

급수가열기 추기노즐의 개선된 충격판 모델에 관한 연구

이 우* · 황경모** · 김경훈†

A Study on Advanced Impinging Baffle Model in Extraction Nozzle of a Feedwater Heater

Woo Lee, Kyeong Mo Hwang and Kyung Hoon Kim

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

원자력 발전소 2차측의 고압 급수가열기 5A 동체측 으로는 고압터빈에서 추기되는 증기와 습분분리재열기 및 급수가열기 6A에서 배수되는 물이 들어가서 증기발 생기에 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 반사되

어 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 가압경수로형 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 감육손상은 원전의 안전운영과 급수가열기 건전성 확보 차원에서

(2006년 11월 30일 접수 ~ 2007년 1월 24일 심사완료)

* (주)대지금속 기술연구소

** 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

† 책임저자, 회원, 경희대학교 테크노공학대학 기계 공학과 교수
(산학협력기술연구원 상임연구원 원전 운영기술고도화센터),
E-mail : kimkh@khu.ac.kr

TEL : (031)201-2509, 2874 , FAX : (031)202-8106

중요하게 고려해야 할 것으로 판단된다.

이에 따라 본 연구에서는 급수가열기 동체 감육손상의 원인을 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 동체 감육 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.

Figure 2는 해석대상으로 결정한 급수가열기 5A의 반단면도를 보여준다. 해석범위는 그림에서 볼 수 있듯이 동체 상단의 절반과 추기라인의 유량조절밸브 후단을 대상으로 하였으며 충격판을 동체 내부에 모델링 하였다.

동체 내부에 있는 전열관은 관심대상이 아니므로 해석범위에 포함시키지 않았다. Fig. 3은 단일블럭(Single Block)으로 구성된 해석모델의 격자구성을 보여준다. Cell 수는 총 110, 277개의 삼각격자(Triangle)로 구성하였다.

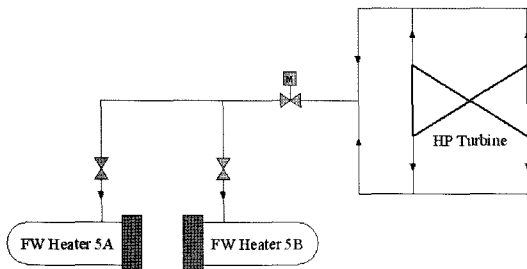


Fig. 1 Schematic diagram of extraction steam system

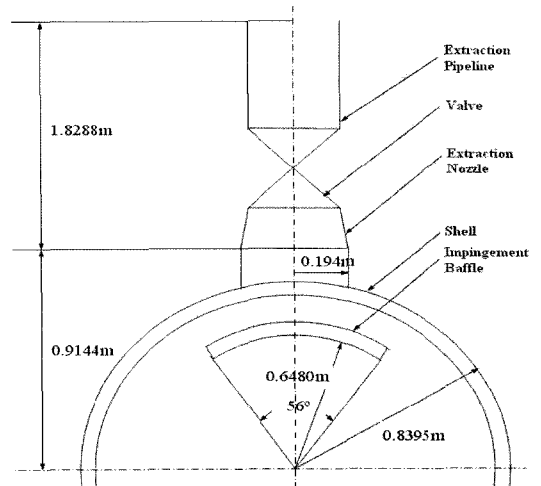


Fig. 2 A Half cross-sectional view



Fig. 3 Cell Divisions

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 반사되어 흐르고 일부는 충격판에서 분리된 후, 후면에서 재결합되는 유동특성 해석에 적합하다고 알려진 RNG k-ε Model을 적용하였다⁽⁴⁾.

급수가열기 및 추기라인 내부의 작동유체는 1.013×10^5 Pa에서 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.

Table 1 Boundary conditions

조건	항목	단위	값	
공통	추기라인 및 동체전단 입구 증기 온도	°C	100	
	추기라인 증기 유속	m/sec	10.930	
	동체전단 증기 유속	m/sec	1.697	
1 Phase	밀도	kg/m ³	0.6	
	동점도	m ² /sec	2.05×10 ⁻⁵	
2 Phase	Water	함량	%	10.7
		밀도	kg/m ³	958.12
		비열	J/kg-K	0.4844
		동점도	m ² /sec	2.95×10 ⁻⁷
	Air	함량	%	89.3
		밀도	kg/m ³	0.6
		비열	J/kg-K	2,026.73
		동점도	m ² /sec	2.05×10 ⁻⁵

Table 2 Experimental conditions

항목	단위	값
추기라인 유속	m/s	7.56
동체전단 유속	m/s	1.16
밀도	kg/m ³	1.204
동점도	m ² /s	1.54×10 ⁻⁵

으며, 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 발생장치를 배관 내부에 설치하였다. Fig. 4는 상사된 급수가열기 동체의 실험모형을 나타낸 것이며, Fig. 5는 내부형상을 보여 준다.

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 Similarity), 운동학적 상사(Kinematic Similarity)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 Similarity)를 성립시켰다. 역학적 상사가 이루어질 경우 다른 유체로 실험을 하여도 무방하다는 것을 의미한다.

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

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

급수가열기 실험모형의 관심부위는 추기라인과 인접한 동체 내부이므로 동체의 하부는 모형에서 제외하였

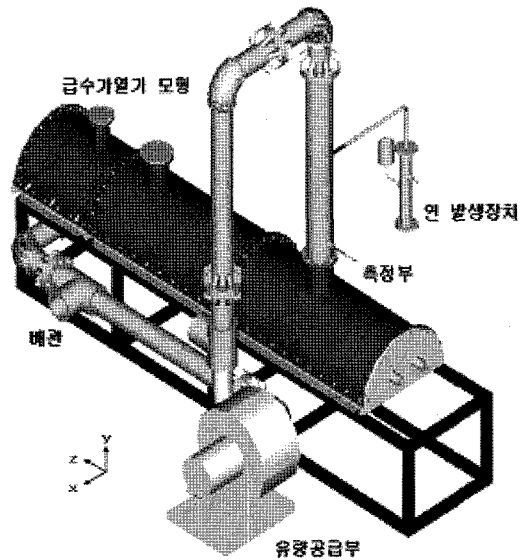


Fig. 4 Layout of test rig

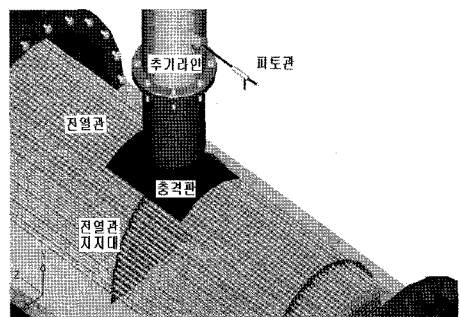


Fig. 4 Layout of test rig

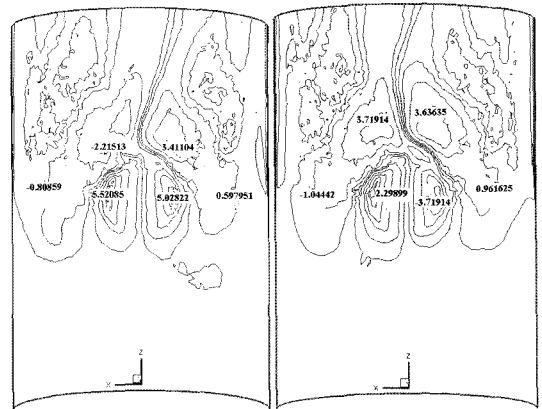
3. 해석 및 실험결과 토의

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.

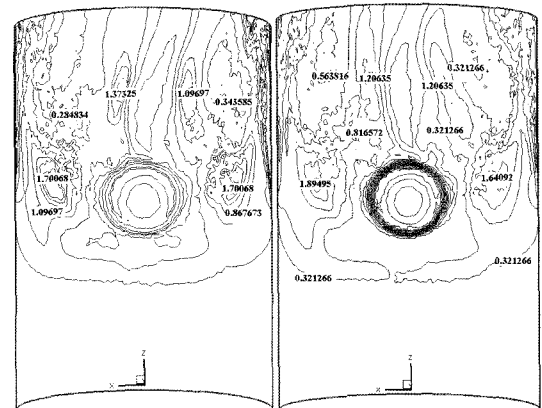
해석결과로서 Fig. 6은 단상(a) 및 2상(b) 유체에 대한 동체 벽면에서의 국부 압력변화를 보여 준다. 여기서 (+)x 방향은 동체 왼쪽으로 왼쪽방향, (+)y 방향은 동체 중심에서 벽면을 향하는 방향, 그리고 (+)z 방향은 동체 축방향을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 단상 및 2상 유체 모두에 대한 압력분포는 유사하게 나타났으며, 추기노즐 후단의 양쪽과 추기노즐에서 약간 떨어진 중심부위의 세 곳에서 대기압 보다 낮은 압력(약 $0.976 \times 10^{-5} \sim 1.012 \times 10^{-5} \text{Pa}$)이 형성되었다. 여기서 부압은 단상 보다 2상이 약간 크게 형성되는 것으로 계산되었다. 발생하는 부압은 추기중기가 급수가열기 동체로 들어온 후 충격 판에 부딪치고 동체측에서 들어오는 저속의 유속 때문에 발생한 현상으로 추정된다. 이러한 부압의 영향으로 급수가열기 내부는 복잡한 유동형태가 발생하였음을 알 수 있다.

Figure 7, 8, 9는 동체벽면의 x, y, z 방향 국부속도 분포를 보여주며, 유동형태는 단상 및 2상에서 모두 유사하게 형성되고 있음을 알 수 있다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 x 방향 국부속도(u)는 추기중기가 동체로 유입된 후 만곡 충격판(Rounded Impingement)의 영향으로 좌



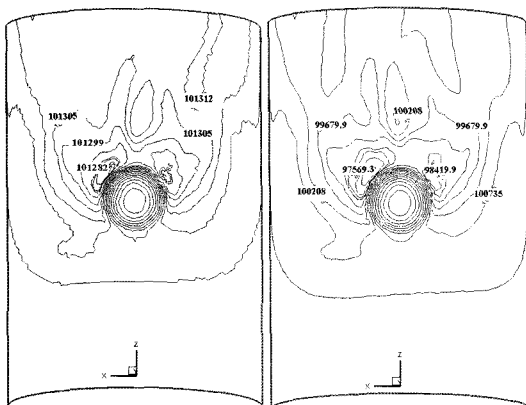
(a) Single Phase (b) 2-Phase

Fig. 7 u Distribution



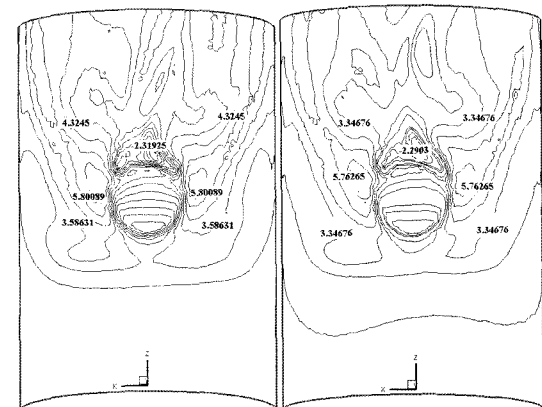
(a) Single Phase (b) Two Phase

Fig. 8 v Distribution



(a) Single Phase (b) 2-Phase

Fig. 6 Pressure distribution



(a) Single Phase (b) Two Phase

Fig. 9 w Distribution

우로 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 1.9 m/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.

3.2 실험결과

급수가열기 추기라인 주변의 유동을 재현하기 위하여 연 발생장치로써 가시화 실험을 먼저 수행하고 추가로 압력을 측정하였다. 유동가시화 실험에 있어서는 실험

장치의 동체가 아크릴 재질이어서 사진 촬영시에 카메라 자체 광원의 반사가 발생함에 따라 실험대상 주위의 빛을 차단하고 촬영장치의 광원과 주위의 빛을 적절하게 투과시켜 선명한 영상을 얻을 수 있는 조건을 구현하면서 비디오 카메라로 연속적인 촬영을 한 후, 필요한 순간을 캡처링하여 데이터로 사용하였다. Fig. 10은 가시화 실험을 한 결과로서 급수가열기 실험모델 정면에서 촬영한 그림이다. 가시화 실험은 유동이 안정된 시점에서 연 주입구를 추기라인 중심에서 벽면으로 10 mm 간격으로 이동하면서 사진촬영을 하였다. Fig. 10(a)에서 볼 수 있듯이 노즐 중심 부근(x=10 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 주입구가

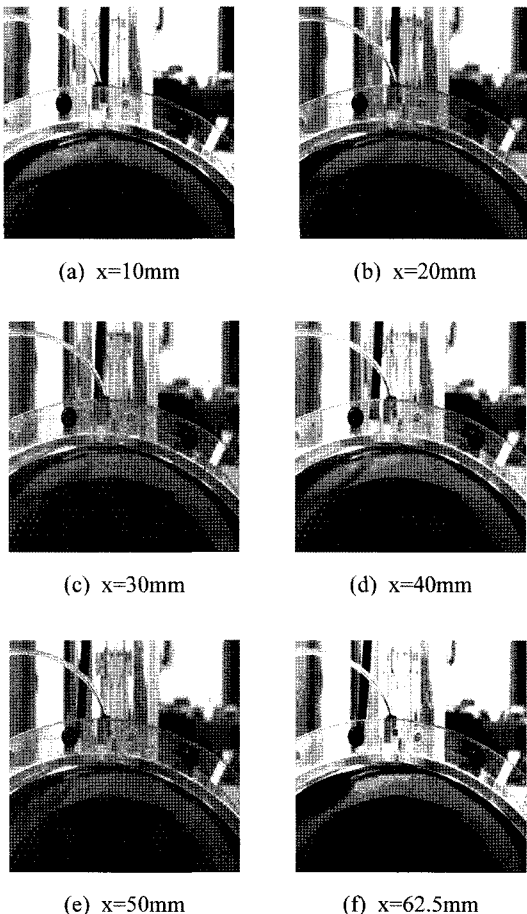


Fig. 10 Visualization of flow shape

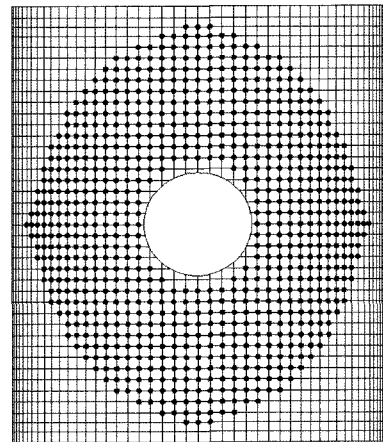


Fig. 11 Pressure measuring points

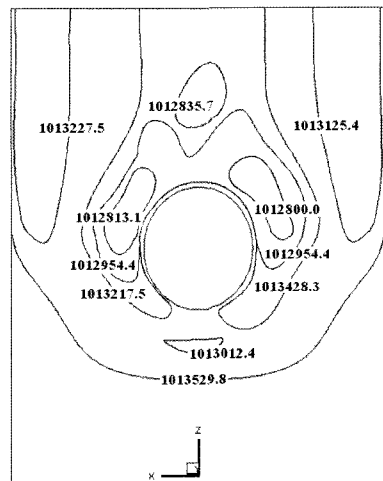


Fig. 12 Pressure distribution resulting from experiment

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

Figure 11은 동체 내부의 압력을 측정하기 위하여 구멍을 낸 형상을 보여 준다. 구멍은 15 mm 간격으로 총 500개를 뚫었다. 압력측정의 이유는 동체 내부의 압력 분포에 따라 유동형태가 결정되기 때문이다. Fig. 12는 측정된 압력을 분포도로 제시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 추기라인 좌우측의 약간 후단쪽과 동체 중심부위의 세 곳에서 대기압 보다 낮은 압력(약 1.0128×10^{-5} Pa)이 형성되었다. 이외의 부위에서는 대기압 보다 약간 높은 압력분포를 나타내었다. 이것은 가시화 실험에서 나타났던 가시화 연기를 벽면 쪽으로 향하게 한 부압의 영향임을 확인하였다.

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.

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 초음파 측정(UT)을 하였다. 측정부위 사이의 간격은 5.08 cm(2in)이었다. Fig. 13은 UT 결과에 따른 동체두께 감육 형상을 보여 준다. 동체의 초기 설계두께는 14.29 mm(0.5625in)이었으며 측정된 두께에 따라 8단계로 구분하여 색칠을 하였다. 밝은 색은 감육이 많이 진행되어 두께가 얇게 측정된 부위이고 진한 색은 감육이 심하지 않은 부위이다.

Figure 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 유동

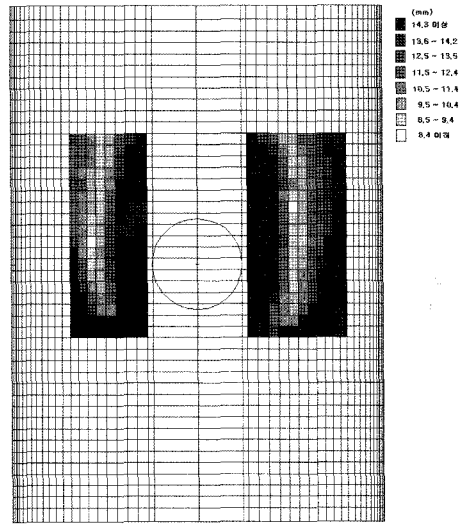


Fig. 13 Wall thinning configuration

이 중심으로 이동된다는 사실을 알 수 있다. 이러한 결과에 근거하여 각 방향의 국부유속과 비교한 결과, 동체 벽면에 수직으로 부딪히는 국부유속을 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 감육 현상과 거의 흡사한 경향을 보였다.

이에 따라 급수가열기 동체 벽면의 감육현상은 동체 내부로 들어 온 추기중기가 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. 개선된 새로운 충격판 모델

한편, 추기노즐을 통해 유입된 유체는 충격판에 부딪친 후 충격판의 형상을 따라 흐르지 않고 급수가열기 동체의 일정부위에서 박리가 일어난다. 이후 급수가열기 동체에 충돌하며 충돌부위는 일정구간에서 집중적으로 나타남을 유동가시화실험과 압력의 측정 및 수치해석을

통해서 알 수 있었다.

수치해석 및 실험결과와 실측데이터의 비교를 통하여 나타난 결과를 적용·검토하여 유동가속부식을 막기 위한 새로운 충격판 모델을 검토하였다. 동체벽면으로 향하는 유동이 감육의 주된 원인이었으므로 새로운 충격판 모델은 그 유동방향을 변화시키는 것을 목적으로 하였다. 유동방향을 변화시키지만, 기존의 충격판을 유지하여 설치할 수 있으며 추기노즐로 유입되는 유동에 미치는 영향을 최소화 할 수 있도록 충격판 위에 다공충격판을 추가시키는 방법을 선택하였다.

5.1 모델의 선정

개선된 충격판의 모델은 다음의 사항을 고려하여 선정하였다.

- (1) 추기노즐에서의 유속과 압력에 미치는 영향을 최소화 한다.
- (2) 기존의 충격판을 유지하면서 동체에 미치는 유동을 변화시킨다.
- (3) 설치가 간단해야 한다.
- (4) 유지와 보수에 투입되는 비용이 적어야 한다.
- (5) 설치 후 예상치 못한 문제가 발생할 경우에 제거가 쉬워야 한다.

위의 조건을 고려하여 선정된 충격판의 형상은 다공

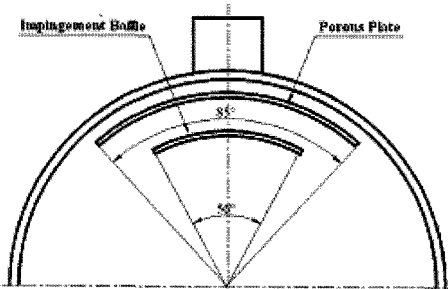


Fig. 14 Schematic diagram of improvement in impingement plate

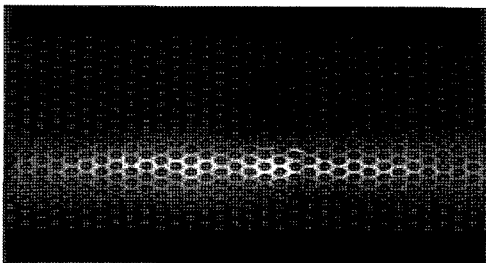


Fig. 15 Improvement of porous plate

판(porous plate)으로 선택하였으며 가시화 실험에서 나타난 유동의 형태를 고려하여 급수가열기 동체모형 내부에 Fig 14와 같이 설치하였다. 또한 다공충격판의 형상은 Fig. 15와 같다.

5.2 모델의 해석

다공충격판이 추가된 해석 모델의 연구에서는 급수가열기 내부에서 추가된 새로운 다공충격판의 모델이 기존의 충격판만 존재했던 모델과 비교하여 동체 감육현상을 완화시키는지 해석을 통하여 살펴보고자 하였다. 또한 추가된 다공충격판이 충격판과 동체 사이의 어느 위치에 있을 때 감육현상을 막을 수 있는지에 대해서도 살펴보고자 하였다.

이 수치해석을 위하여 Fluent를 사용하였고, 먼저 Gambit 프로그램을 사용하여 기존의 충격판 모델에서 다공충격판을 새로이 추가하여 해석모델을 그리고 격자(mesh)를 구성하였다. 단일체적으로 짜여진 모델의 격자

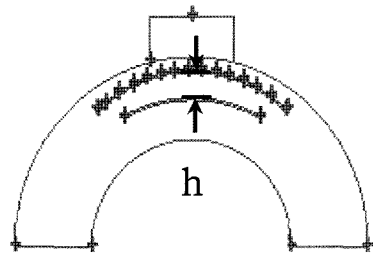


Fig. 16 Place of multi-hole impingement baffle

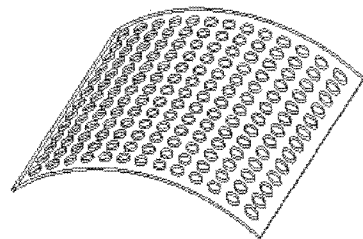


Fig. 17 Multi-hole impingement baffle

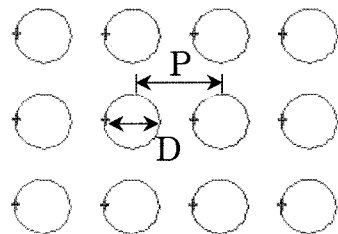


Fig. 18 Diameter and pitch of multi-hole impingement baffle

수는 각 380,000여개로 구성되었다.

이번 해석에서는 새로운 다공충격판의 위치에 따른 감육의 정도를 기존의 충격판 모델과 비교하여 살펴보고자 하였기 때문에 일정한 크기(40 mm, P64 mm)로 배치하여 해석을 수행하였다.

이와 같이 규격이 일정한 다공충격판을 Fig. 16, 17, 18에서 보는 바와 같이 충격판을 기준으로 급수가열기 동체쪽에서 3 cm, 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm로 배치하여 각각 해석을 수행하였다. 사용한 경계조건, 물성치, 유동의 조건은 기존의 충격판 모델에서 적용한 해석의 조건을 동일하게 주었다.

5.3 모델의 실험

검토된 결과를 토대로 다공충격판을 제작하여 지금까지의 실험과 동일한 방법으로 유동가시화 실험과 동체의 면압 측정실험을 실시하였다. 다공충격판은 구멍의 크기와 피치가 따라서 Table 3과 같이 다양하게 준비하였으며, 유동가시화 및 압력측정 실험에서 우수한 결과를 보여주는 것을 선택하여 재 실험을 수행하였다.

5.4 다공충격판의 선정

여러 종류의 다공충격판을 실험한 결과, 구멍의 크기가 크고 피치가 작으면 다공충격판 자체의 강도에 문제점이 발생할 우려가 있고 충격판에서 반사된 유동을 그대로 통과시켜 동체에 충돌하는 것을 알았다. 그리고 구멍이 작고 피치가 크면 추기노즐내의 압력이 상승하며, 추기노즐에서 유입된 유동을 통과 시키지 못하고 반사를 하였다. 유동가시화 실험에서 $\phi 5 \times P8$ mm, 개구율 35%의 다공충격판이 가장 좋은 유동 현상을 나타냈으며, 설치 높이는 기존의 충격판 위에서 20 mm의 간격을 두고 설치하는 것이 가장 좋은 결과를 보였다. 개선된 다공충격판의 형태는 Fig 15와 같이 충격판에서 반사된 유동이 다공충격판의 막힌 날개부분에 충돌한 후 동체의 아래 부분으로 떨어지도록 만들었다.

5.5 모델의 해석 결과

기존의 충격판 모델에서 급수가열기 동체 벽면의 감육 현상은 동체 내부로 들어오는 유동 중 동체 벽면을 향해 수직으로 흐르는 방향의 속도와 압력에 밀접한 연관성을 갖는다는 사실을 알 수 있었다. 이 사실을 통하여 충격판과 급수가열기 동체의 감육예상 부분에서 압력과 속도를 비교해 보았다.

Figure 19는 동체벽면에 설치된 충격판이 기존의 충격판만으로 설치된 모델로 동체벽면을 향하는 동압에 관한 해석결과이고, Fig. 19는 기존의 충격판 위에 다공충격판을 위치에 따라 설치한 모델로 동체벽면을 향하는 동압에 관한 해석의 결과이다. Fig. 19와 같이 다공충격판이 없고 충격판만 있는 경우의 노즐을 통과한 유체는 충격판에 반사되어 노즐 주위에 높은 동압을 형성하였다.

그런데 Fig. 20과 같이 다공충격판이 충격판의 위쪽으로 거리가 3 cm, 6 cm인 경우에 있어서는 충격판과 다공충격판 사이의 거리가 좁아서 다공충격판의 역할을 제대로 수행하지 못하였고, 오히려 노즐 뒷부분에 와류가 형성되어 동압이 더 크게 형성되었다. 반면에, 충격판의 위쪽으로 거리가 12 cm, 15 cm인 경우는 노즐에서 나오는 유체는 고무 퍼졌으나 다공충격판과 동체부 사이가 좁아서 다공충격판을 통과하지 못한 유체는 바로

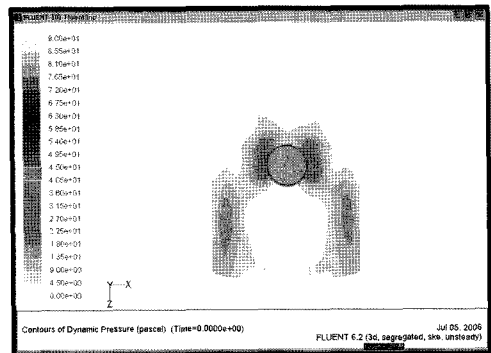


Fig. 19 Dynamic pressure analysis without multi-hole impingement baffle

Table 3 Example of porous plates

Spec. (mm)	Open ratio (%)	Spec. (mm)	Open ratio (%)	Spec. (mm)	Open ratio (%)
$\phi 3 \times P4$	51	$\phi 6 \times P8$	51	$\phi 10 \times P12$	63
$\phi 4 \times P7$	29.6	$\phi 8 \times P12$	25.8	$\phi 11 \times P15$	49
$\phi 5 \times P8$	35.4	$\phi 9 \times P15$	32.6		

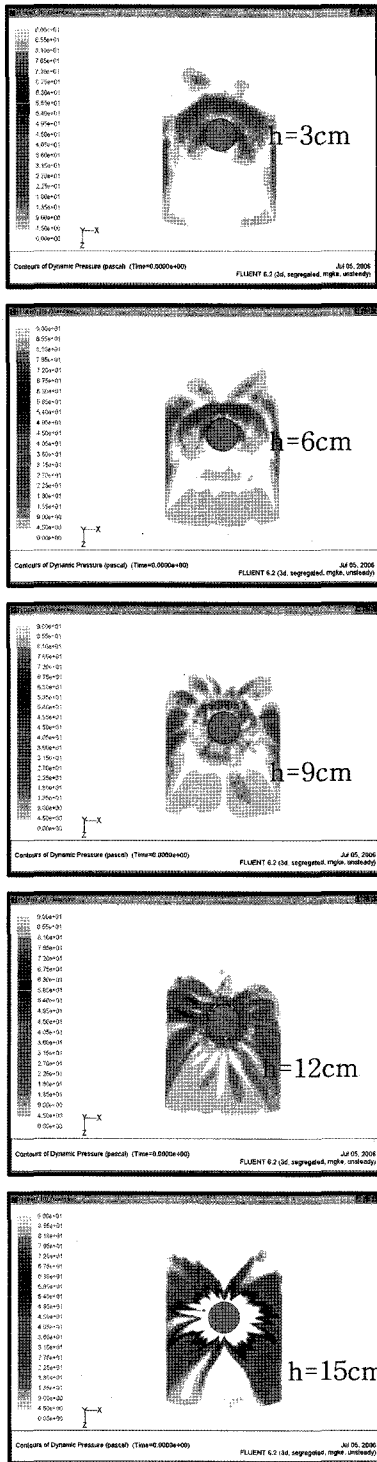


Fig. 20 Dynamic pressure analysis according to the position 'h' between multi-hole impingement baffle and impingement baffle

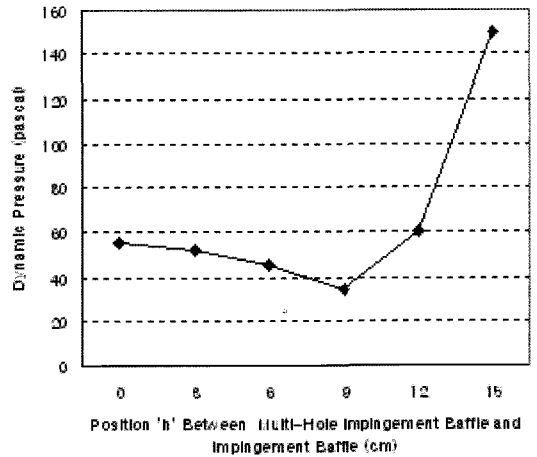


Fig. 21 Dynamic pressure analysis

동체벽면으로 향하여 큰 동압을 형성하였다.

Figure 20에서 특히 각각 동압의 최고치 중 충격판의 위쪽으로 거리가 9cm가 되는 곳에서는 노즐을 통과한 유체는 다공충격판을 통과하면서 적절히 퍼져 있는 것을 확인할 수 있다. 통과한 유체는 충격판에 반사되어 다시 다공충격판의 방해와 입구 쪽에서 들어오는 유체의 영향을 받아 동체부로 향하는 양이 줄어들어서 동체부의 최대 동압이 가장 작은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 충격판으로부터의 거리가 9cm에서 다공충격판을 설치하면 동체 벽면으로 향하는 속도가 감소하여 감속 현상의 완화를 예상할 수 있다.

Figure 19, 20에서 보는 것과 같이 다공충격판이 있을 때와 없을 때의 동압분포를 분석해 보면 다공충격판이 없을 때에는 동체 내에 특정 부분에 큰 압력을 형성하는 반면, 다공충격판이 있을 때에는 동체 내에 동압이 분산되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 21은 다공충격판을 충격판으로부터 임의의 위치에 설치함에 있어서 추기되는 유체 유동의 상태가 어떠한지를 동체 주변에서의 동압분포를 그래프로 나타낸 것이다. 이로써 충격판으로부터 거리(h)가 9cm인 위치에 다공충격판을 설치할 때, 동체주변의 동압이 최소가 됨을 확인할 수 있다.

5.6 개선된 다공충격판의 실험결과

5.6.1 유동가시화실험의 결과

추기노즐을 통과하여 동체내부로 유입된 공기는 유동가시화 실험에서처럼 다공충격판을 통과한 후, 충격판과 충돌하는 모습을 볼 수 있다. 그리고 충돌 후 반사되

어 다공충격판의 막힌 부분과 충돌하여 급수가열기 모형의 아래 부분으로 흐르는 것을 보였다. 따라서 기존의 충격판에서 발생한 동체부와의 충돌은 미미한 것으로 판단된다. Fig. 22의 (a)-(f)는 추기노즐의 중심에서부터 동체 벽면쪽으로 10 mm씩 이동하면서 유동가시화 실험을 실시한 모습이다. (a)-(e)까지는 다공충격판을 통과한 유동이 충격판에 반사한 후, 다공충격판의 막힌 부분에 부딪쳐서 아래 부분으로 반사되는 것을 보여준다. (f)는 동체 벽면과 다공충격판 사이로 유동이 형성되는 것을 나타낸다.

이로써 가시화 실험에서 나타난 결과는 동체벽면에 부딪치는 직접적인 유동이 상당부분 차단되었으며, 충격판에서 반사된 유동이 아래 부분으로 흐름으로써 전열관 다발에도 영향을 미치지 않는다는 결과를 나타냈다.

5.6.2 압력실험의 결과

압력측정은 유동가시화실험의 결과를 통해 밝혀진 동체의 벽면침식부에 미소 압력공을 설치하여 압력을 측정하였다. 차압계로부터 측정된 압력은 신호조정기(Signal Conditioner)를 거쳐 지시계와 컴퓨터에 설치된 AD Board로 전달되도록 하였다. 지시계는 육안으로 확인할 수 있도록 하고, AD Board를 통해 전달된 압력은 NISA의 Lab VIEW프로그램에 의해 실시간으로 저장할 수 있도록 하였다. 각 압력 측정점에서의 결과를 정리하면 Table 4와 같다. 결과를 보면 추기노즐의 주변에서는 여전히 부압이 형성되었으나 압력값의 차이는 매우 적었다. 또한 측정점 전체에서 압력차이가 심하지 않고 압력

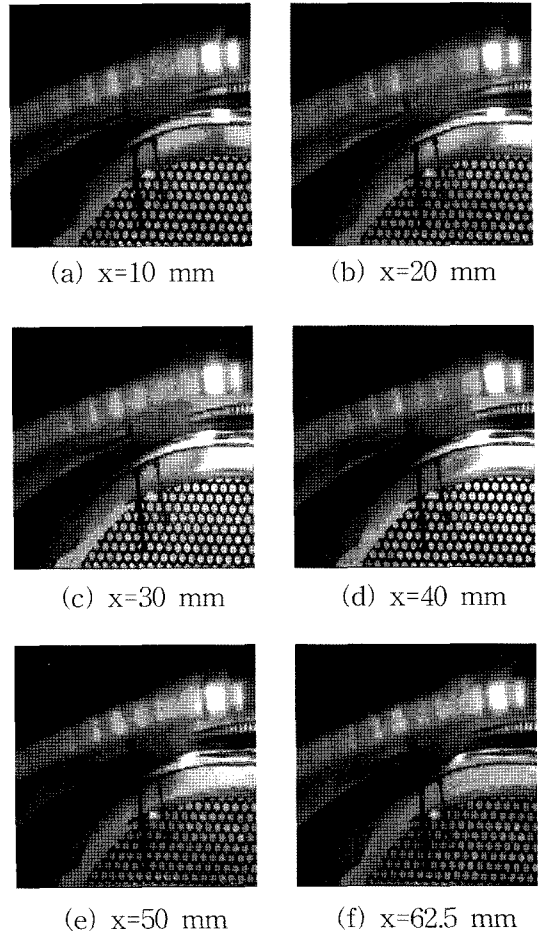


Fig. 22 Flow visualization experiment with multi-hole impingement baffle

Table 4 Average pressure at measured points

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1	-0.7	-1.6	-1.1	-1.4	-1.4	-1.4	-1.4	-1.8	-1.2	-1.9	-0.2	0.0
2	0.3	0.3	0.3	0.1	0.0	0.0	0.1	-0.3	-1.0	-1.4	-1.5	-1.7	-1.5	-1.1	-0.7	-0.1	0.0	0.1
3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.5	-0.5	-0.2	-0.	0.1	0.1	0.1
4	0.3	0.3	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
5	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0
6	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0
7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
8	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
9	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
10	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

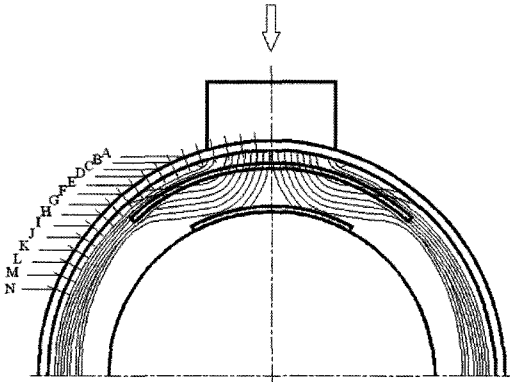


Fig. 23 Sketch of internal flow by improvement in impingement baffle plate

이 고르게 나타났다.

이러한 사실은 가시화 실험에서 나타난 것처럼 동체로 반사되는 유동이 차단되었음을 확인할 수 있는 사항이며, 개선된 다공충격판의 첨가로 인한 효과가 주효했음을 알 수 있는 것이다.

5.7 개선된 다공충격판에 대한 실험 결과의 검토

개선된 충격판 모델을 이용한 실험결과는 추기노즐을 통해 유입된 유체가 충격판에 부딪힌 후 다공충격판의 막힌 부분과 부딪쳐 아래로 흐르는 것을 유동가시화 실험과 압력의 측정으로서 확인할 수 있었다. 그리고 추기노즐의 벽면으로 흐르는 유동은 노즐의 출구 부분과 다공충격판 사이에서 주위에 부압을 형성시키는데, 그 압력의 차이는 작은 것으로 나타났다.

가시화 실험과 압력측정 실험을 통하여 나타난 결과는 Fig. 23과 같이 동체 벽면에 형성되는 충격판 주위의 내부유동단면을 스케치 할 수 있었으며, 이는 압력측정 값과 유동가시화실험의 정성적인 값들을 참고하여 형상화를 나타내 보인 것이다. 이처럼 실험을 통해 나타난 개선된 다공충격판의 실험 결과는 기존의 충격판 보다 개선된 다공충격판을 첨가하는 것이 아주 효과적임을 입증하였다.

6. 결 론

원자력 발전소 2차측의 고압터빈에서 추기되는 고온, 고압의 2상 증기로 인하여 급수가열기 내벽이 감육되는 현상을 유체유동 측면에서 규명하기 위한 연구를 수행

하였다. 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 전열관 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 흐름정체가 발생하는 부위에서 감육이 가장 심하게 발생한다고 알려진 일반적인 사실과도 잘 일치하였다.

또한 노즐에서 내려오는 유동에 의한 동체부의 감육현상을 완화하기 위해 충격판 위쪽에 다공충격판을 추가로 설치하여 해석과 실험을 진행하였다. 해석의 결과 다공충격판의 특정위치부분에서 동체벽면을 향하는 속도벡터의 크기가 기존의 충격판만 있던 모델보다 감육의 정도가 작게 나왔다. 상대적으로 감육의 정도가 작게 나타나는 위치를 찾아 충격판 위에 새로운 다공충격판을 사용하면 동체감육현상을 완화할 수 있을 것이라고 생각된다. 개선된 충격판을 이용한 실험의 결과로 추기노즐의 벽면을 흐르는 유동이 노즐의 출구부분과 다공충격판 사이에서 주위에 여전히 부압을 형성시키지만 압력의 차가 기존의 충격판 모델의 경우와 비교했을 때 상당히 작아 개선된 충격판이 기존의 충격판보다 효과적임을 입증할 수 있었다.

해석과 실험을 통하여 다공충격판의 효과는 입증할 수 있었으나 다양한 피치와 구경의 다공충격판을 통하여 다공충격판의 최적의 사이즈와 동체와 충격판 사이의 최적의 위치를 찾는 연구가 후속적으로 수행되어야 한다고 판단된다.

이러한 연구결과가 발전소 급수가열기 손상을 사전에 예방할 수 있는 설계개선과 동체감육손상 관리에 유용하게 활용될 수 있을 것이라고 판단된다

후 기

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원 사업으로 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, "고리 1호기 급수가열기 동체측 두께검증 기술검토서", 제 1발전소 기계부 설계반.
- (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) K. H. Kim, K. M. Hwang, T. E. Jin, 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) H. Keller, 1978, "Corrosion and Erosion Problems in Saturated Steam Turbines", AIM Conf., Liege, Belgium, pp. 22~28.
- (7) Von W. Kastner and K. Riedle, 1986, "Empirisches Modell zur Berechnung von Materialabtragen durch Erosionskorrosion", VGB Kraftwerkstechnik, Vol. 66, pp. 1171 ~ 1178.