

# 배관계 오리피스 하류에서 유동가속부식으로 인한 국소 유동 파라미터에 대한 조사

## Investigation of Local Flow Parameters Caused by Flow Acceleration Corrosion Downstream of an Orifice in a Piping System

김경훈(Kyung-Hoon Kim)<sup>1†</sup>, 조연수(Yun-Su Cho)<sup>2</sup>, 김형준(Hyung-Joon Kim)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 공과대학 기계공학과, <sup>2</sup>경희대학교 대학원 기계공학과, <sup>3</sup>서울대학교 기계항공공학부

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Yongin 446-701, Republic of Korea

<sup>2</sup>Graduate School of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Yongin 446-701, Republic of Korea

<sup>3</sup>School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Republic of Korea

(Received January 23, 2013; revision received April 16, 2013)

**Abstract** In this study, the performance of an impeller according to blade length and pitch angle was studied experimentally by building a variable pitch impeller while changing blade length to review the effect of blade length and pitch angle on a fan's performance. The pitch angle was changed in six steps from 20°~45° at intervals of 5° while the blade lengths were changed to 90 mm, 100 mm, 110 mm and 120 mm with an identical airfoil shape while carrying out the experiment. The results are summarized as follows : The air flow per static pressure of axial fans increased linearly with increase of pitch angle, but the high static pressure showed a decrease at a pitch angle of 35°. The shaft power increased proportionally to the pitch angle at all blade lengths; the larger the pitch angle, the larger the measured increase of shaft power. This is because the drag at the fan's front increases with the pitch angle. In the axial fans considered in this research, the flow and incre.

**Key words** Flow accelerated corrosion(유동가속부식), Local wall thinning(국소감육), FAC wear rate(유동가속부식 마모율), Alkali metallic salt(알칼리 금속염), Orifice(오리피스)

† Corresponding author, E-mail: kimkh@khu.ac.kr

### 1. 서 론

유동가속부식(FAC)은 일반 플랜트에서나 경년열화된 발전소, 특히 원자력 발전소 등의 탄소강으로 제작된 기기들에 직면하고 있는 심각한 안전과 신뢰성 문제이다. 배관벽면의 감육과 약화를 초래하는 이런 현상은 만약에 그 효과가 과소평가되거나 예정된 유지보수 기간 동안에 발견되지 않는다면 배관구성요소의 파괴를 앞당길 수 있다. FAC는 유동하는 물 또는 증기로 인한 피해나 부식의 산화피막 형성으로 야기된다. FAC 과정은 두 가지 메커니즘에 의해 설명될 수 있다. 첫 번째 메커니즘은 산화/수질 인터페이스에서 용해 철 생산( $Fe^{2+}$ )으로 인해서이다. 두 번째 메커니즘은 확산 경계층을 거치는 부식물의 대량 흐름에 대한 부식물의 이동이다. FAC가 배관 구성 요소의 파이프 벽 두께를 감소시키는 일반적인 특성이 있지만, 그것은 난류가 발

생하는 한정된 지역에서만 발생한다. FAC에 의한 금속 벽 마모율은 물질 성분, 물 화학, 수리학 등의 여러 매개 변수의 복잡한 상호 작용에 따라 달라진다. 따라서 실제 적용에서의 FAC의 조절은 유동에서의 화학적 변화 영역 또는 높은 국소 물질 전달 영역의 확인을 필요로 하며, 관심은 후자에 있다.

오리피스는 발전소의 배관계에서 유량을 측정하고 제한하는데 빈번히 사용된다. FAC로 인한 오리피스 하류에서의 파이프 파열은 몇몇의 원자력 발전소와 화력 발전소에서 보고되어 왔다. 예를 들면, 2004년 미하마 원자력 발전소의 오리피스 하류에서의 FAC로 기인한 온수 라인 폭발로 인해 인사 인명 사고가 있었다.<sup>(1)</sup> 이와 유사한 심각한 배관계 폭발은 고작 10년 가동된 Kakrapar 원자력 발전소 2호기의 급수 오리피스 하류에서 일어났다.<sup>(2)</sup> 오리피스 하류에서의 유동역학은 하류에서 와류들의 성장을 초래하는 오리피스의 날카로운

모서리 부분에서 유동박리와 함께 복잡해진다. 이것은 높은 수치의 표면 마찰 값과 벽 물질 전달을 향상시킬 수 있는 벽면에 근접한 난류생성치의 초래로 설명된다. 또한, 유동 재부착 영역 내에서의 유동 충돌은 파이프 벽을 따라 높은 정압의 수치를 초래한다.

오리피스 하류에서의 FAC에 관한 연구들이 있었다. 난류 수치, 벽 전단 응력, 압력 등과 같은 몇몇 요소들은 물질 전달의 증가에 대한 결정적인 원인으로 간주되어 왔다. 그러나 오리피스 하류에서의 FAC에 대한 결정적인 원인이 되는 유동 메커니즘은 아직도 정확하게 밝혀지지 않았다. 오리피스 하류에서의 벽 마모 분포가 물질 전달율과 난류 수치에 많은 관련이 있으며, 표면 전단 응력이 FAC에 대해서는 주된 원인이 되지 않는다고 제시하기도 했다.<sup>(3)</sup> 그러나 Chang<sup>(4)</sup>과 Nagaya et al.<sup>(5)</sup>은 발전소 검수와 실험을 바탕으로, 벽에서의 물질 전달이 벽에서의 전단 응력과 긴밀한 상관이 있다는 결론을 내린바 있다. 한편, Okada et al.<sup>(6)</sup>과 Kimitoshi and Ryo<sup>(7)</sup>은 수치해석과 실험적 연구를 바탕으로 볼 때, FAC 마모율은 난류 유동 수치와 긴밀한 관계가 있다는 것을 발견했다. 최근, Hwang et al.<sup>(8)</sup>은 수치해석을 통해 서로 다른 난류 유동 매개변수를 전형적인 원자력 발전소 급수가열기 내의 오리피스 하류에서의 탄소강 파이프의 국소 동체 감육과 비교하였고, 국소적인 마모율은 유동 재부착 영역 내의 수직 유동 속도 성분과 상관관계가 있다고 판단했다.

여러 경험적인 상관관계들이 직관<sup>(9)</sup>과 오리피스 하류<sup>(10)</sup>에서의 벽 물질 전달을 예상하기 위해 개발되었다. Tagg et al.<sup>(11)</sup>과 Rizk et al.<sup>(12)</sup>이 오리피스 하류에서의 최대 셔우드 수(Sherwood No.)에 대한 상관관계를 개발한 반면, Coney는 오리피스 하류에서의 셔우드 수의 분포에 대한 상관관계를 개발하였다.<sup>(10)</sup> Rizk의 상관관계로부터 유도된 최대값은<sup>(12)</sup> Tagg가 유도한 값<sup>(11)</sup>보다 3.2배 더 높은 결과를 얻었다. 따라서 벽 물질 전달률 예측에 다양한 견해 차이가 있고, FAC에 대한 원인 규명의 영향은 아직도 명확히 설명되지 않고 있다.

본 연구의 목적은 단상 유동 조건에서 오리피스 하류에서의 유동 수력학과 벽 물질 전달 분포에 대해서 오리피스 대비 파이프 직경비( $d_0/d$ )와 레이놀즈수의 영향을 조사한 것이다. 오리피스 하류배관에서 실험치인 압력분포값들을 통하여 유동박리 및 유동재부착 영역에서의 정압치가 높아지는 것을 확인하였으며, 이러한 현상을 확인하기 위하여 수용성 알칼리 급속염으로 제작된 오리피스 하류배관에서 FAC 마모율에 해당하는 배관동체 감육 유로가시화와 감육 두께의 측정을 수행하였다. 한편, 수치해석은  $d_0/d = 0.5, 0.6$  및  $0.7$  그리고 50,000에 이르는 레이놀즈 수에 대해서 RNG k-ε model을 사용하여 수행하였다. 그 결과를 실험적 결과와 기존 문헌의 물질 전달 상관관계인 FAC 마모율 및

난류특성인 난류운동에너지와 반경방향 속도성분으로 비교 검토하였다.

## 2. 배관 유동 실험 및 수치해석

본 연구에서는 실제 배관개소 내부에서의 FAC 마모율에 해당하는 배관동체의 직접적 구조 감육을 분석하기 위하여 국소 감육에 연관된 편향 난류가 탄소강 배관 내에서 어떠한 유동형태를 갖는지를 검토하였다. 본 연구를 수행하기 위하여 5개의 컴포넌트(4종류의 티, 오리피스, 90° 엘보, 180° 곡관 및 직관 등)를 대상으로 상사 실험설비를 Fig. 1과 같이 제작하였다. 그 중 유량을 제한하는데 가장 효율적으로 많이 사용되는 오리피스의 후단 배관에 대하여 부식과 관련된 난류 유동에 의한 물질전달과 국소 감육에 연관성 있는 실험적 접근을 검증하기 위한 압력 측정 실험과 감육 유로가시화 실험을 실시하였다. 그 후 압력측정 실험 결과를 수치해석 결과와 비교하여 수치해석의 타당성을 검증하였고, 수치해석 결과로 계산된 여러 난류 매개변수를 실험데이터로 계산한 감육 두께와 비교하여 연관성을 확인하였다. 수치해석과 감육 두께와의 비교는 여러 모델에 대해서도 수행하였으나, 본 논문에서는 오리피스 후단 배관의 모델에 대해서만 거론한다.

실제 발전소 배관라인은 대용량, 고온, 고압 조건이기 때문에 실제 조건을 모사하기에 제약조건이 따른다. 따라서 오리피스 모델의 경우, 10 : 1의 축척으로 모형을 축소하여 기하학적 상사를 만족시켰으며, 원형에서와 같은 방향의 유동과 모형의 축척을 모든 방향에 적용함으로써 운동학적 상사도 성립한다고 가정할 수 있었고, 마지막으로 동역학적 상사를 위하여 적용한 Re 수는 원형에서의 Re 수가 상당히 크기 때문에 근사 상사원칙을 적용하였으며, Re 수가  $5.0 \times 10^5$ 이 되도록 유속을 조절하였다.

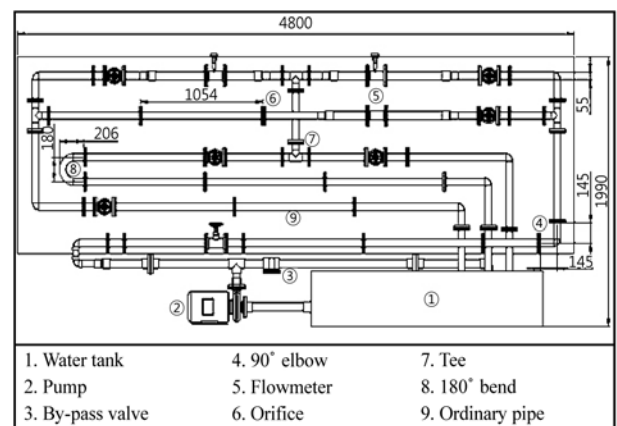


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus.

## 2.1 실험장치 구성 및 실험

실험장치는 본 연구의 관심대상이 되는 배관계소의 유동을 가시화하고, 배관에서의 마찰계수와 부식효과 등을 최소화할 수 있도록 배관설비를 내경 40 mm의 아크릴 파이프로 제작하였다.

실험은 상온 20℃, 1기압에서 수행하였고, 배관계소에 들어가는 유체의 유속(inlet velocity)을 1.50 m/s로 설정한 후, 오리피스의 직경비  $\beta = 0.5, 0.6, 0.7$  ( $\beta =$  직경비 : 오리피스 치수/배관 내경)인 판형 오리피스가 설치된 배관하류에 대하여 실험을 실시하였다.

오리피스 후단 탄소강 배관내의 국소적인 유동을 예측하기 위하여 배관요소 전단의 전압과 오리피스 후단 배관의 위치별 정압을 디지털 압력계를 이용하여 측정하였다. Fig. 2(a)는 정압 측정을 위하여 오리피스 후단 배관하류에서 16개의 압력 측정구를 설치한 뒤, 배관계에 체결한 모습이며 측정구의 위치는 수치해석 데이터 추출 및 감육량 측정 위치와 동일하다.

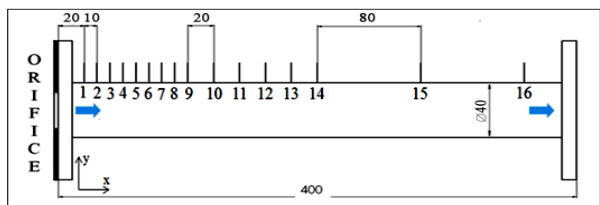
한편, 오리피스 후단 배관하류에서의 감육에 대한 배관내의 유체유동의 형태를 유로가시화 하기 위하여, 오리피스 후단 배관 내부를 수용성 알칼리 금속염으로 제작하고, 전체 실험장치의 배관과 연결하여 실험을 수행하였다.

## 2.2 수치해석

전산 유체 역학(CFD) 분석은 여러 관련 응용 프로그램을 이용해서 높은 정확도로 난류 유체의 흐름을 예측하는데 사용되며, 실험결과와의 타당성을 검증하기 위하여 수치해석을 실시한다.



(a) photograph of pressure measurement



(b) measuring position of pressure

Fig. 2 Measuring position of pressure down-stream of an orifice.

최근 발전소 배관 시스템의 FAC로 인한 심각한 위치를 예측하기 위해 부식/침식 모델, 3차원 단상 및 2상 유동 모델을 사용하는 접근방법을 고안했다.<sup>(13)</sup> 그들의 예측은 실제 발전소의 측정과 상당 부분 일치했다. 또한, CFD 해석에서 부차적 유동, 즉 부차적인 와류와 유동박리는 오리피스 배관내 유동의 하류에서 FAC를 포함해서 모델링되고 이해되어야 할 필요가 있는 두 개의 강력한 파라미터로 간주되고 있다.

오리피스의 배관 하류는 매우 심각한 FAC가 발생하는 장소 중 하나인 것으로 간주된다. 따라서 본 연구의 주요 목적은 가장 큰 FAC 마모율을 가지는 위치를 식별하기 위하여 오리피스의 하류에서의 FAC를 특성화하는 것이다. 즉, FAC 마모율에서의 국소 유동과 물질 전달 매개변수의 효과에 대해 논하고자 한다.

본 연구는 상용 프로그램인 Fluent를 사용하였으며, 격자수는 4단계로 증가시킨 후, 각각의 압력 측정 실험 결과를 비교한 격자 민감도 분석을 통해 약 44만 개의 격자를 사용하였다. Patch Conforming 알고리즘을 사용하여 사각격자인 Tetrahedrons을 생성하였고, 정확한 경계층 해석을 위해 벽 주변에 Inflation 격자를 추가하였다. 본 논문에서 대상이 되는 오리피스 후단 형상 배관계소는 기하학적 형상으로 인해 오리피스에서 유동이 분리된 후 다시 결합하는 특성을 보이는 것으로 추정되기 때문에 이를 가장 잘 예측하는 것으로 알려진 RNG(Re-Normalized Group) k-ε model을 적용하고, 3차원 정상상태의 조건으로 실시하였다.<sup>(4, 5)</sup>

수치해석에 적용된 작동 유체는  $1.013 \times 10^5$  Pa의 물로 설정하였으며, 입력 경계조건으로 사용되는 유속은 실험과 동일한 조건을 적용하였다. 해석에 적용된 기하학적 사양 및 경계조건과 작동 유체의 물성치는 Table 1과 같다. 또한, 동체 모델 벽면의 직접적인 압력 측정은 수직 방향의 압력만 측정되는 것이 아니기 때문에, 동체의 중심으로부터 98% 지점에서의 수치해석 데이터를 추출하였다. Fig. 2(b)는 오리피스 후단 하류 위치인 P1~P16까지의 압력측정 실험의 정압 확인 지점 및 수치해석과 감육 두께의 측정 위치를 나타낸 것이다.

Table 1 Boundary conditions

| Items                                | Units             | Values            |
|--------------------------------------|-------------------|-------------------|
| Operating fluid                      | -                 | water             |
| Density                              | kg/m <sup>3</sup> | 1,000             |
| Viscosity                            | kg/m · s          | 0.001139          |
| Temperature                          | ℃                 | 20                |
| Orifice size/<br>Pipe inner diameter | $\beta$           | 0.5<br>0.6<br>0.7 |
| Inlet velocity                       | m/s               | 1.5               |

### 2.3 압력측정 실험과 수치해석 결과 검토

배관요소 내부의 유동분포가 국소적인 정압 차이에 따라 결정되기 때문에 실험에서의 정압 차이가 수치해석 결과와 유사한 경향을 보이면 유동분포는 동일하게 형성되는 것으로 간주해도 무방할 것으로 판단된다. Fig. 3에 실험과 수치해석의 압력 데이터들을 비교하였다. 실험값과 수치해석에서 얻어진 값을 비교해 볼 때, 두 데이터 모두 P1에서 P6까지 압력이 급격하게 증가하고, 이후 완만한 압력 변화를 보인다. 또 실험에서는 수치해석 값과는 다르게 P9부터 압력이 조금씩 낮아지는데, 이는 배관내 마찰과 같은 압력 손실에서 비롯된 결과로 판단된다.

압력 변화의 추이를 살펴보면, 압력이 낮고 기울기의 변화가 큰 P1~P6까지는 유체 유동의 국소 속도의 변화가 많고 크기는 작을 것으로 판단되며, 압력이 높고 기울기의 변화가 작은 P8 이후부터는 유체 유동의 국소 속도의 변화가 작고 크기는 클 것으로 판단된다. 또 압력의 크기 변화량은 조건별로 차이가 있지만, 유동이 안정화되는 후단부로 갈수록 직경비 β와는 무관하게 크기가 일정해지는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 감속 유로가시화 실험

실제 산업 플랜트와 같은 현장에서는 배관계가 단열재로 감싸진 탄소강으로 제작되어 각 배관계소 내부에서 형성되는 유동 특성을 눈으로 확인할 수가 없다. 이에 따라 본 연구에서는 배관계소의 형상에 따라 유동이 어떻게 형성되어, 배관 내부의 마모에 해당하는 배관 동체 감속의 원인이 되는 유동가속부식 현상이 일어나는지를 파악하고자 오리피스 후단 배관 하류에서의 유동가속부식으로 인한 동체 감속 유로가시화 실험을 수행하였다.

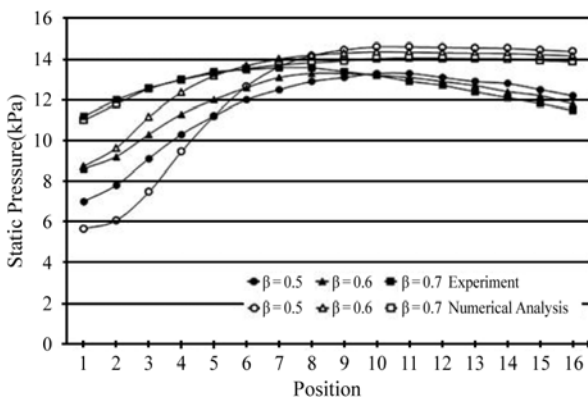


Fig. 3 Comparison of static pressures between experiment and numerical analysis.

한편, 탄소강 배관의 감속은 마그네타이트의 용해와 물질전달에 의해 발생하며, 마그네타이트는, pH 9인 225°C의 물에서 약 8.2 μgFe/kgH<sub>2</sub>O의 용해도를 가진다.<sup>(14)</sup> 미소한 양의 용해도를 가지는 마그네타이트의 감속 현상과 같이 오리피스 후단 탄소강 배관 하류에서의 동체 감속을 가시화하기 위하여 빠른 시간에 용해와 물질전달이 발생하는 재료인 수용성 알칼리 금속염을 실험재료로 선정하였다.

이에 따라 본 연구에서는 오리피스 후단 탄소강 배관 내의 유동형태를 검토하고자 주물법(mold casting)을 적용한 알칼리 금속염을 사용하여 내경 40 mm, 길이 400 mm로 실험장치의 배관계소와 동일하게 제작한 오리피스 후단 배관을 오리피스와 함께 전체 배관계에 체결한 후, 감속 유로가시화 실험을 실시하였다.

### 3.1 FAC 마모율과 물질 전달

탄소강 파이프 내 FAC 진행 과정은 네 가지의 과정으로 설명할 수 있다. 첫 번째 과정은 산소가 없는 금속과 산화물의 경계면에서 발생하는 금속 산화 반응의 과정이다. 두 번째 과정은 주가 되는 물 유동에 다공성 산화물층이 통과하여 철 종(Species)의 용해도를 포함한다. 이 산화물층을 통과하는 유동의 전송은 농도 확산에 의해서 제어된다. 세 번째 과정은 산화와 물의 경계면에서의 마그네타이트의 용해이다. 마지막으로, 네 번째 단계에서의 확산 과정은 확산 경계층을 통과하는 대량으로 흐르는 물속으로 철 이온이 전달되는 곳에서 이루어진다. 이 과정에서 종들은 금속과 산화물 경계면에서 이동하고 흐르는 물속으로 빠르게 확산되는 산화물과 물의 경계면에서 녹아내린다. 이 경우, 대량의 물 안에 포함된 철 이온의 농도는 산화물과 물의 경계면에서의 농도에 비하여 매우 낮다.

이것은 FAC 메커니즘으로서 물속의 철 이온이 대류 물질 전달을 포함하는 것으로 파악될 수 있다. 즉, 단상 유동에 대한 대류 물질 전달은 유속, 국소적인 난류, 기하학적, 그리고 표면 거칠기 등의 벽 경계면 근처의 수력학적 매개변수에 따라 결정되는 것으로 알려져 있다. 또한, 이송된 종이 물의 물리적 특성들은 특히 배관계의 온도 변화가 무시될 때의 단열 유동일 때 국소 전달률에 영향을 미치지 않는다는 것이다. 배관 구성요소의 제한된 길이에 걸쳐 FAC 마모율은 철 이온의 질량 유량의 직접 함수로 간주되고, 흐르는 물에 대한 물질전달계수(MTC; mass transfer coefficient)로 계산할 수 있다. 그런 다음, FAC 마모율(WR; wear rate)이 MTC와 산화물과 물의 경계면에서의 철 이온 농도(C<sub>w</sub>)와 대량의 물속에서의 철의 농도(C<sub>b</sub>) 사이의 차이 값으로 아래와 같이 계산된다.

$$FAC\ WR = MTC(C_w - C_b) \quad (1)$$

관련 연구들에서는 MTC가 FAC에 영향을 주는 중요한 하나의 매개변수이고, 실험 데이터는 종종 셔우드, 레이놀즈, 슈미츠 수(Schmidt No.)들의 항목들로 아래와 같이 보여주고 있다.<sup>(15-17)</sup>

$$Sh = aRe^b Sc^c \quad (2)$$

여기서  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 주어진 유동 조건에서 발생하는 물질 전달에 관계되고 오직 실험적으로만 구할 수 있다. 한편, Tagg 등은 경험적으로 오리피스 배관의 하류에서 발생하는 마모율 항상 분포를 설명한 바가 있다. 이들은 다음과 같이 오리피스 배관의 하류 베나콘트랙터 영역에서의 유동을 레이놀즈 수를 사용하여 최대 셔우드 수로 표현했다.<sup>(11)</sup>

$$Sh_{max} = 0.27 Re_o^{0.67} Sc^{0.33} \quad (3)$$

국소적인 수력학적 매개변수의 함수로써 MTC의 무차원화된 표현에서 셔우드 수는 다음과 같다.

$$Sh = \frac{MTC\ d_H}{D} \quad (4)$$

여기서  $d_H$ 는 수력직경이고,  $D$ 는 물속에서의 철의 확산계수이다.

이들의 관계를 정리해 보면, FAC 마모율이 MTC와 이루게 되는 함수식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} FAC\ WR &= MTC(C_w - C_b) \\ &= MTC \frac{d_H}{D} = f(Sh) \end{aligned} \quad (5)$$

한편, 물질 전달과 FAC 마모율 사이의 관계가 성립하면, 오리피스 하류에서의 MTC에 대한 계산 모델이 만들어질 수 있다. 오리피스 배관 하류에서의 MTC 분포를 결정하기 위해 완전 발달한 난류 내부 유동으로 가정한다. 본 연구에서의 실험 조건이 오리피스 배관 하류에서의 수용성 알칼리 금속염( $CH_3(CH_2)_{16}COO-Na$ )으로 제작된 직관 부분에 대해서 수행되기 때문이다. 솔루션은 Renormalization 그룹의 FLUENT CFD 코드: K- $\epsilon$  differential viscosity model에 의해 얻어졌다. 국소 MTC의 계산 역시 아래와 같이 유사하게 얻어진다.<sup>(18)</sup>

$$FAC\ WR = MTC(C_w - C_b) = -D_{SL} \frac{\partial c}{\partial n} \Big|_w \quad (6)$$

여기에서  $C_w$ 는 배관 벽을 따르는 철 이온 종의 농도이고,  $C_b$ 는 확산 경계층을 넘는 대량 유동에서의 철 이온 종의 농도값,  $n$ 은 벽 표면에 대해 법선방향인 반경방향 벡터이며,  $D_{SL}$ 은 Wilkie의 반 경험적인 관계를 사용하여 계산한 고체 종의 확산계수이다.<sup>(19)</sup>

따라서 본 연구에서는 배관내의 내부유동에서 반경방향 속도분포가 국소 MTC에 영향을 미치고 있으며, 이것은 FAC 마모율에 직접 관계되는 함수로 표현할 수 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} FAC\ WR &= MTC(C_w - C_b) \\ &= -D_{SL} \frac{\partial c}{\partial n} \Big|_w = f(Vr, TKE) \end{aligned} \quad (7)$$

### 3.2 감육량 측정

수용성 알칼리 금속염으로 만든 오리피스 후단 배관 하류의 시험구간을 이용한 실험실 차원의 실험은 배관 내부의 동체 표면에서 FAC로 인한 마모 패턴을 결정하고, 본 수치해석의 연구결과를 증명하기 위해 수행하였다.

오리피스 후단 배관 하류에서의 배관 동체 감육의 유로가시화 실험을 수행한 후, 알칼리 금속염 배관의 절단면 이미지를 상용프로그램인 Auto CAD에서 로딩한 (loading) 후에 배관내부의 동체 감육 두께의 변화인 감육량을 측정하였다.

Fig. 4(a)는 알칼리 금속염 배관을 절단한 이미지를 Auto CAD에서 로딩한 후, 실제 알칼리 금속염 배관과 이미지상의 알칼리 금속염 배관의 크기를 같게 만들어 주는 스케일(scale) 조정 작업을 나타내고 있다. 또한, 스케일만을 조정한 이미지는 카메라 광원 차이에 의해 사다리꼴 형태로 만들어지게 되므로 가로와 세로의 비율을 스트레치(stretch) 작업을 통해 실물과 동일하게 교정한다. 다음으로, Fig. 4(b)와 같이 스케일과 스트레치 작업이 끝난 이미지를 고배율로 확대한다. 그리고 감육량, 정압 및 수치해석 데이터를 측정하고 비교해야 하는 위치에 보조선을 기입한 후, 보조선 위에 감육면을 따라 선을 삽입하고 알칼리 금속염 배관 외경

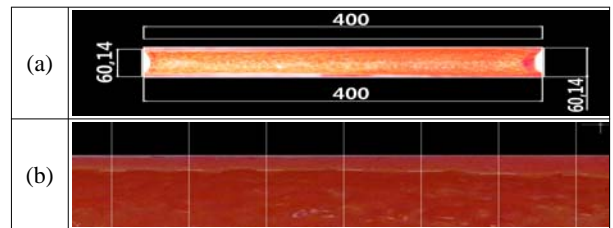


Fig. 4 Measurement of wall thinning inner alkali metallic salt pipe.

까지의 거리를 측정하면 정확하게 원하는 위치에서의 배관 내부 동체의 감육량을 확인할 수 있다.

알칼리 금속염 배관 제작의 혁신 및 이미지 촬영기술의 전문화로 감육두께 측정의 오차율은 평균 0.5%로 최소화되었고, 선행연구에서 수행하였던 기존의 Pit and Crack Depth Gauge를 이용한 감육두께의 측정방법과 견주어 볼 때, 오차율은 유사하거나 더 작음을 확인하였다.<sup>(20)</sup> 또한, 절단면 이미지를 활용한 Auto CAD 프로그램에 의한 감육량 측정은 측정 위치에 대한 제약이 없으며, 시간이 경과함에 따라 경화되면서 수축하는 알칼리 금속염과 하이드로칼(Hydrocal;  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ )을 이용한 기존의 감육량<sup>(21)</sup> 측정 연구방법에 비해 성형 및 부피 수축의 영향을 받지 않는다는 점이 큰 장점이다.

### 3.3 감육 유로가시화 실험결과

Fig. 5는 실험 완료 후, 알칼리 금속염 배관 내부에 대하여 확인하고, 감육 유로를 측정하기 위해 알칼리 금속염 배관을 중력의 법선 방향으로 절단한 사진이다. 절단면 내부의 감육 현상을 분석해 보면, 오리피스 입구에서부터 중간위치(P1~P6)까지 감육이 크고, 중간위치(P9)에서부터 감육량이 점차 작아지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 상대적으로 직경비  $\beta$ 가 작을수록 감육이 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

감육 유로가시화 실험을 통해서 살펴보면, 오리피스를 지난 후류에서의 유체는 유동 박리(flow separation) 현상을 일으키고, 이로 인해 발생한 와류(vortex)가 배관을 감육시킨다. 와류는 배관을 따라 유동이 점차 안정화되면서 줄어드는 것으로 판단된다. 이로 인하여 감육 또한 동시에 감소하는 모습을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 감육량 측정 데이터를 기반으로 배관의 감육량 변화를 육안으로 구분하기 용이하게 그래프로 나타낸 것이다. 감육량 측정 결과를 분석해 보면, P1~P6까지 감육량이 증가하고, P9 이후부터 감육량이 점차 작아지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 상대적으로 직경비  $\beta$ 가 작을수록, 그리고 배관 내의 유속이 클수록 감육량이 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 직경비  $\beta$ 와 유속의 변화량에 따른 감육량을 검토해 볼 때, 직경비  $\beta$ 보다는 유속에 의한 변동이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 감육 위치를 확인해 보면 직경비  $\beta = 0.5$ 의 경우 P9,  $\beta = 0.6$ 의 경우 P7,  $\beta = 0.7$ 의 경우 P3에서 배관동체의 가장 큰 감육량을 보였으며, 감육량의 차이를 확인할 수 없는 위치로는 P15지점 이후로 유동이 안정화되는 것으로 판단된다.

### 4. 국소 감육 효과 검토

Fig. 7은 수치해석과 실험결과 상의 정압 및 배관동

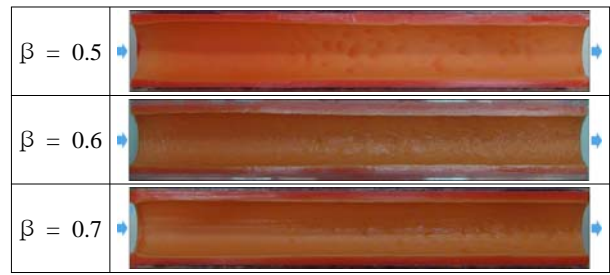


Fig. 5 Images of section on alkali metallic salt pipe.

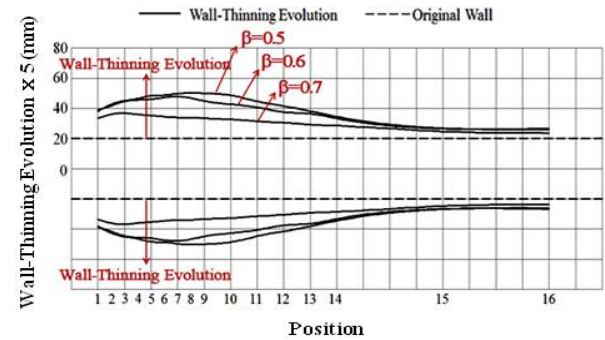


Fig. 6 Comparison of thickness variation for wall thinning.

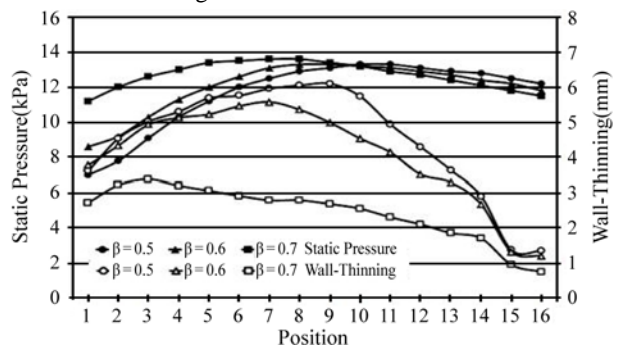


Fig. 7 Comparison between static pressure and wall-thinning.

체의 감육 두께 측정결과를 나타낸 그래프이다. 수치해석과 실험결과를 검토에서도 알 수 있듯이 측정 정압과 감육량의 변화가 오리피스 배관 후단 직후 부분에서 전체적으로 크게 나타났으며, 정압 변화가 작은 P8부터는 감육량이 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉, 정압 차이에 따라 결정되는 배관요소 내부의 국소 유속이 배관 동체의 감육에 큰 영향을 미친다는 것이다.

반면, 국소 유속만으로는 직경비  $\beta$ 별 정압의 차이를 보이지 않는 P9 이후부터의 감육량은 관련이 크다고 판단할 수 없다. 이와 같은 결과는, 측정된 정압으로 유추되는 국소 유속이 유체가 진행하는 방향인 중심축 방향 유속과 유사한 방향성을 갖기 때문이며, 감육의 원인 인자가 국소 유속의 방향과도 큰 관계가 있다는 것으로 판단된다.

### 4.1 편향 난류 유동과 국소감속

알칼리 금속염 배관 내부 감속의 원인 인자를 확인하기 위하여 수치해석 결과로 구해지는 난류 매개 변수 중  $V_r$ (반경방향 유속),  $V_t$ (접선방향 유속), TKE(난류 운동 에너지) 및 TI(난류강도)와 마모율을 비교하였다. 한편, 마모율과 난류 매개변수들간의 관계를 잘 구분할 수 있는 직경비  $\beta = 0.5$ 의 경우를 대표적으로 Fig. 8에 제시하였으며,  $\beta = 0.6, 0.7$ 의 경우는 절대값에 차이가 있을 뿐 매우 흡사한 경향을 보였다. 그 결과, Fig. 8(a)에서 판단할 수 있듯이 반경방향 유속  $V_r$ 이 감속경향과 크기 면에서 가장 유사한 결과를 나타내었다. 이는 오리피스 후단에서 유동이 분리된 후, 와류에 의하여 벽면으로 향하거나 배관 벽면을 일정 각도로 직접 타격하는 편향 난류유동의 속도 성분인  $V_r$ 이 배관의 국소 감속 즉, FAC 마모율과 직접 연관성이 있는 것으로 판단된다. 반면, 마모율은 기울기가 완만하며 최고값의 위치가  $V_r$ 보다 후단에 있는 것을 확인할 수 있다. 이는, 실험을 통해 측정된 감속량은 비정상상태의 실제상황과 지속되는 실험상태에서의 누적량 등이 있는 반면에 수치해석을 통한 결과는 정상상태 조건하에서 도출되었기 때문에 약간의 오차에 해당되는 범위라고 판단된다.

Fig. 8(b)에서는 접선방향 유속  $V_t$ 와 마모율의 비교를 나타낸 것이며, 배관동체의 감속에는 직접적인 영향이 없는 것으로 판단된다.

Fig. 8(c)에서는 난류운동에너지 TKE와 마모율과의 경향이 유사함을 확인할 수 있다. 이는 크기 면에서  $V_r$ 보다는 연관성이 작지만, 난류유동의 형태로 동체감속에 영향을 주는 것으로 판단된다.

난류강도 TI 역시 Fig. 8(d)에서 확인할 수 있듯이 TKE와 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있으나, 후단부로 갈수록 마모율과의 연관성은 확인할 수 없다.

앞서 확인된 난류 매개변수와 마모율과의 비교는 배관이나 기기 벽면에 수직으로 부딪쳐 유동이 정체되는 부위에서 감속이 가장 많이 발생한다는 선행연구의 결과<sup>(22)</sup>와도 일치한다. 반경방향 유속  $V_r$ 은 배관 벽면에서 분리된 후, 다시 벽면으로 향하거나 배관 벽면을 일정한 각도로 직접 타격하는 편향 난류유동의 속도 성분으로서 배관 동체의 국소 감속 즉, FAC 마모와 가장 큰 연관성이 있는 것을 확인하였다.

### 4.2 오리피스 후단 배관에서의 국소감속 효과

감속 유로가시화, 압력측정 및 수치해석을 통해 오리피스를 지나는 오리피스 배관 후단 하류에서의 배관동체 감속의 원인 인자가 FAC 마모로 인한 반경방향 속도  $V_r$ 인 것으로 확인됨에 따라 직경비  $\beta$ 에 따른  $V_r$ 과 FAC 마모율 WR 사이의 상관관계를 분석하였다. FAC

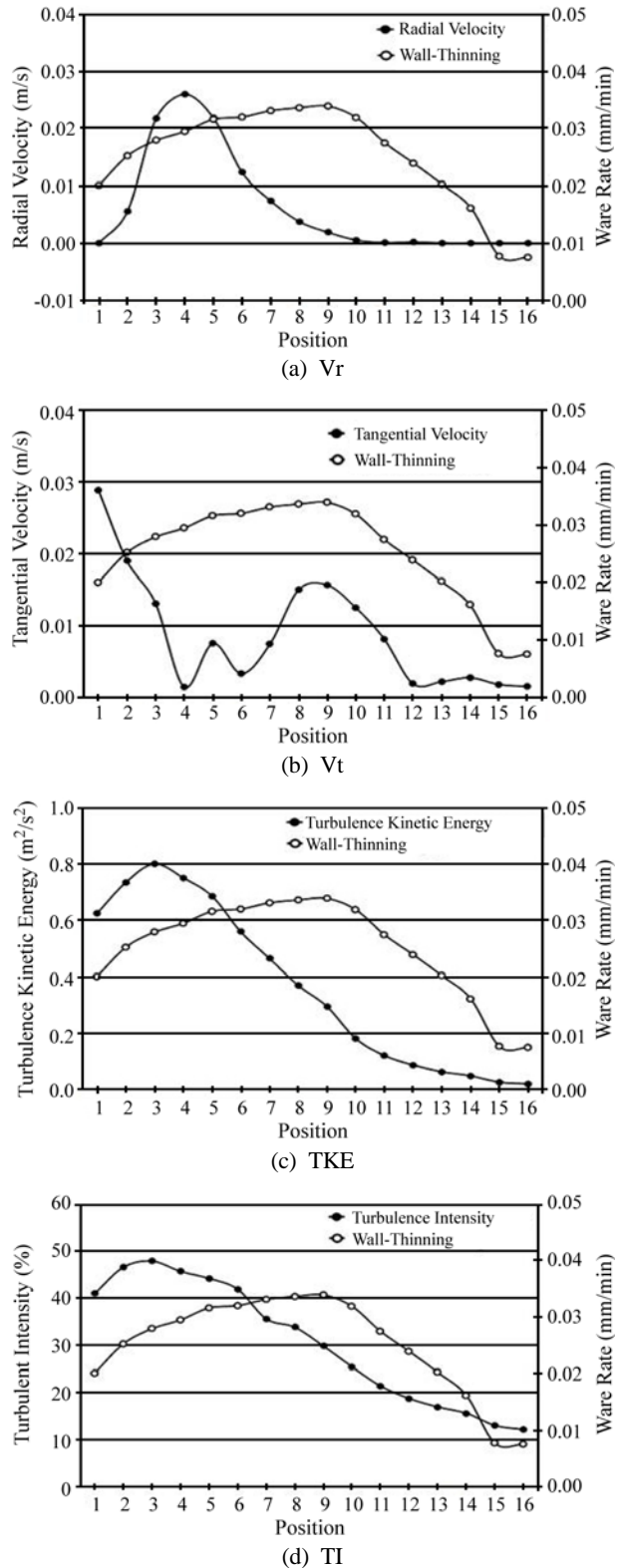


Fig. 8 Comparison between turbulence coefficients and ware rate.

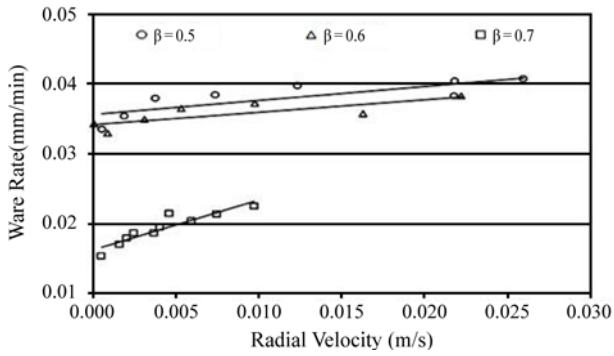


Fig. 9 Wear rate distribution by Vr.

마모율 WR은 배관동체의 감육량 측정 데이터를 각 조건에 대해 실험시간으로 나누어 계산하며, 수치해석에서 반경방향 속도성분 Vr의 데이터를 추출하고 최대값과 최소값을 제거한 데이터를 통해 반경방향 속도성분 Vr과 FAC 마모율 WR의 상관관계를 확인하였다.

Fig. 9에 주어진 데이터에 대한 해 방정식을 근사적으로 구하는 방법인 최소제곱법을 사용하여 얻은 추세선을 실선으로 표시하였다. 결과적으로 본 논문에서는 벽면을 수직으로 향하는 반경방향 속도성분인 Vr과 FAC 마모율 WR 사이에 다음 식과 같은 상관관계가 있다는 것을 확인하였다.

$$FAC\ WR = 0.1985Vr - 0.0356(\beta = 0.5)$$

$$FAC\ WR = 0.1751Vr - 0.0342(\beta = 0.6)$$

$$FAC\ WR = 0.7167Vr - 0.0163(\beta = 0.7)$$

상기 수식으로부터, 배관개소 벽면에서 형성되는 마그네사이트가 벽면으로 향하는 국소유속 반경방향 유속 Vr에 의해 특정 부위에서 물질전달이 활발히 진행되어 국소 감육이 더 빨리 진행된다는 것이다. 또한, 직경비 β가 증가하면 FAC 마모율이 비선형적으로 작아진다는 것도 확인할 수 있다. 본 논문에서 분석한 대상 계통은 단상의 급수계통으로서 아래와 같은 조건에 있는 탄소강 배관에 대해서 적용이 가능하다.

- 1.5 m/s < V < 2.0 m/s
- 0.5 < β < 0.7
- pH : 9.1~10.5
- Dissolved oxygen : 1~5 ppb
- Temperature : 273~323K

여기서, 직경비 β와 유속은 실험 조건의 제한으로 인하여 한계치를 규정하였으나, 실험조건 외의 근사 조건까지는 외삽을 통하여 적용 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

유동가속부식에 의한 국소 감육은 산업 플랜트 및 원자력 발전소 2차 계통 탄소강 기기에서 빈번하게 발생하고 있으며, 파손될 경우 막대한 손실을 초래할 수 있다. 현재까지 개발된 유동가속부식 예측 모델들은 전체적인 배관개소들에 대한 감육률을 간략하게 예측할 수 있었다. 하지만 실제로 유동가속부식은 국소적으로 발생하고 있으며, 기존의 모델로는 이를 예측하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 배관개소에서 국소 감육 현상을 파악하고자 실험과 수치해석을 수행하였다. 실제적인 국소 감육을 확인하기 위해 압력 측정 실험과 수용성 알칼리 금속염을 사용하여 감육 유로가시화 실험을 수행하였다. 또한, 이를 검증하기 위하여 실험에 사용된 오리피스 후단 배관 하류의 형상과 경계조건을 동일하게 하여 수치해석을 수행하였다.

유속 1.50 m/s, 직경비 β = 0.5, 0.6, 0.7의 관형 오리피스에서의 국소 감육 현상을 확인하고, 난류 유동에 따른 매개변수와 국소 감육의 연관성을 규명하기 위해 수치해석에서 추출한 난류 매개변수와 실험을 통해 획득한 배관의 마모율을 비교하였다.

수치해석과 감육 유로가시화 실험을 비교한 결과, 오리피스에서 유동이 분리되면서 발생한 와류에 의하여 벽면으로 향하거나 배관 벽면을 일정 각도로 직접 타격하는 편향 난류유동의 속도 성분인 반경방향 속도 성분 Vr이 배관동체의 국소 감육과 직접 연관성이 있는 것을 확인하였다.

최종적으로 수치해석 및 마모율이 비교된 전체 데이터 중, 신뢰성 있는 데이터를 추출하여 반경방향 속도 성분 Vr과 FAC 마모율과의 상관관계 확인하고 도식화하였다.

이러한 연구결과는 현장의 초음파 두께측정 부위 및 범위 결정, 감육 취약지점 결정, 감육 원인 규명 및 오리피스 크기 선정과 같은 설계개선 등에 활용할 수 있으며, 현장의 감육 관련 안전성 증대 관리에 이바지할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 2011년도 한국연구재단 일반 연구자 지원사업(20111508)의 연구비지원에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. KINS, 2004, Search Report of Nuclear Power Plant accident and problem(2nd)-Case of Water pipe Da-



- mage in Japan Mihamaunit 3, 2004-1(040809F1-r2).
2. Kain, V., Roychowdhury, S., Mathew, T., and Bhaddakkar, A., 2008, Flow accelerated corrosion and its control measures for the secondary circuit pipelines in Indian nuclear power plants, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 383, pp. 86-91.
  3. Poulson, B., 1999, Complexities in predicting wear corrosion, *Wear*, Vol. 235, pp. 497-504.
  4. Chang, Y. S., Kim, S. H., Chang, H. S., Lee, S. M., Choi, J. B., Kim, Y. J., and Choi, Y. H., 2009, Fluid effects on structural integrity of pipes with an orifice and elbows with a wall-thinned part, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 22, pp. 854-859.
  5. Nagaya, Y., Nakamura, A., Murase, M., and Utanohara, Y., 2010, Evaluation of the flow accelerated corrosion downstream of an orifice (measurement of corrosion rate), FAC Conference, Lyon, France.
  6. Okada, H., Uchida, S., Naitoh, M., Uehara, Y., and Koshizuka, S., 2008, Evaluation method on flow accelerated corrosion of components in cooling systems of nuclear power plants by coupling analysis of corrosion and flow dynamics, *International Conference on the Properties of Water and Steam ICPWS XV*, Berlin.
  7. Kimitoshi, Y. and Ryo, M., 2006, Investigation of the flow in orifice downstream related to pipe wall thinning, *Nihon Kikai Gakkai Nenji Taikai Koen Ronbunshu*, Vol. 3, pp. 9-10.
  8. Hwang, K. M., Jin, T. E., and Kim, K. H., 2009, Identification of the relationship between local velocity components and local wall thinning inside carbon steel piping, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 46, No. 5, pp. 469-478.
  9. Berger, F. P. and Hau, K. F., 1977, Mass transfer in turbulent pipe flow measured by the electrochemical method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 20, pp. 1185-1194.
  10. Coney, M., 1980, CREL Report RD/L/N197/80, 1980.
  11. Tagg, D. J., Patrick, M. A., and Wragg, A. A., 1979, Heat and mass transfer downstream of abrupt nozzle expansions in turbulent flow, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 57, pp. 176-181.
  12. Rizk, T. Y., Thompson, G. E. and Dawson, J. L., 1996, Mass transfer enhancement associated with sudden flow expansion, *Corrosion Science*, Vol. 38, No. 10, pp. 1801-1814.
  13. Ferng, Y. M., 2008, Prediction local distribution of erosion-corrosion wear sites for the piping in the nuclear power plant using CFD models, *Ann. Nucl. Energy*, Vol. 35, No. 2, pp. 304-313.
  14. AECL, 2001, Chemistry Control Design Manual, XX-03081/01200-DM-001 Rev., Vol. 4, pp. 1-10.
  15. Poulson, B., 1987, Predicting the occurrence of erosion - corrosion, In : Strutt, J.E., Nicholls, J. R.(Eds.), *Plant Corrosion : Prediction of Material Performance*. Ellis Horwood Ltd.
  16. Berge, P. and Saint Paul, P., 1981, Water chemistry of nuclear reactor systems, *Proceedings of the British Nuclear Energy Society*, London, p. 19.
  17. Bouchacourt, M. and Remy, F. N., 1991, *Proceeding of 3rd NACE International Region Management Committee Symposium*, Cambridge, UK.
  18. El-Gammal, M., Mazhar, H., Cotton, J. S., Shefski, C., Pietralik, J. and Ching, C. Y., 2010, The hydrodynamic effects of single-phase flow on flow accelerated corrosion in a 90-degree elbow, *Nucl. Eng. Des*, Vol. 240, No. 6, pp. 1589-2159.
  19. Chexal, B., Horowitz, J., Jones, R., Dooley, B., Wood, C., Bouchacourt, M., Remy, F., Nordmann, F. and St. Paul, P., 1996, *Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants*, Electric Power Research Institute Report No. TR-106611.
  20. Kim, K. H., Lee, S. K. and Kang, D. W., 2011, Identification on a Local Wall Thinning by Flow Acceleration Corrosion inside Tee of Carbon Steel Pipe, *J. of ILASS-Korea*, Vol. 16, No. 2, pp. 82-89.
  21. Ahmed, W. H., Bello, M. M., El Nakla, M. and Al Sarkhi, A., 2012, Flow and Mass Transfer Downstream of an Orifice under Flow Accelerated Corrosion Conditions, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 252, pp. 52-67.
  22. Kim, K. H., Park, S. H., and Hwang, K. M., 2010, Verification of the Interrelation between Local Wall Thinning and Velocity Components observed in the Deflected Turbulent Flow inside Orifice of Carbon Steel Piping, *Micro-system Technology*, Vol. 16, pp. 1945-1950.