

# 배관계 티에서 유동가속부식으로 인한 난류속도성분과 국부감육의 관계 규명

김 경 훈<sup>†</sup>, 이 상 규<sup>\*</sup>, 조 연 수<sup>\*</sup>, 황 경 모<sup>\*\*</sup>  
경희대학교 기계공학과, <sup>\*</sup>경희대학교 대학원 기계공학과, <sup>\*\*</sup>한국전력기술(주)

## Identification between Local Wall Thinning and Turbulent Velocity Components by Flow Acceleration Corrosion inside Tee of Pipe System

Kyung Hoon Kim<sup>†</sup>, Sang Kyu Lee<sup>\*</sup>, Yun Su Cho<sup>\*</sup>, Kyung Mo Hwang<sup>\*\*</sup>  
*Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Yongin 446-701, Korea*  
*\*Graduate school of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Yongin 446-701, Korea*  
*\*\*KEPCO-E&C, Yongin, 446-713, Korea*

(Received April 15, 2011; revision received May 26, 2011)

**ABSTRACT:** When pipe components made of carbon steel in nuclear, fossil, and industry are exposed to flowing fluid, wall thinning caused by FAC(flow accelerated corrosion) can be generated and eventually ruptured at the portion of pressure boundary. A study to identify the locations generating local wall thinning and to disclose turbulence coefficient related to the local wall thinning was performed. Experiment and numerical analyses for tee of down scaled piping components were performed and the results were compared. In particular, flow visualization experiment which was used alkali metallic salt was performed to find actual location of local wall thinning inside tee components. To disclose the relationship between turbulence coefficients and local wall thinning, numerical analyses were performed for tee components. The turbulence coefficients based on the numerical analyses were compared with the local wall thinning based on the measured data. From the comparison of the results, the vertical flow velocity component( $V_r$ ) flowing to the wall after separating in the wall due to the geometrical configuration and colliding with the wall directly at an angle of some degree was analogous to the configuration of local wall thinning.

**Key words:** Wall thinning(감육), Flow accelerated corrosion(유동가속부식), Deflected turbulent flow(편향 난류 유동), Local wall thinning(국부감육), Alkali metallic salt(알칼리 금속염)

### 1. 서 론

일반 플랜트의 배관 계통 및 원자력 발전소 2차 계통 기기 대부분은 탄소강으로 제작되어 있다. 탄소강

으로 제작된 기기가 유체흐름과 접촉할 경우에는 유동가속부식(FAC : Flow Accelerated Corrosion)이라는 손상을 받아 두께가 점차 얇아지는 동체감육(Wall Thinning) 현상이 나타나고 있으며, 결국에는 기기의 압력경계(Pressure Boundary) 부분이 파열되는 사고가 발생할 수도 있다. 유동가속부식으로 인한 대표적인 사고 사례는 미국의 Surry 2호기 급수관 파열사고<sup>(1, 2)</sup>와 일본 미하마 3호기에서 발생한 복

<sup>†</sup> Corresponding author  
Tel.: +82-31-201-2509; fax: +82-31-205-8016  
E-mail address: kimkh@khu.ac.kr

수관 파열사고<sup>(3)</sup>이며, 사고의 여파로 각국의 규제기관에서는 유동가속부식으로 인한 탄소강 기기들의 감육 관리를 보다 더 엄격히 규제하고 있다. 유동가속 부식은 고온에서 탄소강 표면에 형성되는 마그네타이트의 용해와 물질전달의 두 단계로 진행되는 것으로 알려져 있으며, 1980년대부터 최근까지 유동가속부식을 이론적으로 예측하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다.<sup>(4,5)</sup> 현재까지 발표된 유동가속부식 예측 모델은 대부분 유체중의 화학성분, 철 이온 농도차, 배관개소(component)의 형태 등에 따라 배관전체에 대한 감육률을 계산할 수 있도록 제시되었으나 기존의 유동가속부식 예측 모델은 배관계에 존재하는 배관요소 중에서 감육에 민감한 우선순위와 배관요소별로 하나의 감육률만을 산출하기 때문에, 실제 배관계에 존재하는 단일 배관요소 중에서도 특정 부위에서만 발생하고 있는 국부 감육률과 발생부위<sup>(6)</sup>를 정확히 예측할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 실제 배관개소 내부에서의 국부감육을 직접적으로 분석하기 위하여 국부감육에 연관된 편향난류가 탄소강 배관내의 티에서 어떠한 유동형태를 보이는지에 대하여 검토하고자 연구를 수행하였다. 이를 위하여 4개 컴포넌트(4종류의 티, 오리피스, 90° 엘보우 및 직관 등)를 대상으로 상사(similitude) 실험설비를 제작하여 실험을 수행하고, 수치해석 결과와 비교하여 수치해석의 타당성을 검증하였다. 수치해석 결과로 계산된 여러 난류 매개변수를 실측데이터로 계산한 감육 두께와 비교하여 연관성을 확인하였다. 수치해석과 감육 두께와의 비교는 여러 모델에 대해서도 수행하였으나, 본 논문에서는 티 모델에 대해서만 대표적으로 설명한다.

2. 배관 유동실험 및 수치해석

2.1 실험장치 구성 및 실험

발전소 설비중에서도 탄소강으로 제작된 배관중에서 4개의 컴포넌트(4종류의 티, 오리피스, 90° 엘보우 및 직관 등)를 대상으로 상사설계를 수행하고, 실험설비를 제작하였다. 실제 발전소 배관라인은 대용량, 고온, 고압 조건이기 때문에 실제 조건을 모사하기에 제약조건이 따른다. 따라서 티 모델의 경우 12.1 : 1의 축적으로 모형을 축소하여 기하학적 상사를 만족시켰으며, 원형에서와 같은 방향의 유동과 모형의 축적비를 모든 방향에 적용하였으며 운동학적 상사는 같다고 가정하였다. 마지막으

로 동역학적 상사를 위하여 적용한 Re수는 원형에서의 Re수가 상당히 크므로 근사상사원칙을 적용하였고, Re수가  $1.1 \times 10^5$ 이 되도록 유속을 조절하였다. 탄소강 배관 개소 내의 감육 현상을 파악하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 제작하였다. 본 논문에서는 4개의 컴포넌트 중 유체가 주배관의 상류와 분기관으로 유입된 후, 주배관 하류로 유출되는 유형의 티에 대한 실험결과를 대표적으로 제시한다.

실험에서는 본 연구의 관심대상이 되는 배관개소 등의 유동을 가시화하기 위하여 아크릴로 제작되었으며, 나머지 배관에 대해서는 PVC 파이프로 제작하였다. 실험은 상온인 15°C, 1기압에서 수행하였다. 실제로 현장에서의 운전조건은 이보다 훨씬 높은 온도지만, 온도는 국부감육의 발생 경향을 파악하는 본 연구의 관심대상이 아니므로 상온에서 수행하였다. 각 배관요소에 들어가는 유체 유동의 속도는 주배관 2.23 m/s, 분기관 2.0 m/s로 설정한 후 실험을 수행하였다. 실험에서는 Fig. 1과 같이 배관요소 진단(전압)과 측정하고자 하는 부위의 압력(정압)의 차를 디지털 압력계를 이용하여 측정하였다. 정압을 측정한 이유는 배관요소 내부의 유동분포가 국부적인 정압차이에 따라 결정되기 때문에 정압차이가 수치해석 결과와 유사한 경향을 보이면 유동분포는 동일하게 형성되는 것으로 간주해도 무방하기 때문

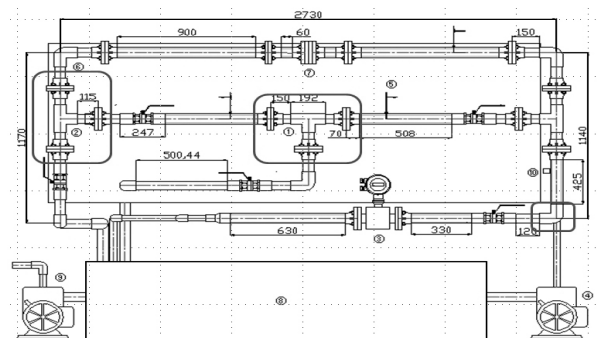
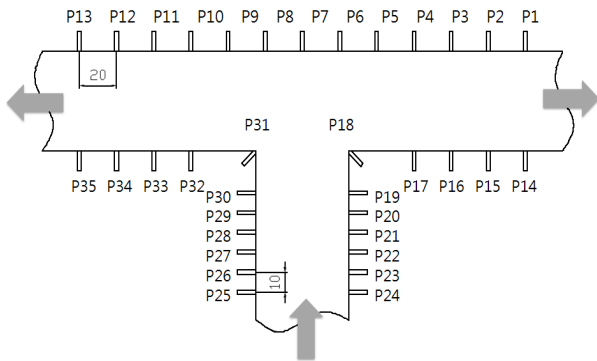


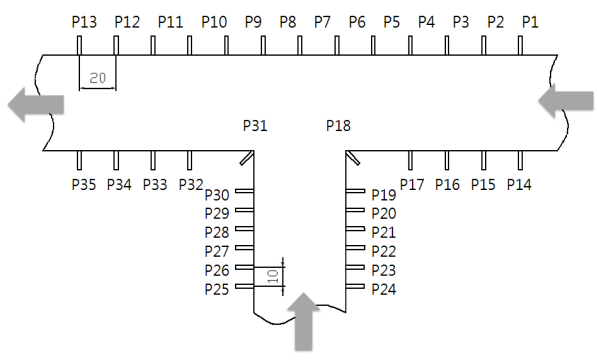
Fig. 1 Layout of experimental facility.



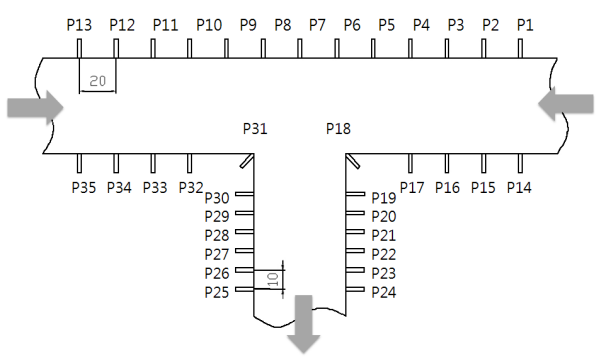
Fig. 2 Configuration of tee.



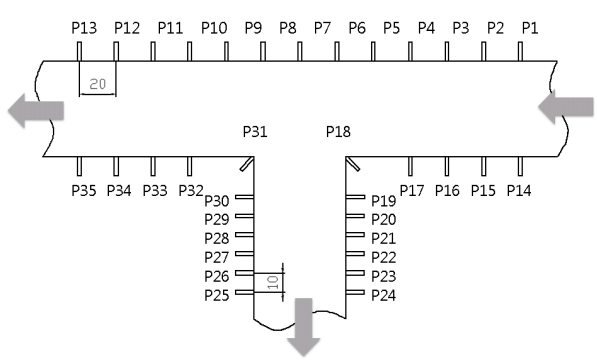
(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3



(d) Type 4

Fig. 3 Pressure measuring positions of tee.

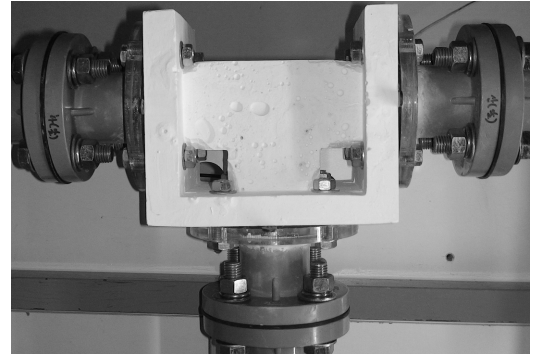


Fig. 4 Piping of alkali metallic salt of tee.

이다. 그리고 배관 내의 유속은 대표속도의 경우는 전자식 유량계를 통하여 측정하였고, 각 배관요소의 입구 쪽에는 피토티관을 설치하여 유속을 측정하였다.<sup>(7)</sup> 측정된 배관별 유속은 수치해석 경계조건으로 활용하였다. Fig. 2는 티의 전 후단 배관에서의 차압 측정 실험을 위하여 티 배관개소에 35개의 압력 측정구를 설치한 것이며, Fig. 3은 티의 유체 유동 형태에 따른 4가지 형태의 유형과 함께 10 mm, 20 mm 간격으로 압력공을 설치한 압력측정 부위를 나타내고 있다. 분기관의 형태를 지닌 티 형상의 배관개소에서 발생할 수 있는 유동경향 중 대표적인 4가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. 한편, 감육에 대한 탄소강 배관내의 유체 유동의 형태를 가시화하기 위하여 탄소강 배관 티 내부를 알칼리 금속염으로 제작하였다. 티 배관의 경우, 내부는 가시화를 위해 알칼리 금속염으로 외부는 전체 배관과 연결하기 위해 석고를 사용하여 제작하였다. Fig. 4는 감육 현상의 유로를 가시화할 수 있는 재료인 알칼리 금속염을 사용하여 티 형상의 배관요소를 제작한 후, 배관계에 체결한 상태를 보여주는 단면 사진이다.

2.2 수치해석

실험결과와 수치해석 결과가 일치하는지의 여부를 검토하기 위하여 수치해석 모델을 구성하였다. Fig. 5는 티에 대하여 구성한 해석 모델 및 격자구성이다. 수치해석을 위한 배관요소의 격자는 경계층 영향분석 결과에 따라 육면체 유형인 Hex/Wedge와 사면체 유형인 Tet/Hybrid를 혼합 적용하였으며, 격자 민감도 분석결과에 따라 298,870개의 격자로 구성하였다. 수치해석은 3차원 정상상태 조건으로 수행하였고, 난류점성 모델은 Instantaneous Navier-Stokes식에서 유도된 RNG(Re-Normalized Group) k-ε mod-

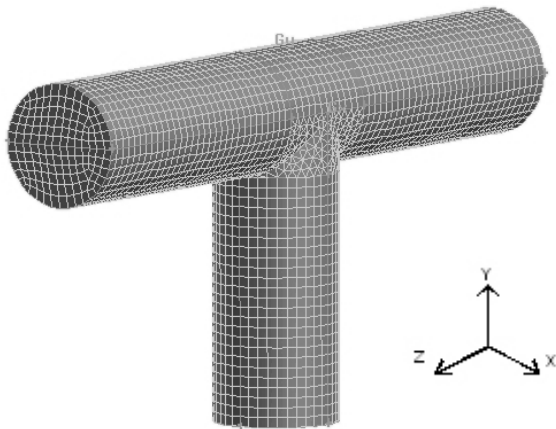


Fig. 5 Cell division of tee.

Table 1 Boundary conditions

Items	Units	Values	Remarks
Operating Fluid	-	Water	
Density	kg/m <sup>3</sup>	1,000	
Viscosity	kg/m · s	0.001139	
Temperature	°C	15	
Inlet Velocity	m/s	1.81(Branch)	Type 1
		2.23(Main) 2.0(Branch)	Type 2
		1.53(Main)	Type 3
		1.92(Main)	Type 4

el을 적용하였다.<sup>(8)</sup> 본 논문에서 대상으로 하고 있는 모델은 기하학적 형상으로 인하여 벽면에서 유동이 분리된 후 재결합하는 유동특성을 보이는 것으로 추정되므로 RNG k-ε model이 이러한 경향을 잘 예측하는 것으로 알려져 있다.<sup>(9)</sup> 근접벽 처리(near wall treatment) 방식은 가장 일반적으로 적용되는 standard wall function을 적용하였으며, 수치해석에 적용된 작동유체는 1.013×10<sup>5</sup> Pa의 물로 설정하였다. 입력 경계조건으로 사용되는 입구 유속은 실험과 동일한 속도 조건을 적용하였다. 해석에 적용된 경계조건과 작동유체의 물성치는 Table 1과 같다.

### 2.3 실험 및 수치해석 결과검토

티에 대한 수치해석 결과로서, 분기관으로 들어온 유체는 주배관 상류쪽에서 오는 유체에 막혀 인접부위에서 다소 높은 압력을 형성하였으며, 상류와 분기관으로 유입된 유체는 티의 중심부위에서 만난

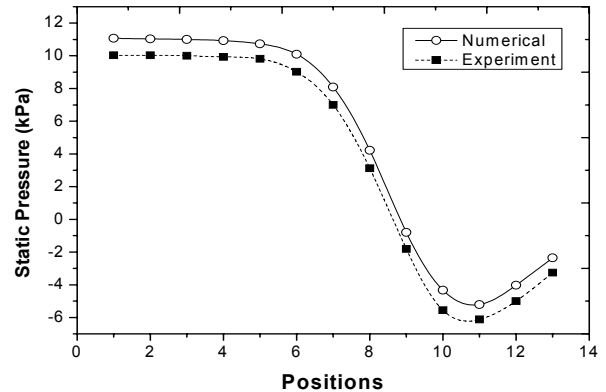


Fig. 6 Comparison of static pressure difference for tee between experiment and numerical analyses.

후 하류로 나가면서 분기관과 인접한 하류쪽 벽면에 부압을 유발시킨 것을 알 수 있다. 분기관과 인접한 하류쪽의 부압은 분기관에서 들어온 유체의 관성 때문에 유체가 벽면과 분리된 후 하류에서 재부착되기 때문에 형성되었다. Fig. 6에는 각각 티의 주배관 상단에서의 실험과 수치해석으로 구한 정압을 비교하여 제시하였다. 데이터 비교부위는 Fig. 3(티배관 유형 2)과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 분기관과 인접한 하류에서 형성된 부압이 하류로 가면서 점차 회복되고 있는 형상은 실험과 해석결과가 유사하게 나타났다.

### 3. 배관 티에서의 감육 현상

실제 현장의 발전소 등에서는 배관 등이 단열재로 씌여진 탄소강으로 제작되어 각 배관개소 내부에서 형성되는 유동특성을 눈으로 확인할 수가 없다. 이에 따라 본 논문에서는 배관개소의 형상에 따른 유동이 어떻게 형성되는지를 파악하고자 티 배관 내에서의 유동가속부식으로 인한 배관 감육 유로가시화 실험을 수행하였다.

한편, 탄소강 배관의 감육은 마그네타이트의 용해와 물질전달에 의해 발생한다. 마그네타이트의 경우에 있어서는, pH 9인 225°C의 물에서 약 8.2 μg Fe/kg H<sub>2</sub>O의 용해도를 가진다.<sup>(10)</sup> 미소한 양의 용해도를 가지는 마그네타이트의 감육 현상과 같이 탄소강 배관 티에서의 감육을 가시화하기 위하여 빠른 시간에 용해와 물질전달이 발생하는 재료인 수용성 알칼리 금속염을 선정하였다. 단, 여기서 온도는 국부감육의 발생경향을 파악하는 본 연구의 관심대상이 아

니므로 상온에서 수행하였다. 실험설비에서 본 연구에서 관심의 대상이 되는 부분인 티 배관계소를 수용성 알칼리 금속염으로 제작하여, 티 배관계에서의 감육 유로가시화를 실시함과 동시에 감육 두께 등을 측정하였다.

### 3.1 감육 유로가시화 실험

탄소강 배관계에서 유동가속부식으로 인한 국부 영역의 감육, 특히 배관형상에 따른 국소 감육현상을 가시화하기 위한 실험을 수행하였다. 본 실험장치의 배관계에 수용성 알칼리 금속염으로 제작한 티 부분을 체결하여 실험을 완료한 후, 알칼리 금속염으로 제작된 티 배관 내부에 대해 확인하고 감육 유로를 가시화하기 위하여 Fig. 7과 같이 알칼리 금속염 티 배관 내부를 절단하였다. 분기관의 형태를 지닌 티 형상의 배관계에서 발생할 수 있는 유동형태는 Fig. 3에서 티 배관의 유형과 유동 경향 및 압력 측정 위치를 확인할 수 있듯이 네 가지의 경우가 있다. 이 네 가지의 경우에 있어서 감육 유로가시화

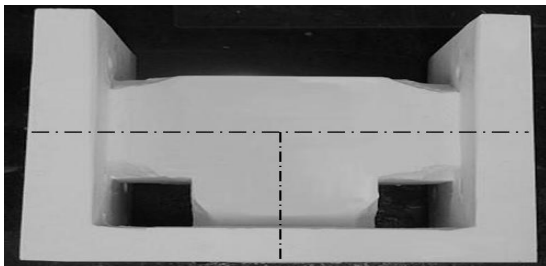


Fig. 7 Cutting line for verification of internal flow of alkali metallic salt tee.

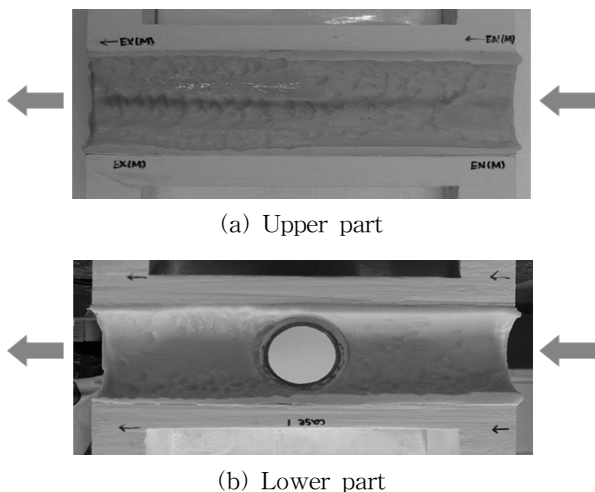
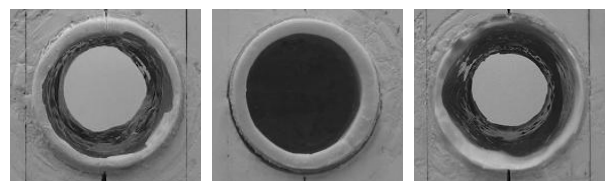


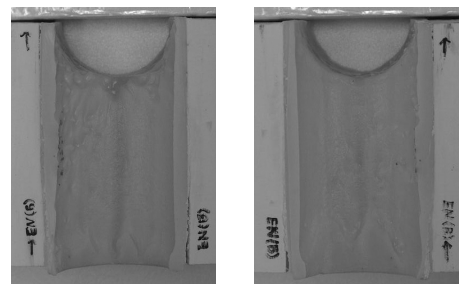
Fig. 8 Photo of cut section for tee(type 2).

및 감육 두께의 측정 등을 모두 실시하였으나, 이 중에서 본 논문에서는 티 배관 유형 2의 경우를 대표적으로 선택하여 티 배관 내부의 감육 현상을 분석하였다. Fig. 8은 수용성 알칼리 금속염으로 제작한 티의 배관상단과 하단 내부에서의 감육 현상을 나타낸 사진이다. 유형 2는 배관 유동에서 두 개의 입구와 하나의 출구를 갖는 형태로서, 유체가 티 배관의 주배관 상류와 분기관으로 유입된 후, 주배관 하류로 나가는 형태이다.

주배관 상류에서 하류로 갈수록 감육이 많이 발생하였으며, 회전유동이 형성되었다. Fig. 8(a)의 절단 상단부에서 주배관의 하류로 갈수록 배관 감육이 심화됨을 확인할 수 있다. 특히, P10에서 P13까지의 벽면에서 거칠고 굽은 형상의 감육이 발생하였는데, 이는 주배관 상류와 분기관을 통해 유입된 유체가 주배관 상단부 벽면을 직접 타격하면서 발생한 것이다. Fig. 8(b)의 절단 하단부에서도 상단부와 동일하게 입구에서 출구로 갈수록 감육이 많이 발생하였으나, 상단부와 비교하였을 때 부드럽게 형성되었다. Fig. 9는 입구와 출구에서의 감육 유로가시화 실험 결과를 나타낸 것이다. 입구보다 출구인 주배관 하류에서 감육이 심한 것으로 나타났다. Fig. 10은 분기관에서의 배관 감육 유로가시화 실험 결과이며, 여기서 Left는 왼쪽, Right는 오른쪽을 나타낸 것이다. 입구부분의 감육량은 상류와 마찬가지로 크지 않았다.



(a) Upstream (b) Branch (c) Downstream  
Fig. 9 Photo of inlet and outlet section for tee(type 2).



(a) Left (b) Right  
Fig. 10 Photo of tee at branch(type 2).

3.2 감육 유로 두께 측정

감육 유로가시화 실험을 수행한 후, 알칼리 금속염의 두께 측정은 3차원 스캐너를 이용하여 측정하였다. 또한, 유로가시화로 인한 티 배관 내부감육 현상을 보다 정확하게 분석하기 위하여 알칼리 금속염으로 제작한 티 배관 내부의 형상을 석고로 분을 뜬 후, 압력 측정 포인트 위치와 동일한 지점의 단면 형상을 얻어 원형 좌표에 표시하였다. Fig. 11은 티 배관 내부의 감육 형상의 절단 위치이고, Fig. 12는 원형 좌표를 나타낸 것이다. 원형 좌표는 알칼리 금속염 티 배관개소 단면과 동일한 형상으로 내경은 50 mm, 외경은 65 mm이다. 그리고 내경과 외경 사이를 1 mm 간격으로 나누고 단면을 15° 각도로 나누어 티배관의 감육 정도를 파악할 수 있게 하였다. 티 배관개소의 경우에는 배관 형태의 특성으로 인해 중심부에서의 단면을 얻기에 어려움이 있으므로 절단이 가능한 부분에 대해서만 그 단면을 절단하여 기록하였다. Fig. 13은 주배관 상·하류와 분기관 단면 형상을 나타낸 것이며, 여기서 화살표는 주배관에서는 상·하를 분기관에서는 좌·우를 나타낸다. 단면 형상을 통해 획득한 두께 데이터를 분석해 보면 입구부분인 주배관 상류와 분기관에서는 감육이 적으며 전체적으로 균일하게 발생하였다. 그러나 출구부분인 주배관 하류에서는 입구에 비해 감육이 많이 발생하였다.

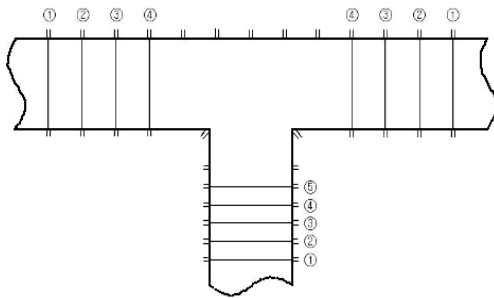


Fig. 11 Cutting position for cross section of tee pipe component.

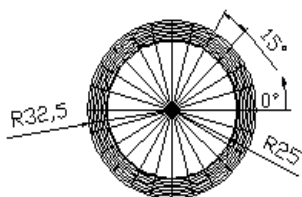
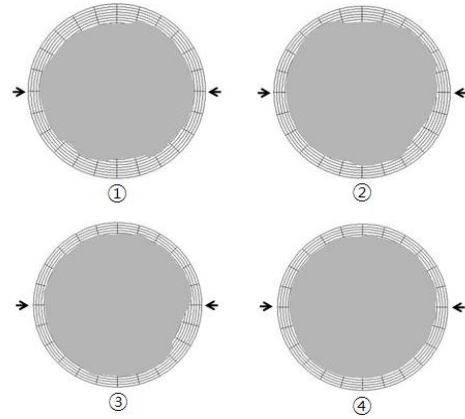
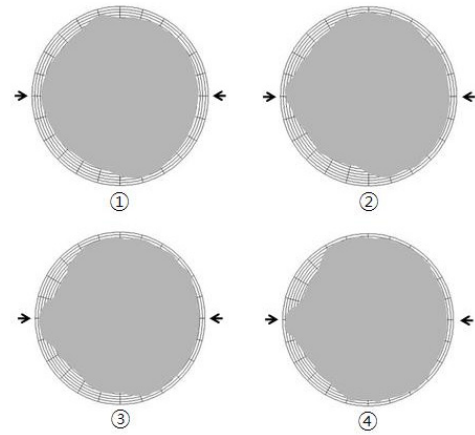


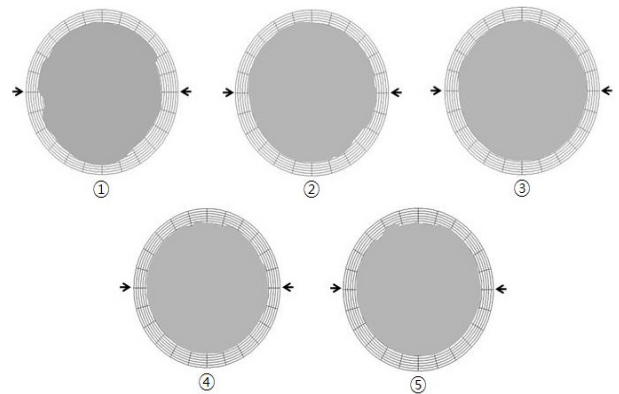
Fig. 12 Circular coordinate for cross section.



(a) Upstream



(b) Downstream



(c) Branch

Fig. 13 Cross section of tee for type 3.

하류의 270°에서 90° 부분 벽면에서는 입구에 비해 약 2배 정도의 감육이 발생하였고, 90°에서 270° 부분에서는 전반적으로 감육량이 많지는 않았으나, 180° 부위에서 국부적으로 심한 감육이 발생하였다. 이러한 결과는 두께측정 데이터를 통해서도 확인할 수 있다.

#### 4. 국부감육 효과 검토

Fig. 14는 수치해석과 실험결과 상의 차압 및 배관의 감육 두께 측정결과를 나타낸 그림이다.

수치해석과 실험결과와의 검토에서도 알 수 있듯이 측정 차압 등 모두가 주배관 하류부분에서 전체적으로 높게 나타났다. 이 영역에서 반대로 배관의 감육이 크게 일어났음을 알 수 있다. 특히, 하류 상단부에서 가장 높게 나타나고 있다. 이는 알칼리 금속염 티 배관 두께 측정 결과에서도 하류 상단부 벽면에서 감육이 크게 발생하였다고 판단되는 것으로 이러한 결과는 차압이 크게 나타나는 부분, 즉 정압이 낮은 부분에서 감육이 많이 발생함을 확인할 수 있다.

##### 4.1 편향 난류 유동과 국부감육

수치해석 결과로 구해지는 난류 매개 변수 중 어떤 성분이 티 배관개소의 국부감육에 영향을 미치는지를 분석하기 위하여 수치해석을 수행하고, 알칼리 금속염 티 배관의 두께 측정 데이터와 비교하였다. Fig. 15~Fig. 18까지는 티 배관 유형 2의 Vr (반경방향 유속), Vt(접선방향 국부유속), TI(난류강도) 및 TKE(난류 운동 에너지)를 알칼리 금속염 티 배관의 두께 측정 결과와 비교한 그래프이다. 티 배관에서 감육이 가장 심한 부위는 하류 상단부(P9에서 13까지)이며, 감육량이 작은 부위에서 반경 방향 유속 Vr이 타 부위에 비해 다소 작게 계산된 것을 알 수 있다. 따라서 Vr이 실제 감육량과 가장 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 감육량이 작은 부위에서 반경방향 유속 Vr이 작고, 반대로 반경방향 유속 Vr이 커지는 부위에서 감육량이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 반면에 접선방향 국부유속인 Vt는 Fig. 16에서도 확인할 수 있듯이 배관 감육에 직접적인 영향은 없는 것으로 판단된다.

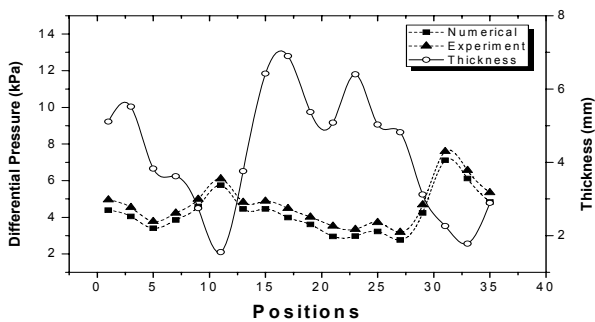


Fig. 14 Comparison between Differential Pressure and thickness of tee for type 2.

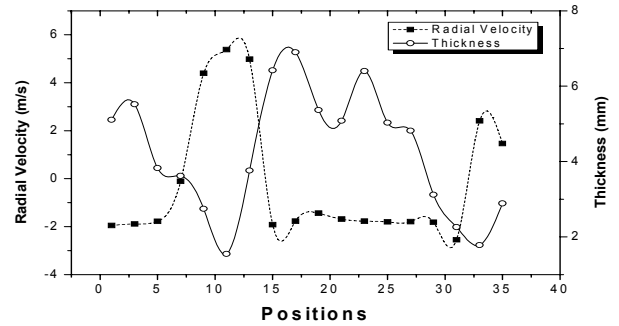


Fig. 15 Comparison between Vr and thickness of tee type 2.

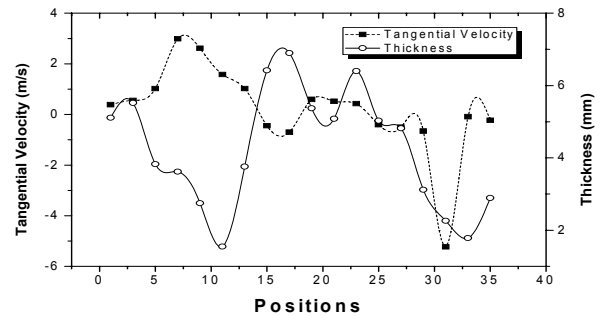


Fig. 16 Comparison between Vt and thickness of tee for type 2.

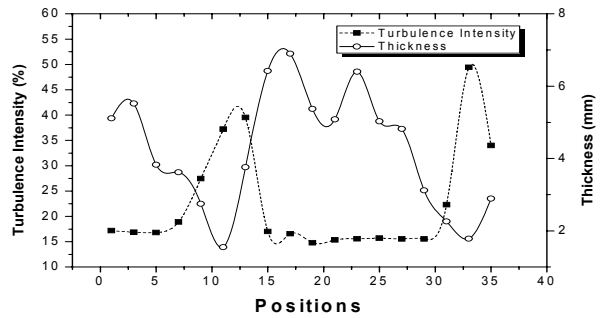


Fig. 17 Comparison between TI and thickness of tee for type 2.

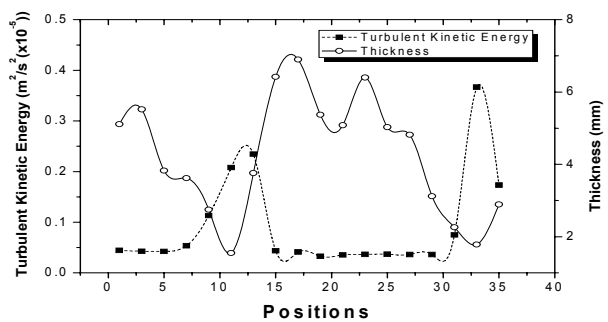


Fig. 18 Comparison between TKE and thickness of tee for type 2.

Fig. 17과 Fig. 18은 난류강도 TI와 난류운동에너지 TKE를 배관 감육의 두께측정 결과와 비교 검토한 그림으로서, 반경방향 유속 Vr과 유사하게 배관 내의 와류와 연관성이 높은 난류 매개변수임을 확인할 수 있었다.

그러나 난류 매개변수들과 알칼리 금속염 티 배관 두께의 비교 결과, 배관개소의 벽면으로 향하는 속도성분인 반경방향 유속 Vr이 국부감육과 가장 연관성이 있는 것으로 판단된다. 이는 반경방향 유속 Vr과 유동이 배관 벽면에서 분리된 후, 다시 벽면으로 향하거나 배관 벽면을 일정 각도로 직접 타격하는 편향 난류유동의 속도 성분으로서 배관의 국부감육과 직접 연관성이 있는 것으로 확인되었다. 이는 배관이나 기기 벽면에 수직으로 부딪쳐 유동이 정체되는 부위에서 감육이 가장 많이 발생한다는 선행연구<sup>(11)</sup> 결과에도 부합된다. 또한 동일한 형태의 배관개소이더라도 유속과 전단에 설치된 배관개소의 형태에 따라 배관 벽면을 직접 타격하는 부위가 달라진다는 사실도 확인하였다.

4.2 편향 난류 매개변수와 국부감육 상관관계

국부감육과 가장 밀접한 연관성이 있는 것으로 확인된 난류 매개변수는 반경방향 속도 Vr인 것으로 확인됨에 따라 Vr과 감육률 사이에는 어떠한 상관관계가 있는지를 분석하였다. 이를 위하여 실험을 통해 각 Type에서 국부감육이 발생한 지점에서의 두께 측정 데이터와 수치해석의 Vr 데이터를 추출하였다. 감육률은 두께 측정 데이터를 각 Type에 대한 실험 시간으로 나누어 계며, 이중에서 Vr이 ‘-’로 나타난 데이터는 속도의 방향이 반대이므로 삭제하였다.

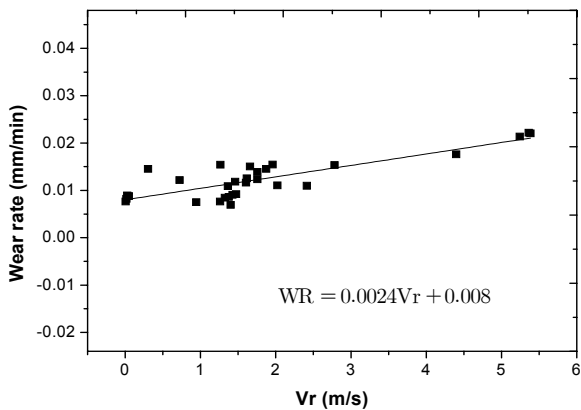


Fig. 19 Least-squared fitting result between Vr and wear rate.

제하였다. 이후 남은 데이터에서 최대값과 최소값을 제거한 30개의 데이터를 통해 Vr과 감육률의 상관관계를 확인하였다. 주어진 데이터에 대한 해 방정식을 근사적으로 구하는 방법인 최소제곱법을 사용하여 얻은 추세선을 실선으로 표시하였다. 결과적으로 본 논문에서는 벽면을 수직으로 향하는 Vr과 감육률 사이에는 다음 식과 같은 상관관계가 있는 것을 확인하였다.

$$WR = 0.0024Vr + 0.008 \text{ (for } 0 < Vr < 6.0)$$

위 식으로부터 배관 개소 벽면에서 형성되는 마그네타이트가 벽면으로 향하는 국부유속에 의해 특정 부위에서의 물질전달이 활발히 진행되어 국부감육이 가속화 된다는 사실을 알 수 있다. 상기 수식으로부터 알 수 있는 사실은 배관개소 벽면에서 형성되는 마그네 타이트가 벽면으로 향하는 국부유속에 의해 특정 부위에서 물질전달이 활발히 진행되어 국부감육이 더 빨리 진행된다는 것이다. 본 논문에서 분석한 대상 계통은 단상의 급수계통으로서 아래와 같은 조건에 있는 탄소강 배관에 대해서 적용이 가능하다.

- $0 < Vr < 6.0$  m/s
- pH : 9.1~10.5
- Dissolved oxygen : 1~5 ppb
- Temperature : 263~343 K

여기서, Vr은 활용된 데이터 개수의 제한으로 인하여 6.0 m/s를 한계치로 규정하였으나, 그 이후의 Vr에 대해서도 일정 국부유속까지는 외삽을 통하여 적용 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 배관개소에서의 국부감육 현상을 파악하고자 실험과 수치해석을 수행하였다. 실제적인 국부감육을 확인하기 위해 수용성 알칼리 금속염을 사용하여 감육 유로가시화 실험을 수행하였다. 또한, 이를 검증하기 위하여 실험에 사용된 티 배관형상과 경계조건을 동일하게 하여 수치해석을 수행하였다. 대표적으로 유형 2를 보면 하류부분에서 감육이 크게 발생하였으며, 특히 하류 상단부 벽면에서 감육이 가장 크게 발생하였다. 또한, 난류유동에 따른 매개변수와 국부감육의 연관성을 규명하기 위



해 수치해석을 수행하고, 해석된 난류 매개변수와 실험을 통해 획득한 배관의 감육 정도를 비교하였다. 수치해석 결과와 두께 측정 결과를 비교한 결과, 배관개소의 형태에 따라 유동이 배관 벽면에서 분리된 후 다시 벽면으로 향하거나 배관 벽면을 일정 각도로 직접 타격하는 편향 난류유동의 반경방향 속도성분  $V_r$ 이 배관의 국부감육과 직접 연관성이 있는 것을 확인하였다. 최종적으로 수치해석 및 감육률이 비교된 전체 데이터 중, 신뢰성 있는 데이터를 추출하여 반경방향 속도성분  $V_r$ 과 감육률과의 상관관계 확인한 결과, 티 형상 배관에서의 국부감육률은 반경방향 속도성분  $V_r$ 의 0.0024배에 0.008을 더한 값과 같다는 것을 확인하였다. 이로부터 알 수 있는 사실은 배관개소 벽면으로 향하는 국부유속에 의해 티 형상 배관 내의 특정 부위에서 물질전달이 활발히 진행되어 국부감육이 더 빨리 진행된다는 것이다. 이러한 연구결과는 현장의 초음파 두께측정 부위 및 범위 결정, 감육 원인규명, 설계개선 등에 활용할 수 있으며, 현장의 배관감육 관련 안전성 증대에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 2010년도 한국연구재단 일반연구지원사업(20101793)의 연구비지원에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. NRC, 1987, Thinning of Pipe Walls in Nuclear Power Plants, Bulletin, Vol. 87-01.
2. NRC, 1988, Feedwater Line Break, Supplement 3, Notice, pp. 86-106.
3. KINS, 2004, Search Report of Nuclear Power Plant accident and problem(2nd)-Case of Waterpipe Damage in Japan Mihamaunit 3, (040809F1-r2).
4. Von Kasrner, W. and Riedle, K., 1986, Empirisches Modell zur Berechnung von Materialabtragen durch Erosionskorrosion, VGB Kraftwerkstechnik, Vol. 66, pp. 1171-1178.
5. Kastner, W., Riedle, K. K. and Tratz, H., 1984, Experimental Inspections on Material Loss due to Erosion-Corrosion, VGB Kraftwerkstechnik, Vol. 64, No. 5, pp. 411-423.
6. Keller, H., 1978, Corrosion and Erosion Problems in saturated-Steam Turbines, AIM Conf., Liege, Belgium, pp. 22-28.
7. Park, S. H., 2011, A Study on a Local Thinning by Flow Acceleration Corrosion inside Carbon Steel Tee Piping, Kyung Hee University, Master Thesis.
8. Choudhury, D., 1993, Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling, Fluent Inc., Technical Memorandum TM-107.
9. CHAM, 1994, An Introduction into the Method for Implementing Multi-Block Grids and/or Grids with Refinements in PHOENICS, CHAM TR/401, Ver. 2.1.
10. AECL, 2001, Design Manual Chemistry Control, XX-03081/01200-DM-001 Vol. 4, pp. I-10.
11. Hwang, K. M., Jin, T. E. and Kim, K. H., 2009, Identification of Relationship between Local Velocity Components and Local Wall Thinning inside Carbon Steel Pipe, J. of Nuclear Science and Technology, Vol. 46, No. 5, pp. 469-478.