

< 논문 >

급수가열기 추기노즐 충격판 주변의 동체감육 현상규명을 위한 실험 및 수치해석 연구

김경훈[†] · 이 우^{*} · 황경모^{**}

(2006년 5월 12일 접수, 2006년 10월 23일 심사완료)

A Study on Experiment and Numerical Analysis for Disclosing Shell Wall Thinning of a Feedwater Heater

Kyung Hoon Kim, Woo Lee and Kyeong Mo Hwang

Key Words: Flow Accelerated Corrosion(유동가속부식), Wall Thinning(감육), Feedwater Heater(급수가열기), Extraction Nozzle(추기노즐), Impinging Baffle(충격판)

Abstract

Feedwater heaters of many nuclear power plants have recently experienced severe wall thinning damage, which will increase as operating time progresses. Several nuclear power plants in Korea have experienced wall thinning damage in the area around the impingement baffle - installed downstream of the high pressure turbine extraction steam line - inside number 5A and 5B feedwater heaters. At that point, the extracted steam from the high pressure turbine is two phase fluid at high temperature, high pressure, and high speed. Since it flows in reverse direction after impinging the impingement baffle, the shell wall of the number 5 high pressure feedwater heater may be affected by flow-accelerated corrosion. This paper describes the comparisons between the numerical analysis results using the FLUENT code and the down scale experimental data in an effort to determine root causes of the shell wall thinning of the high pressure feedwater heaters. The numerical analysis and experimental data were also confirmed by actual wall thickness measured by an ultrasonic test.

1. 서 론

유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion)이란 유체흐름에 의해 가속되는 부식현상으로 유체와 접하는 탄소강이나 저합금강 배관 및 기기의 두께를 감소시킨다. 이러한 현상을 감육(Wall Thinning)이라 한다. 원자력 발전소에서 유동가속부식은 배관에서 주로 문제가 되어 왔으나 가동년수가 증가함에 따라 급수가열기, 습분분리제열기 등과 같은 기기에서도 주요 문제점으로 나타나고 있다.

원자력 발전소 2차측의 고압 급수가열기 5A 동체측으로는 고압터빈에서 추기되는 증기와 습분

분리제열기 및 급수가열기 6A에서 배수되는 물이 들어가서 증기발생기에 공급되는 급수를 가열한다. 특히, 고압터빈에서 들어오는 추기증기는 고온, 고압, 고속의 2상 증기이므로 전열관 손상을 방지하기 위하여 추기증기 유입부에 설치된 충격판(Impingement Baffle)에 부딪친 후 반사되어 흐르기 때문에 급수가열기 동체 내벽에 감육손상을 유발할 가능성이 있다. 실제 1999년 5월 미국의 Point Beach 1호기에서는 급수가열기 4번 동체에서 감육이 발생하여 증기가 누설되는 사고가 발생한 바 있으며,⁽¹⁾ 그 해 11월에는 미국 Fort Calhoun 원전의 급수가열기 5번 추기노즐 충격판 주변에서 심각한 감육손상이 발생되어 침식보강용접(Flush Patch Weld)을 수행한 바 있다.⁽²⁾ 이외에 Salem 1, 2, Fort Calhoun, Peach Bottom, Oyster Creek 등의 원전에서도 급수가열기 동체감육으로 인한 손상을 경험한 바 있다. 국내에서도 2000년 10월 특정 가

[†] 책임저자, 회원, 경희대학교 기계공학과, 산학협력 기술연구원 원전운영기술고도화센터
E-mail : kimkh@khu.ac.kr
TEL : (031)201-2509 FAX : (031)202-8106

^{*} (주)대지금속 기술연구소

^{**} 회원, 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

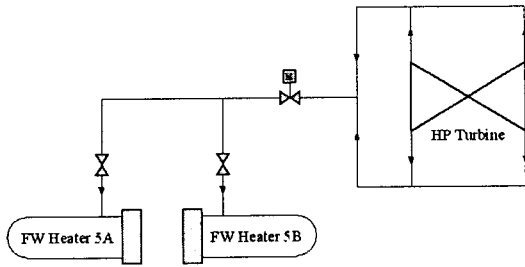


Fig. 1 Schematic diagram of extraction steam system

압경수로형 원전의 급수가열기 5A와 5B에서 유사한 손상을 경험하여 보강용접을 수행한 바 있다.⁽³⁾ 국내 원전 2차측의 급수가열기 설계방식은 대부분 유사하기 때문에 이러한 급수가열기 추기노즐 충격판 주변의 동체 감속손상은 원전의 안전운영과 급수가열기 건전성 확보 차원에서 중요하게 고려해야 할 것으로 판단된다.

이에 따라 본 연구에서는 유동가속부식으로 인하여 급수가열기의 동체가 감속되는 현상의 원인을 유체 유동관점에서 분석하기 위하여 FLUENT 코드를 이용한 수치해석과 모사 실험설비를 이용한 실험을 수행하고 결과를 비교 검토하였다. 해석 및 실험대상은 추기증기 배관라인과 인접한 동체 내부이다. 해석 및 실험결과는 발전소 급수가열기의 동체 두께측정결과와도 비교하여 연구의 효용성을 검증하였다.

2. 해석 및 실험모델 구성

2.1 해석모델

급수가열기 충격판에 반사되는 유체의 유동 및 동체감속 특성 연구를 위하여 상용 전산 수치해석 코드인 FLUENT를 사용하였다. 해석 모델 구성은 국내 가압경수로형 원전 2차측의 급수가열기 5A를 대상으로 하였다. 급수가열기 5A로는 고압터빈에서 추기되는 증기와 습분분리재열기 및 급수가열기 6A에서 배수되는 물이 동체측으로 유입되지만 고온, 고압 및 고속의 증기가 전열관 손상 방지를 위하여 설치된 충격판과 동체에 심한 영향을 미치는 추기라인을 해석대상으로 결정하였다. Fig. 1은 고압터빈에서 급수가열기 5A, 5B로 추기되는 추기증기계통의 개략도를 나타낸다.

Fig. 2는 해석대상으로 결정한 급수가열기 5A의 반단면도를 보여준다. 해석범위는 그림에서 볼 수 있듯이 동체 상단의 절반과 추기라인의 유량조절밸

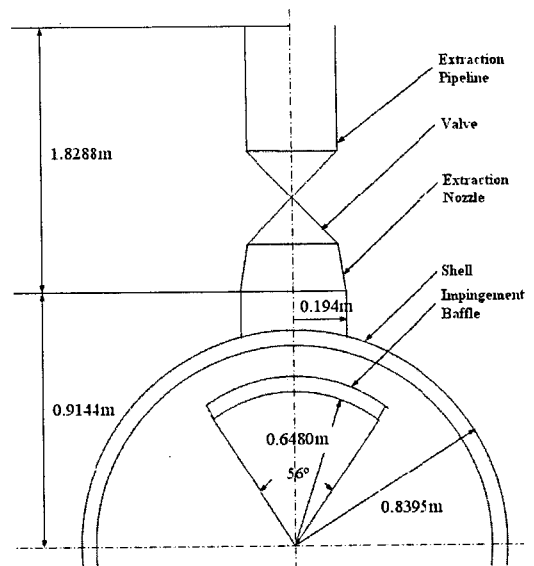


Fig. 2 A Half cross-sectional view

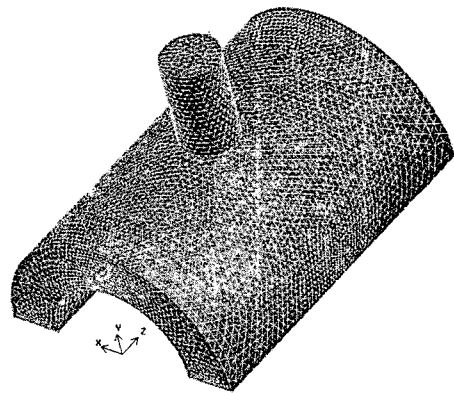


Fig. 3 Cell divisions

브 후단을 대상으로 하였으며 충격판을 동체 내부에 모델링 하였다. 동체 내부에 있는 전열관은 관심대상이 아니므로 해석범위에 포함시키지 않았다.

Fig. 3은 단일블록(Single Block)으로 구성된 해석모델의 격자구성을 보여준다. Cell 수는 총 110, 277개의 사면체 격자(tetrahedra)로 구성하였다. 급수가열기 추기노즐로 유입되는 증기의 Re수를 평가하면 약 1.0×10^5 이고, 추기증기는 충격판에 부딪힌 후 모든 방향으로 반사된다. 따라서 해석대상 모델 내부의 구조와 열유동 조건을 고려하여 물리적으로 적절한 수치해를 얻고자 급수가열기 내부의 유동을 3차원, 정상상태 및 난류로 간주하였다. 난류 점성모델로는 추기라인에서 유입되는 증기가 충격판에 부딪힌 후 동체 벽면으로 반

사되어 흐르고 일부는 충격판에서 분리된 후, 후면에서 재결합되는 유동특성 해석에 적합하다고 알려진 RNG $k-\epsilon$ Model을 적용하였다.⁽⁴⁾ 난류강도 (Turbulence Intensity)와 난류점성비(Turbulent Viscosity Ratio)는 추기노즐 전단의 밸브를 감안하여 모두 20%로 설정하였다. 수치해석을 위한 이산화(Discretization) 기법으로서 압력에 대해서는 Linear, 모멘텀과 체적분율에 대해서는 First Order Upwind를 적용하였으며, 압력-속도 커플링에 대해서는 수렴률 개선을 위한 SIMPLE 알고리즘을 적용하였다.

급수가열기 및 추기라인 내부의 작동유체는 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 에서 단상 및 2상 두 가지 조건에 대하여 구성하였다. 입력 경계조건으로 사용되는 추기라인의 유속은 균일속도 조건을 적용하였으며 속도계산에는 원전 2차측의 열평형도에 제시되어 있는 운전 데이터를 적용하였다. 해석에 적용된 경계조건과 물성치는 Table 1과 같다.⁽⁵⁾

2.2 실험모델

급수가열기 내부의 실제조건을 재현하여 실험하기는 매우 어려우므로 상사법칙을 적용하여 실험모델을 제작하였다. 상사법칙이란 기하학적 상사(Geometric Similitude), 운동학적 상사(Kinematic Similitude)가 만족되고 무차원 독립변수가 같다면 결국 무차원 종속변수가 같게 된다는 것이다. 실험모델은 1/3.122의 비율로 축소하여 기하학적 상사를 만족시켰으며, 운동학적 상사는 원형에서와 같은 방향의 유동과 모형의 축척비를 모든 방향에 적용하였으므로 같다고 가정하였다. 그리고

다음 식의 레이놀즈 상사법을 적용한 역학적 상사(Dynamic Similitude)를 성립시켰다. 역학적 상사가 이루어질 경우 다른 유체로 실험을 하여도 무방하다는 것을 의미한다.

$$\left(\frac{VL}{\nu}\right)_p = Re_p = Re_m = \left(\frac{VL}{\nu}\right)_m$$

실험 조건은 상온 20℃ 공기의 물성치를 적용하였다. 20℃에서 레이놀즈 상사를 위하여 필요한 공기의 물성치는 동점성계수 $\nu = 1.54 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 이다. 위의 식을 이용하여 추기라인과 동체 전단 유속을 계산하여 Table 2와 같이 정리하였다.

Table 2 Model boundary conditions

Items	Units	Values
Velocity in the Extraction Pipeline	m/s	7.56
Velocity in the Shell Inlet	m/s	1.16
Density	kg/m ³	1.204
Kinetic Viscosity	m ² /s	1.54×10^{-5}

Table 1 Boundary conditions

Conditions	Items	Units	Values	
Common	Steam Temperatures in the Extraction Pipeline and the Shell Inlet	℃	100	
	Steam Velocity in the Extraction Pipeline	m/sec	10.930	
	Steam Velocity in the Shell Inlet	m/sec	1.697	
Single Phase	Density	kg/m ³	0.6	
	Kinetic Viscosity	m ² /sec	2.05×10^{-5}	
Two Phase	Water	Steam Quality(Vol.)	%	10.7
		Density	kg/m ³	958.12
		Specific Heat	J/kg-K	0.4844
		Kinetic Viscosity	m ² /sec	2.95×10^{-7}
	Air	Steam Quality	%	89.3
		Density	kg/m ³	0.6
		Specific Heat	J/kg-K	2,026.73
		Kinetic Viscosity	m ² /sec	2.05×10^{-5}

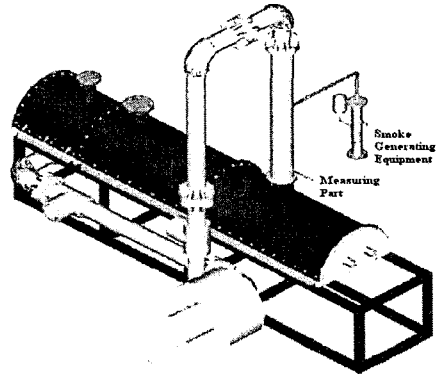


Fig. 4 Layout of test rig.

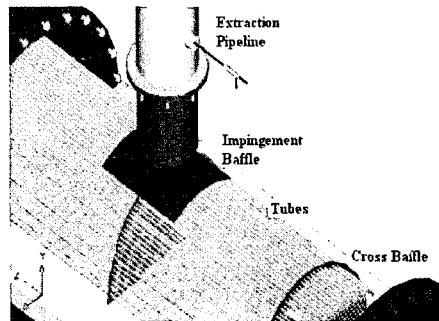


Fig. 5 Layout of test section

급수가열기 실험모형의 관심부위는 추기라인과 인접한 동체 내부이므로 동체의 하부는 모형에서 제외하였으며, 내부에는 충격판과 전열관 및 배플판을 설치하였다. 실험모형 제작에는 내부 모습을 볼 수 있도록 투명 아크릴로 제작하였으며, 전열관 다발은 고무링으로 제작하였다. 또한 유동형상을 가시화하기 위하여 연 발생 장치를 배관 내부에 설치하였다. Fig. 4는 상사된 급수가열기 동체의 실험모형을 나타낸 것이며, Fig. 5는 내부형상을 보여 준다.

3. 해석 및 실험결과 토의

3.1 해석 결과

단상 및 2상유체 모두에 대하여 수치해석에 적용한 Under-relaxation Factor로서 Pressure에 대해서는 0.3, Density와 Body Force에 대해서는 1.0, 그리고 Momentum에 대해서는 0.7을 적용하였다. Convergence Criterion은 Continuity, x, y, z-velocities에 대하여 0.001을 적용하고 Energy에 대해서는 1.0×10^{-6} 을 적용하였다.

해석결과로서 Fig. 6은 단상(a) 및 2상(b) 유체에 대한 동체 벽면에서의 국부 압력변화를 보여 준다. 그림에 표기된 숫자의 단위는 Pa이다. 여기서 (+)x 방향은 동체 왼쪽으로 원주방향, (+)y 방향은 동체 중심에서 벽면을 향하는 방향, 그리고 (+)z 방향은 동체 축방향을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 단상 및 2상유체 모두에 대한 압력 분포는 유사하게 나타났으며, 추기노즐 후단의 양쪽에서 가장 낮은 압력(약 0.976×10^{-5} ~ 1.012×10^{-5} Pa)이 형성되었다. 여기서 부압은 단상보다 2상이 약간 크게 형성되는 것으로 계산되었다. 발생하는 부압은 추기증기가 급수가열기 동체로 들어온 후 충격판에 부딪치고 동체측에서 들어오는 저속의 유속 때문에 발생한 현상으로 추정된다. 이러한 부압의 영향으로 급수가열기 내부는 복잡한 유동형태가 발생하였음을 알 수 있다.

Fig. 7, 8, 9는 동체벽면의 x, y, z 방향 국부속도 분포를 보여주며, 유동형태는 단상 및 2상에서 모두 유사하게 형성되고 있음을 알 수 있다. 그림에 표기된 숫자의 단위는 m/sec이다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 x 방향 국부속도(u)는 추기증기가 동체로 유입된 후 만곡 충격판(Rounded

Impingement)의 영향으로 좌우로 빠르게 흐르다가 동체 후단에서 가운데로 재합류하는 유동 형상을 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 동체 벽면을 향하여 흐르는 +y 방향 국부속도(v)는 추기노즐 좌우 측면의 추기노즐 반경 거리에서 가장 빠르게 나타났으며, 빠른 +y 방향 유속은 말발굽 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이 때 동체 벽면을 향하는 유속은 1.6에서 1.9m/sec 정도인 것으로 계산되었다. 그리고 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 +z 방향 국부속도(w)는 추기노즐 측면에서 가장 빠르게 형성되었으나 전체적으로는 +z 방향으로 유체가 서서히 흐르고 있음을 알 수 있었다.

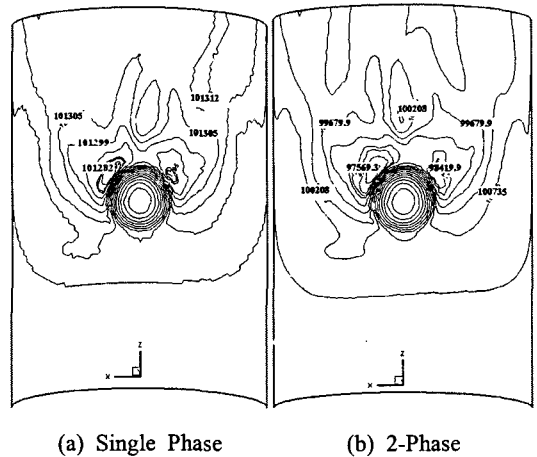


Fig. 6 Pressure distribution

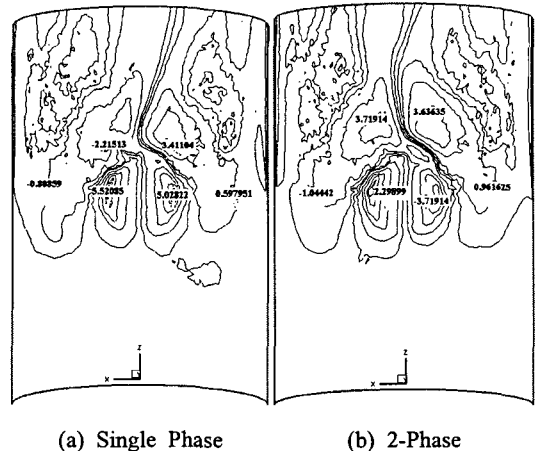


Fig. 7 u Distribution

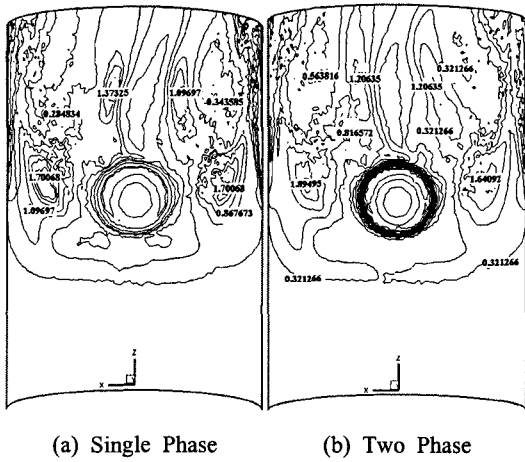


Fig. 8 *v* Distribution

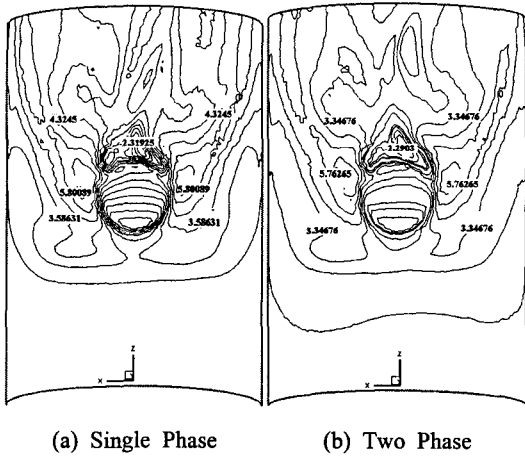


Fig. 9 *w* Distribution

3.2 실험결과

급수가열기 추기라인 주변의 유동을 재현하기 위하여 연 발생장치로써 가시화 실험을 먼저 수행하고 추가로 압력을 측정하였다. Fig. 10은 가시화 실험을 한 결과로서 급수가열기 실험모델 정면에서 촬영한 그림이다. 가시화 실험은 유동이 안정된 시점에서 연주입구를 추기라인 중심에서 벽면으로 10mm 간격으로 이동하면서 사진촬영을 하였다. Fig. 10(a)에서 볼 수 있듯이 노즐 중심 부근($x=10\text{mm}$)에서는 유체가 충격판에 부딪힌 후 충격판과 나란히 흐르다가 박리가 되면서 동체의 벽면으로 반사되는 모습을 볼 수 있다. 그리고 그림 (b)~(f)에서 볼 수 있듯이 연 주입구

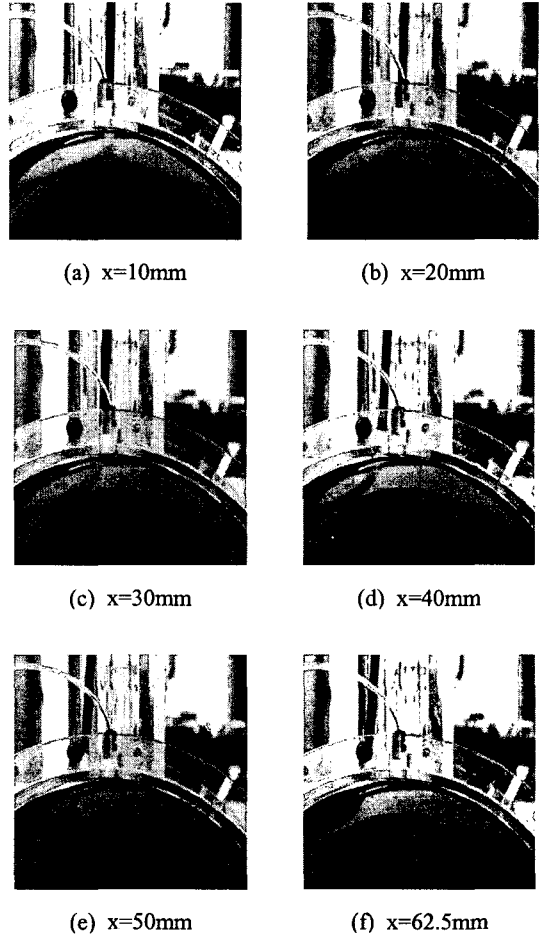


Fig. 10 Visualization of flow shape

가 추기라인 벽면으로 이동하더라도 동체 벽면을 향하는 유체는 거의 일정한 부위를 향하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 동체 내부의 압력을 측정하기 위하여 구멍을 낸 형상을 보여 준다. 구멍은 15mm 간격으로 총 500개를 뚫었다. 압력측정의 이유는 동체 내부의 압력분포에 따라 유동형태가 결정되기 때문이다. Fig. 12는 측정된 압력을 분포도로 제시한 것이다. 그림에 나타난 숫자의 단위는 Pa이며, 추기라인 좌우측의 약간 후단쪽에서 가장 낮은 압력(약 $1.0128 \times 10^{-5} \text{Pa}$)이 형성되었다. 이외의 부위에서는 대기압 보다 약간 높은 압력분포를 나타내었다. 이것은 가시화 실험에서 나타났던 가시화 연기를 벽면 쪽으로 향하게 한 부압의 영향임을 확인하였다.

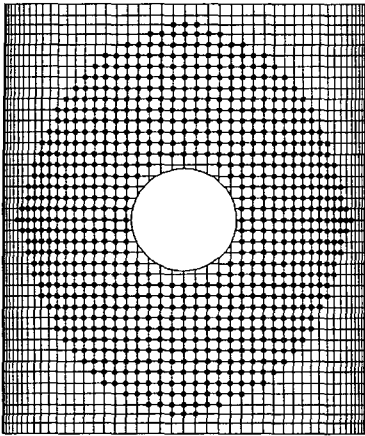


Fig. 11 Pressure measuring points

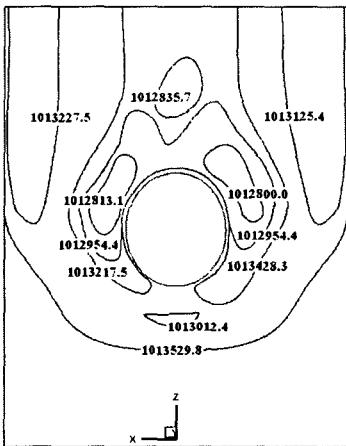


Fig. 12 Pressure distribution resulting from experiment

4. 해석 및 실험결과와 실측데이터 비교

단상 및 2상 유동에 대한 수치해석 결과와 실험결과에 대한 압력분포를 비교하였다. 이는 압력분포가 동일할 경우 급수가열기 내부에서 형성되는 유동분포도 동일할 것이기 때문이다. Fig. 6 (a), (b)와 Fig. 12의 단상 및 2상 유동에 대한 수치해석 결과와 실험결과를 비교하면 부압이 발생하는 부위에서의 압력차가 다소 있었지만 전체적인 압력분포는 거의 동일하였다. 그리고 Fig. 8의 v Distribution과 Fig. 10의 Visualization of flow shape을 비교하면 동체 벽면을 향하고 있는 부위가 거의 동일하게 나타남을 판단할 수 있다.

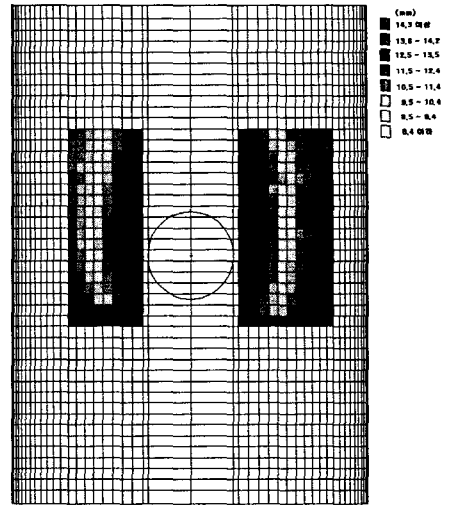


Fig. 13 Wall thinning configuration

또한 해석 및 실험결과에 따른 유동특성이 동체감육에 미치는 영향을 검토하기 위하여 각 방향의 국부유속을 급수가열기 추기라인 인접부의 동체두께 측정 데이터와 비교하였다. 두께측정은 추기라인과 인접한 급수가열기 동체 전면의 198개 부위와 후면의 144개 부위를 대상으로 UT 측정을 하였다. 측정부위 사이의 간격은 5.08cm(2in)이다. Fig. 13은 UT 결과에 따른 동체두께 감육형상을 보여준다. 동체의 초기 설계두께는 14.29mm (0.5625in)였으며 측정된 두께에 따라 8단계로 구분하여 색칠을 하였다. 밝은 색은 감육이 많이 진행되어 두께가 얇게 측정된 부위이고 진한 색은 감육이 심하지 않은 부위이다.

Fig. 13에서 볼 수 있듯이 추기라인 노즐벽면으로부터 노즐반경 정도 거리의 좌우측에서 감육이 비교적 많이 진행된 것을 알 수 있으며, 흐름방향 후단(+z 방향)으로 갈수록 감육이 심한 부위는 충격판 충돌 후의 유동이 중심으로 이동된다는 사실을 알 수 있다. 이러한 결과에 근거하여 각 방향의 국부유속과 비교한 결과, 동체벽면에 수직으로 부딪치는 국부속도를 나타내는 v 는 노즐벽면에서 양측면으로 노즐반경 정도의 거리에서 가장 크게 나타났으며 후단으로 가면서 큰 v 는 노즐중심 축을 향하여 이동하는 것으로 나타났다. 이러한 유동현상은 동체두께 감육현상과 거의 흡사한 경향을 보였다.

이에 따라 급수가열기 동체 벽면의 감육현상은

동체 내부로 들어 온 추기증기가 충격판에 부딪친 후, 국부적인 부압의 영향으로 유체가 역류하여 동체 벽면에 수직으로 영향을 미치는 v 의 국부유속에 민감한 것을 알 수 있다. 선행 감육연구 결과에서도 유체가 재료 벽면과 수직으로 충돌하는 부위에서 감육이 가장 심하게 나타난다고 제시하고 있다.⁽⁶⁾ 따라서 나머지의 속도성분 u 와 w 는 동체두께 감육 현상과 직접 관련이 없는 것을 확인하였다. 이러한 사실은 벽면과 나란히 흐르는 유체는 감육에 영향을 미치지 않는다는 사실과도 잘 일치하는 것을 알 수 있다.⁽⁷⁾

5. 결 론

원자력 발전소 2차측의 고압터빈에서 추기되는 고온, 고압의 2상 증기로 인하여 급수가열기 내벽이 감육되는 현상을 유체유동 측면에서 규명하기 위한 연구를 수행하였다. 상용 수치해석 코드인 FLUENT를 이용하여 단상 및 2상유동에 대한 수치해석을 수행하였으며, 급수가열기를 상사한 실험모델로 실험을 수행하고 압력분포를 비교하였다. 그 결과 단상 및 2상 유동에 대한 수치해석 결과에 따른 유동분포는 거의 동일하였으며, 실험결과도 수치해석의 결과와 유사하게 나타남을 확인하였다. 급수가열기 내부로 유입된 추기증기는 급수가열기 내부의 전열판 손상을 방지하기 위하여 설치된 충격판에 부딪치고 추기라인 노즐 후단에서 발생한 부압 때문에 동체 벽면에 수직으로 부딪치는 현상을 확인하였다.

해석 및 실험결과에 따른 유동특성과 동체감육의 상관성 검토는 초음파 두께측정 장비를 이용하여 측정된 동체 두께 감육분포와 국부유속을 비교하였다. 그 결과, 급수가열기 벽면과 평행하게 흐르는 u 와 w 는 감육현상과 크게 상관이 없음을 확인하였으며 동체 벽면을 향하여 수직으로 부딪치는 v 의 영향이 감육현상에 지배적임을 확인하였다. 이러한 연구결과는 흐르는 유체와 접촉하는 기기재료 중 유체가 수직으로 부딪쳐 흐를정체가 발생하는 부위에서 감육이 가장 심하게

발생된다고 알려진 일반적인 사실과도 잘 일치하였다. 또한 이러한 연구결과는 발전소 급수가열기 손상을 사전에 예방할 수 있는 설계개선과 동체 감육손상 관리에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원사업으로 수행된 논문입니다.

참고문헌

- (1) Point Beach 1, 1999, "Steam Leak From Low Pressure Feedwater Heater," 1999-005, LER.
- (2) Fort Calhoun, 1999, "Shell Wall Thinning of Feedwater Heater," OE 10710, INPO.
- (3) KHNP, 2000, "Technical Review for Proving the Shell Wall Thinning of the Feedwater Heater," Mechanical Department, Technical Review Report.
- (4) 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.
- (5) Kim, K. H., Hwang, K. M. and Jin, T. E., 2005, "Fluid Mixing Analysis for Predicting Shell Wall Thinning of a Feedwater Heater," *J. of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 1078~1085.
- (6) Keller, H., 1978, "Corrosion and Erosion Problems in Saturated Steam Turbines," AIM Conf., Liege, Belgium, pp. 22~28.
- (7) Von W. Kastner and Riedle, K., 1986, "Empirisches Modell zur Berechnung von Materialabtragen durch Erosionskorrosion," VGB Kraftwerkstechnik, Vol. 66, pp. 1171~1178.