

주증기계통 오리피스 후단 소구경 배관의 감육 및 누설 발생

황 경 모[†]

한국전력기술(주), 경기도 용인시 기흥구 용구대로 2354
(2013년 10월 25일 접수, 2013년 10월 28일 수정, 2013년 10월 28일 채택)

Cause Analysis for the Wall Thinning and Leakage of a Small Bore Piping Downstream of an Orifice

Kyeong Mo Hwang[†]

KEPCO E&C, 2354 Yonggu daero, Giheung-gu, Yongin, South Korea, 446-713
(Received October 25, 2013; Revised October 28, 2013; Accepted October 28, 2013)

A number of components installed in the secondary system of nuclear power plants are exposed to aging mechanisms such as FAC (Flow-Accelerated Corrosion), Cavitation, Flashing, and LDIE (Liquid Droplet Impingement Erosion). Those aging mechanisms can lead to thinning of the components. In April 2013, one (1) inch small bore piping branched from the main steam line experienced leakage resulting from wall thinning in a 1,000 MWe Korean PWR nuclear power plant. During the normal operation, extracted steam from the main steam line goes to condenser through the small bore piping. The leak occurred in the downstream of an orifice. A control valve with vertical flow path was placed on in front of the orifice. This paper deals with UT (Ultrasonic Test) thickness data, SEM images, and numerical simulation results in order to analyze the extent of damage and the cause of leakage in the small bore piping. As a result, it is concluded that the main cause of the small bore pipe wall thinning is liquid droplet impingement erosion. Moreover, it is observed that the leak occurred at the reattachment point of the vortex flow in the downstream side of the orifice.

Keywords : liquid droplet impingement erosion, wall thinning, scanning electron microscope, computational fluid dynamic

1. 서 론

원자력발전소 2차계통에 적용되고 있는 탄소강 소재 배관은 유동가속부식(FAC, Flow-Accelerated Corrosion)과 캐비테이션(Cavitation), 플래싱(Flashing), 액적충돌(LDI, Liquid Droplet Impingement) 등과 같은 침식의 손상을 받아 두께가 점차 얇아지고 급기야는 파열되는 사건이 발생하기도 한다^{1,2)}. 여기서 유동가속부식은 유체흐름에 의해 부식이 가속되는 현상, 캐비테이션은 포화증기압 이하로 떨어진 유체가 기화되어 생성된 기포의 재파괴 현상, 플래싱은 캐비테이션과 같이 생성된 기포가 파괴되지 않고 고속으로 흘러가는 현상, 그리고 액적충돌은 증기에 포함된 물 입자가 모체를 타격하여 침식을 유발시키는 현상을 의미한다. 이러한 배관 감육 손상은 물 또는 증기에 포함된 액적과 밀접한 관련이

있다. 주증기계통의 배관 내부를 흐르는 증기는 건도가 높아 일반적으로 감육에 민감하지 않은 것으로 알려져 있다. 그러나 2013년 4월 한국의 특정 1,000 MWe PWR 원전에서는 주증기계통에서 분기된 1인치 소구경 배관에서 감육으로 인한 누설이 발생하였다. 누설이 발생한 배관의 주기능은 증기를 보조급수펌프 터빈으로 전달하는 것이며, 원전 정상운전 중에는 증기를 복수기로 방출한다. 누설이 발생한 부위의 바로 전단에는 관형 오리피스가 설치되어 있다. 이와 비슷한 사례로서 2009년 2월 미국 Arkansas Nuclear One Unit 2에서 발생한 1인치 소구경 배관 파단사건³⁾이 있었다. 파열이 발생한 부위는 고압터빈에서 추기되어 1단 재열기로 가는 소구경 배관의 오리피스 후단이다. Arkansas Nuclear One Unit 2에서 파열된 부위는 1단 HP 터빈 추기증기라인(First Stage HP Extraction Steam Line)으로서 습분함량이 상대적으로 많지만 한국의 PWR 원전에서 누설이 발생한 부위는 습분함량이 매우 적은 부위라는 차이가 있다.

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

이에 따라 본 논문에서는 누설이 발생한 원전의 소구경 배관에 대한 감육 및 누설발생 원인을 분석하기 위하여 UT 데이터 분석, SEM 사진 분석 및 수치해석을 수행한 결과를 제시하였다.

2. 설계 및 운전특성

누설이 발생한 부위는 주증기계의통의 주배관에서 보조급수펌프 터빈으로 증기를 전달하는 배관으로서 정상운전 중에는 복수기로 증기가 배출된다. Fig. 1은 누설이 발생한 부위를 점선 원으로 표기한 것이다. 누설부는 오리피스 직후단이고 오리피스 전단에는 컨트롤밸브가 설치되어 있다. 누설된 소구경 탄소강 배관의 설계 및 운전조건은 다음과 같다.

- ① 외경(OD) 및 두께 : 1 inch, Sch. 80 (4.547 mm)
- ① 설계압력(DP) 및 설계온도(DT) : 80.6 atm, 315.6 °C
- ① 운전압력(OP) 및 운전온도(OT) : 74.3 atm, 293.3 °C

- ① 건도(Steam Quality) 및 유량(Flow Rate) : 0.975, 90.72 kg/hr at full open

3. 감육상태 분석

누설이 발생한 배관의 손상원인을 분석하기 위하여 배관을 절단한 후 육안검사와 UT 측정 및 SEM 사진을 촬영하였다.

3.1 UT 데이터 분석

배관을 절단한 후 상하좌우 6개 포인트씩 그리고 길이 방향으로는 2cm 간격으로 총 24개 포인트를 대상으로 두께를 측정하였다. 두께 측정은 UT 검사장비를 활용하였다. Table 1에서 볼 수 있듯이 오리피스와 인접한 부분인 (2,B) Bottom Side의 두께(0.94 mm)가 가장 얇은 것으로 나타났다. 배관 후단의 4번 이후는 모두 공칭두께 이상으로서 감육이 발생하지 않았다. 누설이 발생한 부위는 길이방향으

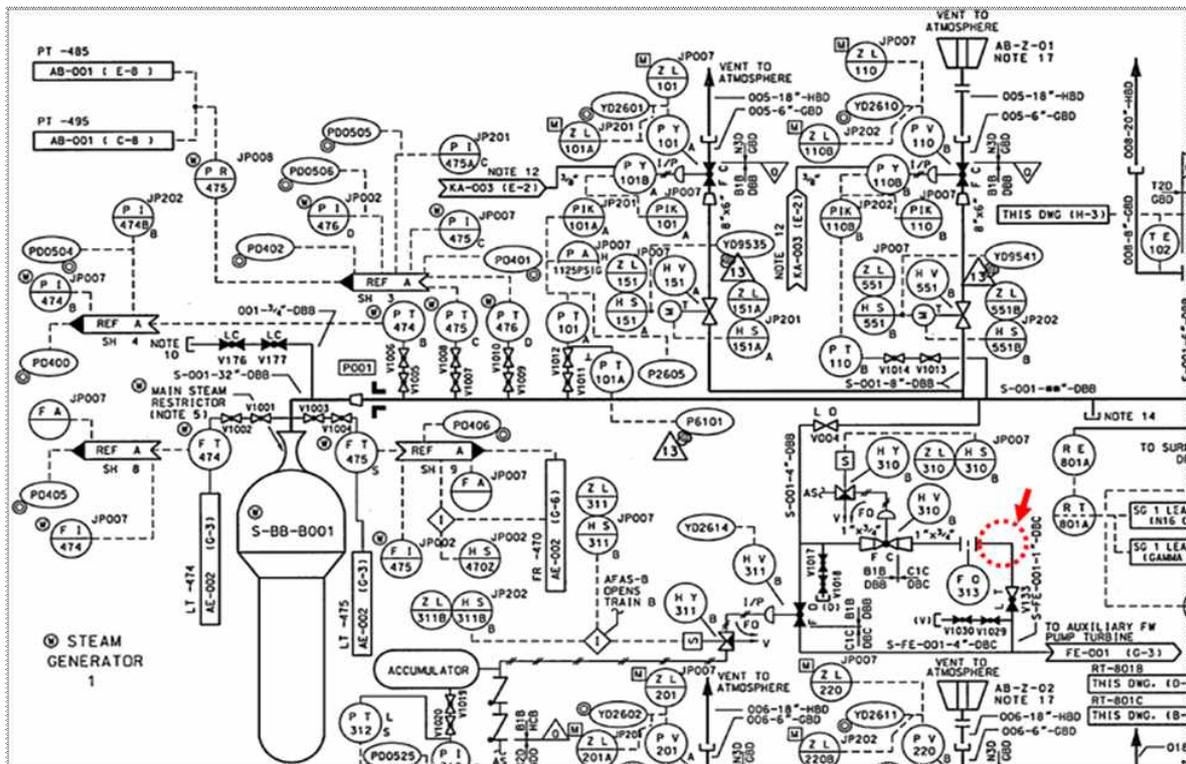


Fig. 1. Leak point on P&ID of steam generator (▶).

Table 1. UT inspection data

UT Inspecting Points		1	2	3	4	5	6
Thickness, mm	A	1.16	1.20	3.73	5.15	4.73	4.79
	B	1.43	0.94	3.73	4.68	4.64	4.78
	C	1.89	1.25	3.84	4.58	4.69	4.68
	D	1.27	2.15	3.36	5.01	5.00	5.14

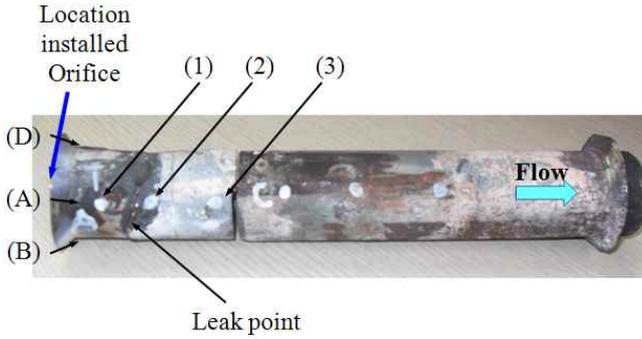


Fig. 2. UT inspection and leak points.

로는 1번과 2번 사이이고, 원주방향으로는 A (Right) 와 B (Bottom) 사이였다. 균열 크기는 약 2cm 정도였다. Fig. 2는 잘라낸 배관의 두께측정 부위와 누설부위를 보여준다.

3.2 사진 분석

Fig. 3은 손상부의 표면형상을 관찰하기 위하여 근접 광학사진과 부위별 SEM 사진을 촬영한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 오리피스와 인접한 부분은 매우 거칠게 손상이 되었으며, 누설이 발생한 부위(Fig. 3 하부의 가운데 그림)는 육안으로는 매끈하게 보이지만 SEM 사진에서는 미세한 곰보 형상으로 손상되었다. 그리고 배관 후단부는 거의 손상이 되지 않았다. 실제 감육은 오리피스와 인접한 부위(거칠게 손상된 부위)에서 더 많이 발생하였지만 오리피스와 배관을 연결하는 용접부가 두껍기 때문에 누설이 발생하지 않은 것으로 추정된다. SEM 사진분석 결과, 감육된 부위가 곰보 형상으로 나타났다는 사실로부터 손상의 원인은 액적 충돌침식이 지배적이었음을 알 수 있다.

4. 수치해석

앞에서 설명한 바와 같이 부위별로 손상 정도와 형태가 다르게 나타난 이유를 유체유동(Fluid flow) 관점에서 분석하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 Fluent Code를 사용하였다.

4.1 해석모델 구성 및 해석조건

해석에 고려한 유동 영역은 밸브와 오리피스 및 오리피스 후단 배관이다. 오리피스 전단의 컨트롤 밸브(Fig. 4)는 형상을 단순화하여 상부에서 유입되는 유동의 방향만을 고려하였다. 오리피스 후단 배관은 약 5.5D(배관내경)까지의 영역을 해석 영역에 포함하였다. Fig. 5는 해석모델을 보여준다. 해석을 위한 격자 수는 약 110만 개로 구성하였으며, 사면체 격자를 적용하였다.

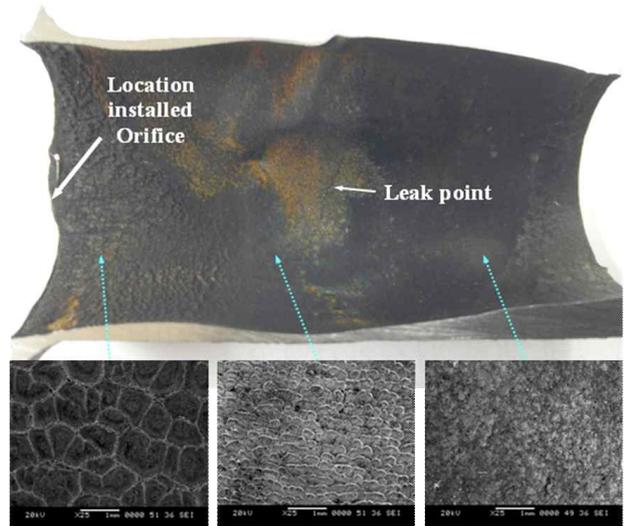


Fig. 3. Optical and SEM pictures of leaked pipe.

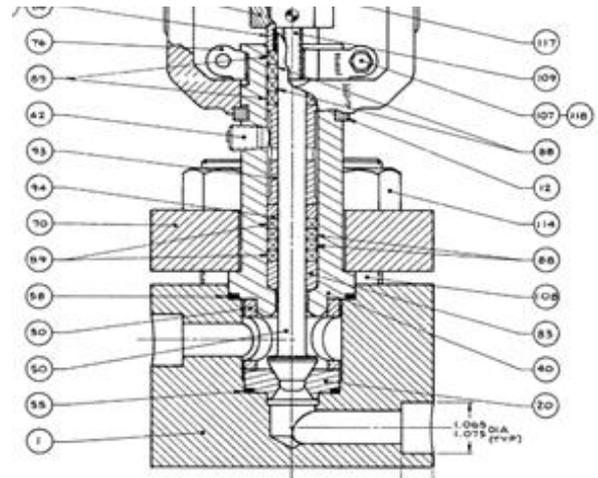


Fig. 4. Valve configuration.

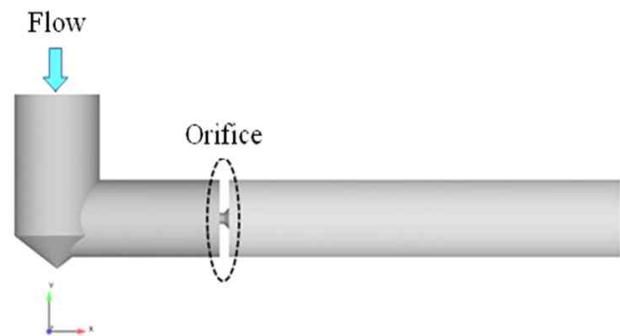


Fig. 5. Configuration of analysis model.

수치해석은 배관라인이 정상적으로 작동되는 조건을 고려하였으며, 오리피스로 유입되는 작동유체는 기-액 2상 유체로 정의하였다. 배관 내 Re 수는 약 6.88E+04이므로 배관 내부의 유동을 비압축성 난류로 가정하였다. 이러한

Table 2. Operating conditions

Items	Before orifice	After orifice
Pressure, bar	75.27	72.51
Temperature, °C	291.68	289.15
Steam Quality	0.975	0.968
Flow Rate, kg/hr	90.72	90.72

Table 3. Fluid properties

Items	Steam	Liquid
Density, kg/m ³	38.62	733.71
Viscosity, Pa-s	1.92×10 ⁻⁵	9.32×10 ⁻⁵
Surface Tension, mN/m	16.86	

난류효과를 고려하기 위하여 Standard k- μ Model을 적용하였으며, 다상효과 반영을 위해서는 Eulerian Model을 적용하였다. Eulerian Model은 제2상 (Second Phase)의 체적분율이 10% 이상인 경우에도 비교적 수렴성이 좋으며, Phase 사이의 경계면을 정의하지 않기 때문에 기포나 액적의 크기가 격자(Mesh)의 크기보다 큰 경우에도 해석이 가능하다. 단, 액적이나 기포의 직경이 너무 큰 경우에는 상간 교환 계수가 커짐에 따라 수렴성에 문제가 발생할 가능성이 있다^{4,5)}. 해석을 위한 경계조건은 Table 2와 같으며, 작동유체의 물성치는 Table 3과 같다. 배관 내부를 흐르는 액적의 크기를 알 수 없기 때문에 세 가지 Case (1, 10, 20 μ m)에 대하여 수치해석을 수행하였다. 20 μ m 이상일 경우에는 관성력으로 인하여 액적이 벽면에 충돌하지 않고 배관을 따라 흘러가버리기 때문에 고려하지 않았다.

4.2 수치해석 및 결과분석

세 가지 크기의 액적, 1 μ m, 10 μ m, 20 μ m에 대하여 수치해석을 수행한 결과로서 오리피스를 지나는 액적의 궤적을 Fig. 6, 7, 8에 나타내었다. 액적의 크기가 1 μ m와 10 μ m인 경우에는 액적의 궤적형태가 거의 유사하다. 오리피스를 지난 증기는 고속 제트 형태의 거동을 보이며, 오리피스 후단에서 고속제트 주변에 재순환영역이 형성된다. 증기 제트의 폭은 하류로 가면서 점점 증가하고 강도는 서서히 약해진다. 오리피스 후단의 약 2D 부근에서는 재부착점이 나타난다. 액적의 크기가 20 μ m인 경우에는 1 μ m와 10 μ m인 경우와 달리 오리피스 직후단의 배관 상부는 큰 와류가 형성되고 하부에는 비교적 작은 와류가 형성된다. 이는 오리피스 전단에 있는 밸브의 유로가 수직으로 형성되고, 액적 사이즈가 커짐에 따라 관성력이 커져 증기와 다른 유동 형태를 보이기 때문인 것으로 추정된다.

Fig. 9, 10, 11은 액적크기 1 μ m, 10 μ m, 20 μ m인 경우에 대한 증기의 속도벡터를 나타낸 것이다. 세 그림에서

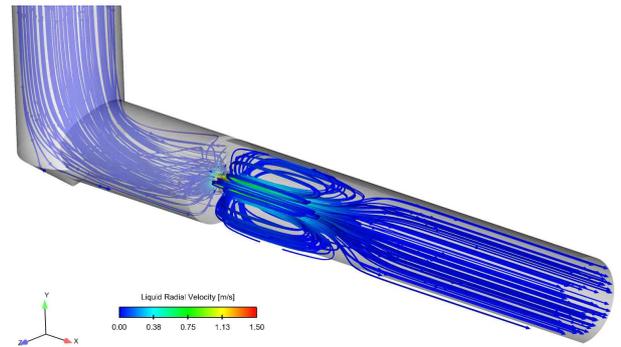


Fig. 6. Liquid droplet stream line of size 1 μ m.

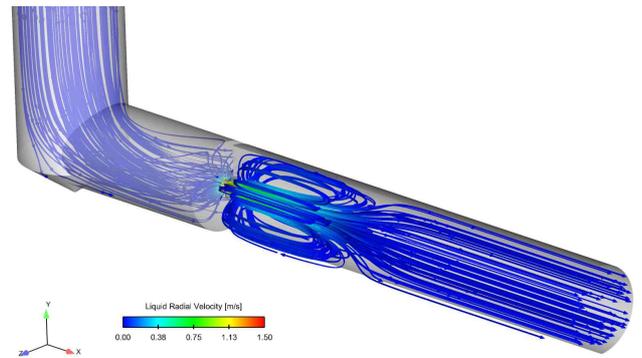


Fig. 7. Liquid droplet stream line of size 10 μ m.

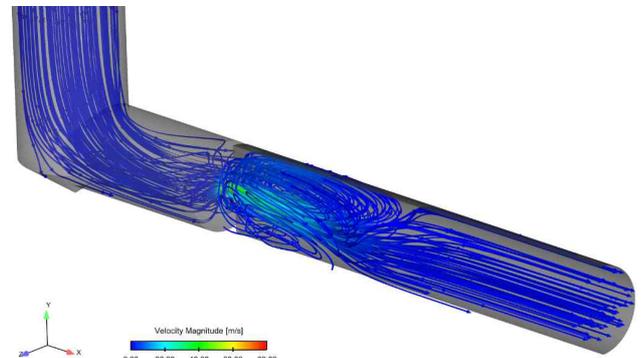


Fig. 8. Liquid droplet stream line of size 20 μ m.

볼 수 있듯이 오리피스를 통과하는 증기의 흐름형태는 거의 유사하다. Fig. 12, 13, 14는 액적크기 1 μ m, 10 μ m, 20 μ m인 경우에 대한 액적의 체적분율과 액적 속도벡터를 동시에 나타낸 것이다. 세 그림에서 볼 수 있듯이 액적의 크기가 1 μ m인 경우에는 오리피스 후단 약 2D 이후부터 액적이 분산되고 있음을 알 수 있다. 그리고 액적의 크기가 증가할수록 액적의 가운데 쏠림 현상은 더 크게 나타나고 20 μ m인 경우에는 약 2D 이후부터 위쪽으로 치우치고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 상황을 종합해 볼 때 액적의 크기가 10 μ m 이하인 경우에 액적은 증기흐름에 합류되어

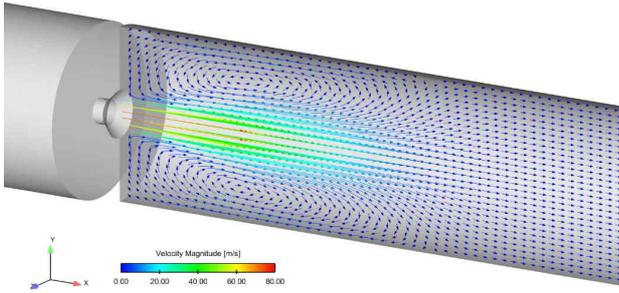


Fig. 9. Steam velocity vector of size 1 μm .

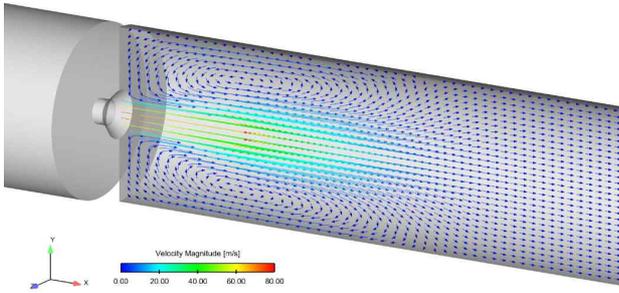


Fig. 10. Steam velocity vector of size 10 μm .

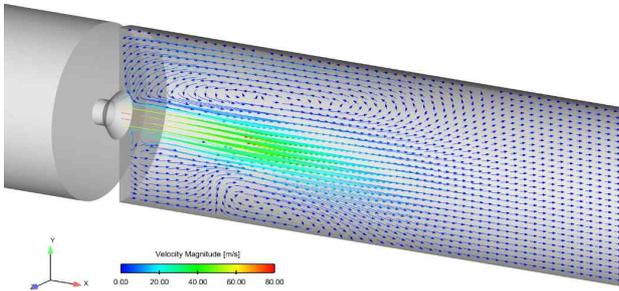


Fig. 11. Steam velocity vector of size 20 μm .

흐르고, 20 μm 인 경우에는 증기흐름과 다소 무관하게 흐르는 것을 알 수 있다.

증기에 포함된 액적의 충돌로 인한 침식 손상 즉, 액적충돌침식은 액적속도의 3.6 ~ 5.2승에 비례하는 것으로 알려져 있다^{1,6,7}. 따라서 액적의 농도분포와 액적의 반경반향속도를 사용하여 오리피스 후단 배관의 길이 방향으로 벽면에 작용하는 충격량을 계산하였다. 충격량 계산 부위는 배관 중심에서 벽면으로 배관 직경의 95% 위치이다. 그 이유는 배관벽면에서는 액적 속도가 0 m/s이기 때문이다. Fig. 15, 16, 17은 액적크기 1, 10, 20 μm 인 경우에 대하여 배관의 길이방향으로 충격량과 두께를 비교하여 나타낸 것이다. 충격량과 비교한 배관두께는 누설이 발생한 배관 아래쪽의 값이고, 누설이 발생한 위치는 (B2) 부근으로서 두께도 가장 얇은 것을 알 수 있다.

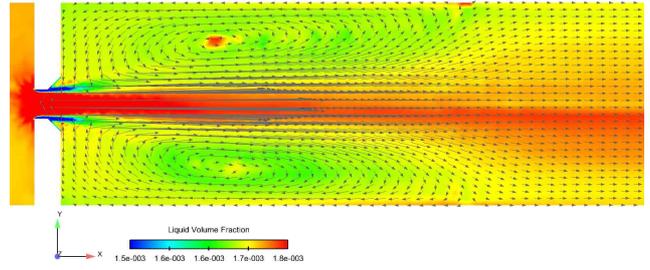


Fig. 12. Liquid droplet volume fraction and velocity vector of size 1 μm .

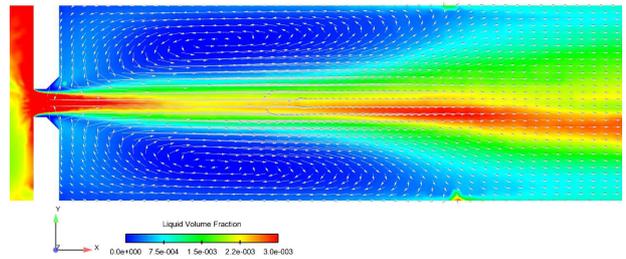


Fig. 13. Liquid droplet volume fraction and velocity vector of size 10 μm .

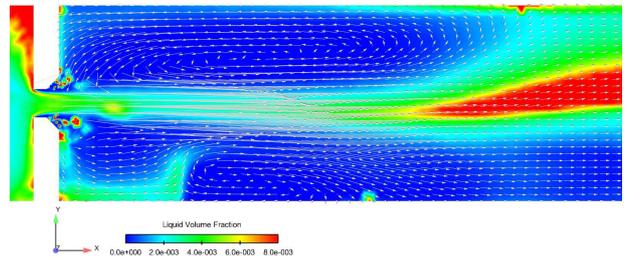


Fig. 14. Liquid droplet volume fraction and velocity vector of size 20 μm .

세 그림에서 볼 수 있듯이 누설이 발생한 (B2)부근에서는 액적의 크기가 클수록 충격량도 큰 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 오리피스 직후단에서 침식이 가장 많이 발생하였으나 용접비드로 인하여 두께 측정은 불가능하다. 이러한 현상을 Fig. 17에서 잘 나타내어 주고 있다. 즉, 오리피스 직후단(거리 0.0 m)에서 액적의 충격량은 약 0.04 m 거리의 충격량보다 훨씬 더 크다.

앞의 4.1항에서 언급한 바와 같이 액적의 크기가 20 μm 이상일 경우에는 관성력으로 인하여 액적이 벽면에 충돌하지 않고 배관을 따라 흘러가버리고, 액적의 크기가 20 μm 이하일 경우에는 오리피스 직후단의 침식과 누설부의 감육현상을 충분히 설명하기 어렵다. 따라서 본 논문에서 대상으로 하고 있는 주증기계통 소구경 배관에서 감육 및 누설손상을 유발시킨 액적 입자의 크기는 20 μm 정도로 추정된다.

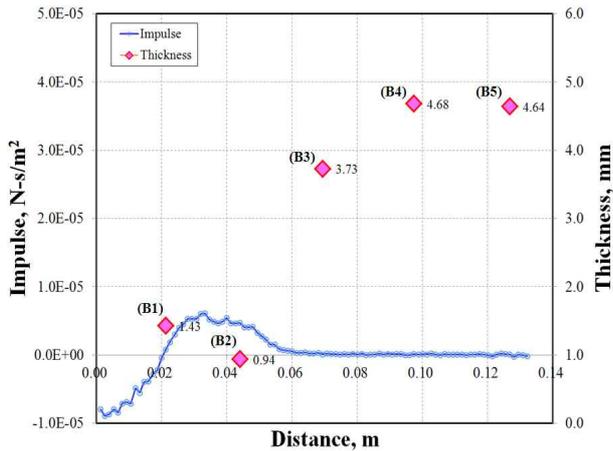


Fig. 15. Comparison of impulse & thickness of size 1 μm.

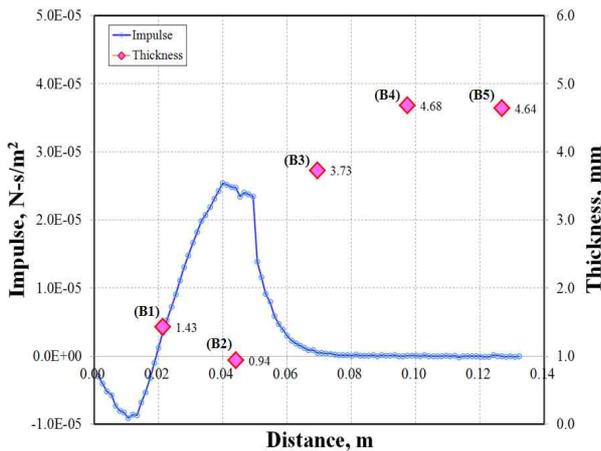


Fig. 16. Comparison of impulse & thickness of size 10 μm.

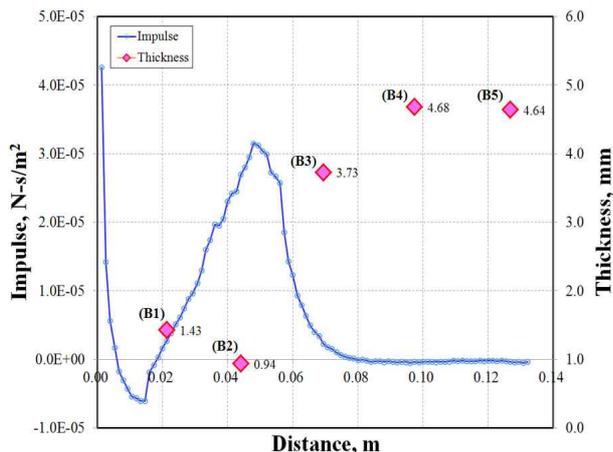


Fig. 17. Comparison of impulse & thickness of size 20 μm.

5. 결론

2013년 4월 한국의 특정 1,000MWe PWR 원전에서는 주증기계통에서 분기된 1인치 소구경 배관에서 감육으로 인한 누설이 발생하였다. 누설이 발생한 부위의 바로 전단에는 판형 오리피스가 설치되어 있고, 오리피스 전단에는 수직 유로를 갖는 컨트롤 밸브가 설치되어 있다.

본 연구에서는 감육 및 누설발생 원인을 분석하기 위하여 UT 검사를 통하여 배관두께를 측정하고, 육안점검, SEM 사진 분석 및 수치해석 수행하였다. 그 결과 배관감육의 직접적인 원인은 액적충돌침식인 것으로 확인되었다. 그리고 침식이 가장 많이 발생한 부위는 오리피스와 인접한 부위이지만 오리피스와 배관을 연결하는 용접부가 두껍기 때문에 문제가 발생하지 않았고, 오리피스 후단의 와류로 인하여 액적이 재부착되는 약 2D 거리 부근에서 액적충돌로 인한 누설이 발생하였다. 이러한 결과로부터 건도가 비교적 큰 주증기 배관에서도 감육이 발생할 수 있음을 확인하였고, 침식을 유발한 액적의 크기는 약 20 μm인 것으로 분석되었다.

참고 문헌

1. Jeffrey Horowitz, Recommendations for Controlling Cavitation, Flashing, Liquid Droplet Impingement Erosion, and Solid Particle Erosion in Nuclear Power Plant Piping Systems, EPRI 1011231, Final Report, November (2004).
2. K. M. Hwang, Investigation on the Evaluation for Liquid Droplet Impingement Erosion through Prediction Model and Experiment, JMST, B (Korean), **35**, 1105 (2011).
3. Y. S. Lee, S. G. Park, and J. S. Lim, Extraction Steam Line Drain Failure, KHNP-FAC-2009-EPRI-01, Rev. 0 (2009).
4. C. Crowe, M. Sommerfield, and Y. Tsuji, Multiphase Flows with Droplets and Particles, CRC Press (1998).
5. K. M. Hwang and D. Y. Lee, A Study on the Thermal Hydraulic Analysis and B-Scan Inspection for LDIE Degradation of Carbon Steel Piping in a Nuclear Plant, Corros. Sci. Tech., **11**, 218 (2012).
6. R. Morita and Y. Cchiyama, Development of a Wall Thinning Rate Model for Liquid Droplet Impingement Erosion, ASME, PVP2012-78443 (2012).
7. J. H. Brunton and M. C. Rochester, Erosion of Solid Surfaces by the Impact of Liquid Drops, Erosion-Treatise on Materials Science and Technology, 16, edited by C. M. Preece, Academic Press, New York (1979).