

원전 탄소강 배관의 액적충돌침식 손상에 대한 B-Scan 검사 및 수치해석적 분석

황 경 모[†] · 이 대 영

한국전력기술(주), 경기도 용인시 기흥구 용구대로 2354
(2012년 10월 12일 접수, 2012년 12월 20일 수정, 2012년 12월 21일 채택)

A Study on the Thermal Hydraulic Analysis and B-Scan Inspection for LDIE Degradation of Carbon Steel Piping in a Nuclear Plant

Kyeong Mo Hwang[†] and Dae Young Lee

KEPCO E&C, 2354 Yonggu daero, Giheung-gu, Yongin, South Korea, 446-713
(Received October 12, 2012; Revised December 20, 2012; Accepted December 21, 2012)

Liquid droplet impingement erosion (LDIE) known to be generated in aircraft and turbine blades is recently appeared in nuclear piping. UT thickness measurements with both A-scan and B-scan UT inspection equipments were performed for a component estimated as susceptible to LDIE in feedwater heater vent system. The thickness data measured with B-Scan equipment were compared with those of A-Scan. Thermal hydraulic analysis based on ANSYS FLUENT code was performed to analyze the behavior of liquid droplets inside piping. The wall thinning rate and residual lifetime based on both existing Sanchez-Caldera equation and measuring data were also calculated to identify the applicability of the existing equation to the LDIE management of nuclear piping. Because Sanchez-Caldera equation do not consider the feature of magnetite formed inside piping, droplet size, colliding frequency, the development of new evaluation method urgently needs to manage the pipe wall thinning caused by LDIE.

Keywords : liquid droplet impingement erosion, flow accelerated corrosion, UT inspection, thermal hydraulic analysis

1. 서 론

원자력발전소에서는 2차측의 탄소강배관에서 발생하는 감속손상을 관리하기 위하여 감속수명을 예측하고, 그 결과에 따라 일정주기로 배관두께를 검사하고 있다. 현재까지 원전 탄소강배관에서는 유동가속부식(FAC, Flow Accelerated Corrosion)이 지배적인 손상기구인 것으로 간주하여 FAC만 집중적으로 관리해 왔다. 그러나 최근에는 액적충돌침식이라는 손상이 국내외 원전 탄소강배관에서도 나타남에 따라 이를 평가하고 관리할 수 있는 방안 수립에 전 세계 원전 산업이 주력하고 있다. 액적충돌침식은 FAC와는 달리 비교적 국부적인 부위에서 감속(Wall Thinning)이 진행되기 때문에 손상형태가 배관과열보다는 배관누설로 귀결되는 경우가 대부분이다. 이러한 액적충돌침식 손상의 대표적인 사건은 2007년 12월 일본 Ohi 2호기의 배기배관 누설로 인하여 발전소가 정지된 사례¹⁾와 2010년 1월 국내 A 원전의

배기배관 중단마개에서 증기가 누설되어 2.5% 출력을 감발한 사례가 있다.

이러한 액적충돌침식 손상 평가이론은 항공기나 터빈 블레이드에서 주로 발생해 왔기 때문에 기존에 제시되어 있는 이론적 평가식도 모재를 대상으로 개발되어 원전의 탄소강 배관 환경에 적용하기에는 무리가 있다. 즉, 운전중인 원전의 배관 내부표면에는 검은색의 마그네타이트가 형성되기 때문이다.

본 논문은 원전 배관에서 발생하는 액적충돌침식 손상에 대한 원인분석 차원에서 작성한 것으로서 손상이 예상되는 부위에 대하여 B-Scan 장비로 UT 검사를 수행하고 배관 내부에 형성되는 액적의 유동분포를 수치해석적으로 분석한 내용을 기술하였다. 이외에 B-Scan으로 검사한 실측 데이터와 액적충돌침식 평가식으로 잘 알려져 있는 Sanchez-Caldera 이론식을 적용하여 감속률과 배관의 잔여수명을 계산한 결과를 제시하였다.

[†] Corresponding author: hkm@kepc0-enc.com

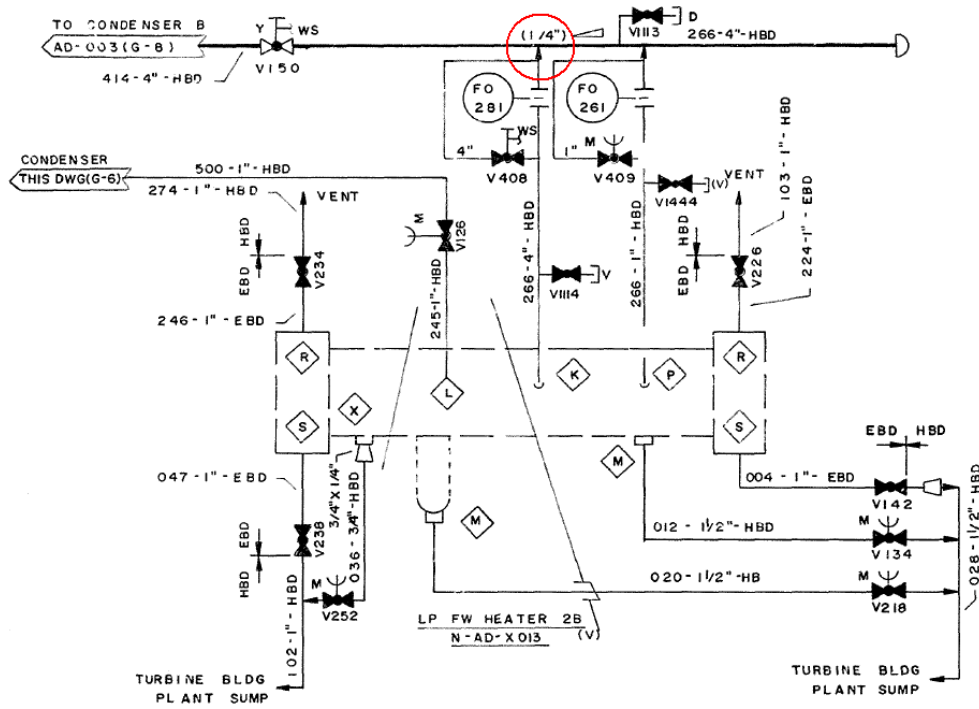


Fig. 1. Low pressure feedwater heater vent system.

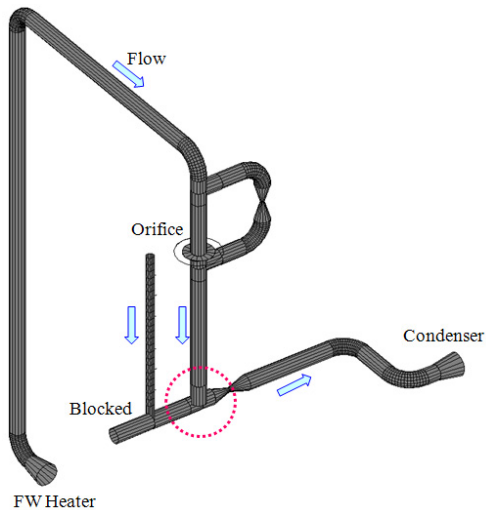


Fig. 2. 3-dimensional pipeline feature.

2. 대상 배관의 설계특성 및 두께검사

2.1 설계 및 운전특성

본 연구의 대상이 되는 배관은 원전 2차측의 저압 급수가 열기 배기계통에 포함되며, 급수가열기 동체에 존재할 수도 있는 증기를 복수기로 배출시키는 역할을 한다. Fig. 1은 계통도를 보여주며, Fig. 2는 해당 배관라인을 3차원으로

형상화한 그림이다. 본 연구에서 대상으로 한 부위는 Fig. 1과 Fig. 2에서 원으로 표기한 T자관이다. 대상 배관은 상시 개방되어 있으며, 전단에 오리피스가 설치되어 있고 2상 증기가 흐른다. 재질은 탄소강(A234 WPB)이고 배관구경 4.5인치, 두께 0.237인치이다.

2.2 두께검사

급수가열기에서 나온 증기에는 일부 액적이 포함되어 있으며, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 오리피스를 지난 후 증기에 포함된 액적이 T자관의 바닥을 타격할 것으로 추정되어 T자관의 바닥을 검사 대상으로 결정하였다. 검사는 A-Scan과 B-Scan 검사를 모두 수행하였다. 일반적으로 액적충돌 침식으로 인한 배관의 표면은 곰보형태로 나타나기 때문에 2) 한 포인트씩 검사해 나가는 A-Scan 검사로는 넓은 부위의 두께 변화를 확인하기 어렵다. 그러나 B-Scan 검사와의 비교를 위하여 두 방식을 모두 적용하여 배관두께를 측정하였다. B-Scan 검사는 탐촉자(Probe)에 바퀴를 부착하여 밀면서 검사를 수행하기 때문에 A-Scan 검사보다는 넓은 부위를 검사할 수 있고 곰보형태의 침식부위도 선형적으로 모사해 낼 수 있다.³⁾ 물론 B-Scan 검사 방식도 In-line 형태로 검사가 수행되지만 유동형태를 추정할 수 있다면 보다 효과적으로 배관손상을 진단할 수 있다. Fig. 3은 두께검사를 수행한 T자관 사진을 보여주며, 두께검사는 T자관의 하부 바닥부위를 대상으로 수행하였다. Fig. 4는 검사결과



Fig. 3. Picture for thickness measurement.

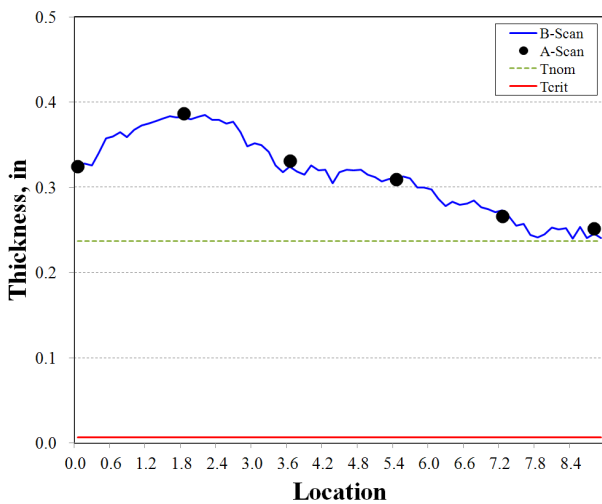


Fig. 4. Thickness comparison of A-Scan and B-Scan measurements.

데이터를 그래프로 나타낸 것이다. B-Scan 검사를 시작한 부위(Fig. 4의 0.0 포인트)는 Fig. 3의 T자관 옆면에 쓰여진 3번의 하부 바닥부터이고 A-Scan 검사는 B-Scan 검사와 비교하기 위하여 3번 바닥부터 8번까지 6개 포인트를 검사하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 A-Scan으로 나온 검사두께는 6개 포인트인데 반해 B-Scan 검사는 하부바닥의 한 개 라인 전체의 두께가 확보된 것을 알 수 있다. 여기서 배관의 두께는 T자관 오른쪽의 밸브쪽으로 갈수록 많이 얇아진 것으로 나타났다.

3. 수치해석 및 결과분석

3.1 수치해석 모델 구성 및 해석조건

T자관 하부의 감속현상을 유체유동 측면에서 검토하기 위하여 Fig. 5와 같이 수치해석 모델을 구성하였다. 해석모

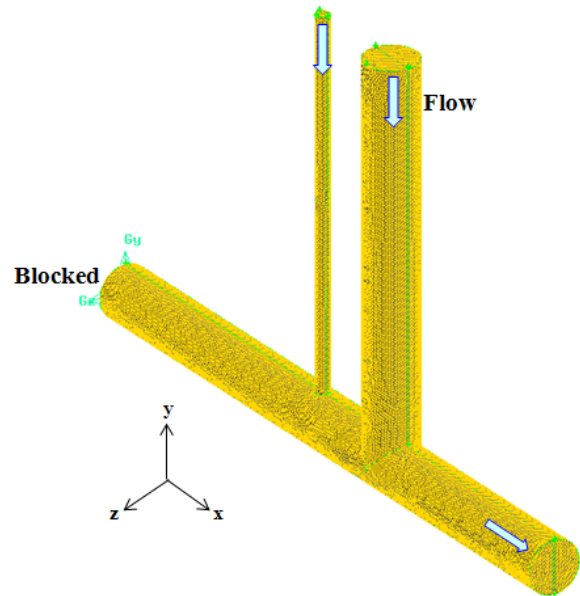


Fig. 5. Analysis model.

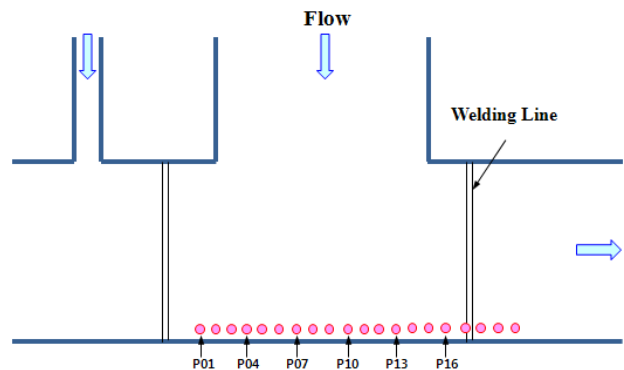


Fig. 6. Data calculation points.

델은 Gambit 프로그램을 이용하여 구성하였으며, 수치해석에는 상용 수치해석 프로그램인 ANSYS FLUNT Version 13.0을 활용하였다. 해석모델에는 4.5인치 T자관과 좌측의 1인치 지관을 포함하였다. T자관 Branch와 1인치 지관 상단에는 오리피스가 설치되어 있으나 10D(외경) 이상 떨어져 있기 때문에 해석모델에는 포함하지 않았다. 일반적으로 오리피스가 10D 이상 떨어져 있을 경우에는 오리피스로 인하여 발생하는 난류가 대부분 희석되는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 그리고 Fig. 6은 수치해석 결과 데이터를 도출하기 위한 위치로서 Fig. 3의 사진 3번 하부를 p01로 설정하고 10.16 mm 간격으로 20개 포인트를 지정하였다. 배관 벽면에서는 내경의 90% 지점이다.

수치해석을 위한 배관 컴포넌트의 격자(Grid)는 경계층이 아닌 유체흐름 중의 액적유동이 관심 대상이므로 Tet/Hybrid를 적용하였다. 격자 민감도를 분석한 결과, 격자수

가 약 40만개 이상에서는 계산 포인트별 결과 값에서 차이가 없는 것으로 나타남에 따라 해석모델을 약 45만 개의 격자로 구성하였다. 수치해석은 정상상태 조건으로 수행하였으며, 난류점성 모델은 Standard k-ε Model을 적용하였다. 유체조건은 액적이 포함된 2상 증기이므로 다상모델로서 Eulerian Model을 적용하였다. ANSYS FLUENT 코드에서 적용하고 있는 Eulerian Model 모델의 지배방정식은 다음과 같다.⁵⁾

연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} \quad (1)$$

액체-액체 모멘텀 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \overline{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + (\overline{F}_q + \overline{F}_{lift,q} + \overline{F}_{vm,q}) \\ & + \sum_{p=1}^n (K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) \end{aligned} \quad (2)$$

체적분율 방정식

$$V_q = \int_v \alpha_q dV \quad (3)$$

- 여기서, α_q : q상 유체의 체적분율
- ρ_q : q상 유체의 밀도
- \vec{v}_q : q상 유체의 질량평균 속도
- \dot{m}_{pq} : p상 유체에서 q상 유체로의 물질전달, 본 연구에서는 미고려
- n : 상의 수
- $\overline{\tau}_q$: q상 유체의 Stress-Strain Tensor
- \overline{F}_q : Body Force
- $\overline{F}_{lift,q}$: Lift Force (식 4 참조)
- $\overline{F}_{vm,q}$: Virtual Mass Force (식 5 참조)
- K_{pq} : 상들 간의 모멘텀 교환 계수
- \vec{v}_{pq} : 상들 간의 상대속도

$$\overline{F}_{lift} = -0.5 \rho_q \alpha_p (\vec{v}_q - \vec{v}_p) \times (\nabla \times \vec{v}_q) \quad (4)$$

$$\overline{F}_{vm} = 0.5 \rho_q \alpha_p \left(\frac{d_q \vec{v}_q}{dt} - \frac{d_p \vec{v}_p}{dt} \right) \quad (5)$$

근접벽 처리(Near Wall Treatment) 방식은 가장 일반적으로 적용되는 Standard Wall Function을 적용하였다. 해석에 적용한 유체조건과 물성치는 Table 1에 제시하였으며, 액적의 크기(d_{vm})는 식 6에 제시한 Tatterson 식[6]을

Table 1. Operating conditions for numerical analysis

Items	Units	Water	Steam
Temperature	°C	74	74
Pressure	Pa	-64,381	-64,381
Enthalpy	J/kg	1,814,926	1,814,926
Flow Velocity	4.5 in pipe	m/sec	78.339
	1 in pipe	m/sec	47.718
Density	kg/m ³	975.32	0.23
Viscosity	Pa · sec	0.00038347	0.000011394
Surface Tension	kg/sec ²	62.8	-
Volume rate	-	0.000129	0.999871

적용하여 계산된 0.747 mm를 적용하였다.

$$\frac{d_{vm}}{D} = 0.106 We_g^{-1/2} Re_g^{1/10} \quad (6)$$

여기서, We와 Re는 식 (7)과 식 (8)과 같으며, ρ_g 는 기상 밀도, U_g 는 기상 유속, D는 배관내경, μ_g 는 기상의 점도, σ 는 표면장력을 나타낸다.

$$We_G = \frac{\rho_g U_g D}{\sigma} \quad (7)$$

$$Re_g = \frac{\rho_g U_g D}{\mu_g} \quad (8)$$

3.2 수치해석 결과 및 두께 데이터 분석

수치해석 결과는 각 방향의 국부유속을 제공하여 합한 값에 루트처리한 속도크기(VM)와 y-방향 국부유속(y-Vel) 측면에서만 분석하였다. 속도크기를 검토한 이유는 배관내부의 유동이 얼마나 복잡하게 형성되는지를 확인하기 위함이며, y-방향 국부유속을 검토한 이유는 액적충돌침식이 배관벽면에 수직으로 충돌하는 액적의 유속에 지배적이기 때문이다. Fig. 7은 증기의 속도크기 분포를 보여주며, Fig. 8은 벡터분포를 보여준다. 그리고 Fig. 9는 액적의 속도크기 분포를 보여주며, Fig. 10은 액적의 벡터분포를 보여준다. 증기와 액적의 그림에서 볼 수 있듯이 T자관에서 유입된 증기는 우측의 복수기 쪽으로 크게 휘어져 나가지만 액적은 관성력과 중력으로 인하여 약간 오른쪽으로 치우쳐 T자

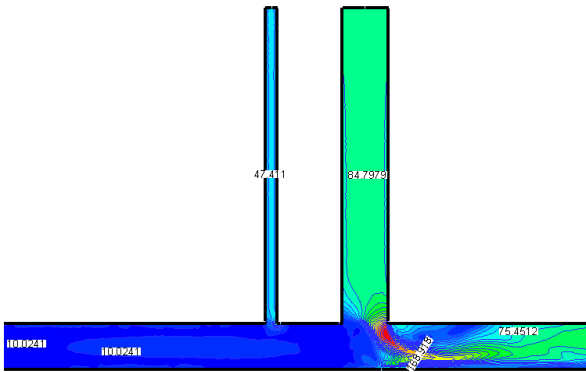


Fig. 7. VM Distribution of Steam.

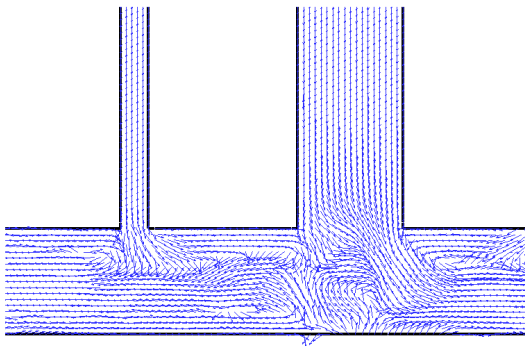


Fig. 8. Vector Distribution of Steam.

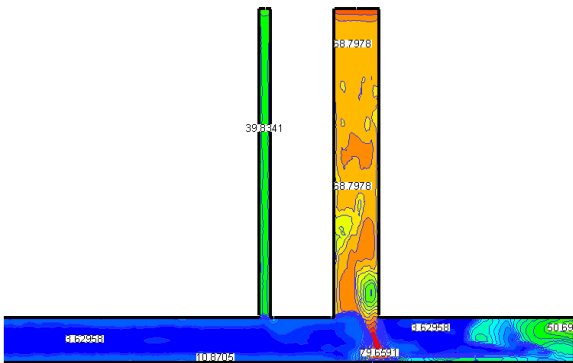


Fig. 9. VM Distribution of Droplet.

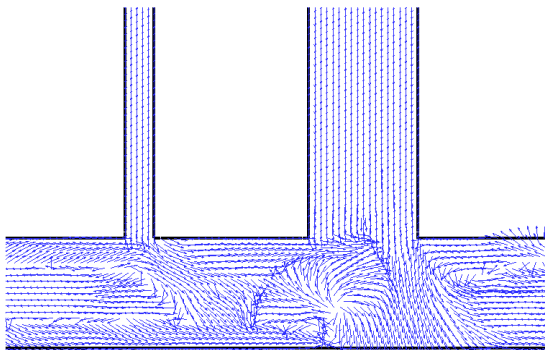


Fig. 10. Vector Distribution of Droplet.

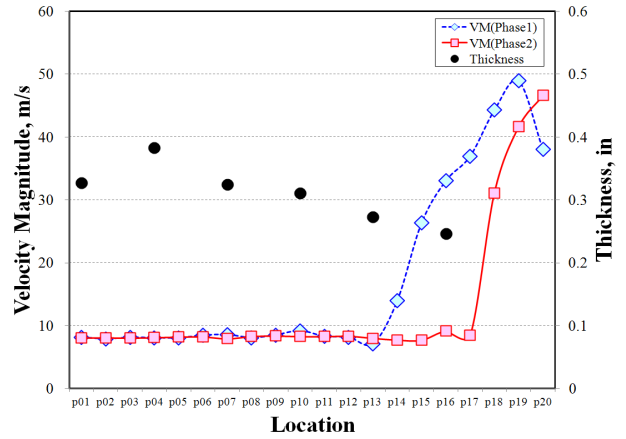


Fig. 11. Comparison of VM & Thickness.

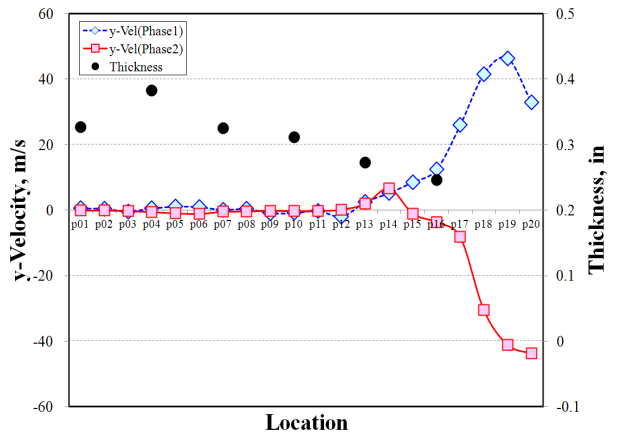


Fig. 12. Comparison of y-Vel & Thickness.

관 하부 벽면에 충돌하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 속도크기와 측정된 두께를 비교하여 나타낸 그래프이고, Fig. 12는 y-방향 국부유속과 배관두께를 비교하여 나타낸 그래프이다. Fig. 11에서는 T자관 오른쪽 부위 (Fig. 6 참조)에서 유체가 심하게 요동치는 것을 알 수 있다. 이는 좌측의 1인치와 4.5인치 배관에서 유입된 유체가 충돌하고 있기 때문이다. Fig. 12에서는 T자관 오른쪽에서 증기 (Phase1)는 위쪽으로 향하고 액적 (Phase2)은 배관 벽면에 직접 충돌하고 있는 것을 알 수 있다. 증기가 위쪽으로 향하고 있는 것은 1인치 배관에서 들어온 유체와 벽면에 충돌한 액적이 증기를 위쪽으로 밀어올리고 있기 때문이다. 그림에서 (-) 값은 유체의 방향이 아래쪽으로 향하고 있다는 것을 의미한다. 이와 같이 T자관의 오른쪽에서 액적이 배관 하부벽면에 수직으로 충돌하고 있기 때문에 두께가 많이 얇아져 있는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 4의 B-Scan 측정 데이터에서 볼 수 있듯이 두께분포가 균일하지 않고 변화가 심한 것으로 보아 T자관의 하부 표면은 액적충돌로 인하여 침식이 발생하고 있다는 것을 미루어 짐작해 볼 수

있다.

3.3 LDIE 평가 및 영향분석

본 연구의 대상으로 선정된 T자관에 대하여 기존에 액적 충돌침식 평가식으로 제시되어 있는 Sanchez-Caldera 모델⁷⁾과 실측 데이터를 직접 활용한 감육률과 잔여수명을 평가하여 비교하였다. 식 (9)은 Sanchez-Caldera 이론식을 보여준다.

$$\dot{m} = \frac{C \cdot \rho_f \cdot \dot{m}_{tot} \cdot (1-x) \cdot v^4 \cdot F_e \cdot F_h}{(P \cdot \epsilon_c)^2 \cdot A_c} \quad (9)$$

- 여기서, \dot{m} : 감육률 (m/s)
- C : 무차원 감육계수
- ρ_f : 액체의 밀도
- \dot{m}_{tot} : 총 질량유량(lbm/hr)
- x : 유체의 건도
- v : 액적의 속도
- Fe : 액적유입계수
- Fh : 충돌계수(hitting factor)
- P : 금속 또는 산화층의 탄성계수
- ϵ_c : Critical Strain to Fracture(0.03)
- Ac : 액적에 의한 손상 부위(Ac = 1.5d²)

실측 데이터를 이용한 감육률 계산은 측정된 최대두께와 최소두께의 차이를 운전시간으로 나누어 계산하였다. 측정 최대두께를 초기두께로 간주한 이유는 일반적으로 초기두께로 고려하는 공칭두께가 최대두께보다 작고 T자관의 바닥면은 비교적 고른 두께분포로 제작되기 때문이다. 그리고 잔여수명은 측정 최소두께에서 최소요구두께(T_{crit})를 뺀 값을 각각의 감육률로 나누어 계산하였다. Sanchez-Caldera 이론식과 실측두께를 기준으로 감육률과 잔여수명을 계산

한 결과는 Table 2와 같다. 실측에 따라 계산한 감육률과 잔여수명이 Sanchez-Caldera 이론식으로 계산한 값과 1,000배 이상의 차이를 보이는 이유는 Sanchez-Caldera 모델이 원전 탄소강배관의 표면에서 형성되는 마그네사이트 특성과 액적크기, 충돌빈도 등을 제대로 고려하지 못하기 때문이다.

4. 결 론

항공기나 발전소의 터빈 블레이드에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있는 액적충돌침식 손상이 최근에는 원전 배관에서도 나타나고 있다. 이에 따라 액적충돌침식 손상이 나타날 것으로 예상되는 부위에 대하여 B-Scan UT 장비로 배관두께 검사를 수행하여 기존에 배관두께 검사에 널리 활용되고 있는 A-Scan 검사장비로 측정된 결과와 비교하였다. 비교결과, B-Scan 장비는 기존의 A-Scan 검사장비보다 침식손상을 더 신뢰성 있게 진단할 수 있는 것으로 나타났다.

이외에 배관 내부에 형성되는 액적의 유동분포를 수치해석적으로 분석한 내용과 B-Scan으로 검사한 실측 데이터를 비교하여 액적충돌침식 손상이 나타나는 원인을 분석하였다. 액적충돌침식 손상의 원인은 증기보다 액적의 비중이 크기 때문에 발생하는 관성력이 원인인 것으로 확인되었다. 또한 Sanchez-Caldera 이론식으로 계산한 감육률과 잔여수명을 실측 두께기준으로 평가한 결과와 비교하였다. Sanchez-Caldera 이론식으로 평가한 결과가 실측 두께기준으로 평가한 결과보다 1,000배 정도의 비보수적인 것으로 나타나 원전 배관의 액적충돌침식 관리에 적용하기에는 문제가 있는 것으로 나타났다. 그 이유는 Sanchez-Caldera 모델이 원전 탄소강배관의 표면에서 형성되는 마그네사이트 특성과 액적크기, 액적충돌 빈도 등을 제대로 고려하지 못하기 때문인 것으로 확인되어 새로운 평가 이론식 개발이

Table 2. LDIE evaluation results

Items	Basic Information		Calculation Results			
	Units	Values	Items	Units	Values	
Maximum Measured Thickness	mm	9.779	Wear Rate	Sanchez-Caldera	mm/yr	0.00016
Minimum Measured Thickness	mm	6.096		Measurement	mm/yr	0.16679
Minimum Required Thickness	mm	0.178	Remaining Life	Sanchez-Caldera	yr	36,667
Operating Time	yr	22.08		Measurement	yr	35

시급한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. KHNP, Reactor shutdown by pipe wall thinning in Ohi unit 2 of Japan, 2008-007, Technical Information Report (2007).
2. EPRI, Recommendations for Controlling Cavitation, Flashing, Liquid Droplet Impingement, and Solid Particle Erosion in Nuclear Power Plant Piping Systems, 1011231, Palo Alto, p. 2-7 (2004).
3. D. Y. Lee, H. K. Suh, and K. M. Hwang, *Corros. Sci. Tech.*, **11**, 89 (2012).
4. K. M. Hwang, S. H. Park, and K. H. Kim, *Microsystem Technologies*, **16**, 1945 (2010).
5. FLUENT, *Fluent Tutorial Guide*, p. 20.1, Fluent Inc. (2001).
6. D. F. Tatterson, J. C. Dallman, and T. J. Hanratty, *AIChE Journal*, **23**, 68 (1997).
7. G. J. Keck and P. Griffith, *Prediction and Mitigation of Erosive-Corrosive Wear in Secondary Piping Systems of Nuclear Power Plants*, NUREG/CR-5007 R5, USNRC, p. 3 (1987).