

# 유동가속부식으로 인한 급수가열기 동체 감육현상 규명과 완화 방안 및 충격판 설계개선에 관한 연구

김경훈<sup>†</sup> · 황경모\* · 김인태\*\*

## A Study on the Shell Wall Thinning by Flow Acceleration Corrosion and Mitigation Plan and Design Modification of a Feedwater Heater Impingement Baffle

Kyung Hoon Kim, Kyeong Mo Hwang and In Tae Kim

**Key Words:** Wall thinning(감육), Flow-accelerated corrosion(유동가속부식), Feedwater heater (급수가열기), Extracting nozzle(추기노즐), Impingement 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 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, four different types of impingement baffle plate-squared, curved, mitigating type and multi-hole 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 and multi-hole type baffle plate are more effective than other baffle plate about prevention of pressure concentration and pressure value decrease.

### 1. 서 론

원전 2차측 급수가열기의 동체에서 국부적으로 발생하는 감육(Wall Thinning)현상은 최근에 부각되고 있는 경년열화기구로서 급수가열기를 장기간 운전함에 따라

나타나는 현상이다. 이러한 감육현상은 유체가 고속으로 흐르는 배관에서 많이 발생되어 왔기 때문에 관련연구도 배관에서만 집중되어 왔으나, 최근에는 동체 국부 감육으로 인한 사건이 국내외에서 빈번히 발생하고 있으며 운전년수 증가에 따라 동사건의 발생빈도는 증가할 것으로 예상된다. 급수가열기내부는 전열관, 방해판 등으로 인하여 복잡한 유동현상이 나타나기 때문에 배관과는 달리 감육손상도 국부적으로 발생하고 있으며, 이에 따른 정확한 원인규명이 필수적이다<sup>(1)</sup>.

발전소에서는 고압 및 저압터빈에서 추기되는 2상의 제트스팀을 이용하여 증기발생기로 공급되는 급수를 가열함에 따라 고압 및 저압 급수가열기 내부는 제트스팀

(2010년 3월 23일 접수~2010년 6월 15일 심사완료, 2010년 6월 24일 게재확정)

\*한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

\*\*경희대학교 대학원 기계공학과

<sup>†</sup> 김경훈, 회원, 경희대학교 공과대학 기계공학과

E-mail : kimkh@khu.ac.kr (산학협력기술연구원)

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

으로 인하여 전열관이 손상되지 않도록 충격판(Impingement Baffle)이 설치되어 있으며, 추기증기는 충격판에 부딪힌 후 벽면에 재부착되는 유동현상으로 인하여 동체 벽면에서 국부적인 감육현상이 발생한다<sup>(2)</sup>. 최근 미국을 포함한 국내의 발전소에서는 이를 방지하기 위한 대책수립에 몰두하고 있으나, 현재까지는 UT(Ultrasonic Test)검사를 통한 사후 대책수립이 전부일 뿐이다<sup>(3)</sup>.

1980년대 후반부터 미국, 프랑스, 캐나다 등에서는 제트스팀의 재부착 현상으로 인하여 급수가열기 동체 내부가 국부적으로 감육되는 손상사례가 발표되어 왔다. 특히 최근에는 운전년수의 증가에 따라 손상횟수가 증가하고 있으며, 국내에서도 동일한 손상이 발생하여 침식보강용접(Flush Patch Weld)<sup>(4)</sup>을 하는 등으로 대응하고 있으나 임시방편에 불과한 실정이다. 따라서 충돌로 인해 분산된 제트스팀의 재부착 현상과 국부 감육현상과의 상관관계를 학술적으로 규명하고, 이를 근본적으로 완화시킬 수 있는 설계개선 연구가 필요하다.

한편, 본 연구의 선행 연구<sup>(5)</sup>에서는 상용 수치해석 코드인 Fluent를 이용하여 급수가열기 동체내부의 유체유동 해석을 수행하였고, 그 결과의 검토를 위하여 급수가열기 추기 노즐 주변의 동체두께 측정데이터를 코드해석 결과에 따른 국부유속과 비교하였다. 또한 선행 연구<sup>(6)</sup>에서는 급수가열기 동체 내부 충격판 주위의 실제 유동현상을 파악하기 위하여, 실험장치를 모사하여 제작하였고, 연 발생장치를 이용한 유동 가시화 실험과 국부유속을 측정하기 위한 실험도 수행하였다. 이러한 선행 연구의 결과로 기존의 충격판 모델의 실험에서 나타난 급수가열기 동체의 국부감육은 추기노즐을 통과한 증기가 충격판을 따라 흐르지 않고 반사됨으로써 감육을 발생시키는 것으로 밝혀졌다<sup>(7)</sup>.

더욱이 동체의 감육현상에 관한 원인을 규명한 연구 후, 후속으로 진행되었던 연구<sup>(8)</sup>에서는 급수가열기의 동체 국부 감육현상을 막기 위해서 추기 유체의 동체 벽면쪽으로 향하는 유동 방향을 변화시키는 방법을 선택하여 동체의 국부 감육현상을 완화할 수 있는지에 대한 연구를 진행하였다. 추기 유체의 유동방향을 변화시키기 위하여 기존의 충격판위에 다공 충격판 및 충격완화판을 추가시키는 방법을 선택하였으며, 그 결과는 기존의 충격판 모델에 비하여 어느 정도 감육손상을 완화시킬 수 있는 새로운 가능성을 찾았다.

그런데 본 연구의 연구대상인 급수가열기 본체에 유입되는 유체는 2상(Two Phase) 상태이며, 2상 제트스팀(Two Phase Jet Steam)에 의한 전열관의 손상을 방지하

기 위하여 설치된 충격판에 의해 2차적으로 발생하는 재부착 유동현상과 이로 인하여 발생하는 국부감육(Local Thinning)과의 상관관계를 규명해야 하며, 이를 개선하기 위한 충격판의 설계변경 연구 및 동체 국부 감육 완화방안에 대해서 검토해야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 원자력 발전소 2차측 급수가열기의 실제 현상상황과 유사한 조건을 조성하기 위하여 습도조절기를 통한 2상(Two Phase)상태를 구현하여 실험을 수행하였으며, 선행 연구결과를 바탕으로 충격판 형상의 변형 및 급수가열기 내부의 충격판 위에 새롭게 설계된 충격완화판과 다공충격판 도입을 통하여 급수가열기 동체의 감육현상이 완화되는지를 수치해석과 실험을 수행하여 비교검토하였다. 즉, 충격판 모델에 대해서 유동해석을 수행하고 실험 결과와 비교함으로써 급수가열기 동체 감육 완화방안에 대한 설계 개선의 타당성을 검토하였다.

## 2. 해석 및 실험모델 구성

충격판에 반사되는 유체의 유동 및 동체감육 특성 연구를 위하여 상용 전산 수치해석 코드인 FLUENT를 사용하였다<sup>(9)</sup>. 해석 모델 구성은 국내 가압경수로형 원전 2차측의 급수가열기 5A를 대상으로 하였다. 급수가열기 5A로는 고압터빈에서추기되는 증기와 습분분리재열기 및 급수가열기 6A에서 배수되는 물이 동체측으로 유입된다. 따라서 본 연구에서는 고온, 고압 및 고속의 증기가 급수가열기 5A에 유입되면서 전열관 손상 방지를 위하여 설치된 충격판과 동체에 심한 영향을 미치는 추기 라인을 해석대상으로 결정하였다. Fig. 1은 고압터빈에서 급수가열기 5A, 5B로 추기되는 추기증기계통의 개략도를 나타낸다.

또한, 급수가열기 실험모델에서는 급수가열기 내부의

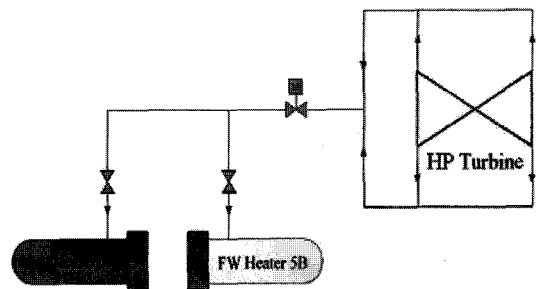


Fig. 1 Schematic diagram of extraction steam system

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 1/2의 비율로 축소하여 기하학적 상사를 만족시켰으며, 운동학적 상사는 원형에서와 같은 방향의 유동과 모형의 축척비를 모든 방향에 적용하였으므로 같다고 가정하였다. 동력학적 상사를 위하여 적용한 Re수는 원형에서의 Re수가 상당히 크기 때문에 근사상사 원칙을 적용하였다. Reynolds 상사를 만족시키기 위한 실험을 수행하기 위해서는 실험에서의 속도가 원형에서 보다 대단히 커지는 경우가 발생하고, 이로 인해 현실과 다른 물리적 현상이 나타날 수 있다. 실제 Potter<sup>(10)</sup>, Cengel<sup>(11)</sup> 등은 Re수가  $10^3$ 에서  $10^5$  사이에 있는 경우에는 유동이 Re수에 둔감하다고 제시하고 있다. 이는  $Re = 10^3$  유동은  $Re = 10^5$  유동과 비슷하며,  $Re = 10^5$ 일 경우에 모형과 원형에서 점성효과가 같기 위해서는 모형에서의 Re수가  $10^3$ 에서  $10^5$  사이에 있으면 된다는 것을 의미한다. 다시 말하면 Re수가 충분히 크다는 것을 입증한 후, 외삽법이나 해석적 방법을 통하여 원형에서의 유동영향을 확인해도 결과는 타당하다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 동력학적 상사를 만족시키기 위하여 Re수가  $2.8 \times 10^5$ 이 되도록 유속을 조절하였으며, 실험결과를 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.

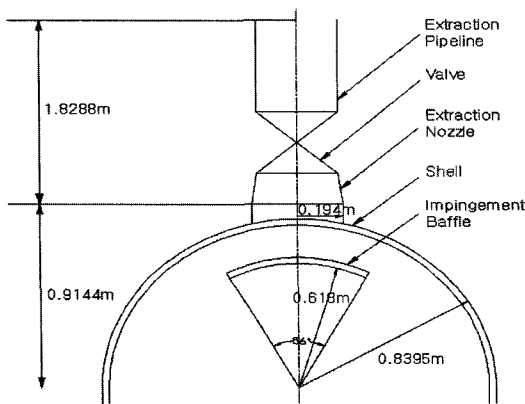


Fig. 2 A Half Cross-Sectional View

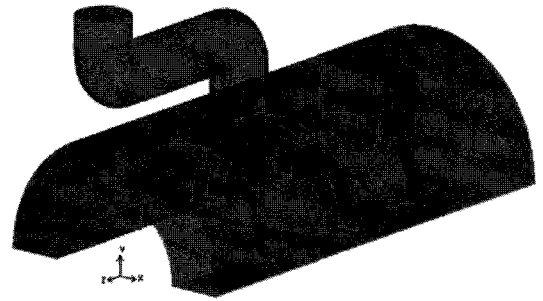


Fig. 3 Modeled Geometry & Cell Divisions

### 2.1 해석모델 및 해석방법

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

2상 유체의 조건을 조성하기 위하여, 작동유체는 1 atm에 대한 100°C의 습증기로 가정하였다. 입력 경계조건으로 사용되는 추기라인의 유속은 균일속도 조건을 적용하였으며, 속도계산에는 발전소 2차측의 열평형을 이용하였다. 이외에 해석에 사용된 경계조건과 물성치<sup>(12)</sup>는 Table 1과 같다.

급수가열기 추기노즐로 유입되는 증기의 Re수를 평가하면 약  $2.81 \times 10^5$ 이고, 추기증기는 충격판에 부딪힌 후 모든 방향으로 반사된다. 따라서 해석대상 모델 내부의 구조와 열유동 조건을 고려하여 물리적으로 적절한 수치해를 얻고자 급수가열기 내의 유동을 3차원, 비정상상태, 압축성 및 난류로 간주하였다.

난류모델에는 Constant Viscosity model과 k-ε model, RNG(ReNormalized Group) k-ε model 등이 있는데, k-ε model과 RNG k-ε model은 난류 유동 해석에 많이 쓰이고 있는 모델로서 시간변화에 따른 와류점성(Eddy Viscosity) 특성과 Re수가 높은 유동의 특성을 보다 정확하

Table 1. Boundary Conditions

Conditions		Items	Units	Values
Common		Steam Temperature in the Extraction Pipeline and the Shell Inlet	°C	100
		Steam Velocity in the Extraction Pipeline	m/sec	14.51
Two Phase	Water	Steam Quality(Vol.)	%	10.7
		Density	kg/m <sup>3</sup>	958.12
		Specific Heat	J/kg·K	4212.87
		Viscosity	kg/m·sec	$2.82 \times 10^{-4}$
	Air	Steam Quality(Vol.)	%	89.3
		Density	kg/m <sup>3</sup>	0.6
		Specific Heat	J/kg·K	2026.73
		Viscosity	kg/m·sec	$1.228 \times 10^{-5}$

게 예측한다. 본 연구에서의 유동특성은 k- $\epsilon$  model보다 RNG k- $\epsilon$  model이 더 정확하게 예측하는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 각 난류모델의 특성과 급수가열기 내부 유동의 특성을 고려하여 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해 본 연구에서는 RNG k- $\epsilon$  model을 선택하였다<sup>(12)</sup>.

## 2.2 실험 장치 및 실험방법

본 실험에서는 급수가열기 추기노즐 주변동체의 유동 특성을 알아보기 위해 실제 급수가열기의 1/2축소 실험 모델을 Fig. 4와 같이 제작하였다. 실험장치의 구성은 크게 급수가열기 동체 모형, 유량공급용 송풍기, 배관, 측정 장치 등으로 구성되어 있다.

급수가열기 동체 모형은 내부유동을 관찰할 수 있도록 투명 아크릴로 제작하였고, 실제로 국내원자력 발전소에서 사용되고 있는 충격판 형상인 평판충격판 혹은 각형충격판을 Fig. 5의 (a)와 같이 제작하였다. 평판충격

판의 경우는 각형충격판과 유사한 형태로서 충격판의 상판이 동일하다. 따라서 본 연구에서는 범용의 형태인 각형충격판을 선택하였다. 또한 동체 감육을 완화하기 위한 형상인 곡률충격판과 충격완화판을 각각 (b), (c)와 같이 제작하였고 동체에 가해지는 압력을 비약적선택하 줄이기 위해 고안된 다공충격판 (d)와 같이 제작하여 설치하였다. 다공충격판의 구멍 개수와 배열은 다양한 모형의 충격판 형상을 수치해석을 통해 선행적선택해검 증한 쇠 본가장 효율적인 모델을 채택하였다<sup>(13)</sup>. 또 유체가 직접적으로 전열관 쪽으로 유입되는 것을 방지하기 위하여 상판과 하판의 다공의 배열을 엇갈리게 설계하여 추후 전열관 파손에 영향을 미치지 않도록 하였다.

Figure 6은 급수가열기 동체 벽면에서의 압력분포를 살펴보기 위하여 급수가열기 모형인 아크릴 동체 상에 정압공 511개를 뚫은 것이다.

데이터 수집 장치로는 LabVIEW에서 제공하는 Wall Static 측정기능과 Pitot Tube 측정 기능을 이용하여 DAQ 시스템을 구축하고, 센서로부터의 출력신호를 받아 데이터를 수집, 분석할 수 있도록 구성하였다. 추기라인과 동체에 설치된 피토관으로부터 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. 7은 Scanning Box를 활용하여 압력을 측정하고 LabVIEW를 통해 측정된 압력 데이터를 수집하는 DAQ 시스템을 나타낸다.

실험 조건에서의 건도를 대략 0.9로 조정하기 위해

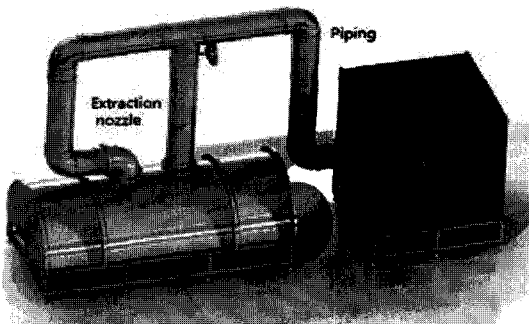
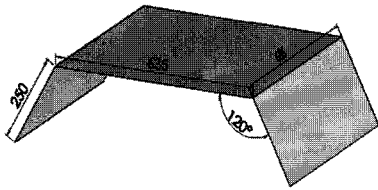
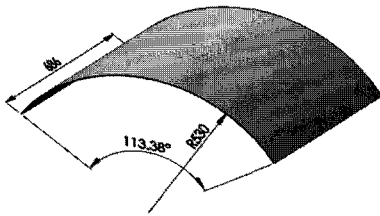


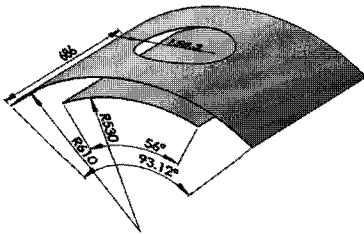
Fig. 4 Feedwater Heater Model



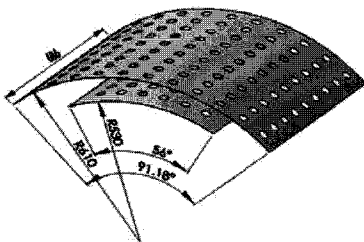
(a) Squared Type



(b) Curved Type



(c) Mitigating Type



(d) Multi-hole Type

Fig. 5 Shape of Impingement Baffle Plate

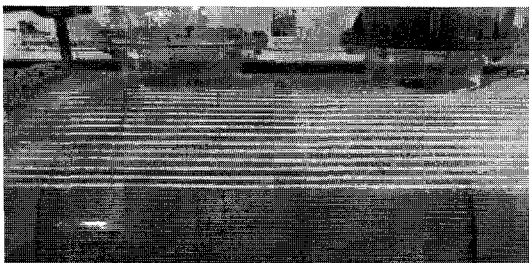


Fig. 6 Pressure Measuring Hole

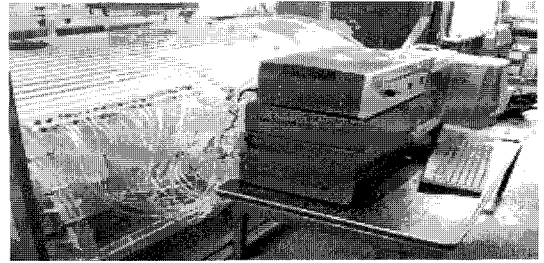


Fig. 7 DAQ System (Data Acquisition System)

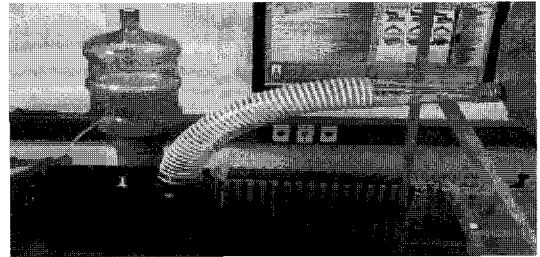


Fig. 8 Humidifier

Fig. 8과 같은 대형 습분 발생 장치를 통하여 공기의 습분을 조절하였다.

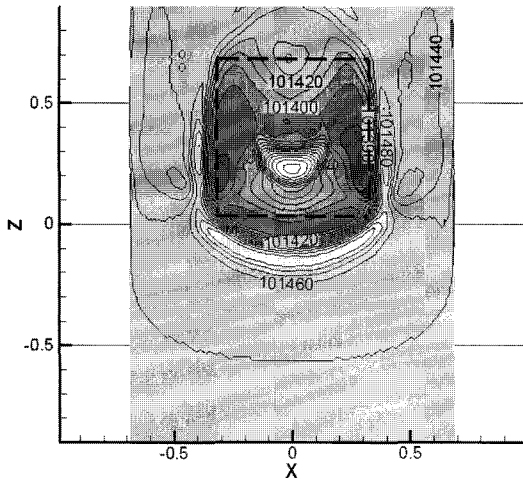
### 3. 해석 및 실험 결과

#### 3.1 수치해석 결과

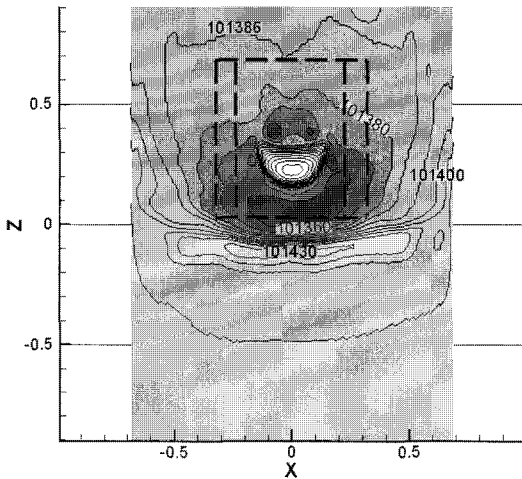
추기노즐을 통하여 동체측으로 유입되는 추기증기는 급수가열기로 들어가면서 전열관 손상방지를 위하여 설치된 충격판에 부딪치고, 반사된 증기는 다시 동체 벽면에 영향을 미쳐 동체 벽면에 감육현상을 유발시킬 수 있다. 급수가열기의 감육현상의 완화를 위한 방안으로 충격판 형상을 변화시키는 방안과 급수가열기 내부에 추가로 충격완화판을 설치하는 방안을 고려하여 Fluent로 수치해석을 진행하였다. 또한, 충격판의 투영면적은 그림에 점선으로 표시하였다.

Figure 9의 (a), (b), (c), (d)는 각각 각형충격판, 곡률충격판, 충격완화판, 다공충격판이 설치된 고압 급수가열기 추기노즐 주위 동체부분의 유동특성을 Fluent를 이용하여 해석한 후, 동체 직경의 98% 지점에서의 압력 분포를 나타낸 것이다. 그림의 X축은 동체의 반경방향, Z축은 길이방향이다.

Figure 9의 (a)는 각형충격판에서의 수치해석 결과로서 급수가열기에 가해지는 추기증기가 충격판에 부딪친



(a) Squared Type Impingement Baffle Plate



(c) Mitigating Type Impingement Baffle Plate

Fig. 9 Pressure Distribution on Numerical Analysis

후, 유동방향이 급격히 변환되어 X축 좌표 ±0.4 지점에서 급수가열기 동체로 압력 집중 영역이 분포하는 것을 알 수 있다. 또한 압력집중 영역에서의 압력분포도의 압력절대값이 약 101,480 Pa로 높게 나타났다. 또한 추기노즐 후단부인 Z축 -0.15부근에서 동체 후단부의 부압으로 인해 압력집중영역이 나타났다.

Figure 9의 (b)의 곡률충격판의 경우에는 압력값이 각형충격판과 비슷하게 나타났다. 그러나 급수가열기에 가해지는 추기증기의 방향이 충격판을 따라 완만하게 변환되어 급수가열기 동체와 충돌하게 되는 지점, 즉 압력 집중 영역이 각형충격판에 비해 급수가열기 동체 하

단 부분, X축 좌표±0.5 지점으로 완만하게 형성되었고, 압력절대값도 다소 낮아졌음을 알 수 있다.

이는 충격판의 형상만으로도 급수가열기 동체 감육으로 인한 손상이 개선될 수 있음을 보여주는 것으로 판단된다.

Figure 9의 (c)는 충격완화판의 압력분포를 나타내고 있다. 충격완화판의 경우에는 특별히 압력이 집중되는 지점을 찾기가 어려웠다. 충격완화판의 형태로 인하여 동체로의 직접적인 유동 흐름이 방해받은 결과로 생각된다. Fig. 9의 (d)의 다공충격판의 경우에도 충격완화판과 마찬가지로 특별히 압력이 집중되는 영역을 찾을 수가 없었으며, 충격완화판에서의 압력값보다 낮아진 압력절대값을 나타내었다. 이를 통해 다공충격판이 급수가열기 동체 내부의 감육으로 인한 손상을 효과적으로 완화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### 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 압력값을 절대 기준에 따라 색을 차등적으로 적용하여 표시하였다. 측정값의 단위는 mmAq이다.

Figure 10의 (a)는 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 N열부터 R열까지 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.

Figure 10의 (b)는 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 급수가열기 동체에 부딪히는 충돌 지점이 각형충격판보다 아래쪽인 Q열 이후에 발생하였고, U열 부근에서 압력 집중영역이 나타나는 것을 알 수 있다.

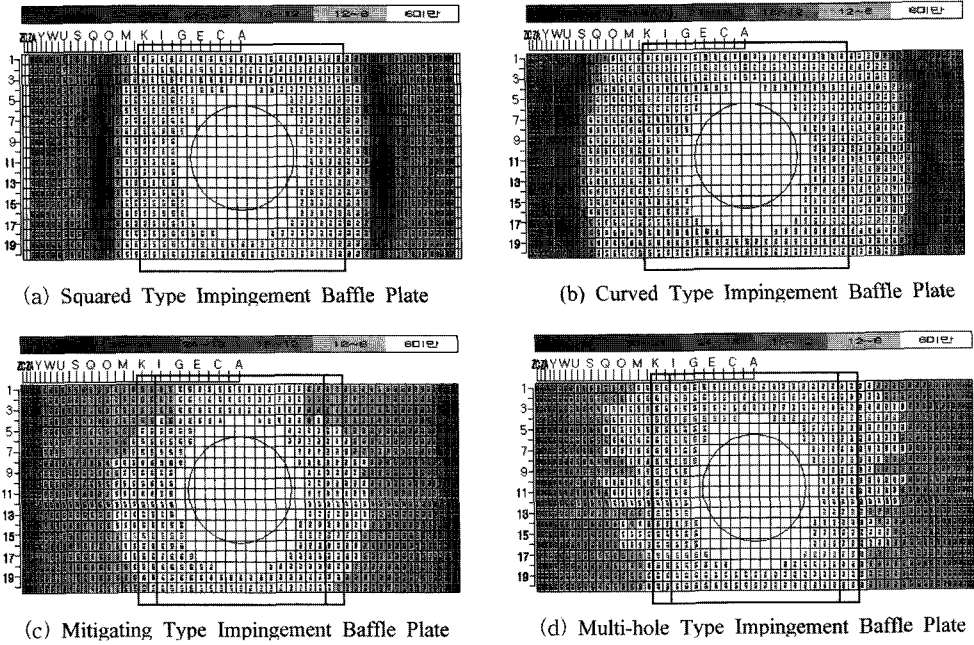


Fig. 10 Pressure Distribution on 4 Types

한편, 충격완화판이 설치된 급수가열기 모델에서의 동체 압력 분포의 결과인 Fig. 10의 (c)를 살펴보면, Z열 이후에서 압력 집중영역이 발생하고 있다. 이는 곡률충격판보다 동체 내부에 미치는 전체적인 압력차의 분포가 심하지 않고 압력절대값이 크지 않으며, 압력 분포도 고르다는 것을 알 수 있다.

Figure 10의 (d)는 다공충격판이 설치된 급수가열기 모델의 결과로 충격완화판의 결과와 유사하지만 압력분포가 산발적이고 압력 절대값도 충격완화판에 비해 더 낮게 나타났다.

이러한 결과는 다공충격판과 충격완화판에서의 급수가열기 동체 감속 완화 정도가 각형충격판과 곡률충격판에 비해 더욱 더 향상되었음을 나타내는 것으로 판단된다.

### 3.3 유동가시화 실험 결과

본 절에서는 수치해석과 실험을 통해 얻어진 결과를 추기노즐과 급수가열기 동체 내부에서의 유체 유동을 검증하기 위하여 유동가시화 실험을 실시하였다. Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13은 추기노즐에서 나온 유체의 유동현상을 보기 위하여 연기 발생장치의 노즐을 추기노즐의 벽면에 위치시켜 유동가시화를 실시한 결과이다.

Figure 11은 각형충격판을 실험한 결과이며, 그림에서

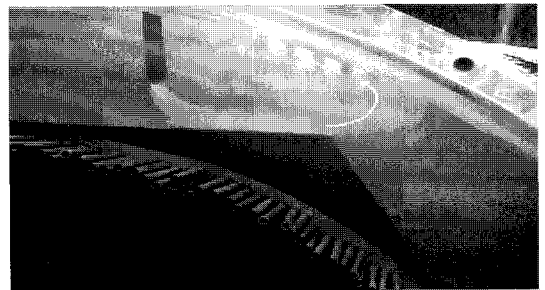


Fig. 11 Flow Visualization of Squared Type Impingement Baffle Plate

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 형성되고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 12는 곡률충격판에 대한 유동가시화 실험결과로서 충격판에 부딪힌 후 곡면을 따라 흐르다가 충격판의 끝에서 박리가 되며, 박리된 후에도 곡률충격판의 곡률과 비슷한 형태로 유동을 유지하다가 하부 1/3 지점에서 급수가열기 동체 벽면에 충돌하는 것을 보여 준다.

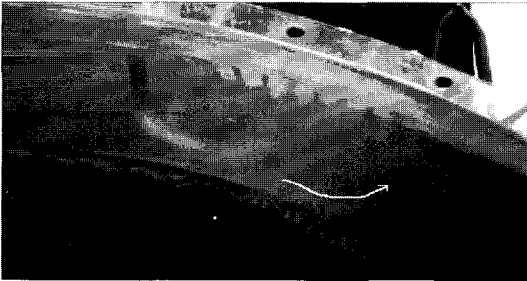


Fig. 12 Flow Visualization of Curved Type Impingement Baffle Plate

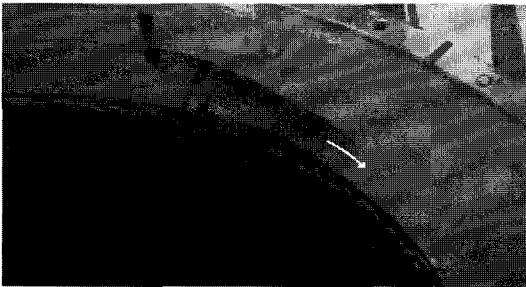


Fig. 13 Flow Visualization of Mitigating Type Impingement Baffle Plate

이를 통해 곡률충격판에서는 압력 집중 영역이 동체 하단부쪽으로 이동하여 분포함을 검증할 수 있다.

Figure 13은 충격완화판을 설치한 후의 유동가시화 실험을 수행한 결과이다. 곡률충격판에 추가로 설치된 충격완화판 사이로 유입된 공기는 곡률충격판에 충돌한 후 상판의 충격판을 따라 흐르며, 추기노즐의 벽면을 따라 흐르는 공기는 충격완화판의 유입구 주변에서 형성

된 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.

다공충격판의 경우는 여러 개의 구멍이 곡률형 충격판에 배열되어 있는 관계로 연발생장치의 노즐로부터 발생되는 유동의 산란으로 인하여 가시화를 통한 유체의 경로를 확인할 수 없었다. 이는 다공충격판이 동체 벽면으로의 유동 집중현상을 크게 줄여주었기 때문이라 생각된다.

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, 추기증기가 충격판에 충돌한 후 급수가 열기 동체에 충돌하는 지점은 어느 정도 일정하다는 것도 확인할 수 있었다. 즉, 충격판에 부딪친 추기증기가 급수가열기 동체의 어느 부분에서 집중적으로 손상을 입는지의 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 제시하고자 한다.

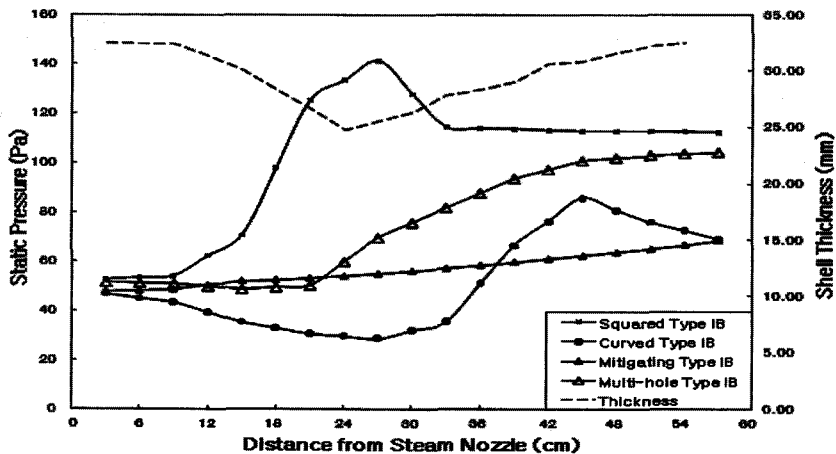


Fig. 14 Comparison Analysis and Shell Thickness



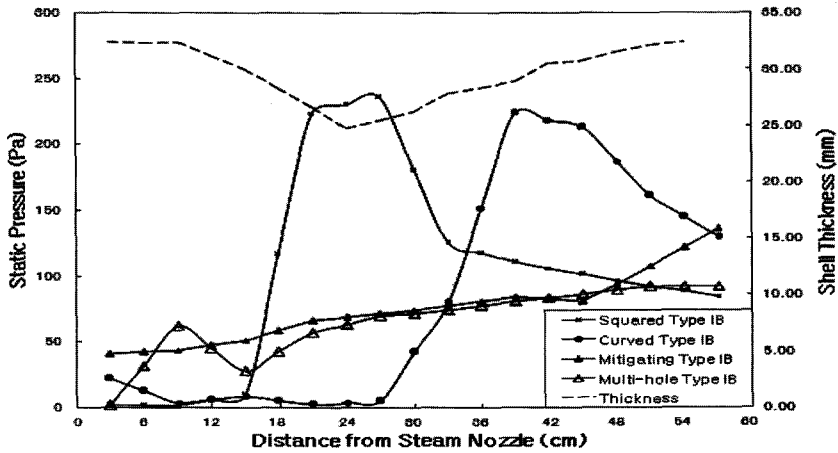


Fig. 15 Comparison Experiment and Shell Thickness

Figure 14는 수치해석 결과와 현장 데이터인 초음파 두께 측정결과를 비교한 그래프이다. 수치해석 그래프에 사용된 데이터는 추기노즐의 중심에서 동체 반경 방향으로 선을 긋고, 이 선상에서 수집된 데이터를 사용하였다. 그래프의 X축은 추기노즐로부터의 거리를 나타내며, Y1축(좌측)은 정압, Y2축(우측)은 급수가열기 동체 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 급수가열기 유동해석에 적용 가능함을 나타내는 것이라 생각된다.

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

Figure 15는 실험 결과와 초음파 두께 측정결과를 비교한 그래프이다. 실험데이터의 선정은 실험결과를 표로 나타낸 그림 Fig. 10에서 10열에 해당하는 데이터를 선정하여 그래프로 나타냈다. 각형충격판의 경우, 실측 데이터의 감육지점과 압력 집중 영역이 중심으로부터 20~24 cm 범위에서 거의 일치하였고, 곡률충격판은 각형충격판에 비해 동체 하단부쪽으로 이동하여 압력 집중 영역이 나타났다. 또한, 압력절대값도 각형충격판에 비해 약 50 Pa 정도 낮아졌음을 알 수 있다. 충격완화판과 다공충격판의 경우에는 각형충격판, 곡률충격판보다

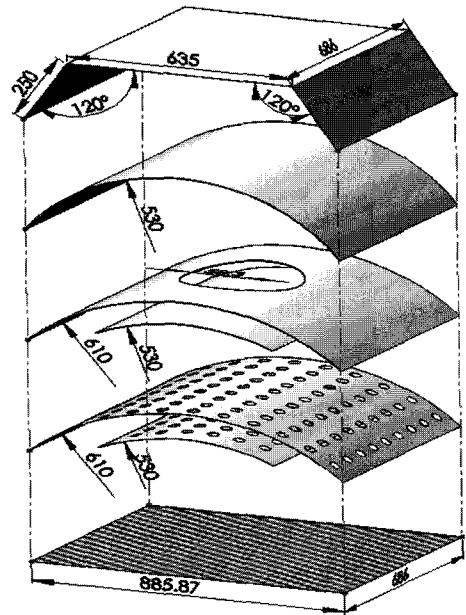


Fig. 16 Projection area of Impingement Baffle Plate

도 급수가열기 동체 내부의 전체적인 압력절대값이 낮았으며 압력 분포 또한 고르게 나타남을 확인할 수 있었다.

본 실험에 적용된 네 가지 형상의 충격판은 각형충격판을 기준으로 하여 각각의 투영면적을 동일하게 제작하였다. 투영면적이 동일하다는 것은 충격판에 의해 보호되는 전열관의 면적이 동일하다는 것을 의미한다. Fig. 16은 각형충격판, 곡률충격판, 충격완화판, 다공충격판의 투영면적을 나타낸 그림이다.

실험 및 수치해석의 비교와 초음파 두께 측정결과를 종합해 보면, 동일한 투영면적을 가진 충격판에서 각형 충격판과 비교해 봤을 때, 곡률충격판은 동체 내부의 압력 집중영역이 동체 하단부로 이동하는 것으로 나타났고, 압력수치 절대값의 분산효과는 그다지 향상되지 않았으나, 급수가열기 동체 감육의 완화 방안에 적용 가능성이 있음을 확인하였다. 반면에 충격완화판과 다공충격판에서는 압력 분산 효과가 가장 뛰어난 것으로 나타났으며, 급수가열기 동체 감육 완화에 가장 효과적이라 판단된다.

#### 4. 결 론

급수가열기에 유입된 추기증기는 충격판과 추기라인 노즐 후단에서 발생한 부압 때문에 동체 벽면에 수직으로 부딪히는 현상이 확인되었다.

해석 및 실험 결과에 따른 유동특성과 동체 감육의 상관성검토는 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 충격완화판, 다공충격판에서 급수가열기 동체 감육 개선 효과가 있음을 확인하였다.

곡률충격판의 경우, 압력 집중 영역이 각형충격판에 비해 급수가열기 동체 하단부쪽으로 약 10 cm 이동하여 분포하였고, 압력절대값도 약 50 Pa 정도 작아졌으며, 압력 집중 영역과 주변부위에서의 압력값에 큰 차이가 없음을 확인하였다. 더욱이, 충격완화판의 경우에는 각형 및 곡률충격판에 비하여 급수가열기 동체 벽면에 가해지는 압력값이 현저히 낮아져 실험값의 경우 최대 100 Pa, 수치해석의 경우 약 60 Pa 정도 차이가 나는 것을 확인하였고, 압력 분포 또한 다른 두 충격판형상에 비해 고르게 분포됨을 알 수 있었다. 또한, 다공충격판의 경우에는 충격완화판보다 압력분포가 산발적이고 압력절대값도 다른 형태와 비교하여 가장 낮은 것으로 나타났다. 이러한 현상들은 유동가시화 실험을 통해서도 검증할 수 있었다. 이를 통해 본 연구의 수치해석 및 실험의 결과가 실제 급수가열기에도 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제시된 결과가 몇 가지 경우에 대한 정성적인 비교이기 때문에 현장으로의 직접적인 적용에는 다소 무리가 있겠지만, 이러한 연구 결과를 바탕으로 발

전소의 급수가열기 손상을 사전에 예방할 수 있는 설계 개선과 동체감육 관리에 유용하게 활용될 수 있을 것이라고 판단된다.

#### 후 기

이 논문은 (주)한국수력원자력 전력연구원에서 발주한 연구의 위탁연구과제로서 수행한 결과이며, 관계기관의 협조에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Von W. Kastner and K. Riedle, Empirisches Modell zur Berechnung von Materialabtragen durch Erosionskorrosion, VGB Kraftwerkstechnik, Vol. 66, 1986, pp. 1171~1178.
- (2) Point Beach 1, Steam Leak From Low Pressure Feedwater Heater, 1999, 1999-005, LER.
- (3) Fort Calhoun, Shell Wall Thinning of Feedwater Heater, OE 10710, INPO, 1999.
- (4) KNHP, "Technical Review for Proving the Shell Wall Thinning of the Feedwater Heater", Mechanical Department, Technical Review Report, 2000.
- (5) K. H. Kim, et al, "Fluid Mixing Analysis for Predicting Shell Wall Thinning of a Feedwater Heater", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 19, No. 1, 2005, pp.173-180.
- (6) K. H. Kim, W. Lee K. M. Hwang, "A Study on Experiment and Numerical Analysis for Disclosing Shell Wall Thinning of a Feedwater Heater", Transaction of KSME B, vol. 31, No. 1, 2007, pp.1~7.
- (7) K. H. Kim, K. M. Hwang, S. H. Jung, "Experimental and Numerical Analysis in the surrounding of Impingement Baffle Plate of the Extracting Nozzle for Disclosing Shell Wall Thinning of a Feedwater Heater", Transaction of SAREK, vol. 19, No. 12, 2007, pp.821-830.
- (8) K. H. Kim, K. M. Hwang, W. Lee, T. E. Jin, "A Study on the Shell Wall Thinning causes identified through Experiment, Numerical Analysis and Ultrasonic Test of High Pressure Feedwater Heater", Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, No.1, 2008, pp. 25-32.
- (9) Fluent Inc, Fluent 6.x Training Notes, 2006, pp.1-

1~1-56.

- (10) M. C. Potter and E. P. Scott, "Thermal Science : An Introduction to Thermodynamics, Fluid Mechanics and Heat Transfer", Thomson, 2005.
- (11) Y. A .Cengel and J. M. Cimbala, "Fluid Mechanics" Fundamental and Application, ISBN 0-07-247236-7, McGRAW-HILL, 2006.
- (12) Kyung Hoon Kim, Kyeung Mo Hwang, Tae Eun Jin, "A Study on the Shell Wall Thinning cause identified through Experiment, Numerical Analysis and Ultrasonic Test of Main Feedwater Isolation Valve", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 45, 2008, No. 1, pp. 45~54.
- (13) K. H. Kim, et al., "A Study on Design Modification and Interrelation between Reattachment Flow of Dispersed Jet by Impingement and Local Thinning", Transaction of SAREK, Vol. 21, 2009, No. 9, pp. 483~495.