drain Sys.	단상	90° Elbow	BS3601 SAW410	0.14	0.14	0.29
	단상	90° Elbow	A106 Gr.B	0.04	0.04	2.04
Extraction Steam Sys.	2상	90° Elbow	BS3604 HFS622	0.04	0.04	10.49
	2상	45° Elbow	BS3604 HFS622	0.03	0.02	25.58
TBN Grand Sealing Sys.	2상	Tee	A106 Gr.B	0.09	0.05	42.89
TBN Drain Sys.	2상	90° Elbow	A106 Gr.B	0.03	0.03	9.32
	2상	90° Elbow	A106 Gr.B	0.04	0.03	31.83

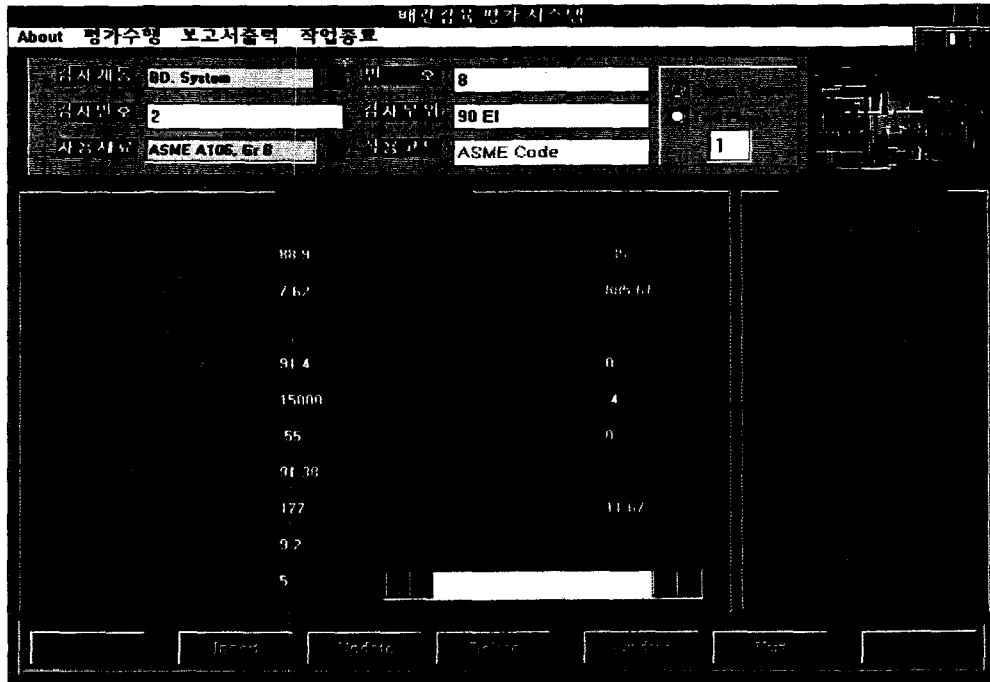


그림 2. 원전 2차측 배관의 침식부식 수명평가 화면 예

표 1은 원전 2차측 배관에 대한 수명평가 사례로서 여러 계통 중에서 대표적인 몇몇 부위에 대한 평가결과를 제시한 것이며, 그림 2는 본 평가에 사용된 평가화면으로서 각종 입력데이터 외에 이론치와 실측치를 비교하여 침식부식률, 잔여수명, 오차 등을 나타내었다. 그리고 그림 3은 본 평가 시스템으로 산출한 침식부식률을 실제 현장에서 초음파검사로 측정된 결과와 비교하여 각 오차범위별로 분류한 그래프이다. 여기서 실측오류로 나타난 부위는 배관의 최소 측정두께가 설치당시의 설계사양에 제시되어 있는 공칭두께 보다 큰 것으로서 이들 부위는 이론으로 구한 결과와 비교할 수 없으며, 이는 실측오류 혹은 건설당시에 발생한 오차이거나 운전, 보수 등으로 인해 발생한 오차로 판단된다. 그림 4는 실측오류 부위를 제외하고 이론 및 측정에 의해 산출된 침식부식률을 비교하여 오차 100% 이내에 포함되는 부위와 100%를 초과하는 부위로 나누어 비교한 것이다. 여기서 볼 수 있듯이 오차가 100%를 초과하는 부위는 8%에 불과하며, 이러한 오차는 원전의 운전조건 변화 및 정확한 입력 데이터의 부재에 따른 것으로 판단된다. 최근에 발행된 각종 자료에 의하면, 이론에 의해 구한 침식부식률은 측정치 보다 보수적인 것으로 알려져 있으며, 오차가 100% 이내면 비교적 우수한 평가결과라고 알려져 있다[3]. 따라서, 본 연구에서 개발한 원전 2차측 배관의 잔여수명 예측 시스템은 상당히 우수한 평가결과를 보여주고 있으며, 향후 본 시스템을 더욱 개선·보완하여 실제 발전소 및 산업 플랜트에 적용할 경우 경제적, 기술적 측면에서 상당히 우수한 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 시스템을 이용하여 2차측 배관의 침식부식률을 평가한 결과 운전온도가 274℃ 이상이고 수분함량이 0.62% 이하인 조건에서 운전되는 주중기 계통과 증기덤프 계통은 건중기 배관과 유사하여 이론상으로는 침식부식이 발생하지 않으므로 본 평가 시스템을 적용할 수 없으며, 이들 계통에서 발생된 배관감육 현상은 침식부식이 아닌 다른 손상기구에 의한 것으로 판단된다.

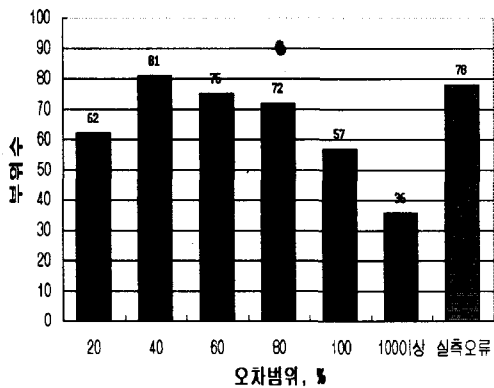


그림 3. 오차범위별 부위수

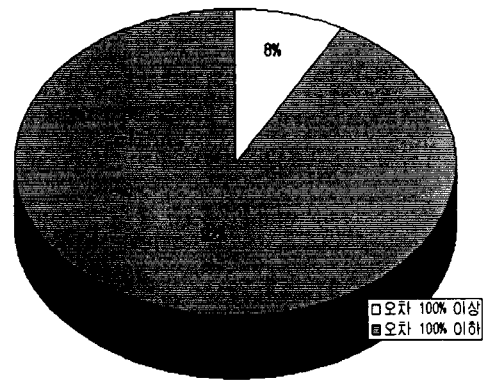


그림 4. 오차 100% 내·외의 검사부위 비교

5. 결론

본 연구에서 개발한 원전 2차측 배관의 잔여수명 예측 시스템은 배관 내부를 흐르는 유체의 흐름으로 인해 발생하는 침식부식 현상을 평가하는 시스템으로서, 단상유체가 흐르는 계통에는 KWU-Siemens 식을 적용하고 2상유체가 흐르는 계통에는 Keller 식을 적용하였다. 본 시스템은 배관의 침식부식률 외에 최소허용 배관두께를 기준으로하여 잔여수명도 예측할 수 있으며, 배관의 두

계가 최소허용 배관두께 이하로 감소할 경우는 배관의 국부 감육평가를 수행하여 수리, 교체 및 계속 사용가능의 여부도 판단할 수 있다.

본 연구에서는 배관수명 예측시스템의 기본적인 검증 및 활용방안으로 특정 원전 2차측 배관의 거의 모든 계통을 대상으로 총 461개 부위에 대하여 평가를 수행하였다. 그 결과 각종 자료 및 이론에서 요구하는 100% 오차범위에 포함되는 부위는 92%에 이르는 것으로 평가되었다. 또한 이러한 평가 시스템을 더욱 개선 및 보완하고 실제 현장에 설치하여 순간순간 변하는 입력데이터를 온라인으로 취득하여 평가 시스템에 활용할 경우 상당히 우수한 기술적인 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 이외에도 주기적으로 검사해야 하는 인력, 시간 및 비용절감 효과를 노릴 수 있으며, 원전 전반에 걸친 안전성 확보에도 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. N. Henzel, D. C. Crosby and S. R. Eley, "Erosion/Corrosion in Nuclear Plants Single and Two Phase Flow Experience, Prediction, NDE Management" Chicago, Illinois, pp109~115, Apr. 1988.
2. Von W. Kastner and K. Riedle, "Empirisches Modell zur Berechnung von Materialabtragen durch Erosionskorrosion" VGB Kraftwerkstechnik 66, December 1986 pp1171~1178.
3. H. Keller, "Corrosion and Erosion Problems in Saturated-Steam Turbines", AIM Conf., Liege, Belgium, May 22~28, 1978.
4. ASME Code for Pressure Piping, B31.1 104.1.2, 1992
5. BS 806, "British Standard Specification for Ferrous Pipes and Piping Installations for and in Connection with Land Boilers", 1975.
6. T. L. Gerber, D. M. Norris and W. F. Lucas, "Acceptance Criteria for Structural Evaluation of Erosion/Corrosion Thinning in Carbon Steel Piping", pp93~101.