

2002 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

중수로 피더관내의 FAC 현상 규명을 위한  
유체 유동장에 관한 이론 및 실험 연구

**A Study of Flow Field of Feeder outlet pipe at CANDU  
for understanding Flow Accelerated(Assistant) Corrosion Phenomena**

권 혁, 서동운, 박군철  
서울대학교  
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

정한섭  
한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

중수로 피더관내의 FAC(Flow Accelerated Corrosion)는 중수로의 건정성을 위협하는 현상으로 최근 주목받고 있다. 이는 전기화학적 부식 현상과 수력학적인 유체 유동이 서로 상관되어 발생하는 현상이다. 거시적으로 FAC를 지배하는 인자인 질량전달계수는 유체 유동장에 의해 결정되므로 우선 수력학적인 관점에서 FAC 현상을 분석하였고, 이를 실험적으로 비교 검증하였다. 또한, 발전소 데이터 베이스의 자료를 토대로 실제 중수로 피더관의 감육 취약지점과 계산결과를 비교 평가하였다.

Abstract

The FAC(Flow Accelerated Corrosion) on feeder outlet pipe is an important phenomena for surveying an integrity of CANDU plant. There are correlated a corrosion effect in electrochemistry and a flow field effect in hydrodynamics. A mass transfer rate is main governing parameter in macroscopic analysis of FAC phenomena. Therefore, first of all, at the hydrodynamic aspect the analysis of FAC is carried out. CFX 4.3 code calculates the flow field of feeder outlet pipe with complex geometry and the calculated results are estimated with an experimental data. On the basis of power plant data base, the worst location about wall thinning is compared with calculated and experimental location.

## 1. 서 론

최근 세계적으로 원자력 발전소의 운전연수의 증가에 따라 냉각수가 흐르는 탄소강 배관에서 FAC(flow assisted/accelerated corrosion)로 인한 손상 사례가 많이 나타나고 있다. 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 그 사고 이후 미국뿐만 아니라, 독일, 프랑스와 같은 선진국 여러 나라에서도 원자력 발전소의 탄소강 배관에서 FAC에 의한 손상사례가 여러 차례 보고되고 있다. FAC이란 기존의 침식(erosion), 마모, 캐비테이션과 같은 기계적인 손상과는 달리 배관 표면에 부착되어 있는 산화성 보호피막이 유체의 흐름으로 인하여 점차 제거되면서 배관 감육(thinning)이 가속화되는 재료의 부식 현상이다. FAC에 의한 배관의 감육 현상은 원자력발전소에서는 일반적으로 주로 2차 계통의 탄소강 배관에서만 발생한다고 알려져 있으나 최근 가압 중수로의 경우는 2차 계통뿐만 아니라 냉각수가 방사능을 함유하고 있는 1차 계통측, 특히 feeder outlet 탄소강 배관에서 FAC에 의하여 배관 감육이 일어난다는 것이 보고되고 있으며 캐나다에서 공급한 CANDU 형 중수로의 경우 FAC에 의한 배관 감육이 경수로에 비하여 상대적으로 심하다는 것이 원전 건설 초기부터 꾸준히 지적되고 있다.

국내의 FAC 사례로는 월성 발전소(CANDU)내의 1차측 feeder outlet 배관에서 주로 발생하고 있으며 이로 인해 배관의 감육은 물론이고 증기발생기관의 과도한 fouling을 야기하므로 열전달 감소와 관의 내경 감소를 초래해 관의 검사 시 계측기 삽입 장애를 초래하고 노심 입구온도 상승까지도 야기한다<sup>1)</sup>.

FAC이란 정상적인 조건 하에서는 배관 재질인 탄소강 표면이 보호성 산화피막에 의하여 부식이 억제되지만 온도, 유속, pH, 및 용존산소 등의 유체의 환경이 변하여 표면 산화피막이 제거되면 부식이 가속화되어 빠른 속도의 배관감육이 일어나는 현상이라고도 볼 수 있다. 이와 같은 관점에서 FAC 배관 감육은 두 가지 단계로 나누어 생각할 수 있다. 첫 번째는 금속 표면 산화피막의 용해 단계이며 두 번째는 용해된 철 이온이 산화피막-물 계면으로부터 bulk water로의 질량전달 단계이다. bulk water의 철 이온의 농도는 계면에서의 농도에 비하여 현저히 작으므로 철 이온의 이동이 계면으로부터 bulk water로 이동하게 되며 만약 계면을 지나치는 유체의 이동속도가 빨라지게 되면 FAC에 따른 배관 감육속도도 더욱 증가하게 된다<sup>2)</sup>.

금속부식피막과 bulk water간의 질량 전달은 유체의 유속, 유동장의 기하학적 구조와 같은 수력학적 요소, 그리고 온도 및 pH와 같은 수화학적 요소에 의해 이루어진다. 질량 전달량은 수화학적인 철이온 포텐셜과 질량 전달계수의 곱으로 표현된다. 피더관 내부의 유동장을 포함한 대부분의 유동장에서는 수화학적 포텐셜이 고정되어 있기 때문에 질량

전달량은 질량전달계수만의 함수로 가정할 수 있고, 이 량은 수력학적 인자만의 함수로 표현되어진다. 따라서 본 논문에서는 수화학적인 환경을 배제한 순수한 수력학적 환경에서 실제 피더관 형상내의 유동장을 실험 및 이론적으로 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 이론 연구

피더관내의 유동장 분석을 위해 CFX4.3 범용전산 코드를 이용하여 실험장치에서의 유동장을 해석하여, 실험에서 얻어진 실험결과와 비교분석하였다. CFX4.3 코드는 실험장치의 실제 유동장을 잘 모사하였으며, 이를 확장하여 월성 원자로의 피더관을 기하학적으로 일치시켜 피더관에서 발생하는 유동장을 해석하였다. 해석된 유동장은 발전소 데이터와 비교분석하였다.

유체유동을 분석하기 위해 300여개의 피더관을 52군으로 묶고 이를 다시 4군으로 분류하여 계산을 수행하였다. 특히 곡관부의 유동은 Dean 수에 의하여 유동의 형태가 지배됨을 계산으로 확인하였다. 이러한 유동장 계산 결과를 활용하여 수력학적인 관점에서 피더관내의 FAC 발생 지점 및 취약 부위를 본 절에서 제시하였다.

#### 2.1.1 지배 방정식

CFX 4.3 전산 코드는 연속 방정식과 Navier-Stokes 운동 방정식을 FVM(Finite Volume Method)를 이용하여 계산한다. 특히 이러한 벽면 가까이의 유동이 중요시될때는 DNS(Direct Numerical Method)나 LES(Large Eddy Simulation)을 이용하여야 하나 배관의 복잡성과 높은 Reynolds 수에 의해 이를 푸는 것은 매우 비싼 방법이다. 따라서 모델링을 이용하여 이를 해석하여야 하며 본 논문에서는 벽면에서의 난류를 정확하게 계산하기 위해 Low Reynolds  $k-\epsilon$  모델을 이용하여 난류를 모델링 하였다<sup>3)</sup>.

$k$ 식은 식 (2.1)과 같이 표현된다.

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

여기서  $B$ 는 체적력 항 이고  $J$ 는 좌표변환시 요구되는 Jacobian matrix,  $G$ 는 source 항이다.  $\epsilon$  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.

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

각 상수들은 식(2.4)의 구성방정식으로부터 정해진다.

$$C_\mu = 0.09, C_{\varepsilon_1} = 1.44, C_{\varepsilon_2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (2.4)$$

이들 두 방정식으로부터 계산된 k(eddy의 운동에너지)와  $\varepsilon$ (eddy의 특성길이)으로부터 Boussineq의 가정을 사용하여  $\mu_t$ 가 모델링된다.

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

모델링된  $\mu_t$  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<sup>4)</sup>.

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

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

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

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

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

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

여기서 K는 생성 상수,  $C_b$  는 유체에서의 철이온 농도,  $C_w$  는 부식피막에서에서의 철이온 농도이다. 더 고려해야 할 것은 철이온 전달률인데 이것은 파이프 벽면에서의 산소의 물질전달량에 의해 지배 된다.

### 2.1.2. 피더관 계산 결과

CFX 코드를 이용하여 실험장치 설계를 위한 기본 계산을 수행하였다. 그림 1과 같은

형상에 대해 표1의 계산 case에 관하여 계산을 수행하였다. 파이프내의 곡관 유동은 아래의 무차원수에 의해 그 특징이 지배된다.

$$K = Re\left(\frac{a}{R}\right)^{1/2} \quad (2.10)$$

K는 Dean 수로 알려진 곡관에서의 유동을 특성화하는 무차원수이다. Dean 수가 커지면 곡관의 외부에서의 경계층이 내측에서의 경계층보다 빨리 성장함을 의미한다. 따라서 Dean 수가 커짐에 따라 외측의 유속이 내측보다 빨라짐을 의미하고, Dean 수가 작아짐에 따라 내측의 유속이 외측의 유속보다 빨라짐을 의미한다. Dean 수에 따른 곡관에서의 유동장을 그림 2에서 3까지 나타내었다. Feeder관내의 유동의 경우 이 Dean 수가  $10^5$  이상이기 때문에 그림 2와 같은 유동 형상을 보일것이다.

CFX 코드를 이용하여 실험장치 설계를 위한 기본 계산을 수행하였다. 그림 1과 같은 형상에 대해 표 1의 계산 case에 관하여 계산을 수행하였다. CASE 1에 관한 계산 결과는 그림 4와 5에서 제시되어 있다. 그림 4는 유선에 관한 결과로서 계산된 유선들은 유선 상호간의 경계를 가로지르지 않는다. 이는 유동박리가 발생하지 않음을 의미한다. 그림 5로부터 case1에서는 유선과 압력장의 계산결과에 기인하여 swirl flow가 형성되지 않으며, 곡관 부위 역시 유동박리가 거의 일어나지 않음을 알 수 있다.

CASE 2에 관한 계산 결과는 그림 6부터 8에 나타나 있다. 유선에 관한 계산결과에서 보여지는 특징은 유선의 중첩이 나타나며 상호간의 경로를 가로지르는 유동이 나타난다. 또한 곡관부위에서 swirl flow가 보여지는데 이는 case1과 달리 twisted angle이 존재하기 때문에 나타난 현상이다. swirl flow와 유선의 중첩에 의한 유동 박리의 가능성은 국부적인 질량 전달계수의 증가를 가져올것으로 예상되며, 이러한 지점은 다른 지점보다 큰 FAC rate로 인해 배관 감육이 더 많이 발생할 것이다.

Case 3은 가장 복잡한 형상을 가지는 피더관으로서 본 연구의 관심의 대상이다. 해석에서 나타나듯이 복잡한 수력학적 현상이 case 3에서 나타난다. 그림 9는 case 3의 유선을 보여주고 있다. 유선의 겹침과 함께 꼬여있는 형태의 유선들을 볼 수 있다. 이러한 유선들은 swirl flow가 형성되는 것을 말해준다. 그림 10은 impact velocity가 최대인 점들을 보여준다. 이들 지점은 침식현상이 최대가 되는 곳으로 만약 침부식 있을시 이 지점이 최대 침식 지점이 된다. 그림 11은 난류 소산율이 최대인 점으로 난류 혼합율이 큰 지점이다. 이러한 물리적 현상을 토대로 이 지점들은 침식 뿐만이 아니라 질량 전달율도 최대가 될 수 있는 지점들이다. 즉 FAC가 최대가 되는 곳이다. 두 번째 곡관부위에서 난류 에너지가 최대인 점이 나타나며 그림 12에서 이를 보여준다. 난류 에너지가 최대인 지점은 곡관의 외부이며 이는 곡관 외부의 난류량이 가장 높기 때문에 국부적으로 마찰계수가 높은 영역들이 발생할 것이다.

## 2.2. 실험 연구

본 연구에서 3가지 실험이 피더관내의 유동장 분석과 FAC평가를 위해 수행되었다. 실제 피더관내 유동에 관한 유동은 전무하기 때문에 실제 피더관을 금형으로 제작하여 아크릴 사출방법을 이용하여 실제와 같은 기하학적 모형을 갖도록 제작하여 실험하였다. 수행된 3가지 실험은 아래와 같다.

가. 유선 가시화 실험

나. 한계 유선 실험(벽면 전단응력 가시화)

다. 피더관 차압 데이터 측정 실험(Chilton-Colburn 상사성 이용)

이들 세 실험으로부터 얻어진 결과들은 수합하여 해석결과 및 발전소 데이터 베이스와 비교 분석하여 피더배관내의 유동의 이해와 FAC가 최대로 일어나는 지점을 예측하기 위해 이용되었다.

### 2.2.1. 유선 가시화 실험

유선은 유동장 내의 모든 점에서 어떤 주어진 순간에 유동방향에 접선이 되도록 유동장에 그려진 선을 말한다. 유선들은 그 유동장 내의 모든 점에서의 속도 벡터에 접선이기 때문에 유선을 가로 지르는 유동은 없다<sup>5)</sup>.

피더관내의 유동장은 복잡한 형상에 의해 그 유동 형태를 단정짓기 어렵다. 따라서, 계산에 의한 결과만으로 실제 피더관내의 유동장이 무엇이라고 규정짓기 어렵다. 본 실험은 이러한 실제 발전소내의 피더관을 모사하여 실험과 계산 결과의 오차가 무엇인지 판별하여, 실제 발전소 조건으로 계산한 해석결과의 신뢰성을 확보하였다.

가. 실험 장치

이러한 일련의 실험을 위해 실험 장치는 그림 16 처럼 구성하였다. 시험 체적부로 유입되는 유동을 균일하게 해주기 위해 시험 체적부의 유입구에 honeycomb을 설치하였다. 설치된 honeycomb으로부터 20cm 하류쪽에 염료를 배출하는 장치를 장착하였다. 실험은 표 1과 같은 3가지의 기하학적 구조에 대하여 수행하였다. 유량 측정은 Burkert사의 터빈 유량계를 사용하였으며, 오차는  $\pm 0.1\%$  오차를 가진다.

나. 실험 방법 및 결과

실험은 다음의 가정하에 수행하였다.

- (1) 벽면에서 멀리 떨어진 시간 평균된 유동의 형태는 속도에 상관없이 일치한다.
- (2) 염료 분사 노즐이 유동장에 미치는 영향은 무시한다.
- (3) 유체로 분사된 염료의 비중은 무시한다.

실험에 사용된 피더관 형상은 계산에 사용된 기하학적 구조와 일치한다. 3가지 형상의 특징을 살펴보면, 2가지 형상은 twisted angle이 있고, 나머지 하나는 twisted angle(case1)이 없다. 이러한 angle의 유무는 평균유동장에 회전성분을 주어 swirl flow를 형성하게 한다. swirl이 발생하면, swirl이 없는 유동보다 벽면과 평균 유동장간의 혼합(mixing)이 활발하게 이루어져 벽면에서 평균 유동장으로의 질량 전달율을 증가 시킨다<sup>6)</sup>.

Swirl은 혼합율을 증가시키므로, 입자(particle) 또는 기포(bubble)에 의한 벽면의 침식 현상은 완화된다. 이때 혼합이 잘되는 유동의 경우는 균일하게 흩어져 관벽면을 가격하므로 잘 혼합되지 않아 국부적으로 높은 분포를 가지는 입자 유동에 비해 침식되는 양이 현저하게 줄어든다. 그러나 질량 전달을 관점에서는 똑같은 질량 전달 계수를 가질 때, 더 큰 농도구배를 가지게 되므로, 질량 전달량이 더 많아지게 된다. 따라서 똑같은 유동장에서 swirl이 있을 경우, 더 많은 양의 철이온이 평균 유동장 쪽으로 이동하므로 swirl이 없는 경우보다 배관감육이 더 많이 발생한다. 이러한 논리로서 우선 계산된 결과의 검증의 위해 평균 유동장을 유선가시화 방법을 사용하여 가시화 하여 계산결과와 비교하였다. 그림 17은 case 1에 관한 유선을 보여주는데 swirl flow가 나타나지 않으며 계산된 결과인 그림4와 유사한 유선을 보여준다., 그림 18과 19에서는 swirl flow가 나타남을 알 수 있다. Case 2 역시 swirl flow가 형성되었지만 case 3보다 약하게 발생하였다. case 1은 swirl flow가 나타나지 않았다. 이들로부터, swirl flow는 twisted angle이 있는 곡관 부에서 발생하였다. 또한 계산 결과가 실험결과를 잘 모사함을 유선 가시화 실험으로부터 증명하였다.

## 2.2.2. 한계 유선 실험(벽면 전단응력 분포 실험)

지금까지 벽면 전단응력을 측정하기 위한 많은 시도들이 있어 왔으나 여전히 정확한 값을 측정하지 못하고 있다. preston tube를 사용하는 방법이 벽면 전단응력 측정에서는 가장 정확한 방법론으로 알려져 있다. 그러나 이는 평면이나 곡률이 작은 경우에만 한정되어 사용되어진다. 간접적으로 측정하는 방법으로 차압을 측정하여 면적 평균된 벽면 전단응력을 도출하는 방법이 있다. 벽면 전단응력분포를 안다는 것은 벽 근처의 유동특성을 안다는 것을 의미한다. 식(2.11)에서 보여지는 것처럼 벽 근처의 유동을 특성화 하는 특성 속도가 벽면 전단응력에 의해 결정되어 지기 때문이다.

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.11)$$

본 연구에서 사용되는 것 같은 특수한 형상을 가지는 배관에 관하여는 PIV(Particle Image Visualization)등과 같은 광학기구나, preston 튜브와 같은 계측기기를 사용할 수 없으므로, 한계 유선 방법을 응용하여 본 연구에 적용하여 실험 하였다.

#### 가. 실험 이론 및 방법

한계 유선(limited streamline)이란 벽면에 채색된 도료가 유동에 의해 어떤 선을 그리게 되는데 이를 한계 유선이라 한다. 일반적으로 사용되고 있는 한계 유선 방법은 정성적인 벽면 정보만 제공하나 E.A.Ttraghji<sup>7)</sup>가 제시한 방법은 정량적인 정보도 동시에 알수 있는 방법이다. 그림 20과 같은 제어체적에서 운동 방정식을 세우면 식 (2.12)을 얻는다.

$$F = \tau_w \cdot A(= \pi a^2) = \frac{d(mu)}{dt} \quad (2.12)$$

이 식을 streak의 길이 s 에 관한 식으로 표현하면,

$$\tau_w \pi a^2 = (2\pi \rho a^3/3)u \cdot \frac{du}{ds} + u^2 \cdot \frac{d(2\pi \rho a^3/3)}{ds} \quad (2.13)$$

식 (2.13)을 얻으며 중력은 무시하였다. 위 미분 방정식을 풀면 아래와 같은 미분 방정식의 해를 구할 수 있다.

$$\tau_w = \frac{4R\rho s}{3t^2} \quad (2.14)$$

여기서 R은 초기 oil 액의 반지름,  $\rho$ 는 oil dot의 밀도, s는 streak의 길이 그리고 t는 실험 시간이다. 식(2.14)는 벽면 전단응력은 길이 s에 비례하며 가장 큰 전단응력이 나타나는 부위는 가장 긴 s를 가지는 지점임을 말해준다.

사용된 oil은 에나멜 칼라, thinner, 글리세린을 조합하여 만들었다. 이 값은 실험에 사용할 조건에 따라 달라지므로 유의하여 사용하여야 한다. 이러한 최적 조합비로부터 얻어진 oil을 이용하여 시험체적부 내부에 본 실험실에서 제작한 brush를 이용하여 내부에 점을 찍고 유동장을 발생시켜 정상화(steady state)에 도달했을 때 내부의 streak 길이를 측정하고 streak의 방향을 관측하였다.

#### 나. 실험 결과

그림 21에서 23에서 이들 각 case에 대한 결과를 보여준다. 이들 각 결과에서 주목할 만한 것은 case 2와 3에서는 벽면 전단응력이 -가 되는 곳이 발생하는데 이는 유동이 adverse pressure를 겪고 있음을 의미하며 벽면에서 경계층이 분리되어 역방향 유동이 형성되었음을 보여주는 것이다. 이러한 유동 박리점 부근의 반대쪽 유동은 연속방정식 조



건에 의해 다른 지점보다 빠른 속도로 흐르게 되고, 이 지점은 다른 지점보다 높은 마찰 계수를 가진다. 따라서 반대 부위의 streak는 다른지점보다 길게 나타났으며 또한 이러한 부위에서 계산된것처럼 높은 난류량을 가지게 된다. 그러나 박리가 되는 부위는 마찰계수가 0이 되므로 이러한 박리점과 그 반대지점간의 속도구배가 매우 크게 왜곡되어 다른지점보다 농도구배가 급작스럽게 증가할것이고 이는 다른 지점 보다 더 큰 질량전달이 발생될것으로 예상된다.

### 2.2.3. 피더관 차압데이터 측정 실험(상사성 이용)

피더관과 같은 복잡한 형상에서의 국부적인 전단응력의 측정은 매우 어렵다. 따라서 면적 평균된 차압을 측정하여 이를 힘 균형 방정식으로부터 벽면 전단응력으로 환산하였다. 측정된 차압은 Chilton-Colburn 상사성(이하 C-C 상사성)을 이용하여 물질전달계수를 표현 하기 위해 속도의 차수로 표현하였다. 또한 이 값은 실제 발전소에서 얻어진 fitting 식과 비교하여 실제 피더관에서의 차압이 어떻게 FAC에 영향을 주는지를 간접적으로 평가하였다.

#### 가. 실험 이론 및 실험 방법

벽면에서의 전단응력과 차압의 관계는 그림 24의 제어체적에 관하여 유도하면 식 (2.15) 처럼 표현되고

$$-\tau_w \cdot \pi \cdot L \cdot D = -(P + \Delta P) \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} + P \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (2.15)$$

이 식을 정리하면 아래와 같다.

$$\tau_w = \Delta P \cdot \frac{D}{4L} \quad (2.16)$$

어떤 길이 L의 양단에 발생하는 압력강하는 그 길이 구간까지 표면적을 평균한 벽면 전단응력과 같게 된다. 이렇게 측정된 차압 관계식은 유속과 벽면 전단응력간의 무차원수인 skin friction factor  $C_f$  로 표현되어진다.  $C_f$ 는 벽에서 평균유동장으로서의 질량 전달율과 상사(analogy)관계가 성립하기 때문에 이 값이 높은 곳이 질량전달율이 높을 것으로 유추 할 수 있다<sup>8)</sup>.

#### 나. 실험 결과

측정된 차압은 속도가 2m/s 이하인 저유속 조건에서 실험하였다. 그림 25에서 처럼 첫

번째와 두 번째 곡관부의 속도 차수가 거의 비슷하게 실험에서 나타나는것과는 달리 발전소 데이터에서는 두 번째 곡관부의 차수가 매우 낮게 나타남을 알 수 있다. 이러한 불일치는 발전소 데이터 베이스의 피팅식이 실제 실험보다 낮은 속도 차수를 사용하기 때문에 고유량으로 갈수록 속도에 대해서는 실제보다 낮게 평가할 것으로 예상된다. 특히 이러한 속도 차수의 불일치는 실제 발전소의 피팅에서 2<sup>차</sup>- 2번째 곡관부가 첫 번째 곡관부보다 높게 평가되는 원인일 수 있다.

### 3. 결 론

FAC에 관한 현상을 분석하기 위하여 수력학적인 관점에서 이를 수행하였다. 각 피더관의 형상에 따라 유동장이 민감하게 변화하였으며 실험과 계산 공히 같은 결과를 보였다. 일련의 계산 및 실험 결과들을 종합해보았을 때 유동장만으로는 FAC에 의한 배관감육 취약지점을 정확히 알기는 어려우나 그 근방을 예상할 수 있을것으로 보였다. 이러한 관점에서 피더관내에서 FAC rate가 가장 큰 지점을 예측하기 위한 기준을 아래와 같이 제시하였다.

- 1) 소산율이 최대인점, 이 지점은 침식이 최대인점과 일치한다.
- 2) 상대적 압력강하가 최대인 점, 난류 운동에너지가 최대인점과 일치하여 나타난다.

### 참고 문헌

1. Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants, EPRI TR-106611, June 1998.
2. Bryan Poulson, wear, "Complexities in predicting erosion corrosion", 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. 노오현, 점성유체역학, 1998
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.
7. E.Atraghji,"More than meets the eyes: The oil dot technique",Flow Visualization II, 1980.
8. Dewitt and Incropera,Fundamental of Heat and Mass transfer, John Wiley, 1999

CASE	$\phi$	$\Omega$	$\theta$	D
Case 1	32.71°	32.71°	0°	2.0"
Case 2	42.83°	30.15°	32°	2.0"
Case 3	70.00°	73.13°	32°	2.0"

표 1 계산 형상에 관한 자료표

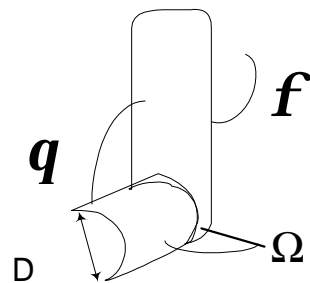


그림 1. 계산을 위한 피더관 형상

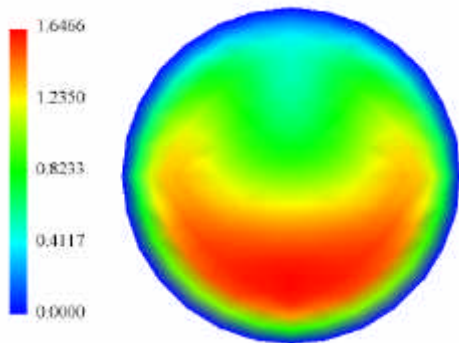


그림 2.  $K > 606$  의 속도분포

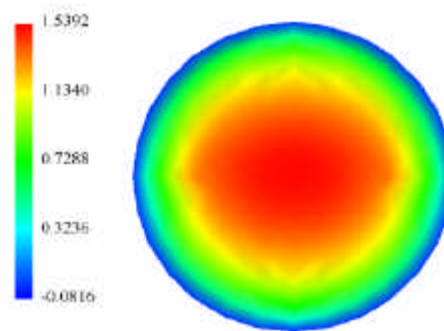


그림 3.  $96 < K < 606$ 에서의 속도분포



그림 4. case1에 관한 유선

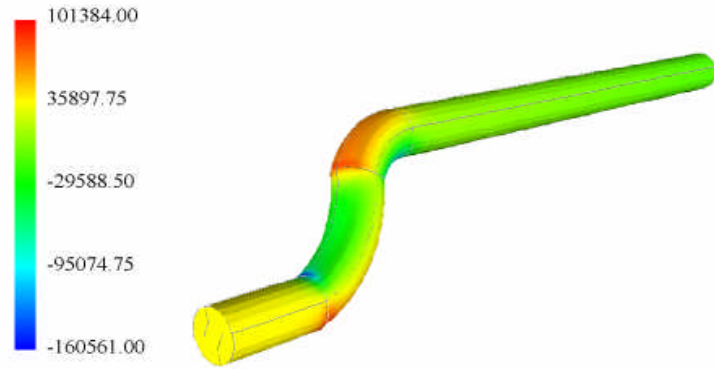


그림 5. case 1에 관한 압력 분포

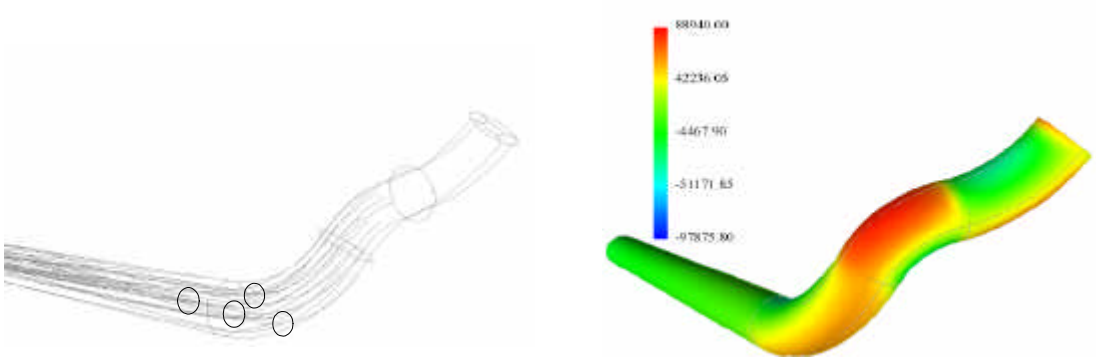


그림 6. case2에 관한 유선

그림 7. case 2의 압력분포

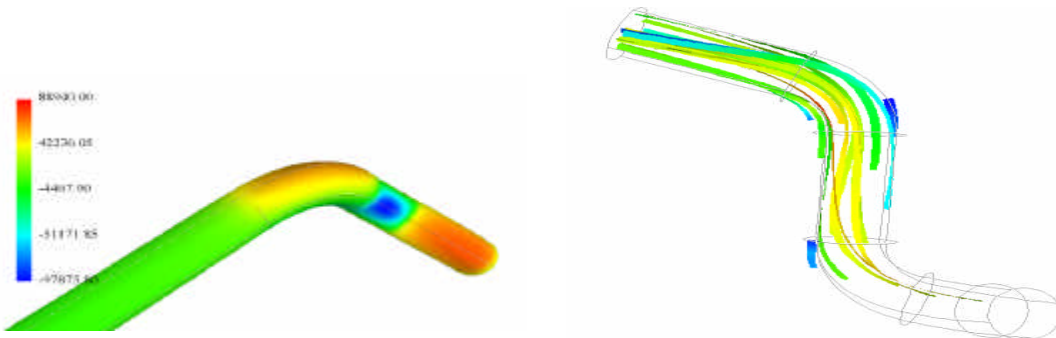


그림 8. case2에 관한 압력장

그림 9. case 3의 유선

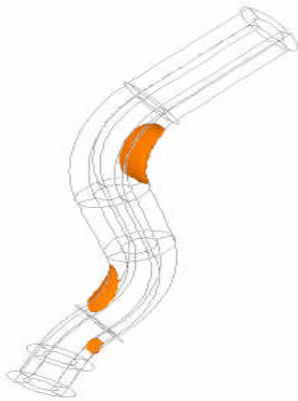


그림 10. case 3의 impact velocity가 최대인점

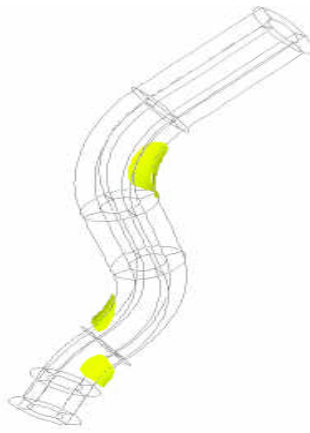


그림 11. case 3에서 소산율이 최대인점

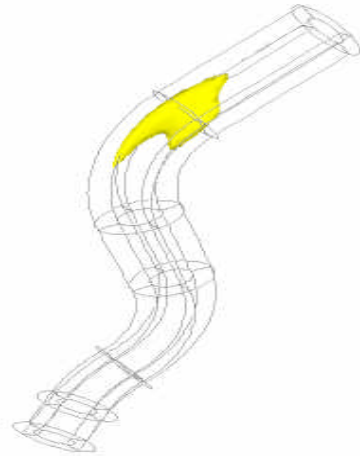


그림 12. case 3에서 난류에너지가 최대인점

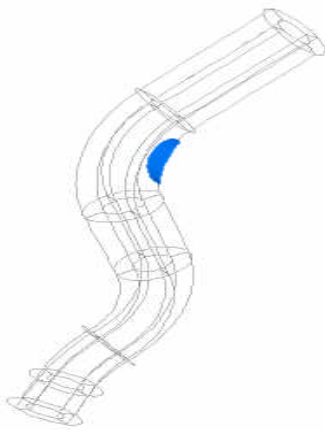


그림 13. case 3에서 압력이 가장 낮은 지점



그림 14. case 3에 관한 압력분포

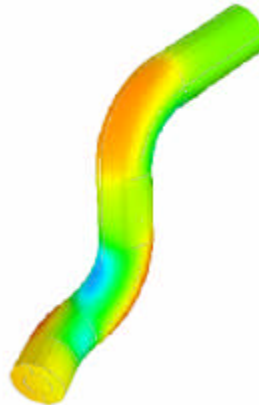


그림 15. case 3에 관한 압력 분포

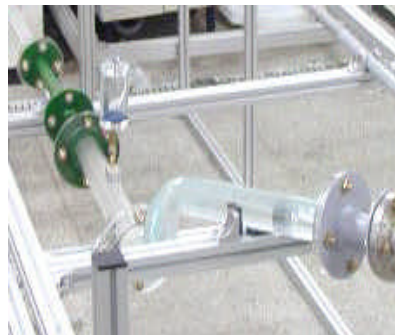
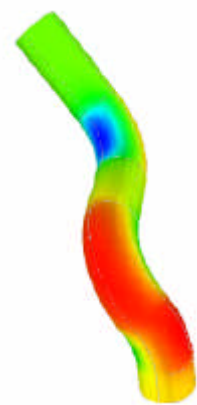


그림 16. 실험장치 전체 사진과 시험체적부 사진.



그림 17. CASE 1에 관한 유선



그림 18. CASE 2에 관한 유선



그림 19. CASE 3에 관한 유선 II.

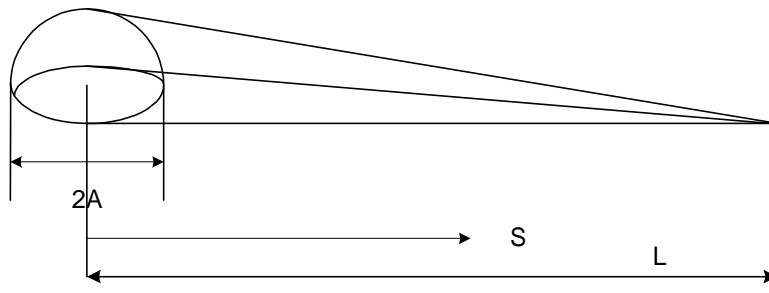


그림 20. Oil Dot method의 제어체적

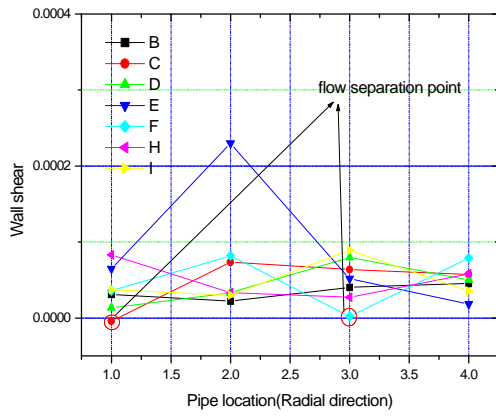


그림 21. case 3에 관한 벽면 전단응력 결과

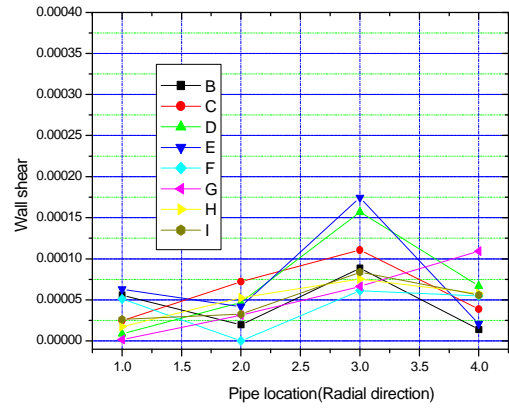


그림 22. case 2에 관한 벽면 전단응력 결과

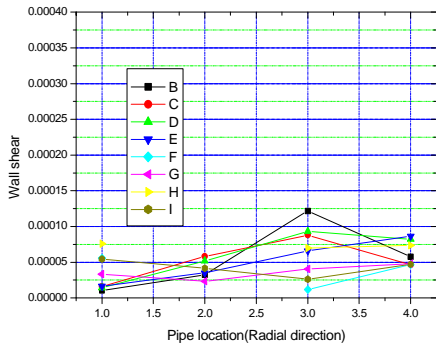


그림 23. CASE 3에 관한 벽면 전단응력 결과

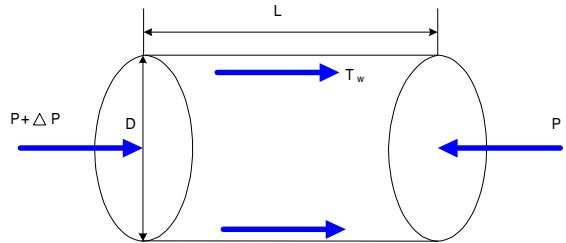


그림 24. 벽면 전단응력과 차압간의 제어체적

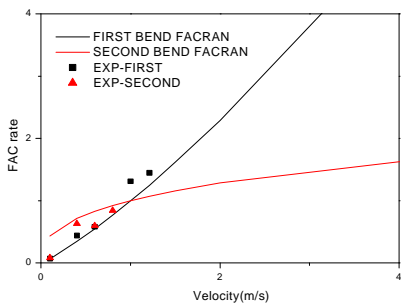


그림 25. 발전소 데이터와 실험의 결과비교