

# 급수가열기 동체 감육 현상과 완화 방안 및 충격판 설계개선

## Shell Wall Thinning and Mitigation Plan and Design Modification of a Feedwater Heater Impingement Baffle

김경훈<sup>1,✉</sup>, 황경모<sup>2</sup>, 박상훈<sup>3</sup>  
Kyung Hoon Kim<sup>1,✉</sup>, Kyeong Mo Hwang<sup>2</sup> and Sang Hoon Park<sup>3</sup>

1 경희대학교 공과대학 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, KyungHee Univ.)

2 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹 (Korea Power Engineering Co. Inc.)

3 경희대학교 대학원 기계공학과 (Graduate school, KyungHee Univ.)

✉ Corresponding author: kimkh@khu.ac.kr, Tel: 031-201-2509

Manuscript received: 2010.1.13 / Accepted: 2010.4.16

*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 inside feedwater heater installed downstream of the turbine extraction stream line. At that point, the extract steam from the turbine is two phase fluid at high temperature, high pressure, and high speed. Since it flows to reverse direction after impinging the impingement baffle, the shell wall of feedwater heaters may be affected by flow-accelerated corrosion. In this paper, to compare degree of shell wall thinning mitigation rate to squared type with mitigation rate of other type baffle plate, three different types of impingement baffle plate-squared, curved and mitigating type-applied inside the shell. With these comparison data, this paper describes operation of experiments and numerical analysis which is composed similar condition with real feed water heater. And flow visualization is operated for verification of experiments and numerical analysis. In conclusion, this study shows that mitigating type baffle plate is more effective than other baffle plate about prevention of pressure concentration and pressure value decrease.*

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

### 1. 서론

에너지효율 극대화 및 그린에너지의 활성화 등 최근 국내외에서는 여러 요인들로 인해 원자력 발전소의 운전년수가 증가함에 따라 주요기기의 경년열화 관리 및 성능개선을 통한 계속 운전 가능성 여부가 최대 쟁점으로 부각되고 있다.

최근에 건설되고 있는 원전 2 차 계통 기기는 일부 저합금강 재료를 채택하고 있지만, 대부분의

발전소의 계통은 탄소강으로 제작되었다. 탄소강으로 제작된 기기는 유체흐름과 접촉할 경우에 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion)이라는 손상을 받아 두께가 점차 얇아지고 결국에는 기기의 압력경계 부분이 파손에 이르게 된다. 이러한 현상을 감육(Wall Thinning)이라 한다. 유동가속부식이란, 기계적인 손상과는 달리 유체의 흐름과 이에 따른 물질전달의 상승효과로부터 금속표면 산화막의 용해 또는 분리가 가속되어 일어나는 현상을

말한다. 원자력 발전소에서 유동가속부식은 배관에서 주로 문제가 되어 왔으나<sup>1</sup> 가동년수가 증가함에 따라 급수가열기, 습분분리재열기 등과 같은 기기에서도 주요 문제점으로 나타나고 있다.<sup>2</sup>

급수가열기 동체의 국부감육 문제는 고압 및 저압터빈에서 추기되는 증기가 전열관 손상을 방지하기 위하여 설치된 충격판(Impingement Baffle)에 부딪친 후 편향되어 벽면에 재충격을 가하는 유동 때문에 발생하는 것으로 추정되고 있다. 이러한 급수가열기 동체 국부감육 손상은 1990 년 이후에 급증하고 있으며, 가동년수 증가에 따라 발생빈도는 점차 증가하고 있다.

실제로 1999 년 5 월 미국의 Point Beach 1 호기에서는 급수가열기 4 번 동체에서 감육이 발생하여 증기가 누설되는 사고가 발생한 바 있으며,<sup>3</sup> 그 해 11 월에는 미국 Fort Calhoun 원전의 급수가열기 5 번 추기노즐 충격판 주변의 동체에서 심각한 감육손상이 발생되어 침식보강용접(Flush Patch Weld)을 수행하였다.<sup>4</sup> 국내에서도 2000 년 10 월 특정 가압경수로형 원전의 급수가열기 5A 와 5B 에서 유사한 손상을 경험하여 보강용접을 수행한 바 있다<sup>(5)</sup>. 동 문제로 인하여 국내 전체 발전소에서 급수가열기 추기노즐 주변의 동체를 대상으로 두께측정을 하여 국부감육 정도를 확인한 바 있으며, 그 정도가 보강용접을 수행했던 발전소 보다는 심각하지는 않으나 문제발생의 소지가 잠재하고 있음을 확인하였다. 최근 미국을 포함한 국내외 발전소에서는 이를 방지하기 위한 대책수립에 몰두하고 있으나 현재까지는 UT(Ultrasonic Test) 검사를 통한 사후 대책수립이 전부이다.

한편, Kim 등<sup>6,7</sup>은 유동가속부식으로 인하여 급수가열기의 동체가 감육되는 현상의 원인을 유체 유동 관점에서 분석하기 위하여 Fluent 코드를 이용한 수치해석과 모사 실험설비를 이용한 실험을 수행하고 결과를 비교 검토한 바 있으며, 이를 통해 급수가열기 내부에 설치되어 있는 충격판의 형태가 국부감육에 큰 영향을 미치는 것으로 확인하였다. 국내 원전 2 차측의 급수가열기 설계 방식은 대부분 유사하기 때문에 이러한 급수가열기 동체 감육손상은 원전의 안전운영과 급수가열기 건전성 확보 차원에서 중요하게 고려해야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 선행 연구결과를 바탕으로 충격판 형상의 변형 및 급수가열기 내부의 충격판 위에 새롭게 설계된 충격완화판의 도입을 통하여 급수가열기 동체의 감육 현상이 완화되는

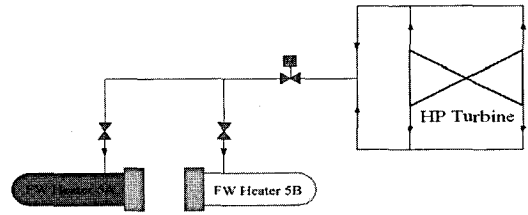


Fig. 1 Schematic diagram of extraction steam system

지를 수치해석과 실험을 수행하여 비교 검토하였다. 따라서 충격판 모델에 대해서 유동해석을 수행하고 실험 결과와 비교함으로써 급수가열기 동체 감육 완화 방안에 대한 설계 개선의 타당성을 검토하였다.

## 2. 해석 및 실험모델 구성

급수가열기 충격판에 반사되는 유체의 유동 및 동체감육 특성 연구를 위하여 상용 전산 수치해석 코드인 Fluent 를 사용하였다.<sup>8</sup> 해석 모델 구성은 국내 가압경수로형 원전 2 차측의 급수가열기 5A 를 대상으로 하였다. 급수가열기 5A 로는 고압터빈에서 추기되는 증기와 습분분리재열기 및 급수가열기 6A 에서 배수되는 물이 동체측으로 유입된다. 따라서 본 연구에서는 고온, 고압 및 고속의 증기가 급수가열기 5A 에 유입되면서 전열관 손상 방지를 위하여 설치된 충격판과 동체에 심한 영향을 미치는 추기라인을 해석대상으로 결정하였다. Fig. 1 은 고압터빈에서 급수가열기 5A, 5B 로 추기되는 추기증기계통의 개략도를 나타낸다.

또한, 급수가열기 실험모델에서는 급수가열기 내부의 실제조건을 재현하여 실험하기가 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 1/2 의 비율로 축소하여 기하학적 상사를 만족시켰으며, 운동학적 상사는 원형에서와 같은 방향의 유동과 모형의 축척비를 모든 방향에 적용하였으므로 같다고 가정하였다. 동력학적 상사를 위하여 적용한 Re 수는 원형에서의 Re 수가 상당히 크기 때문에 근사상사 원칙을 적용하였다. Reynolds 상사를 만족시키기 위한 실험을 수행하기 위해서는 실험에서의 속도가 원형에서보다 대단히 커지는 경우가 발생하고, 이로 인해 현실과 다른 물리적

현상이 나타날 수가 있다. 실제 Potter,<sup>9</sup> Cengel<sup>10</sup> 등은 Re 수가  $10^3$  에서  $10^5$  사이에 있는 경우에는 유동이 Re 수에 둔감하다고 제시하고 있다. 이는  $Re=10^3$  유동은  $Re=10^5$  유동과 비슷하며,  $Re=10^5$  일 경우에 모형과 원형에서 점성효과가 같기 위해서는 모형에서의 Re 수가  $10^3$  에서  $10^5$  사이에 있으면 된다는 것을 의미한다. 다시 말하면 Re 수가 충분히 크다는 것을 입증한 후, 외삽법이나 해석적 방법을 통하여 원형에서의 유동영향을 확인해도 결과는 타당하다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 동력학적 상사를 만족시키기 위하여 Re 수가  $2.8 \times 10^5$  이 되도록 유속을 조절하였으며, 실험 결과를 수치해석 결과로 검증하고 수치해석 모델을 원형과 동일한 크기로 확대하여 해석결과를 도출하는 방식을 채택하여 레이놀즈 상사법을 적용한 역학적 상사(Dynamic Similitude)를 성립시켰다. 역학적 상사가 이루어질 경우 다른 유체로 실험을 하여도 무방하다는 것을 의미한다.

**2.1 해석모델 및 해석방법**

Fig. 2 는 해석대상으로 결정한 급수가열기 5A 의 반단면도를 보여준다. 해석범위는 그림에서 볼 수 있듯이 동체 상단의 절반과 추기라인의 유량조절밸브 후단을 대상으로 하였으며 충격판을 동체 내부에 모델링하였다. 동체 내부에 있는 전열관은 관심대상이 아니므로 해석범위에 포함시키지 않았다. 수치해석에서, 동체 모델 벽면의 직접적인 압력 측정은 수직 방향의 압력만 측정되는 것이 아니기 때문에, 동체의 중심으로부터 98% 지점에서의 압력을 측정하기 위하여 2 단 체적(Double Volume)으로 형성된 해석 모델을 구성하였다. Fig. 3 은 고압형 급수가열기의 해석 모델 격자 구성을 보여준다. 실험 장치가 비대칭형 형상이기 때문에 비정방형 격자모델로 구성하였으며, 총 격자수는 약 120 만 개 정도로 구성하였지만 충격판의 형상에 따라 약간의 차이가 있다.

작동유체는 1 atm 에 대한 포화조건에서의 15℃ 공기로 가정하였다. 입력 경계조건으로 사용되는 추기라인의 유속은 균일속도 조건을 적용하였으며 속도계산에는 발전소 2 차측의 열평형도를 이용하였다. 이외에 해석에 사용된 경계조건과 물성치는 Table 1 과 같다.

급수가열기 추기노즐로 유입되는 증기의 Re 수를 평가하면 약  $2.81 \times 10^5$  이고, 추기증기는 충격판에 부딪친 후 모든 방향으로 반사된다. 따라서 해

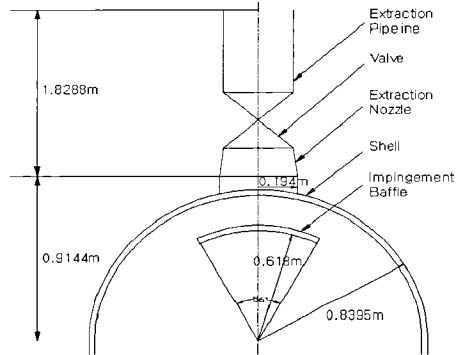


Fig. 2 A Half cross-sectional view

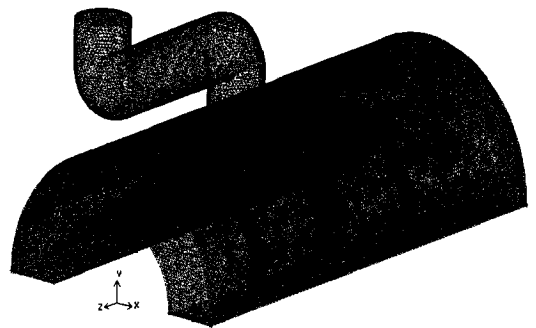


Fig. 3 Modeled Geometry & Cell Divisions

Table 1 Boundary Conditions

| Items                      | Unit              | Value                 | Remarks  |
|----------------------------|-------------------|-----------------------|--|
| Extraction Nozzle velocity | m/s               | 14.51                 | Application for analysis result by thermal equilibrium |
| Density                    | kg/m <sup>3</sup> | 1.29                  | 1atm, 15℃ air  |
| viscosity                  | kg/m-sec          | $1.98 \times 10^{-5}$ | 1atm, 15℃ air  |
| Temperature                | ℃                 | 15                    | air  |

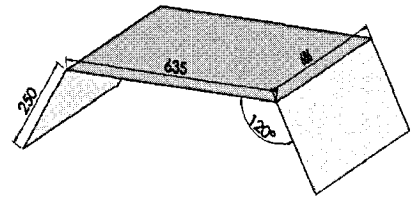
석대상 모델 내부의 구조와 열유동 조건을 고려하여 물리적으로 적절한 수치해를 얻고자 급수가열기 내의 유동을 3 차원, 비정상상태, 압축성 및 난류로 간주하였다.

난류모델에는 Constant Viscosity model 과 k-ε model, RNG k-ε model 등이 있는데 k-ε model 과 RNG k-ε model 은 난류 유동 해석에 많이 쓰이고 있는 모델로서 시간변화에 따른 와류점성(Eddy Viscosity) 특성과 Re 수가 높은 유동의 특성을 보다 정확하게 예측한다. 본 연구에서의 유동특성은 k-ε model 보다 RNG k-ε model 이 더 정확하게 예측

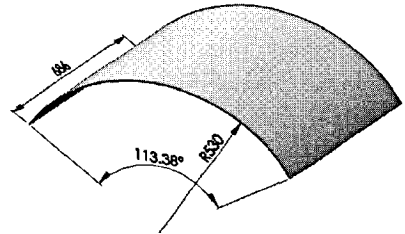
하는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 각 난류모델의 특성과 급수가열기 내부유동의 특성을 고려하여 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해 본 연구에서는 RNG(ReNormalized Group) k-ε model 를 선택하였다.

**2.2 실험모델 및 실험**

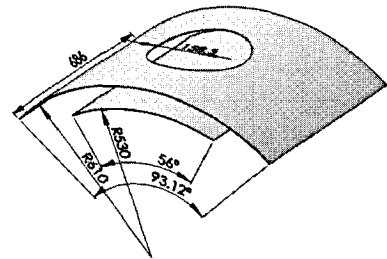
본 실험에서는 급수가열기 추기노즐 주변동체의 유동특성을 알아보기 위해 실제 급수가열기의 1/2 축소 실험모델을 Fig. 4 와 같이 제작하였다. 실험장치의 구성은 크게 급수가열기 동체 모형, 유량 공급용 송풍기, 배관, 측정 장치로 구성되어 있다. 급수가열기 동체 모형은 내부유동을 관찰할 수 있도록 투명 아크릴로 제작하였고, 실제로 국내 원자력 발전소에서 사용되고 있는 충격판 형상인 평판충격판 혹은 각형충격판을 Fig. 5 의 (a)와 같이 제작하였다. 평판충격판의 경우는 각형충격판과 유사한 형태로서 충격판의 상판이 동일하다. 따라서 본 연구에서는 범용의 형태인 각형충격판을 선택하였다. 또한 동체감옥을 완화하기 위한 형상인 곡률충격판과 충격완화판을 각각 Fig. 5 의 (b), (c) 와 같이 제작하여 설치하였다. Fig. 6 은 급수가열기 동체 벽면에서의 압력분포를 살펴보기 위하여 급수가열기 모형인 아크릴 동체 상에 정압공 511 개를 뚫은 것이다. 데이터 수집 장치로는 LabVIEW 에서 제공하는 Wall Static 측정기능과 Pitot Tube 측정 기능을 이용하여 DAQ 시스템을 구축하고, 센서로부터의 출력신호를 받아 데이터를 수집, 분석할 수 있도록 구성하였다. 추기라인과 동체에 설치된 피토프로브로부터 속도를 측정하고, 실험 속도에 이를 때까지 배관에 설치된 유량 조절부에서 유량을 조절하였다. 유동이 안정된 후 동체에 설치된 압력공을 통해 각 위치에서의 압력을 측정하고, 이를 데이터화 하여 분석하였다. Fig. 7 은 DAQ 시스템을 나타낸다.



(a) Squared Type



(b) Curved Type



(c) Mitigating Type

Fig. 5 Shape of Impingement Baffle Plate

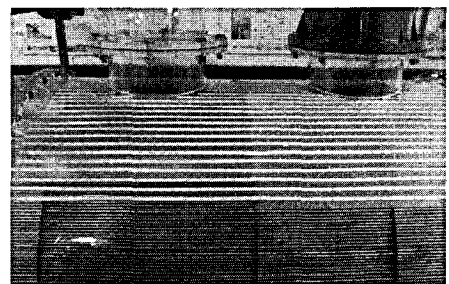


Fig. 6 Pressure Measuring Hole

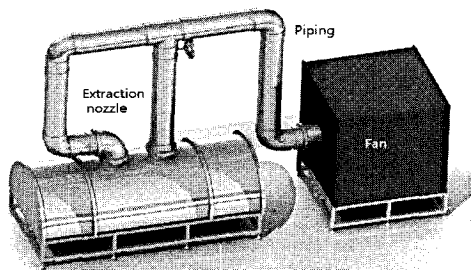


Fig. 4 Feedwater Heater Model

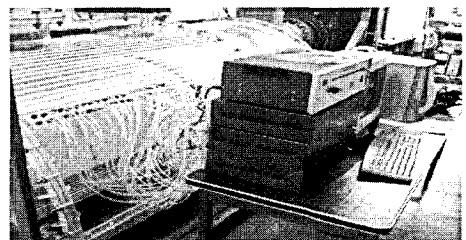


Fig. 7 DAQ System(Data Acquisition System)

### 3. 해석 및 실험결과 토의

#### 3.1 수치해석 결과

추기노즐을 통하여 동체측으로 유입되는 추기 증기는 급수가열기로 들어가면서 전열관 손상방지를 위하여 설치된 충격판에 부딪치고, 반사된 증기는 다시 동체 벽면에 영향을 미쳐 동체 벽면에 감육현상을 유발시킬 수 있다. 급수가열기의 감육현상의 완화를 위한 방안으로 충격판 형상을 변화시키는 방안과 급수가열기 내부에 추가로 충격 완화판을 설치하는 방안을 고려하여 Fluent 로 수치 해석을 진행하였다. 또한, 충격판의 투영면적은 그림에 점선으로 표시하였다.

Fig. 8 과 Fig. 9 그리고 Fig. 10 은 각각 각형충격판, 곡률충격판, 충격완화판이 설치된 고압 급수가열기 추기노즐 주위 동체부분의 유동특성을 Fluent 를 이용하여 해석한 후, Tecplot 을 이용하여 동체 직경의 98% 지점에서의 압력 분포를 나타낸 것이다. 그림의 X 축은 동체의 반경방향, Z 축은 길이방향이다.

Fig. 8 의 각형충격판에서의 수치해석 결과의 경우, 추기증기가 충격판에 부딪친 후 유동방향이 급격히 변환되어 X 축 좌표  $\pm 0.4$  지점에서 급수가열기 동체로 압력 집중 영역이 분포하는 것을 알 수 있다. 또한 압력집중 영역에서의 압력분포도 약 101,477 Pa로 높게 나타났다. 또한 추기노즐 후 단 부인 Z 열 -0.15 부근에서 동체 후단부의 부압으로 인해 압력집중영역이 나타났다.

Fig. 9 의 곡률충격판의 경우에는 압력값이 각형충격판과 비슷하게 나타났다. 그러나 추기증기의 방향이 충격판을 따라 완만하게 변환되어 급수가열기 동체와 충돌하게 되는 지점, 즉 압력 집중 영역이 각형충격판에 비해 급수가열기 동체 하단 부분, X 축 좌표  $\pm 0.5$  지점으로 완만하게 형성되었음을 알 수 있다. 이는 충격판의 형상만으로도 동체 감육으로 인해 손상이 개선될 수 있음을 보여주는 것으로 판단된다.

한편, 감육 손상의 개선을 더욱 향상시키기 위하여 충격완화판을 설치하여 해석을 수행한 결과는 Fig. 10 과 같이 나타났다. 충격완화판의 경우에는 급수가열기 동체 내부에 압력 집중 영역이 형성되지 못하고 압력 분포가 전체적으로 넓게 퍼지는 것을 알 수 있다. 그리고 동체 내부의 체적인 압력 수치도 각형충격판, 곡률충격판에 비하여 낮게 나타나고 있어서 급수가열기 동체의 감육 손상 개선에 긍

정적인 영향을 미칠 수 있을 것이라 판단된다.

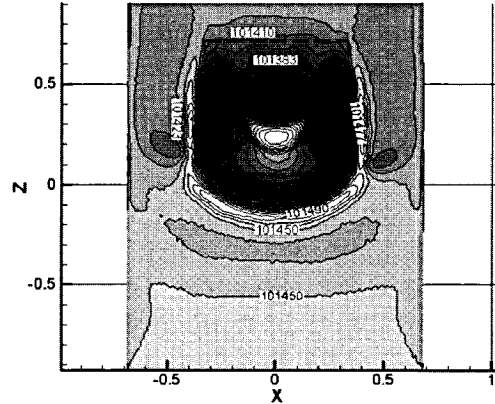


Fig. 8 Pressure Distribution of Squared Type Impingement Baffle Plate

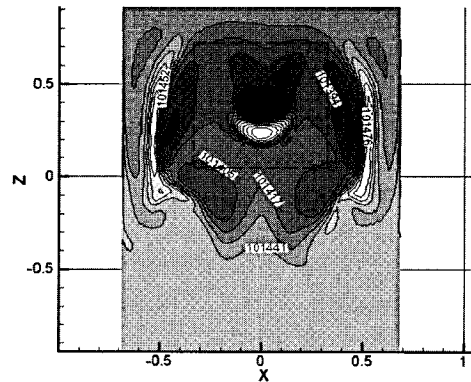


Fig. 9 Pressure Distribution of Curved Type Impingement Baffle Plate

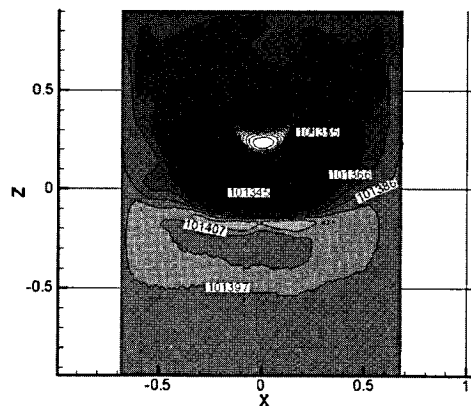


Fig. 10 Pressure Distribution of Mitigating Type Impingement Baffle Plate

**3.2 실험 결과**

본 절에서는 실험을 통해 얻어진 데이터를 정리한 후 결과를 분석하였다. 수치해석 결과와 실험결과를 비교하기 위하여 수치해석과 같은 형상이 되도록 데이터를 위치시켰으며, 실험 결과간의 비교와 데이터 해석을 쉽게 하기 위하여 압력 값을 절대 기준에 따라 색을 차등적으로 적용하였다.

Fig. 11 은 각형충격판이 설치된 급수가열기 모델에서 추기노즐 주위 동체부분의 압력공을 통해 측정된 압력분포를 정리한 것이다. 실험결과에서 나타난 동체 벽면의 압력분포를 살펴보면, 전열관을 보호하기 위한 각형충격판에 의해 반사된 유체가 급수가열기 동체의 일정부위, 그림의 N 열부터 R 열까지 높은 압력으로 집중되어 나타남을 알 수 있다. 이 결과로 기존의 충격판 모델의 실험에서 나타난 급수가열기의 동체부의 감육은 추기노즐을 통과한 증기가 충격판을 따라 흐르지 않고 반사됨으로써 급수가열기 동체부의 감육을 발생시킨다는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 곡률충격판이 설치된 급수가열기 모델에서 추기노즐 주위 동체부분의 압력공을 통해 측정된 압력분포를 정리한 것이다. 곡률충격판은 각형충격판처럼 급격한 모서리 부분이 존재하지 않고 곡면으로 되어 있어서 유체의 유동이 곡면을 타고 내려 오면서 각형충격판보다 급수가열기 동체에 부딪치는 충돌 지점이 각형충격판보다 아래쪽인 Q열 이후에 발생하였고, U열 부근에서 압력 집중영역이 나타나는 것을 알 수 있다.

한편, 충격완화판이 설치된 급수가열기 모델에서의 동체 압력 분포의 결과인 Fig. 13을 살펴보면 Z 열 이후에서 압력 집중영역이 발생하였으나, 곡률충격판보다 동체 내부의 전체적인 압력차이가 심하지 않고 압력 분포도 고르다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 충격완화판에서의 급수가열기 동체 감육 완화 정도가 각형충격판과 곡률충격판에 비해 더 향상되었음을 나타내는 것으로 판단된다.

**3.3 유동 가시화 실험 결과**

본 절에서는 수치해석과 실험을 통해 얻어진 결과를 검증함과 동시에 추기노즐과 급수가열기 동체 내부에서의 유체 유동을 검증하기 위하여 유동가시화 실험을 실시하였고, 그 결과를 수치해석 및 실험 결과와 비교해 보았다. Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16 은 추기노즐에서 나온 유체의 유동현상을 보기 위하여 연발생장치의 노즐을 추기노즐의 벽면에

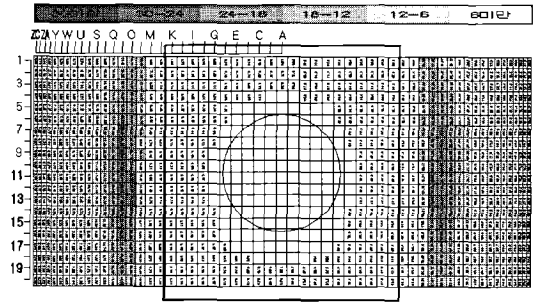


Fig. 11 Pressure Distribution of Squared Type Impingement Baffle Plate

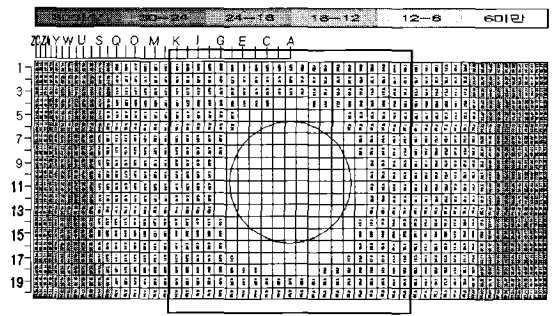


Fig. 12 Pressure Distribution of Curved Type Impingement Baffle Plate

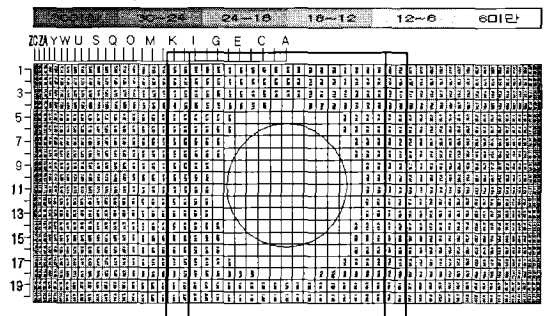


Fig. 13 Pressure Distribution of Mitigating Type Impingement Baffle Plate

위치시켜 유동가시화를 실시한 결과이다.

Fig. 14는 각형충격판을 실험한 결과이며, 그림에서 볼 수 있듯이 연기가 충격판을 부딪힌 후 충격판의 평판부에 거의 달라붙어 흐르다가 평판부의 끝에서 박리가 되는 것을 볼 수 있다. 박리된 유동은 평판부와 거의 평행한 지점에 충돌하고, 동체의 안쪽 곡면을 따라 일부는 유동의 상부에서 와류를 형성하며, 일부는 하부로 떨어지는 것을

볼 수 있다. 즉, 압력 집중 영역이 충격판의 끝부분에 형성되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 15는 곡률충격판에 대한 유동 가시화 실험 결과로서 충격판에 부딪힌 후 곡면을 따라 흐르다가 충격판의 끝에서 박리가 되며, 박리된 후에도 곡률판의 곡률과 비슷한 형태로 유동을 유지하다가 하부 1/3 지점에서 급수가열기 동체 벽면에 충돌하는 것을 보여 준다. 이를 통해 곡률충격판에서의 압력 집중 영역이 동체 하단쪽으로 이동하여 분포함을 검증할 수 있다.

Fig. 16은 충격완화판을 설치한 후 유동가시화 실험을 수행한 결과이다. 곡률충격판에 추가로 설치된 충격완화판 사이로 유입된 공기는 곡률충격판에 충돌한 후 상판의 충격판을 따라 흐르며, 추

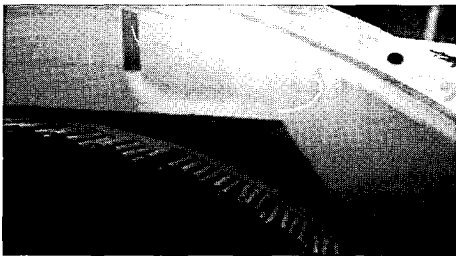


Fig. 14 Flow Visualization of Squared Type Impingement Baffle Plate

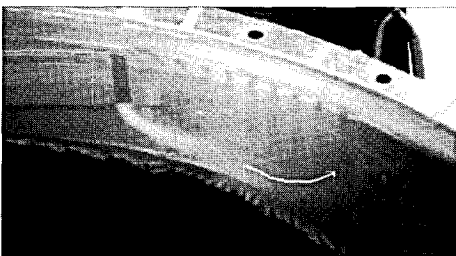


Fig. 15 Flow Visualization of Curved Type Impingement Baffle Plate

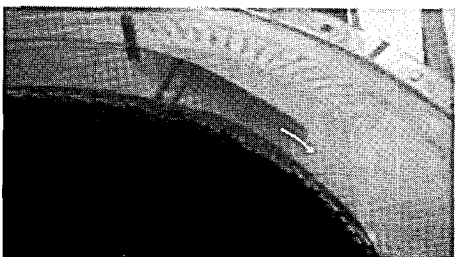


Fig. 16 Flow Visualization of Mitigating Type Impingement Baffle Plate

기노즐의 벽면을 따라 흐르는 공기는 충격 완화판의 유입구 주변에서 형성된 부압의 영향으로 주위 유동이 상부에 충돌한 후 그대로 아래로 흐르는 모습을 볼 수 있다. 이는 충격완화판의 경우, 급수가열기 동체 내부에 압력 집중 영역이 발생하지 않음을 나타내는 것으로 판단된다. 또한, 충격완화판으로 인해 추기증기가 동체에 직접 부딪치지 않기 때문에 압력 절대값이 낮아짐을 알 수 있다.

이러한 결과들을 통해, 유동가시화 실험에서 관찰된 추기증기가 급수가열기 동체 벽면에 충격을 가하는 부위와 수치해석 및 실험에서 나타난 압력 집중 부위가 동일하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 충격판에 충돌 후 급수가열기 동체에 충돌하는 지점은 어느 정도 일정하다는 것도 확인할 수 있었다. 즉, 충격판에 부딪힌 추기증기가 급수가열기 동체의 어느 부분에 집중적으로 손상을 입히는지의 예측이 가능하다는 것을 알 수 있었고, 충격판 설계에 따라 급수가열기 동체 내부 감육으로 인한 손상을 완화시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 3.4 충격판 설계 개선 방안

본 절에서는 실험 및 수치해석의 결과 데이터를 실제 현장의 급수가열기에서 초음파 두께 측정을 통해 얻어진 데이터와 비교 분석하고, 결과 분석을 바탕으로 충격판 설계 개선 방안을 제시한다.

Fig. 17은 수치해석 결과와 현장 데이터인 초음파 두께 측정결과를 비교한 그래프이다. 수치해석 그래프에 사용된 데이터는 추기노즐의 중심에서 동체반경 방향으로 선을 긋고, 이 선상에서 수집된 데이터를 사용하였다. 그래프의 X 축은 추기노즐로부터의 거리를 나타내며, Y1 축은 정압, Y2 축은 벽면의 두께를 나타낸다. 동체 감육 그래프를 살펴보면, 각형충격판 경우의 압력 집중 영역이 실측 데이터의 최대 감육 지점과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서의 수치해석 결과가 실제 현장의 급수가열기에 적용 가능함을 나타내는 것이라 생각된다.

그리고 곡률충격판의 경우에는 수치해석 결과의 예상치와 동일하게 실측 데이터와 각형충격판에 비해 압력 집중 영역이 급수가열기 동체 하단부로 이동하여 분포되는 것을 알 수 있다. 충격완화판의 실측데이터와의 비교에서는 압력 집중 영역이 전혀 발생하지 않음을 확인하였고, 압력수치도 낮아짐을 알 수 있다.

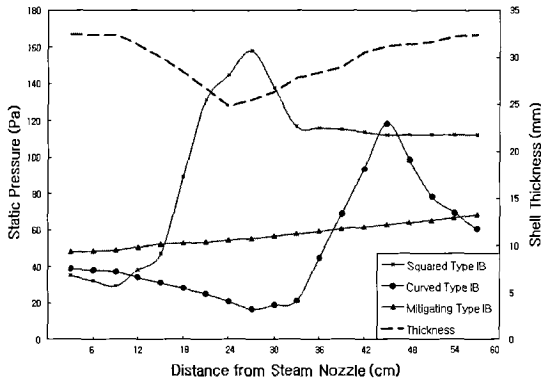


Fig. 17 Comparison Analysis and Shell Thickness

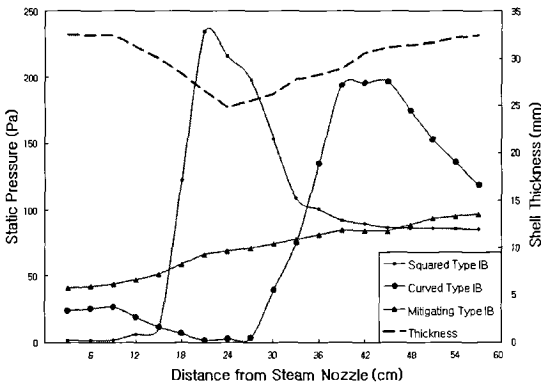


Fig. 18 Comparison Experiment and Shell Thickness

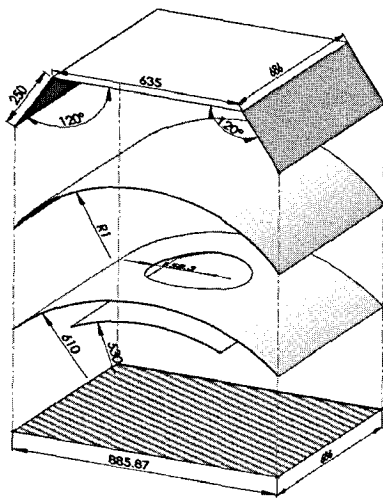


Fig. 19 Projection area of Impingement Baffle Plate

Fig. 18 은 실험 결과와 초음파 두께 측정결과를 비교한 그래프이다. 실험데이터의 선정은 실험결

과를 표로 나타낸 그림(Fig. 11~Fig. 13)에서 10 열에 해당하는 데이터를 선정하여 그래프로 나타냈다. 각형충격판의 경우, 실험데이터의 감속지점과 압력 집중 영역이 중심으로부터 20~24 cm 범위에서 거의 일치하였고, 곡률충격판은 각형충격판에 비해 동체 하단부쪽으로 이동하여 압력 집중 영역이 나타났다. 또한, 압력 값도 각형충격판에 비해 약 50 Pa 정도 낮아졌음을 알 수 있다. 따라서 이것은 급수가열기 동체에 가해지는 충격량이 곡률을 따라서 분산됨과 동시에 압력 절대값이 낮아짐으로서 충격완화 효과가 있음을 입증하는 사항이다. 충격완화판의 경우에는 각형충격판, 곡률충격판보다도 급수가열기 동체 내부의 전체적인 압력 값이 낮았으며 압력 분포 또한 고르게 나타남을 확인할 수 있었다.

본 실험에 적용된 세가지 형상의 충격판은 각형충격판을 기준으로 하여 각각의 투영면적을 동일하게 제작하였다. Fig. 19 는 각형충격판, 곡률충격판, 충격완화판의 투영면적을 나타낸 그림이다.

실험 및 수치해석의 비교와 초음파 두께 측정 결과를 종합해 보면, 동일한 투영면적을 가진 충격판에서 각형충격판과 비교해 봤을 때, 곡률충격판은 동체 내부의 압력 집중영역이 동체 하단부로 이동하는 것으로 나타났고, 압력 분산효과는 그다지 향상되지 않았다. 반면에 충격완화판에서는 압력 분산 효과가 가장 뛰어난 것으로 나타났으며, 급수가열기 동체 감속 완화에 가장 효과적이라 판단된다.

#### 4. 결론

원자력 발전소 2 차측의 고압터빈에서 추기되는 고온, 고압의 추기증기로 인하여 급수가열기 동체 내벽이 감속되는 현상을 유체유동 측면에서 규명하기 위한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 단상 조건에 관한 실험을 실시하였다. 상용 수치 해석 코드인 Fluent 를 이용하여 단상에 대한 수치 해석을 수행하였으며, 급수가열기를 상사한 실험 모델로 실험을 수행하고 압력분포를 비교하였다. 그 결과, 수치해석 결과와 실험 결과에서의 유동 분포는 유사하였으며, 유동가시화 실험의 결과와도 유사하게 나타남을 확인하였다. 따라서 급수가열기 내부로 유입된 추기증기는 충격판에 부딪히고 추기라인 노즐 후단에서 발생한 부압 때문에 동체 벽면에 수직으로 부딪히는 현상도 확인하였



다.

해석 및 실험 결과에 따른 유동특성과 동체 감육의 상관성 검토는 초음파 두께 측정장비를 이용하여 측정된 동체 두께 감육분포 데이터와의 비교를 통해 실시하였고, 감육 완화 방안에 대한 고찰이 검증되었다.

실험 및 수치해석 결과에 따르면, 각형충격판에 비해 곡률충격판과 충격완화판에서 급수가열기 동체 감육 개선 효과가 있음을 확인하였다. 곡률충격판의 경우, 압력 집중 영역이 각형충격판에 비해 급수가열기 동체 하단부쪽으로 이동하여 분포하였고, 각형충격판에 비해 압력 절대값이 작아졌으며, 압력 집중 영역과 주변부위에서의 압력 값에 큰 차이가 없음을 확인하였다. 더욱이, 충격완화판의 경우에는 각형 및 곡률충격판에 비하여 급수가열기 동체 벽면에 가해지는 전체적인 압력 값이 현저히 낮아짐을 확인하였고, 압력 분포 또한 다른 두 충격판 형상에 비해 고르게 분포됨을 알 수 있었다. 이러한 현상들은 유동가시화 실험을 통해서도 검증할 수 있었다. 이를 통해 본 연구의 수치해석 및 실험의 결과가 실제 급수가열기에도 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 발전소의 급수가열기 손상을 사전에 예방할 수 있는 설계개선과 동체감육 관리에 유용하게 활용될 수 있을 것이라고 판단된다.

**참고문헌**

1. Keller, H., "Corrosion and Erosion Problems in Saturated Steam Turbines," AIM Conf., pp. 22-28, 1978.
2. Kastner, W. and Riedle, K., "Empirisches Modell zur Berechnung von Materialabtragen durch Erosionskorrosion," VGB Kraftwerkstechnik, Vol. 66, No. 10, pp. 1171-1178, 1986.
3. Point Beach 1, "Steam Leak From Low Pressure Feedwater Heater," 1999-005, LER, 1999.
4. Fort Calhoun, "Shell Wall Thinning of Feedwater Heater," INPO, OE 10710, 1999.
5. KHNP, "Technical Review Report for Thickness Verification of Feedwater Heater Shell Side of Kori Unit 1," Kori First Plant, Mechanical Department Report No. 3, 2000.
6. Kim, K. H., Hwang, K. M. and Jin, T. E., "Fluid Mixing Analysis for Predicting Shell Wall Thinning

- of a Feedwater Heater," J. of Mechanical Science and Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 173-180, 2005.
7. Kim, K. H., Lee, W. and Hwang, K. M., "A Study on Experiment and Numerical Analysis for Disclosing Shell Wall Thinning of a Feedwater Heater," Transactions of KSME(B), Vol. 31, No. 1, pp. 1-7, 2007.
8. Fluent Inc., "Fluent 6.x Training Notes," 2006.
9. Potter, M. C. and Scott, E. P., "Thermal Science : An Introduction to Thermodynamics, Fluid Mechanics and Heat Transfer," Thomson Books, 2005.
10. Cengel, Y. A. and Cimbala, J. M., "Fluid Mechanics : Fundamental and Application," McGRAW-HILL, 2006.