

액적충돌침식 영향 배관의 설계변경에 관한 연구[§]

황경모*[†] · 이찬규* · 방극진** · 임영식**

* 한국전력기술(주), ** 한국수력원자력(주)

Study on Design Change of a Pipe Affected by Liquid Droplet Impingement Erosion

Kyeong Mo Hwang*[†] Chan Gyu Lee*, Keug Jin Bhang** and Young Sig Yim**

* KEPCO Engineering & Construction Co., INC.

** Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD.

(Received April 12, 2011 ; Revised July 27, 2011 ; Accepted August 12, 2011)

Key Words: Liquid Droplet Impingement Erosion(액적충돌침식), Wall Thinning(감육), Design Change(설계변경), End Cap(중단마개), Flow Accelerated Corrosion(유동가속부식)

초록: 액적충돌침식은 증기나 공기에 포함된 액적이 금속 소재에 고속으로 충돌할 때 모재가 손상되는 현상이다. 액적충돌침식 손상은 증기터빈이나 빗방울과 부딪치는 항공기에서 주로 발생되어 왔으나 최근에는 원전 배관에서도 발생하고 있다. 원전 배관 중에서도 특히 높은 압력강하가 발생하고 2상 증기가 흐르는 배관에서 주로 발생한다. 실제 2011년 초반 국내 한 원전에서는 2상 증기가 흐르는 배관에서 액적충돌침식 손상으로 인한 누설이 발생한 바 있다. 본 논문에서는 액적충돌침식 손상이 발생한 배관에 대하여 손상을 억제할 수 있는 설계변경 방안에 관한 연구를 수행하였다. 설계변경은 유체 유동측면에서 분석하였으며, 상용 수치해석 코드인 FLUENT를 이용하였다.

Abstract: Liquid droplet impingement erosion (LDIE) is caused by the impact of high-velocity droplets entrained in steam or air on metal. The degradation caused by the LDIE has been experienced in steam turbine internals and high-velocity airplane components (particularly canopies). Recently, LDIE has also been observed in the pipelines of nuclear plants. LDIE among the pipelines occurs when two-phase steam experiences a high pressure drop (e.g., across an orifice in a line to the condenser). In 2011, a nuclear power plant in Korea experienced a steam leak caused by LDIE in a pipe through which a two-phase fluid was flowing. This paper describes a study on the design change of a pipe affected by LDIE in order to mitigate the damage. The design change has been reviewed in terms of fluid dynamics by using the FLUENT code.

1. 서론

증기와 액적(Droplet)이 혼재하는 증기계통 배관에서는 오리피스나 작게 개방된 밸브, 복수기 등에 의해 증기와 함께 액적이 가속되는 경우가 있다. 가속된 액적이 배관 벽면 등에 충돌하면 국소적으로 커다란 충격력이 발생하고, 배관 표면의 산화막이나 모재가 침식될 수도 있다. 이러한 현상을 액적충돌침식(LDIE, Liquid Droplet

Impingement Erosion)이라 하며, 충격력은 재료의 경도나 유속에 의존한다.⁽¹⁾

액적충돌침식과 관련된 연구는 주로 증기터빈이나 항공산업에서 수행되어 왔으나 최근에는 원전 배관계에서도 이로 인한 손상이 발생함에 따라 대책수립을 위한 연구수행 필요성이 급격히 부상하고 있다. 일반적으로 액적충돌침식에 의한 배관감육(Pipe Wall Thinning) 현상이 발생하기 쉬운 장소는 액적의 관성에 의해 벽면에 충돌하기 쉬운 엘로우 하류부의 외측 및 T자관 등과 같이 흐름방향이 변화되는 부분이나 오리피스, 밸브 직후단의 배관 등이다.⁽²⁾

최근 국내 원전에서는 액적충돌침식으로 인한

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 유체공학부문 춘계 학술대회(2011. 4. 15.-16., 포항공대) 발표논문임

† Corresponding Author, hkm@kepco-enc.com

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

배관손상이 여러 건 발생한 바 있으며, 그 중의 하나가 고압터빈 후단의 1단재열기에서 급수가열기로 가는 2상 증기 라인의 종단마개(End Cap) 누설이다. 본 논문에서는 액적충돌침식으로 인하여 종단마개가 감옥되고, 이로 인하여 누설이 발생한 부위에 대하여 감옥 원인을 검토한 후 최적의 설계변경 방안을 모색한 결과를 수록하였다.

2. 설계 및 운전특성

배관감옥으로 인하여 누설이 발생한 배관라인은 주터빈계통(Main Turbin System)에 해당된다. 이는 고압터빈에서 나온 증기를 저압터빈으로 들어가기 전에 재가열하기 위한 용도로 설치된 1단재열기에서 배기되는 증기를 급수가열기로 주입하는 라인이다. Fig. 1은 누설이 발생한 부위를 제시한 것이다.

누설이 발생한 부위는 배관 끝단의 종단마개이며, 전단에는 컨트롤밸브, 오리피스, 익스팬더, 차단밸브 및 T자관 순서로 배열이 되어 있다. 누설부의 배관은 6인치이며, 두께는 스케줄 40(7.11mm)이고 재질은 탄소강(A106 Gr.B)이다. 해당 라인은 상시 운전되며, 운전조건은 다음과 같다.

- 체적유량 : 71.601m³/hr
- 유속 : 2.434m/s
- 건도 : 0.915
- 온도 : 230℃
- 압력 : 2,791.82KPa

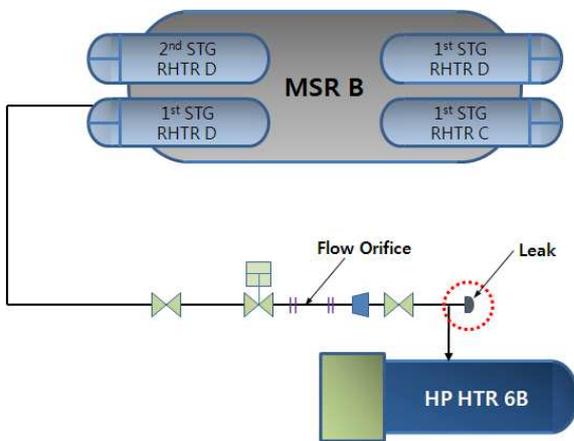


Fig. 1 Location of steam leak

3. 감옥 발생원인 검토

탄소강 소재의 배관에서 감옥현상을 유발시킬 수 있는 경년열화기구(Aging Mechanism)는 유동가속부식(FAC, Flow Accelerated Corrosion), 캐비테이션, 플래싱, 액적충돌침식 및 고체입자침식(SPE, Solid Particle Erosion)이 있다. 누설이 발생한 종단마개의 감옥발생 원인을 상기 4가지 종류의 경년열화기구에 대하여 검토하였다.

3.1 유동가속부식 영향 검토

유동가속부식은 유체 흐름으로 인하여 가속되는 재료의 부식현상으로 정의할 수 있으며, 단상 및 2상 유체 조건 모두에서 발생할 수 있다. 유동가속부식은 유체 흐름이 없는 배관에서는 발생하지 않는 것으로 알려져 있으며, 매개체는 배관 표면에 형성되는 검은색의 마그네타이트(Fe₃O₄)이다. 누설이 발생한 배관의 종단마개는 유체가 정체되는 조건이지만 미량의 와류가 형성되고 있기 때문에 유동가속부식 손상이 발생하는 정도는 상당히 적다.⁽³⁾

3.2 캐비테이션 및 플래싱 영향 검토

캐비테이션과 플래싱은 단상유체 조건에서 발생한다. 누설이 발생한 배관은 2상 유체 조건이므로 캐비테이션이나 플래싱 현상은 문제가 되지 않는다.⁽²⁾

3.3 고체입자침식 영향 검토

고속의 고체입자 충돌에 의한 충격력으로 인하여 모재가 침식되는 현상으로 원전에서는 단상유체 조건에서만 나타난다.⁽⁴⁾ 원전에서 고체입자침식이 나타날 수 있는 계통은 냉각수계통과 증기발생기취출수계통 등이다. 누설이 발생한 배관은 2상 유체 조건이고 유체 중에 고체입자가 포함될 가능성이 없으므로 고체입자침식은 문제가 되지 않는다.

3.4 액적충돌침식 영향 검토

고속의 액적 충돌에 의한 충격력으로 인하여 모재가 침식되는 현상으로 2상 유체 조건에서 발생한다. 누설이 발생한 배관은 2상 유체 조건이며, 오리피스를 통과한 액적이 끝단의 종단마개에 장기간 충돌하여 모재를 침식시킬 수 있다.⁽²⁾

따라서 본 논문에서는 액적충돌침식에 주안점을 두었다.

4. 수치해석 모델구성 및 해석

4.1 수치해석 모델구성

액적충돌침식의 영향을 검토하고 최적의 설계 변경 방안을 도출하기 위하여 4가지 종류에 대한 수치해석 모델을 구성하였다. 수치해석 및 모델 구성에는 Gambit 프로그램과 상용 수치해석 프로그램인 FLUNT 코드를 이용하였다. 수치해석 모델은 Base Case (BC), 1D, 2D 및 3D 모델로서 기존에 설치되어 있던 형상을 모델링한 것이 Base Case 모델이다. 종단마개 전단에 배관 직경의 한 배, 두 배, 세 배의 길이만큼 단관을 삽입하여 모델링한 것이 1D, 2D, 3D 모델이다. 여기서 D는 배관 내경을 의미한다. Fig. 2는 Base Case 모델을 대상으로 격자를 구성한 예를 보여준다. 그리고 Fig. 3은 4가지 모델에 대하여 데이터를 계산한 위치로서 종단마개 전단의 배관 중심에서 수직방향으로 5개 포인트를 지정하였다.

수치해석을 위한 배관 컴포넌트의 격자는 경계 층이 아닌 유체흐름 중의 액적유동이 관심 대상이므로 Tet/Hybrid를 적용하였다. Fig. 4는 격자 민감도를 분석한 결과로서 격자수가 약 40만개 이상에서는 계산 포인트별 결과 값에서 차이가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 약 40만 개의 격자를 기초로 하고 삽입한 단관의 크기에 따라 배관 크기 비율로 격자수를 증가하면서 설계변경 모델을 구성하였다. 수치해석은 정상상태 조건으로 수행하였으며, 난류점성 모델은 Instantaneous Navier-Stokes 식에서 유도된 RNG (ReNormalized Group) $k-\epsilon$ Model을 적용하였다.⁽⁵⁾

누설이 발생한 재열기 배기라인은 비압축성 유체인 물과 압축성 유체인 증기로 구성된 2상 유체가 흐르고 상들 간의 드래그 법칙(Drag Law)을 알 수 없기 때문에 혼합 다상모델(Mixture Multiphase Model)을 적용하였다. 혼합 다상모델의 지배방정식은 다음과 같다.

연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (1)$$

모멘텀 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \quad (2)$$

$$\nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} +$$

$$\vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E$$

상대속도 방정식

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{qp} - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \vec{v}_{qk} \quad (4)$$

체적분율 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) \quad (5)$$

- 여기서, \vec{v}_m : 질량평균 속도
 ρ_m : 혼합유체의 밀도
 α_k : 상 k 의 체적분율
 \dot{m} : 캐비테이션으로 인한 물질전달, 본 연구에서는 미고려
 n : 상의 수
 \vec{F} : Body Force
 μ_m : 혼합유체의 점도
 $\vec{v}_{dr,k}$: 두 번째 상 k 의 표류속도
 k_{eff} : 유효(Effective) 전도도
 S_E : 체적열원(Volumetric Heat Sour

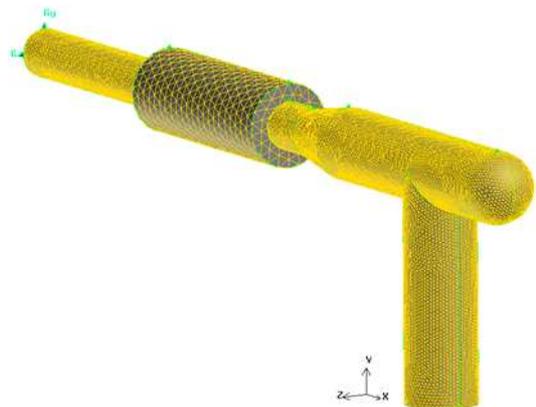


Fig. 2 Example of mesh generation

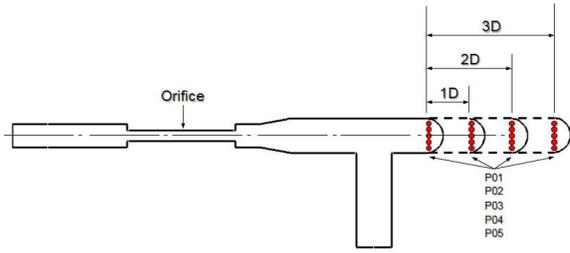


Fig. 3 Data calculation points by model

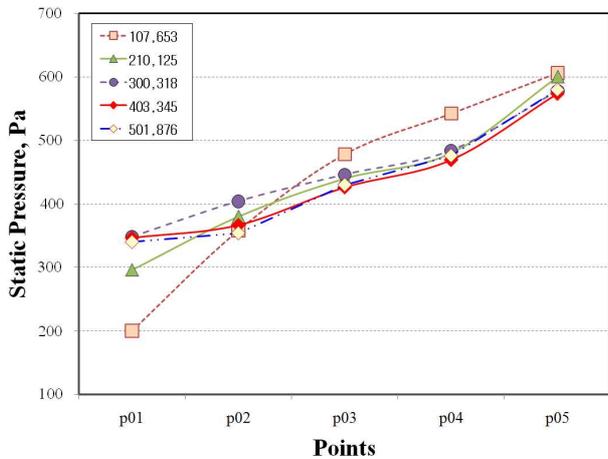


Fig. 4 Varification by the number of cells

$$E_k = h_k \text{ (비압축성 유체)}$$

h_k : 상 k 에 대한 Sensible Enthalpy

v_{qp} : 상대속도

a : 2차 상 입자의 가속도

τ_{qp} : 입자의 이완시간

a : 가속도

근접벽 처리(Near Wall Treatment) 방식은 가장 일반적으로 적용되는 Standard Wall Function을 적용하였으며, 상 간의 물질전달은 없는 것으로 가정하였다. 입력 경계조건으로 사용되는 입구 유속은 균일속도 조건을 적용하고 출구조건은 후류가 없는 게이지압 '0' Pa를 적용하였다. 해석에 적용한 유체조건과 물성치는 Table 1에 제시하였으며, 액적의 크기는 0.1mm로 추정하였다.

4.2 수치해석 결과

수치해석 결과는 내압, 난류운동에너지(TKE, Turbulent Kinetic Energy) 및 축방향 액적속도

Table 1 Analysis conditions

Items	Steam	Water
Contents, %	91.5	8.5
Density, kg/m ³	13.97	827.46
Viscosity, kg/m-s	1.68×10 ⁻⁵	1.16×10 ⁻⁴
Specific Heat, J/kg-K	3,326.78	4,681.06
Thermal Conductivity, W/m-K	0.046	0.639
Flow Rate, m/s	2.43	2.43

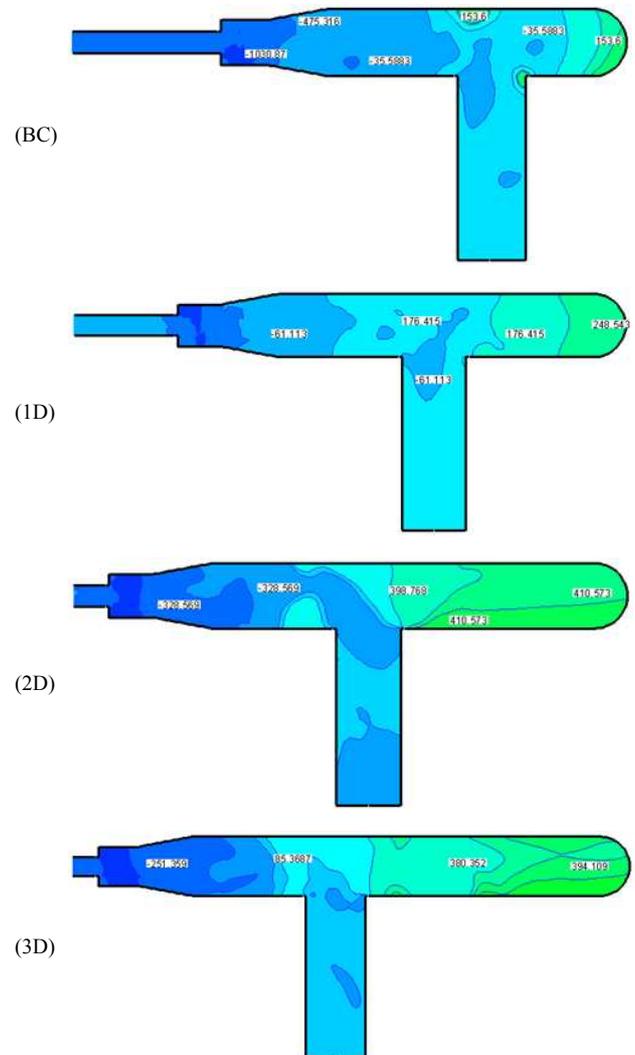


Fig. 5 Static pressure configuration by model

(x-Vel) 측면에서 검토하였다. 내압 중에서도 정압만을 논문에 제시한 이유는 배관 내부의 유동 분포가 내부 압력에 따라 결정되기 때문이며, 동압은 부위별 최대 11Pa 정도로서 배관 내부의 전

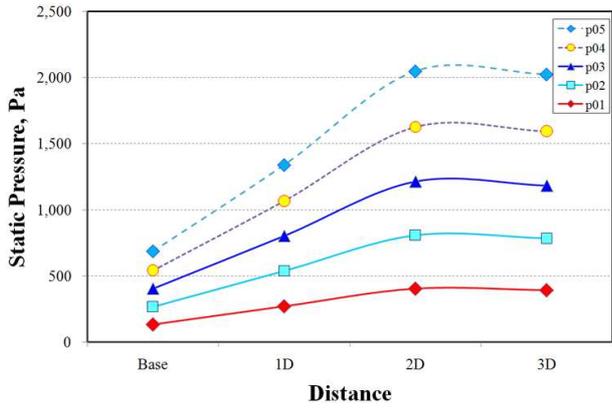


Fig. 6 Static pressure variation by model

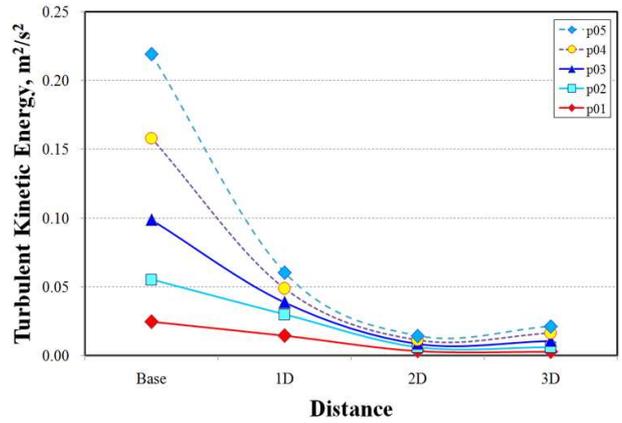


Fig. 8 TKE variation by model

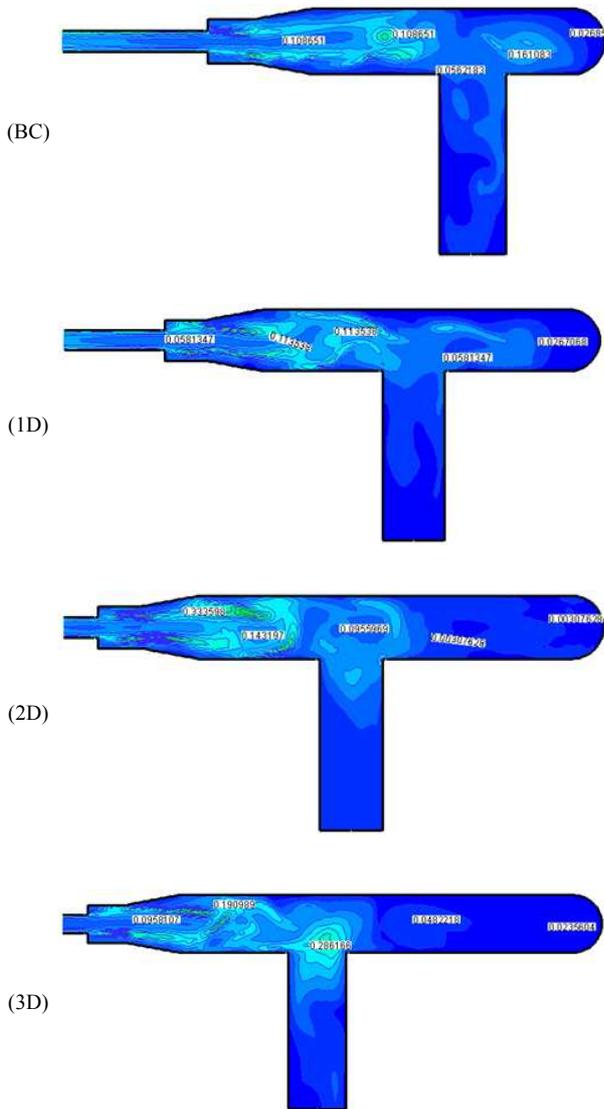


Fig. 7 TKE configuration by model

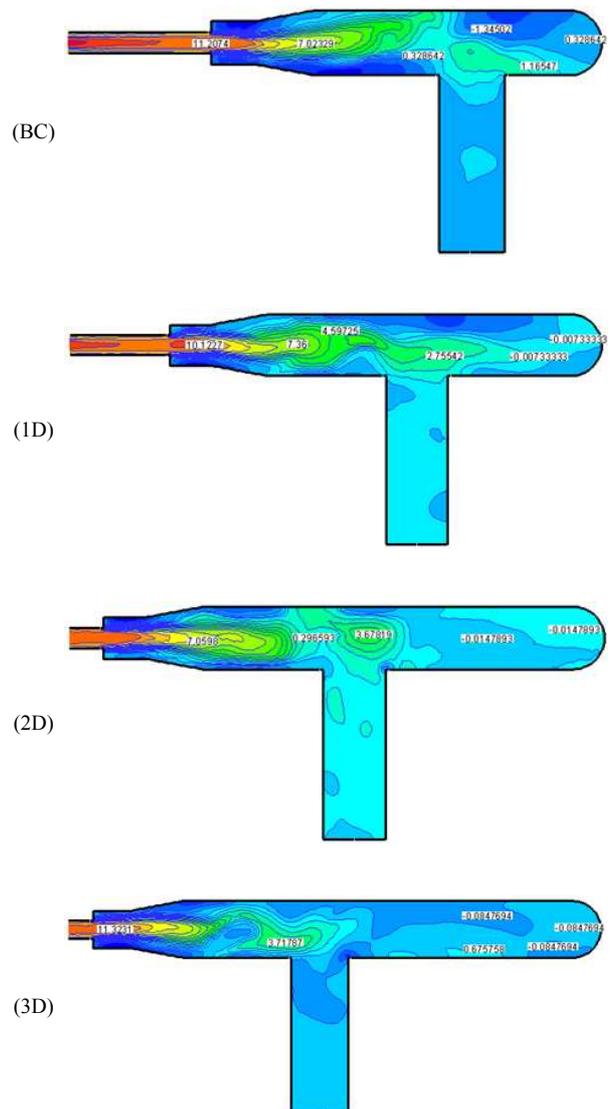


Fig. 9 x-Vel configuration of droplet by model

체적인 압력분포에 미치는 영향이 미미하여 본 논문에서는 제시하지 않았다. 난류운동에너지를 검토한 이유는 배관 내부에 형성되는 유체의 난류발생 정도에 따라 배관감육 매개체인 마그네이트의 물질전달계수의 크기가 결정되기 때문이다. 축방향 액적속도는 액적충돌침식과의 관련성을 분석하기 위하여 검토하였다.⁽⁶⁾

Fig. 5는 각 모델별 정압분포를 보여주며, Fig. 6은 계산 포인트별 압력변화를 보여준다. Fig. 5와 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 T자관 후단에 삽입된 단관의 길이가 증가할수록 종단마개에 형성되는 정압은 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 삽입 단관의 길이가 증가할수록 정압이 커지는 현상으로 인하여 오리피스를 통과한 2상 유체는 후단 종단마개에 충돌할 가능성은 점차 줄어든다.

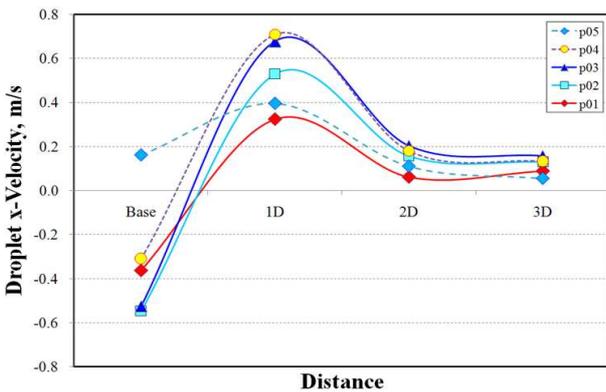


Fig. 10 x-Vel variation of droplet by model

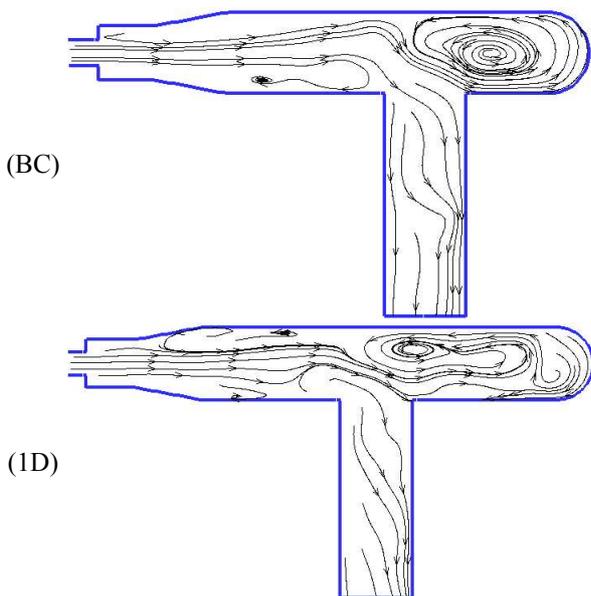


Fig. 11 Liquid droplet stream line for BC and 1D

Fig. 7은 각 모델별 TKE 분포를 보여주며, Fig. 8은 계산 포인트별 TKE 변화를 보여준다. 배관 감육은 유동가속부식이건 침식이건 간에 배관 내부에서 형성되는 유체의 난류와 밀접한 관련이 있다. Fig. 7과 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 T자관 후단에 삽입된 단관의 길이가 증가할수록 종단마개에 형성되는 난류운동에너지는 2D 거리까지 급격하게 줄어드는 것을 알 수 있다. 이로부터 2D 거리 이후에는 난류발생 정도가 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9는 각 모델별 축방향 액적속도(x-Vel) 분포를 보여주며, Fig. 10은 계산 포인트별 x-Vel 변화를 보여준다. 축방향 액적속도는 오리피스를 통과한 2상 유체가 종단마개 방향으로 향하는 액적의 속도를 나타낸다. Fig. 9와 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 1D 모델에서 각 포인트의 축방향 액적속도가 가장 빠르고 2D와 3D 모델의 거리에서 급격히 느려진 것을 알 수 있다. Base Case에서 축방향 액적속도가 (-)의 속도를 나타내는 것은 액적이 종단마개에 충돌한 후에 반사되어 나오는 속도를 나타내기 때문이다. 이와 같이 오리피스를 통과한 2상 유체에 포함된 액적은 지속적으로 종단마개에 부딪치고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 Base Case와 1D 모델에 대한 액적궤적을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 Base Case에서는 오리피스를 통과한 유체가 직접 종단마개에 와류를 형성하면서 접촉하지만 1D 모델에서는 1차로 형성되는 와류가 종단마개에 직접 접촉하지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 2D와 3D에서도 동일하다.

5. 결론

2011년 초반 국내 한 원전의 1단계열 배기라인의 종단마개에서 감육으로 인한 누설이 발생하였다. 본 연구를 통하여 배관감육이 발생한 원인을 분석하였으며, 그 결과 손상의 원인은 액적충돌 침식이 지배적인 것으로 나타났다.

이에 따라 액적충돌침식을 완화할 수 있는 최적의 설계변경 방안을 도출하기 위하여 수치해석을 통한 유동특성을 분석하였다. 설계변경 측면에서는 종단마개 전단에 2D 만큼의 단관을 설치하면 액적충돌침식의 영향을 거의 배제시킬 수 있으며, 공간적인 제약사항이 있을 경우에는 1D 만큼의 단관을 설치하더라도 손상을 상당부분 회

석시킬 수 있을 것으로 나타났다.

참고문헌

- (1) Horowitz, J., 2007, Interim Recommendations for an Effective Program Against Erosive Attack, 1015071, EPRI, Palo Alto, pp. A-1~A-14.
- (2) Horowitz, J., 2007, Interim Recommendations for an Effective Program Against Erosive Attack, 1015071, EPRI, Palo Alto, pp. A-1~A-14.
- (3) Munson, D. and Horowitz, J., 2006, Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program, 1011838, EPRI, Palo Alto, pp. 2-1~2-4.
- (4) Kleis, I. and Kulu, P., 2010, "Solid Particle Erosion - Occurrence," Prediction and Control, Spinger, Spain, pp.14~27.
- (5) Choudhury, D., 1993, Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling, Fluent Inc., Technical Memorandum TM-107.
- (6) Albert, M., 2004, CHECWORKSTM Steam Feedwater Application, 1009600, EPRI, Palo Alto, pp. 15-1~15-4.