

2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

기포유동에 의한 박리점 지연 현상과 Flow Accelerated Corrosion(FAC)

Flow Accelerated Corrosion(FAC) and delaying the point of separation due to the bubble agitation effect

권 혁, 서동운, 박군철
서울대학교

서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

김기태

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

기포유동에 의한 박리점 및 재부착점의 위치변화가 후향계단유동에 대해 수치해석하였다. 박리점 및 재부착점은 기포류의 기포거동에 의해 단상유동에 비해 지연되었다. 기포거동에 의해 증가된 벽면 전단응력은 볼록형상(concave)에서 발생하는 역압력구배를 완화시켜 단상유동에서 발생하는 박리점을 지연시킨다. FAC는 부식 피막의 특성과 물질전달계수에 의해 결정된다. 박리 및 재부착점 주위의 유동은 강한 난류운동에너지와 소산율 그리고 경계층의 급격한 변화가 발생한다. 이러한 유동특성은 물질전달계수에 영향을 주어 최대 FAC위치와 발생지점을 조정한다.

Abstract

The variation of both separation and reattachment points is investigated numerically on the back-ward facing step flow. The effect of bubble agitation delays these points in comparison with those of single phase flow. The increment of turbulent shear stress due to the effect cause to the relaxation of the points that were made by the adverse pressure gradient from the concave shape. Flow Accelerated Corrosion(FAC) is determined by two parameters - mass transfer coefficient, the characteristics of corrosion. The flow around separation or reattachment produces the strong turbulent kinetic energy and dissipation rate, so that occurs to the abrupt thickness variation of boundary layer. These characteristics affect the rate and the generation point of FAC and change the mass transfer coefficient.

1. 서론

최근 세계적으로 원자력 발전소의 운전연수의 증가에 따라 냉각수가 흐르는 탄소강 배관에서 FAC(flow assisted/accelerated corrosion)로 인한 손상 사례가 많이 나타난다. 발전소 탄소강 배관의 FAC는 1986년 12월 미국의 Surry Unit 2 발전소의 주 급수 펌프 흡입 측 배관이 FAC으로 파열되어 인명피해가 발생한 후 그 중요성이 널리 인식되었고 이후 미국뿐만 아니라, 독일, 프랑스와 같은 여러 나라에서도 원자력 발전소의 탄소강 배관에서 FAC에 의한 손상사례가 여러 차례 보고되고 있다[1].

150기압하의 약 300℃ 온도에서 운전되는 중수로내의 피더관은 탄소배관으로 제작되었다. 경수로와 달리 중수로는 2인치에서 2.5인치의 직경을 가지는 300여개의 피더관들이 로심의 냉각회로를 구성하고 있다. 작은 공간에 조밀하게 위치한 관계로 피더관의 굽힘각은 경사가 심하여 유동박리가 발생하기 쉽다. 유동박리가 발생하면 정체점 주위의 속도 분포 및 전단응력이 급격하게 변하여 FAC가 더 쉽고 강하게 나타난다[2].

고온 고압의 피더관내의 유동은 기포류이다. 이상유동은 단상유동 보다 더 큰 벽면 전단응력을 유발한다. 단상유동과 동일한 유동조건일지라도 기포류가 되면 기포들의 운동에 의한 벽면 전단응력의 증가는 유동박리의 발생을 지연한다. 변경된 박리점은 유동장을 변형시켜 물질전달계수에 영향을 주어 단상유동과는 다른 형태의 FAC분포를 형성한다.

이러한 현상을 이해하기 위해 이상유동의 기포운동이 유동장의 박리점과 재부착점에 어떻게 영향을 끼치는지를 후향계단을 통해 수치적으로 평가하고 FAC와의 관계로 확장하였다.

2. 계산방법

2.1. 지배 방정식

CFX 4.3 전산 코드는 연속 방정식과 Navier-Stokes 운동 방정식을 FVM(Finite Volume Method)를 이용하여 계산한다. 특히 재부착점 및 박리점의 예측 벽면 가까이 유동이 중요하다. 이를 정확히 계산하기 위해서는 DNS(Direct Numerical Method)나 LES(Large Eddy Simulation)을 이용하여야 하나 형상의 복잡성과 높은 Reynolds 수에 의해 이런 방법은 용이하지 않다. 따라서 모델링을 이용하여 이를 해석하여야 하며 본 논문에서는 벽면에서의 난류를 정확하게 계산하기 위해 Low Reynolds $k-\epsilon$ 모델을 이용하여 난류를 모델링 하였다. k 식은 식(2.1)과 같이 표현된다[3].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[U k - \frac{1}{J} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial}{\partial x} B_m \right] = J(G - \rho \epsilon) \quad (2.1)$$

여기서 B는 체적력 항 이고 J는 좌표변환시 요구되는 Jacobian matrix, G는 source 항이다. ϵ 식은 식(2.2)처럼 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[U \epsilon - \frac{1}{J} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x} B_m \right] = J \left(C_{\epsilon_1} \frac{\epsilon}{k} G - C_{\epsilon_2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \right) \quad (2.2)$$

source항은 식 (2.3)처럼 표현된다.

$$G = \frac{\mu_t}{J^2} \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} b_j \right)^2 + \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} b_2 + \frac{\partial u_2}{\partial x} b_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial u_1}{\partial x} b_3 + \frac{\partial u_3}{\partial x} b_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial u_2}{\partial x} b_3 + \frac{\partial u_3}{\partial x} b_2 \right)^2 \right] \quad (2.3)$$

각 상수들은 식(2.4)의 구성방정식으로부터 정해진다.

$$C_\mu = 0.09, C_{\epsilon_1} = 1.44, C_{\epsilon_2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (2.4)$$

이들 두 방정식으로부터 계산된 k(eddy의 운동에너지)와 ϵ (eddy의 특성길이)으로부터 Boussineq의 가정을 사용하여 μ_t 가 모델링된다.

$$\mu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.5)$$

모델링된 μ_t 와 $Sc_t = 1.7$ (실험값)로부터 식 (2.5)을 이용하면 난류가 있는 경우의 질량 전달계수를 모사할 수 있다. 또한 식 (2.6)에 적용하면 난류가 있는 경우의 벽면에서의 전단응력도 계산된다[4].

$$\tau_t = \mu_t \frac{\partial u}{\partial n} \quad (2.6)$$

척도 평가에서 요구되는 dissipation rate와 난류의 특성길이는 식(2.7)과 (2.8)처럼 평가된다.

$$T_L = 0.3 \frac{k}{\epsilon} \quad (2.7)$$

$$L_L = u' T_L \quad (2.8)$$

국부 부식률(local corrosion rate)은 철이온의 생성 및 이동량에 의해 지배된다. 철이온의 생성률은 수화학적 방정식인 식(2.9)에 의해 계산된다.

$$R_p = 2K(C_b - C_w) \quad (2.9)$$

여기서 K는 생성 상수, C_b 는 유체에서의 철이온 농도, C_w 는 부식피막에서에서의 철이온 농도이다.

2.2. 경계조건 및 적용모델

벽면 전단응력에 의한 영향을 평가하기 위하여 점성저층(viscous sub-layer)영역에 7개 이상의 격자를 형성하였다. 그림 1과 같은 129 X 70 개의 비균일 정렬 격자계를 형성하였으며 Bradshaw의 실험결과로 계산 결과를 검증하였다[5]. 재부착점 및 전단층 부근의 영역은 조밀하게 격자계를 형성하였다.

입구에서 유입되는 속도 및 난류 운동에너지와 소산율은 실험 결과를 이용하였다. 물질 전달량을 모델링하기 위하여 바닥면에는 균일한 농도를 주어 Neumann 경계조건을 주었다. 위면은 no-shear 조건을 사용하여 유동장에 영향을 주지 않도록 모델링하였다.

이상유동을 모델링하기 위하여 계면 운동전달량을 lift force, virtual mass, turbulent dispersion, 그리고 wall lubrication force항으로 구분하여 각각을 모델링하였다.

압력과 속도 계산시 발생할 수 있는 수치 불안정성을 방지하기 위해 Rhie-Chow interpolation 방법을 적용하였다. 속도 및 압력장은 SIMPLEC을 사용하여 계산하였다. 대류항에 대해서는 Hybrid upwind 차분을 적용하였다. 시간에 대해서는 crank nicholson 방법을 적용하여 계산을 전진시켰다.

수렴여부는 전 time step의 mass residual과 현상태의 값의 뺀 양이 10^{-6} 이하가 되면 수렴하였다고 판단하였다.

3. 이론

3.1 후향 계단 유동

그림 2는 후향 계단유동에서 발생하는 물리적 현상을 나타낸다. 입구에서 유입된 유체는 계단 끝단에서 박리현상을 겪게 되고 재순환영역을 거쳐 다시 벽면에 부착하게 된다. 재부착한 유체는 새로운 경계층을 형성하여 평판해로 접근거동한다. 계단 끝단에서는 jet flow에서 볼 수 있는 혼합전단 경계층이 발생하며 이들은 bulk water의 유동을 재순환 영역으로 끌어들이는 entrainment를 발생시킨다.

후향 계단 영역을 분석하기 위해서 Bradshaw의 실험치[5]를 이용하여 계산을 검증하였다. 벽면에서는 log-law를 사용하지 않고 점성저층부터 선형으로 fitting하여 Low Reynolds 모델을 적용하여 모델링하였다.

3.2 기포류 유동에서의 전단응력

Y.Sato와 K. Sekoguchi는 mixing length theory[6]를 이용하여 bubble agitation에 의한 전단응력의 증가분을 모델링하였다. 그들은 식(3.1)에서처럼 점성에 의한 항, 난류 그

리고 bubble의 agitation에 의한 3항으로 나누어 각각을 모델링하였다. 기포가 움직임에 따라 위 아래성분의 속도 요동항이 발생하게 되어 추가적인 전단응력이 발생한다고 모델링하였다.

$$\tau = \tau_l + \tau_t + \tau_B$$

$$\tau = \rho(1 - \alpha)(\nu + \epsilon' + \epsilon'') \frac{du}{dy} \quad (3.1)$$

이 ϵ'' 항을 단상유동에서의 난류 eddy motion을 모델링한 방법을 이용하여 다시 모델링하면 식(3.2)처럼 된다.

$$\epsilon'' = k_1 \alpha (d_b/2) U_b \quad (3.2)$$

여기서 k_1 는 상수, α 는 기포율, d_b, U_b 는 공간 평균한 기포의 직경과 속도이다. 기포들에 의한 전단응력의 증가분은 연속상인 액체의 속도구배를 더 급격하게 만든다. 더 두꺼워진 속도분포는 벽면에서의 박리점을 지연시킨다. 만약 역압력구배가 이 증가된 벽면 전단응력의 값보다 크지 못하다면 단상유동에서는 박리가 발생하더라도 이상유동에서는 발생하지 않게 된다. 이러한 bubble agitation의 영향은 물질전달에도 영향을 주게 된다. 일반적으로 소산율이 커지면 그 근방의 혼합율이 증가하게 되고 물질전달계수가 증가한다.

3.3 유동 박리점과 FAC와의 관계

속도 구배항은 물질전달계수와 전단응력의 크기를 결정하기 때문에 FAC는 이 구배성분에 크게 영향을 받는다. 그림 3에서 유동박리가 발생하면 이러한 속도 구배항이 급격하게 변하게 되어 FAC가 가속화된다. 유동박리가 없는 경우에는 곡관부 안쪽에서 유속이 최대가 되고 속도구배 또한 바깥쪽보다 더 급격하게 되어 안쪽에서 FAC가 더욱더 많이 발생한다. 그러나 유동박리가 발생하면 재순환 영역이 발생하여 유로가 좁아진다. 이 영역에서 연속방정식을 만족시켜 주기 위해 재순환 영역 이외의 지역은 유속이 더 빨라져야 한다. 이러한 이유로 유동박리가 발생하면 바깥쪽이 더 빨라지게 되고 속도 구배 또한 안쪽보다 더 급격해져서 FAC가 영향을 주는 지점이 안쪽에서 바깥쪽으로 이동하게 된다.

유동박리가 발생하여 재순환영역이 형성되면 재부착지점이라는 유동박리의 역현상이 발생하는 지점이 생성된다. 이 지점은 난류 강도, 난류 운동에너지, 그리고 소산율 모두가 다른 지점보다 큰 지점으로 알려져 있다. 따라서 FAC는 다른지점보다 이 지점 근방에서 높을 것이다.

4. 계산 결과

4.1 단상유동

단상유동에서 물질전달량과 속도분포와의 값을 비교하였다. 그림 4는 실험값과 비교한 결과이다. 후향계단 유동의 평가 척도인 재부착지점까지의 길이는 $\frac{x_r}{h} = \frac{1.56}{0.243} = 6.42$, 처럼 계산되어 지고 Bradshaw의 실험에 의한 실험값은 6.8이다. 실험에서 얻어진 재부착지점의 길이는 1.60이었다.

그림 5는 물질전달량과 유선과의 관계를 보여주며 재부착 지점에서 경계층이 재생성된다. 이 지점에서 물질전달량이 크기 때문에 다른 지점보다 더 작은 양의 농도 분포를 보여준다. 그림 6은 각 영역에 대한 농도 구배를 보여준다. 벽면을 향해 농도구배를 외삽한 값이 물질전달계수와 비례하는 양이며 이 값이 재부착지점과 혼합경계층에서 다른 영역보다 크다.

4.2 이상유동

그림 7은 각 영역별로 질량전달량의 기울기가 이상유동에서 단상유동의 값보다 더 급격하게 변함을 보여준다. 이러한 기울기의 변화는 속도장에 의해서 나타난다. 그림 8에서 기포에 의해 속도분포가 더 두터워지고 이 분포는 재부착지점을 지연시켜서 mixing layer를 더 크게 만든다. 그림 9에서 단상유동과 이상유동에서의 재부착지점들을 비교하였다. 이상유동에서의 bubble agitation에 의해 증가된 응력분포는 벽 가까이 기울기를 더 가파르게 만들어 재부착지점을 지연시킨다.

5. 토의

Bubble agitation은 벽가까이의 속도구배를 급격하게 만들어 벽면전단응력을 증가시켰다. 벽면응력의 증가는 그림 9처럼 재부착지점의 지연 및 mixing layer를 증폭시켰다. 이상유동에 의한 효과는 아래와 같다;

- 기포 자체 공격에 의한 erosion
- 기포거동에 의한 혼합증대
- Bubble agitation에 의한 전단응력 증대

이상유동의 다른 효과와는 달리 bubble agitation의 효과는 액상의 속도분포에 직접적으로 영향을 주었다. 그림 6과 7의 비교에서 이러한 bubble agitation의 효과가 물질전달계수를 증가시켜 FAC를 가속화시키거나 확대 시킬것이다. 또한 정체점 및 재부착점의 이동으로 인한 유동장의 변형은 단상유동의 결과를 토대로 분석한 FAC 최대 위험 지점이

좀 더 하류지점에 위치하거나 아니면 속도분포의 두터워짐으로 인해 정체점이 발생치 않아서 해석 결과와는 전혀 다른 곳이 될 수 있음을 시사한다.

6. 결 론

이상유동의 bubble agitation 효과와 유동장의 관계를 수치해석 하였다. Bubble agitation은 단상유동의 난류전단응력에 추가적으로 전단응력 성분을 제공하고 속도분포를 두텁게 만들어 재부착 및 박리지점을 지연시킨다. 변형된 유동장은 물질전달량에 영향을 주며 증가된 전단응력은 물질전달계수를 증가 시킨다.

이 현상으로 인한 유동장의 변형은 농도분포 및 물질전달량에도 영향을 준다. 따라서 bubble agitation 항을 추가로 고려한 수정된 속도분포를 사용하면 단상유동의 계산량으로 이상유동에서의 유동장을 근사할 수 있다.

참고 문헌

1. Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants, EPRI TR-106611, June 1998.
2. Bryan Poulson, "Complexities in predicting erosion corrosion", Wear, Vol 233, pp 497-504, 1999
3. CFX 4.3 Solver Manual, AEA-Technology, 1999.
4. N.N Mansour, J.Kim, and P.Moin, " Near Wall k-e Turbulence Modeling", J.AIAA, Vol 29, pp1068-1073, 1988.
5. P.Bradshaw and F.Y.F.Wong " TherReattachment and relaxation of a turbulent shear layer," JFM, Vol 52, pp 113-135
6. R.J.K.Wood, T.F.Jones, N.J. Miles, J.Ganeshalingam, "Upstream swirl-induction for reduction of erosion damage from slurries in pipeline bends.", Wear 250, 770-778, 2001.



그림 1 . 후향 계단 유동에서의 격자계 129 X 70

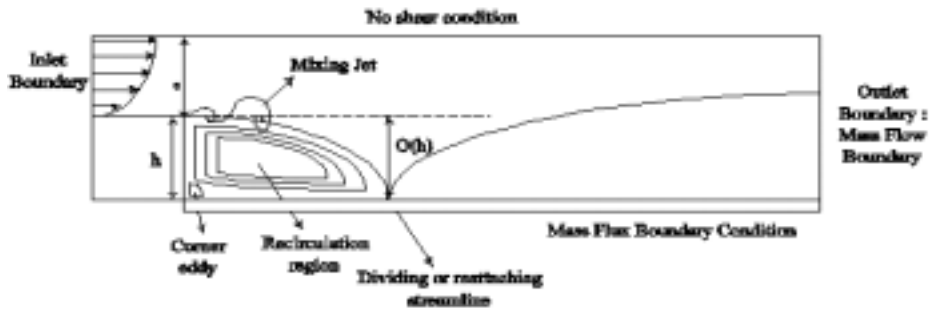


그림 2 . 후향계단유동에서 발생하는 물리적 현상도

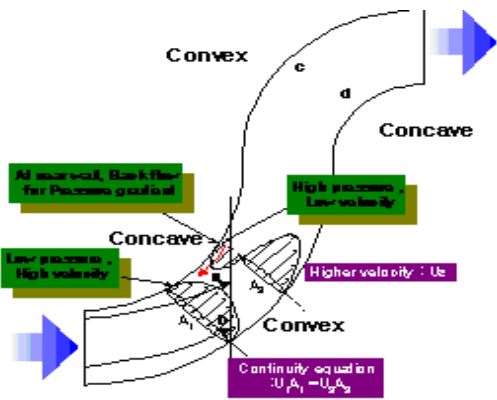


그림 3 유동박리와 FAC의 관계 현상도

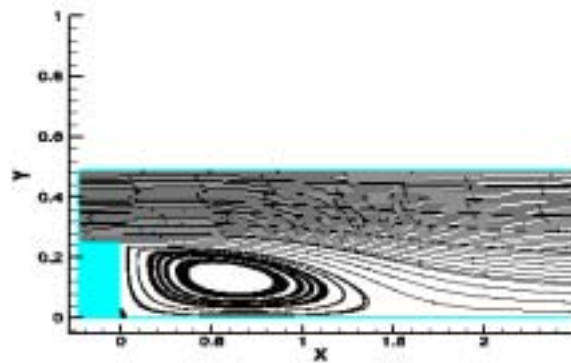


그림 4. 재순환 영역과 재부착점

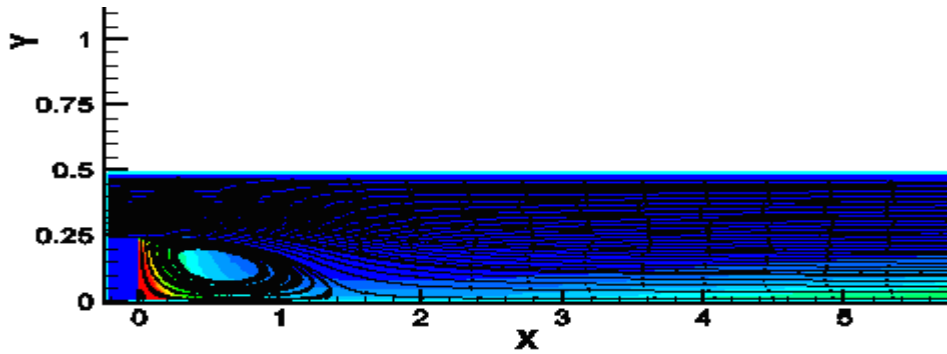


그림 5. 유선과 질량전달량(contour : 질량전달량)

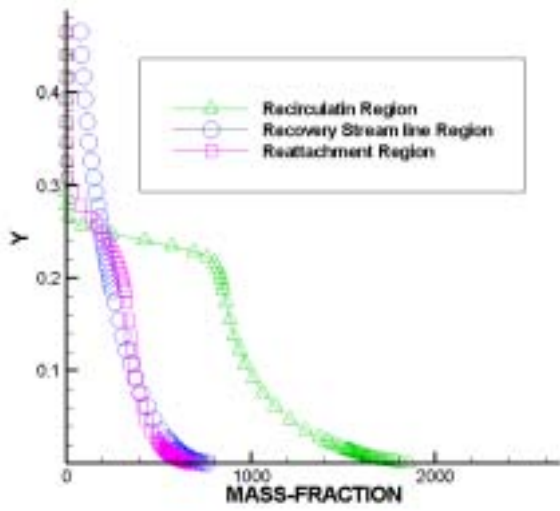


그림 6. 단상유동에서 각영역의 농도분포

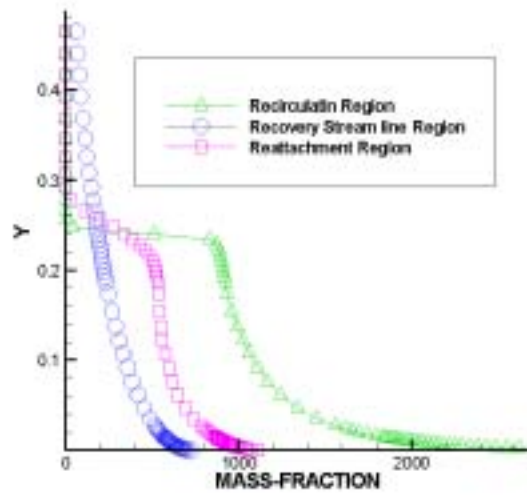


그림 7. 이상유동에서 각영역의 농도분포

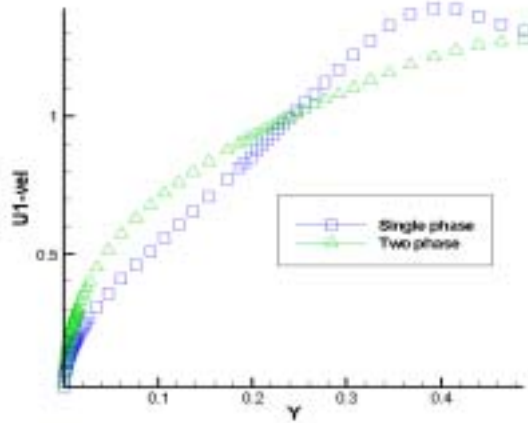


그림 8. Bubble agitation 효과

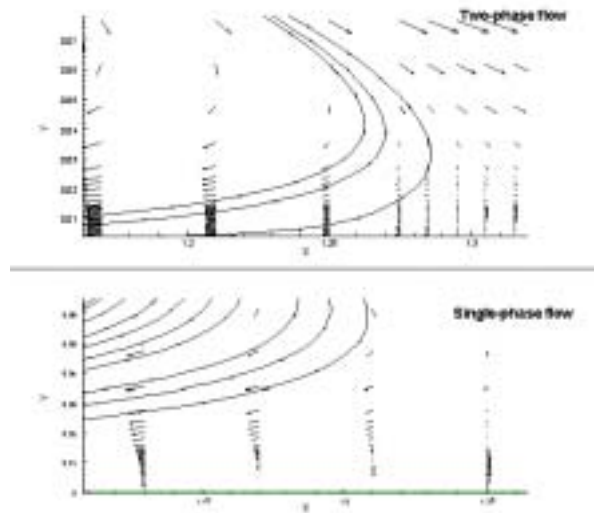


그림 9. 이상유동에서의 재부착지점 지연현상