

충돌로 인해 분산된 2상 제트스팀의 재부착 현상과 국부 감육 상관관계 규명 및 설계개선에 관한 연구

김형준, 김경훈[†], 황경모^{*}

경희대학교 공과대학 기계공학과 산학협력기술연구원, ^{*}한국전력기술(주)

Design Modification and Correlation Verification between Reattachment Flow of Dispersed Jet and Local Thinning of Feedwater Heater

Hyung Joon Kim, Kyung Hoon Kim[†], Kyeong Mo Hwang^{*}

Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Yongin-si 446-701, Korea

^{*}Koreae Power Engineering Company, Inc. Yongin-si 446-713, Korea

(Received June 26, 2009; revision received August 11, 2009)

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 stream 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 operation of experience and numerical analysis composed similar condition with real high pressure feedwater heater. This study applied squared, curved and new type impingement baffle plates to feedwater heater same as previous study. In addition, it shows difference of pressure distribution and value between single phase and two phase based on experience and numerical analysis.

Key words: Wall thinning(감육), Flow-accelerated corrosion(유동가속부식), Feedwater heater(급수가열기), Extracting nozzle(추기노즐), Impingement baffle(충격판)

1. 서 론

원전 2차측 급수가열기의 동체에서 국부적으로 발생하는 감육(wall thinning) 현상은 최근에 부각되고 있는 경년열화기구로서 급수가열기를 장기간 운전함에 따라 나타나는 현상이다. 이러한 감육현

상은 유체가 고속으로 흐르는 배관에서 많이 발생되어 왔기 때문에 관련연구도 배관에서만 집중되어 왔으나, 최근에는 동체 국부감육으로 인한 사건이 국내외에서 빈번히 발생하고 있으며 운전년수 증가에 따라 동사건의 발생빈도는 증가할 것으로 예상된다. 급수가열기 내부는 전열관, 방해관 등으로 인하여 복잡한 유동현상이 나타나기 때문에 배관과는 달리 감육손상도 국부적으로 발생하고 있으며, 이에 따른 정확한 원인규명이 필수적이다.⁽¹⁾

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2509; fax: +82-31-202-8106

E-mail address: kimkh@khu.ac.kr

발전소에서는 고압 및 저압터빈에서 추기되는 2상의 제트스팀을 이용하여 증기발생기로 공급되는 급수를 가열함에 따라 고압 및 저압 급수가열기 내부는 제트스팀으로 인하여 전열관이 손상되지 않도록 충격판(impingement baffle)이 설치되어 있으며, 추기증기는 충격판에 부딪친 후 벽면에 재부착되는 유동현상으로 인하여 동체 벽면에서 국부적인 감육현상이 발생한다.⁽²⁾ 최근 미국을 포함한 국내의 발전소에서는 이를 방지하기 위한 대책수립에 몰두하고 있으나, 현재까지는 UT(ultrasonic test)검사를 통한 사후 대책수립이 전부일 뿐이다.⁽³⁾

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)⁽⁴⁾을 하는 등으로 대응하고 있으나 임시방편에 불과한 실정이다. 따라서 충돌로 인해 분산된 제트스팀의 재부착 현상과 국부감육 현상과의 상관관계를 학술적으로 규명하고, 이를 근본적으로 완화시킬 수 있는 설계개선 연구가 필요하다.

한편, 본 연구의 선행 연구⁽⁵⁾에서는 상용 수치 해석 코드인 Fluent를 이용하여 급수가열기 동체 내부의 유체유동 해석을 수행하였고, 그 결과의 검토를 위하여 급수가열기 추기 노즐 주변의 동체두께 측정데이터를 코드해석 결과에 따른 국부 유속과 비교하였다. 또한 선행 연구⁽⁶⁾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.⁽⁷⁾

더욱이 동체의 감육현상에 관한 원인을 규명한 연구 후, 후속으로 진행되었던 연구⁽⁸⁾에서는 급수가열기의 동체 국부감육 현상을 막기 위해서 추기 유체의 동체 벽면쪽으로 향하는 유동 방향을 변화시키는 방법을 선택하여 동체의 국부감육 현상을 완화할 수 있는지에 대한 연구를 진행하였다. 추기 유체의 유동방향을 변화시키기 위하여

기존의 충격판위에 다공 충격판 및 충격 완화판을 추가시키는 방법을 선택하였으며, 그 결과는 기존의 충격판 모델에 비하여 어느 정도 감육손상을 완화시킬 수 있는 새로운 가능성을 찾았다.

그런데, 일반적으로 탄소강 재료의 감육손상은 단상(single phase)보다는 2상(two phase)유체에서 더 심한 것으로 알려져 있기 때문에 급수가열기와 연결된 배관라인 중 추기라인과 인접한 동체가 연구대상이다. 2상 제트스팀(two phase jet steam)에 의한 전열관의 손상을 방지하기 위하여 설치된 충격판에 의해 2차적으로 발생하는 재부착 유동현상과 이로 인하여 발생하는 국부감육(local thinning)과의 상관관계를 규명해야 하며, 이를 개선하기 위한 설계변경 연구 및 동체 국부감육 완화방안에 대해서 검토해야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 원자력 발전소 2차측 급수가열기의 실제 현장상황과 유사한 조건을 조성하기 위하여 습도조절기를 통한 2상 상태를 구현하여 실험을 수행하였으며, 해석값들을 비교 검토함으로써 타당성을 검증하고, 이에 따라 급수가열기 추기노즐 주위의 동체에서의 국부감육현상을 완화시킬 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 해석 및 실험모델 구성

급수가열기의 경우 실제로는 2상의 증기가 추기노즐을 통해 급수가열기로 유입이 된다. Fig. 1은 고압터빈에서 급수가열기로 추기되는 추기증기계통의 개략도를 나타낸다. 실험에 있어서 실제의 조건을 완벽하게 재현시키며 실험하기가 어렵다.

한편, 선행연구에서 단상 및 2상 유동에 대한 수치해석 결과와 실험결과에서 나타난 압력분포는 부압이 발생하는 부위에서 압력값의 차가 다소 있었지만, 전체적인 압력분포는 거의 동일하

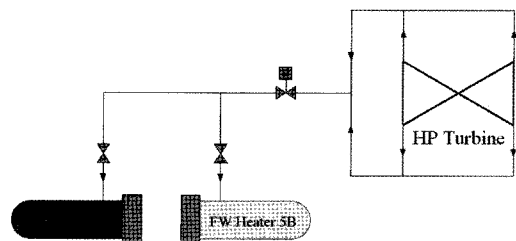


Fig. 1 Schematic diagram of extraction steam system.

다는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 특히 유동가시화 실험의 결과를 통해서 급수가열기의 손상이 나타나고 있는 동체 벽면부위가 거의 동일하게 나타남을 알 수 있다는 것을 선행연구에서 확인하였다.^(7,8) 이와 같은 문제로 실험설비는 상사를 통하여 1:2 비율로 축소하여 진행되며, 역학적 상사를 통하여 실험조건을 도출하게 된다. 본 연구에서는 완전 상사가 이루어진 실험조건에서 해석과 실험을 동일하게 수행하여 해석 및 실험의 결과를 비교 분석하였다. 이 후, 실제 조건으로 해석을 수행하여 실험결과를 수치해석에서 수행하여 도출된 결과로 확대하여 결과를 도출하는 방식을 채택하였다.

2.1 해석 모델

Figure 2는 해석대상으로 결정한 급수가열기의 단면도를 보여준다. 해석범위는 그림에서 볼 수 있듯이 동체 상단의 절반과 추기라인의 유량 조절밸브 후단을 대상으로 하였으며 충격판을 동체 내부에 모델링 하였다. 동체 내부에 있는 전열관은 관심대상이 아니므로 해석범위에 포함시키지 않았다. 수치해석에서, 동체 모델 벽면의 직접적인 압력 측정은 수직 방향의 압력만 측정 되는 것이 아니기 때문에, 동체의 중심으로부터 98%

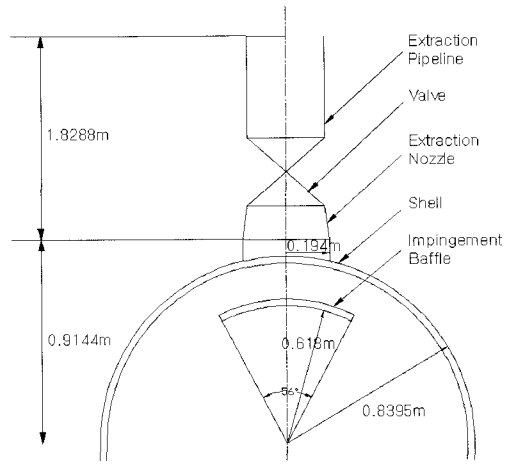


Fig. 2 A Half cross-sectional view.

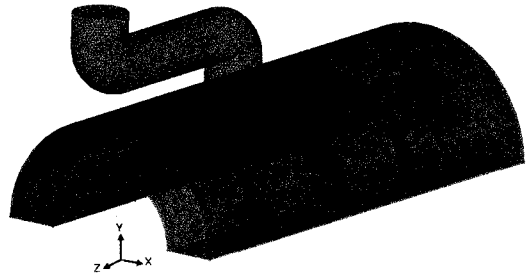


Fig. 3 Modeled geometry and Cell divisions.

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	14.51
Single Phase	Density	kg/m ³	1.29
	Viscosity	kg/m · sec	1.98 × 10 ⁻⁵
Two Phase	Water		
	Steam Quality(Vol.)	%	10.7
	Density	kg/m ³	958.12
	Specific Heat	J/kg · K	4212.87
Two Phase	Air		
	Viscosity	kg/m · sec	2.82 × 10 ⁻⁴
	Steam Quality(Vol.)	%	89.3
	Density	kg/m ³	0.6
Two Phase	Air		
	Specific Heat	J/kg · K	2026.73
Two Phase	Air		
	Viscosity	kg/m · sec	1.228 × 10 ⁻⁵

지점에서의 압력을 측정하기 위하여 2단 체적(double volume)으로 형성된 해석 모델을 구성하였다. Fig. 3은 고압형 급수가열기의 해석 모델 격자 구성을 보여준다. 실험장치가 비대칭형 형상이기 때문에 비정방형 격자모델로 구성하였으며, 총 격자수는 약 1,200,000개 정도로 구성하였으며 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 2차측 열평형도를 이용하였다. 이외에 해석에 사용된 경계조건과 물성치는 Table 1과 같다.

급수가열기 추기노즐로 유입되는 증기의 Re수를 평가하면 고압의 경우는 약 3.11×10^5 이다. 추기증기는 충격판에 부딪친 후 모든 방향으로 반사된다. 따라서 해석대상 모델 내부의 구조와 열유동 조건을 고려하여 물리적으로 적절한 수치해를 얻고자 급수가열기 내의 유동을 3차원, 비정상 상태, 압축성 및 난류로 간주하였다.

난류모델에는 constant viscosity model과 k- ϵ model, RNG k- ϵ model 등이 있는데, 본 연구에서는 각 난류모델의 특성과 급수가열기 내부유동의 특성을 고려하여 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해 시간변화에 따른 와류 점성 특성과 높은 Re 유동의 특성 예측에 유용한 RNG(ReNormalized Group) k- ϵ model을 적용하였다.⁽⁹⁾

2.2 실험 모델 및 실험

본 실험에서는 급수가열기 추기노즐 주변동체의 유동특성을 알아보기 위하여 실제 급수가열기의 1/2축소 실험모델을 Fig. 4와 같이 제작하였다.

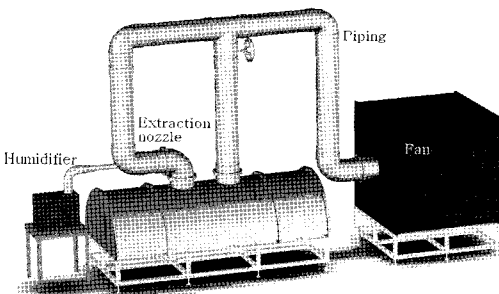
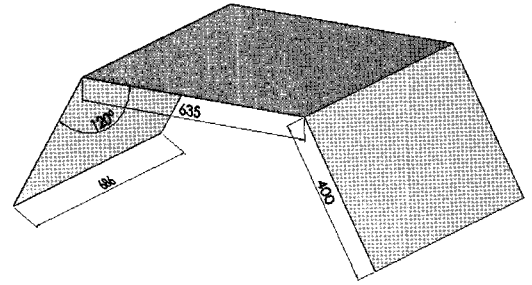
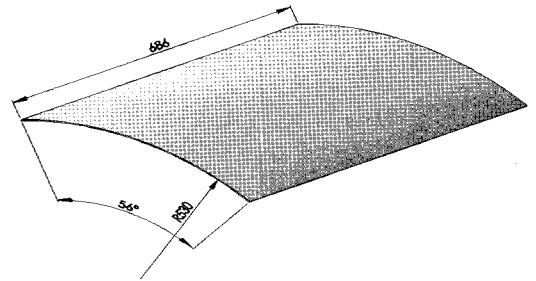


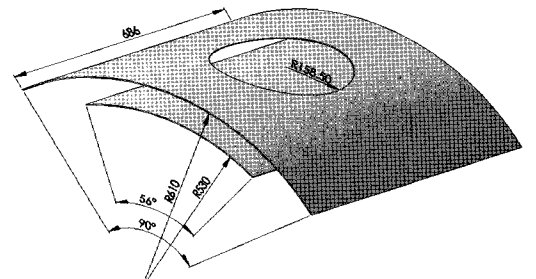
Fig. 4 Feedwater heater model.



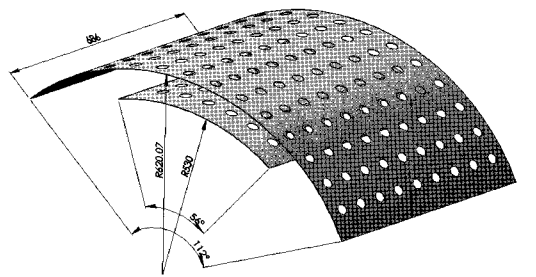
(a) Squared type



(b) Curved type



(c) Mitigating type



(d) Multi-hole type

Fig. 5 Shape of impingement baffle plate.

실험장치의 구성은 크게 급수가열기 동체 모형, 유량공급용 송풍기, 배관, 측정 장치, 습분 발생 장치로 구성되어 있다.

급수가열기 동체 모형은 내부유동을 관찰할 수 있도록 투명 아크릴로 제작하였고, 실제로 국내 원자력 발전소에서 사용되어 지고 있는 충격판 형상인 각형 충격판을 Fig. 5의 (a)와 같이 제작하였다.

또한 동체감육을 완화하기 위한 형상인 곡물 충격판과 충격 완화판을 각각 (b), (c)와 같이 제작

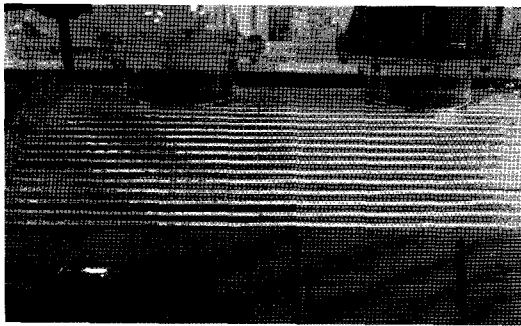


Fig. 6 Pressure measuring hole.



Fig. 7 DAQ system(data acquisition system).

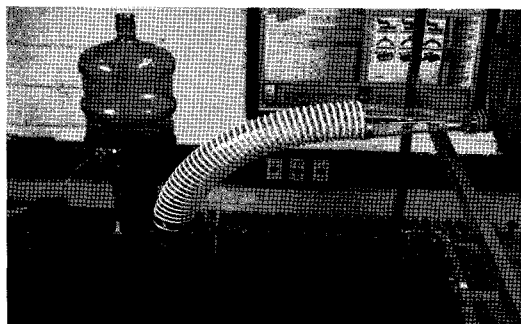


Fig. 8 Humidifier.

하였고 동체에 가해지는 압력을 분산시켜 비약적으로 줄이기 위해 고안된 다공 충격판을 (d)와 같이 제작하여 설치하였다. 다공 충격판의 구멍 개수와 배열은 다양한 모형의 충격판 형상을 수치해석을 통해 선행적으로 검증한 후, 가장 효율적인 모형을 채택하였다. 또한, 유체가 직접적으로 전열판 쪽으로 유입되는 것을 방지하기 위하여 상부판과 하부판의 다공의 배열을 엇갈리게 설계하여 추후 전열판 파손에 영향을 미치지 않도록 하였다.

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

실험과정을 살펴보면, 먼저 유량공급용 송풍기로부터 추기라인과 동체에 유량을 공급하여 추기라인과 동체에 설치된 피토티관으로부터 속도를 측정하고, 유동의 속도가 14.51 m/s에 이를 때까지 배관에 설치된 유량조절부에서 유량을 조절하였다. 유동이 안정된 후 동체에 설치된 압력공을 통해 각 위치에서의 압력을 측정하고 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. 8과 같은 대형 습분 발생 장치를 통하여 공기의 습분을 조절하였다.

3. 해석 및 실험결과 토의

3.1 수치해석 결과

추기노즐을 통하여 동체측으로 유입되는 추기 증기는 급수가열기로 들어가면서 전열판 손상방지를 위하여 설치된 충격판에 부딪치고, 반사된 증기는 다시 급수가열기 동체 벽면에 영향을 미쳐 동체 벽면에 감육현상을 유발시킬 수 있다. 급수가열기 동체의 감육 현상의 완화를 위한 방안으로 충격판 형상을 변화시키는 방안과 급수가열기 내부에 추가로 충격 완화판을 설치하는 방안을 고려하여 Fluent로 수치해석을 진행하였다.

3.1.1 단상 조건

본 절에서는 2상 조건과의 결과를 비교하기 위

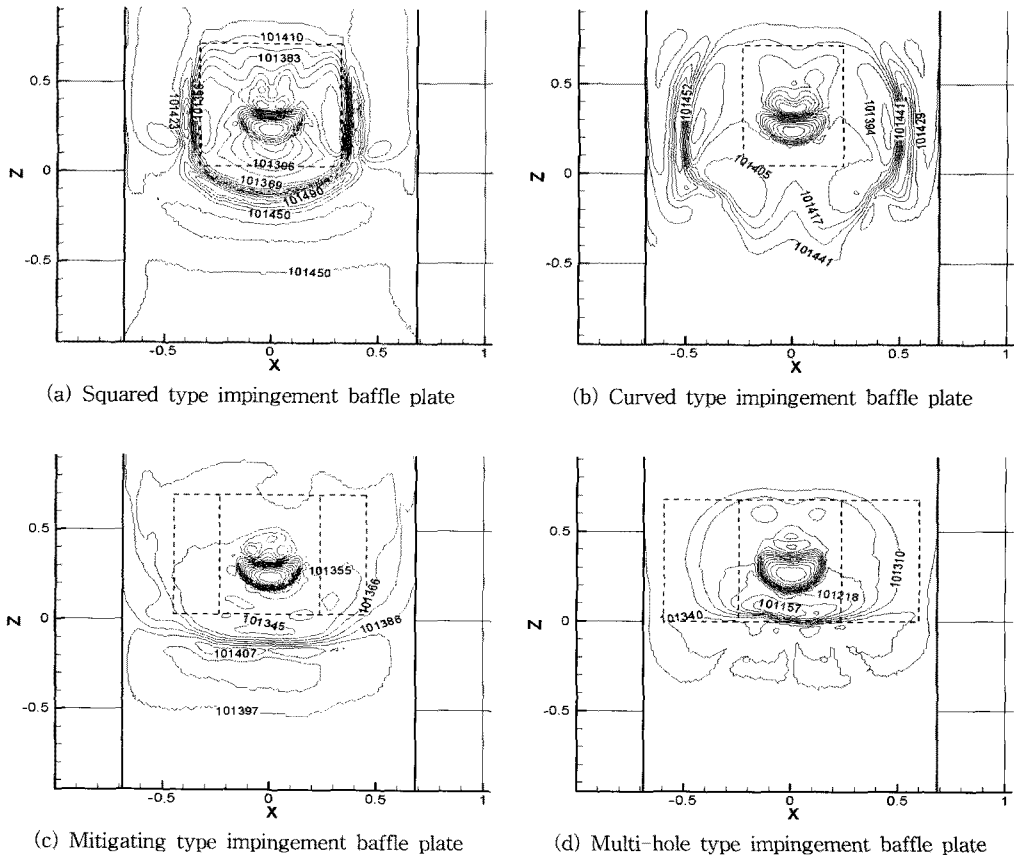


Fig. 9 Pressure distribution on single phase.

해 먼저 단상에서의 수치해석을 수행하였다.

Figure 9의 (a), (b), (c) 그리고 (d)는 각각 각형 충격판, 곡률충격판, 충격 완화판 및 다공 충격판이 설치된 고압형 급수가열기 추기노즐 주위 동체부의 유동특성을 Fluent를 이용하여 해석한 후, Tecplot을 이용하여 단상 조건에서의 동체 반경의 98% 지점에서의 압력 분포를 비교하여 나타낸 것이다.⁽⁹⁾

Figure 9의 (a)의 각형 충격판에서의 급수가열기 동체에 미치는 유동해석을 분석해 본 결과, 동체의 x축을 기점으로 $\pm 0.4\text{m}$ 지점에서 압력 집중이 발생했다. Fig. 9의 (b)의 곡률 충격판의 경우, 동체의 x축을 기점으로 $\pm 0.5\text{m}$ 지점에서 압력 집중이 발생했다. 이는 곡률 형태의 충격판으로 인하여 유체가 충격판에 바로 반사되지 않고 충격판을 따라 유동이 자연스럽게 바뀌면서 발생한 현상으로 추측된다. 이러한 결과는 충격판의 형상

변화만으로도 동체 감육으로 인한 손상이 개선될 수 있음을 보여준다. Fig. 9의 (c) 얇고 바뀌면서의 압력 분포를 나타내고 있다. 바뀌면서의 경우, 특별히 압력이 집중되고 지점을 찾기도 어려웠다. 바뀌면서의 형태로 인하여 동체로의 직접적 열 동체 흐름을 방해한 결과로 생각된다. Fig. 9의 (d)의 현상으로의 경우, 바뀌면서 과 마찬가지로 특별히 압력이 집중되는 영역을 찾을 수 없었으며, 충격 완화판에서의 압력 값보다 낮은 압력값을 나타내었다. 이를 통해 다공 충격판이 동체 내부 감육으로 인한 손상을 효과적으로 완화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.2 2상 조건

본 절에서는 실제 급수가열기의 조건에 상응하는 2상 조건에서의 수치해석을 수행하였다.

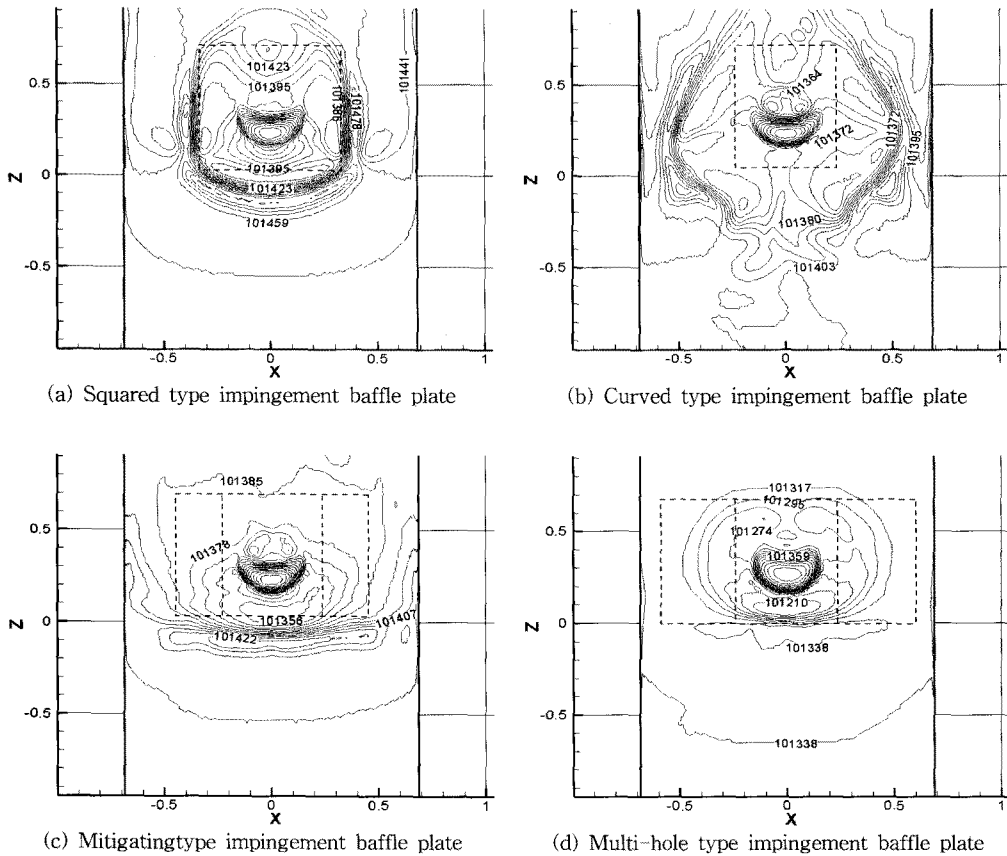


Fig. 10 Pressure distribution on two phase.

Figure 10의 (a), (b), (c) 그리고 (d)는 각각 각형 충격판, 곡률 충격판, 충격 완화판 및 다공 충격판이 설치된 고압형 급수가열기 추기노즐 주위 동체부분의 유동특성을 Fluent를 이용하여 해석한 후, Tecplot을 이용하여 2상 조건에서의 동체 반경의 98% 지점에서의 압력 분포를 비교하여 나타낸 것이다.⁽⁹⁾

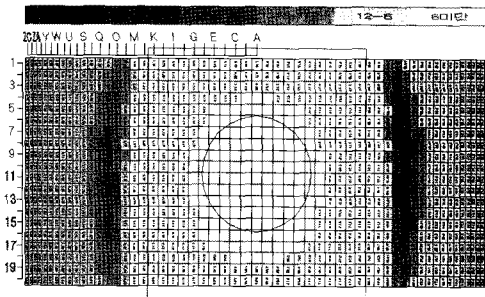
Figure 10의 (a)의 각형 충격판과 (b)의 곡률 충격판에서의 압력집중영역은 단상과 크게 차이가 없었지만 2상에서의 고압력 영역의 분포가 단상에서의 분포보다 조금 더 확장되었다. Fig. 10의 (c)의 충격완화판과 (d)의 다공 충격판의 경우에서도 단상과의 차이는 거의 없었지만 압력의 절대값이 상승하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 단상보다는 2상에서의 유체가 습분이 포함됨으로 인해 유체의 밀도가 증가하였기 때문이라고 생각된다.

수치해석 결과, 충격판의 종류에 따른 압력 집중 영역은 각형 충격판과 곡률 충격판을 적용시킨 경우에서 현저하게 나타났다. 충격 완화판은 이러한 집중되는 압력 분포를 완화시켜주는 효과를 보였다. 다공 충격판의 경우, 충격 완화판보다 더욱 개선된 결과를 나타내었고, 추후 문제화될 수 있는 상부판과 하부판 사이의 내압 상승을 해결할 수 있을 것으로 생각된다. 상조건(phase condition)에 따른 압력 집중의 차이는 크게 나타나지 않았으며 집중영역 분포 범위가 조금 확장하거나 절대값의 미세한 상승을 관찰할 수 있었다.

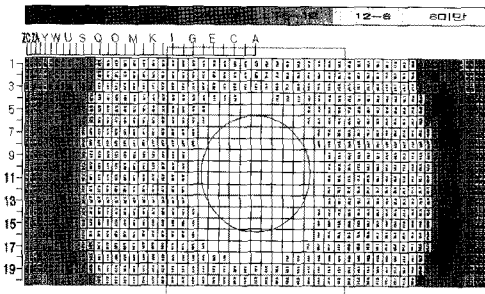
3.2 실험결과

3.2.1 단상 조건

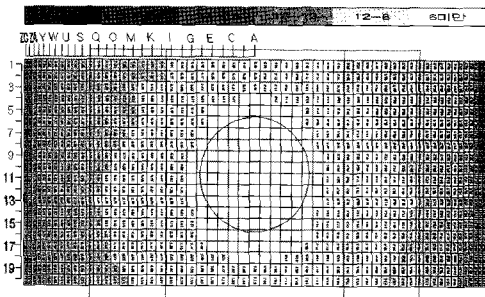
본 절에서는 실험장치를 통해 얻어낸 단상 조



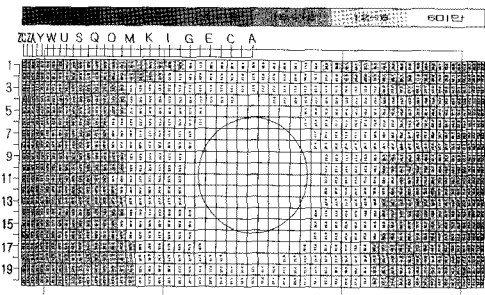
(a) Squared type impingement baffle plate



(b) Curved type impingement baffle plate



(c) Mitigating type impingement baffle plate



(d) Multi-hole type impingement baffle plate

건에서의 실험 결과값을 표로 작성하여 비교, 검토하였다. 실험장치에서의 충격판 위치를 명확히 표기하기 위하여 표 내부에 충격판을 평면도로 표시하였다. 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. 따라서 Fig. 11과 Fig. 12의 그림 상단에는 압력 값의 기준(mm Aq)을 제시한 숫자가 표시되어 있다.

Figure 11의 (a)는 각형 충격판의 실험 결과이다. 실험결과를 살펴보면, 각형 충격판에 의해 반사된 유체가 급수가열기 동체의 일정부위에서 높은 압력으로 집중되어 나타남을 알 수 있다. 이 결과로 기존의 충격판 모델의 실험에서 나타난 급수가열기의 동체부의 감육은 추가노즐을 통과한 증기가 충격판에 부딪쳐 동체 벽면으로 반사됨으로써 감육을 발생시킨다는 것을 알 수 있다.

Figure 11의 (b)는 곡률 충격판의 실험 결과이다. 곡률 충격판은 각형 충격판처럼 급격한 모서리 부분이 존재하지 않고 곡면으로 되어 있어 유체의 유동이 곡면을 타고 내려오면서 각형 충격판보다 급수가열기 동체에 부딪치는 충돌 지점이 훨씬 아래쪽으로 이동하여 존재한다는 것을 알 수 있다.

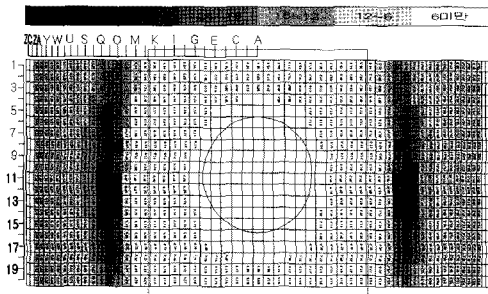
충격 완화판이 설치된 급수가열기 모델의 동체 압력 분포의 결과인 Fig. 11의 (c)를 살펴보면 곡률 충격판보다 동체 내부의 전체적인 압력차이가 심하지 않고 압력 분포도 고르다는 것을 알 수 있다.

Figure 11의 (d)의 다공 충격판의 경우, 충격 완화판과 마찬가지로 압력이 어느 한 지점에 집중되지 않고 고르게 분포되는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 동체 벽면에 작용하는 전체적인 압력값은 더욱 낮아졌으며, 수치해석에서의 결과보다 더욱 산발적으로 나타났다. 이는 다공 충격판에 의해 유체의 흐름이 급수가열기 동체 내부의 특정 영역에 집중되지 않고 연속적으로 변화하기 때문으로 생각된다. 따라서 다공 충격판의 적용은 압력 집중을 피할 수 있는 효과적인 방법이라고 생각되며 실제 급수가열기 감육 완화에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

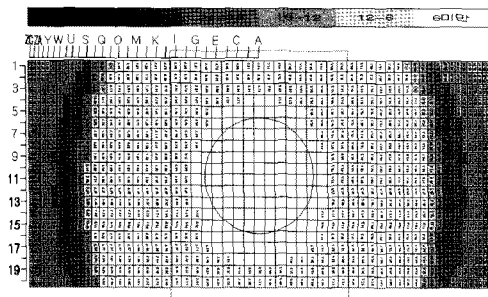
3.2.2 2상 조건

본 절에서는 위의 단상 조건과 마찬가지로 실

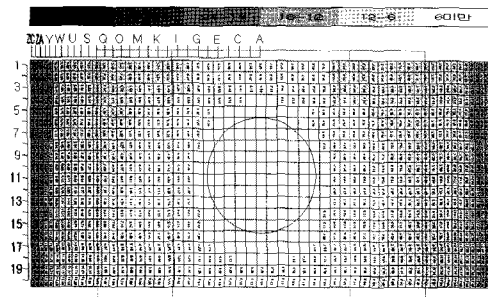
Fig. 11 Pressure distribution on single phase.



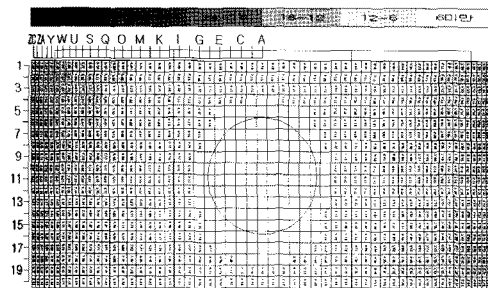
(a) Squared type impingement baffle plate



(b) Curved type impingement baffle plate



(c) Mitigating type impingement baffle plate



(d) Multi-hole type impingement baffle plate

Fig. 12 Pressure distribution on two phase.

험장치를 통해 얻어낸 2상 조건에서의 실험 결과 값을 표로 작성하여 비교, 검토하였다.

Figure 12의 (a)는 각형 충격판의 실험 결과이다. 실험결과를 살펴보면, 압력 집중 영역은 단상에서의 결과와 크게 다르지 않다는 것을 알 수 있다. 다만 수치해석에서도 언급한 바와 같이, 습분이 포함됨으로 인한 유체의 밀도 증가가 전체적으로 압력 절대값의 상승을 초래하였음을 관찰할 수 있다. 최대 압력 값을 비교해 보면 단상에서 101,518 Pa, 2상에서 101,609 Pa로 측정되었다.

Figure 12의 (b)는 곡률 충격판의 실험 결과이다. 각형 충격판과 마찬가지로 압력분포는 단상과 큰 차이를 보이지 않는다. 최대 압력값은 단상에서 101,533 Pa, 2상에서 101,547 Pa로 측정되었다.

충격 완화판이 설치된 급수가열기 모델의 동체 압력 분포의 결과인 Fig. 12의 (c) 역시 단상과 큰 차이점을 관찰할 수는 없었다. 단상과 마찬가지로 동체 내부의 전체적인 압력차이가 심하지 않고 압력 분포도 고르다는 것을 알 수 있다. 최대 압력값이 단상에서는 101,452 Pa, 2상에서는 101,480 Pa로 측정되었다.

Figure 12의 (d)는 다공 충격판의 실험 결과이다. 이것 역시 단상에서의 결과와 큰 차이점을 보이지 않고, 충격 완화판보다 압력분포의 산발성, 압력 절대값의 감소를 나타냈다. 산발적인 압력 분포로 인해 단상과 2상에서의 최대압력값 차이는 나타나지 않았다.

실험 결과, 수치해석과 마찬가지로 충격판의 종류에 따른 압력 집중 영역은 각형 충격판과 곡률 충격판의 경우에서 현저하게 나타났다. 충격완화판과 다공 충격판은 이러한 집중되는 압력 분포를 완화시켜주는 효과를 보였다.

상조건에 따른 압력 집중의 차이는 크게 나타나지 않았으며 수치해석의 결과와 마찬가지로 집중영역 분포 범위가 조금 확장하거나 압력 절대값의 미세한 상승을 관찰할 수 있었다.

단상과 2상에서의 실험을 통해, 2상에서의 실험값들이 단상에서의 실험값들보다 최대 압력 및 압력 절대값 증가면에서 상승되었음을 확인할 수 있었고, 다공 충격판의 압력 집중 완화 기능을 확인할 수 있었다.

3.3 유동 가시화 실험 결과

본 절에서는 수치해석과 실험을 통해 얻어진 결

과를 검증함과 동시에 추기노즐과 급수가열기 동체 내부에서의 유체 유동을 검증하기 위하여 유동가시화 실험을 실시하였고, 그 결과를 수치해석 및 실험 결과와 비교해 보았다. Fig. 13~Fig. 15는 추기노즐에서 나온 유체의 유동현상을 보기 위하여 연발생장치의 노즐을 추기노즐의 벽면에 위치시켜 유동가시화를 실시한 결과이다.

Figure 13은 각형 충격판을 실험한 결과이며, 그림에서 볼 수 있듯이 연기가 충격판에 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.

Figure 14는 곡률 충격판에 대한 유동 가시화 실험결과로서 충격판에 부딪힌 후 곡면을 따라 흐르다가 충격판의 끝에서 박리가 되며, 박리된 후에도 곡률판의 곡률과 비슷한 형태로 유동을 유지하다가 하부 1/3지점에서 급수가열기 동체 벽에 충돌하는 것을 보여 준다. 이를 통해 곡률 충격판에서의 압력 집중 영역이 동체 하단부 쪽으로 이동하여 분포함을 검증할 수 있다.

Figure 15는 충격 완화판을 설치한 후 유동가시화 실험을 수행한 결과이다. 곡률 충격판에 추가로 설치된 충격 완화판 사이로 유입된 공기는 곡률 충격판에 충돌한 후 충격판을 따라 흐르며, 추기노즐의 벽면을 따라 흐르는 공기는 충격 완화판의 유입구 주변에서 형성된 부압의 영향으로 주위 유동이 상부에 충돌한 후 그대로 아래로 흐르는 모습을 볼 수 있다. 이는 충격 완화판의 경우, 동체 내부에 압력 집중 영역이 발생하지 않음을 나타내는 것으로 판단된다. 또한, 완화판으로 인해 추기증기가 동체에 직접 부딪치지 않기 때문에 압력 절대값이 낮아짐을 알 수 있다. 다공 충격판의 경우, 유동의 산란으로 인하여 가시화를 통한 유체의 경로를 확인할 수 없었다. 이는 다공 충격판이 동체 벽면으로의 유동 집중현상을 크게 줄여주었기 때문이라 생각된다.

이러한 결과를 통해, 유동가시화 실험에서 관찰된 추기증기가 급수가열기 동체 벽면에 충격을 가하는 부위와 수치해석 및 실험에서 나타난 압력 집중 부위가 동일하다는 것을 확인할 수 있었다.

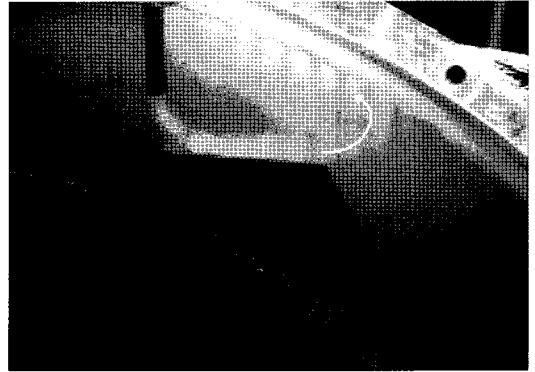


Fig. 13 Flow visualization of squared type impingement baffle plate.

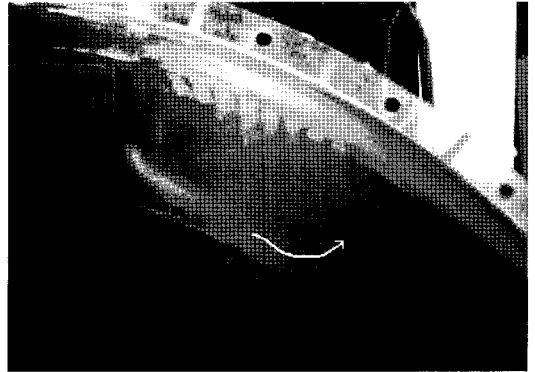


Fig. 14 Flow visualization of curved type impingement baffle plate.

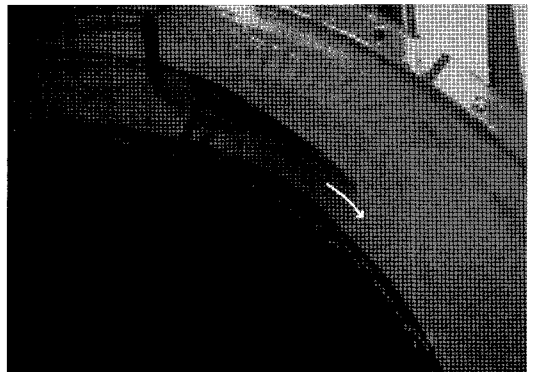


Fig. 15 Flow visualization of mitigating type impingement baffle plate.

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 입는지의 예측이 가능하다는 것을 알 수 있었고, 충격판 설계에 따라 급수가열기 동체 내부 감육으로 인한 손상을 완화시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.4 실제 감육 측정 데이터와의 비교

실제로 현장에서는 초음파 두께측정기를 사용하여 급수가열기 동체의 두께를 측정한다. 그리고 이를 토대로 급수가열기 동체의 감육지점을 확인하며, 이러한 확인작업은 급수가열기 동체 전체에 걸쳐 광범위하게 진행되므로 많은 경제적 및 시간적인 소모를 치를 수밖에 없는 실정이다. 따라서 본 절에서는 급수가열기 내벽 동체가 감육되는 지점을 유체유동 측면에서 미리 예측하고 규명하기 위하여 실제 감육 측정 데이터와 비교해 보았다. 위의 결과에서 단상과 2상의 큰 차이를 관찰할 수는 없었으므로, 본 절에서는 단상의 수치해석

및 실험 결과를 실제 감육 측정 데이터와 비교하였다.

Figure 16은 각형 충격판이 설치된 국내 특정 원자력발전소의 실제 급수가열기에서 초음파 두께측정기를 사용하여 얻어낸 동체 감육 측정 데이터와 수치해석 결과를 비교한 그래프이다. 수치해석 그래프에서 사용된 데이터는 추기노즐의 중심에서 동체 반경방향으로 선을 긋고, 이 선상에서 수집된 데이터를 사용하였다. 동체 감육 그래프에서 각형 충격판의 경우, 압력 집중 영역이 실측 데이터의 최대 감육 지점과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이는 본 연구에서의 수치해석 결과가 실제 급수가열기에 적용 가능함을 나타내는 것이라 생각된다. 그리고 곡률 충격판의 경우에는 수치해석 결과에서 언급하였듯이 실측 데이터와 각형 충격판에 비해 압력 집중 영역이 동체 하단부 쪽으로 이동하여 분포되는 것을 알 수 있다. 충격완화판과 다공 충격판의 경우, 전체적으로 압력 값이 현저히 낮아지는 것을 관찰할 수 있었으며 특별한 압력 집중 영역을 찾아볼 수 없었다.

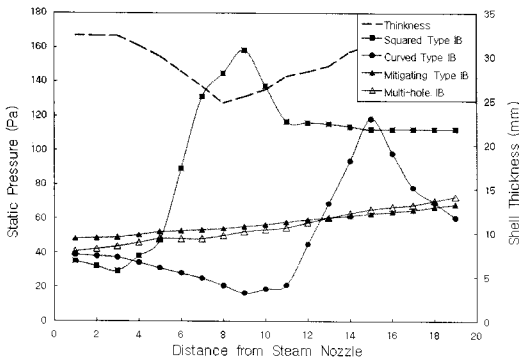


Fig. 16 Comparison of analysis and shell thickness.

Figure 17은 국내 특정 원자력 발전소의 실제 급수가열기에서 동체 감육 측정 데이터와 실험 결과를 비교한 그래프이다. Fig. 17도 Fig. 16과 마찬가지로 추기노즐에 가장 가까운 10열의 데이터를 충격판별로 취하여 작성하였다. 실험데이터의 선정은 실험결과를 표로 나타낸 Fig. 11에서 10열에 해당하는 실험결과들을 선정하여 그래프로 나타냈다. 수치해석과 마찬가지로 각형 충격판의 실험결과와 실측 데이터의 최대 감육 지점이 거의 일치하는 것을 알 수 있고, 곡률 충격판은 동체 하단부 쪽으로 압력 집중 영역이 분포한다. 충격완화판과 다공 충격판은 전체적으로 낮은 압력 분포를 나타낸다.

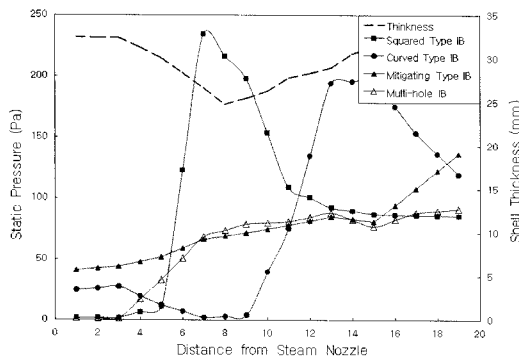


Fig. 17 Comparison of experiment and shell thickness.

수치해석과 실험 데이터의 비교·분석을 통해, 상호간의 결과를 입증할 수 있었으며 국내외적으로 현재 현장에서 사용 중인 충격판의 한계와 개선된 충격판이 동체에 미치는 영향을 관찰할 수 있었다.

4. 결 론

원자력 발전소 2차측의 고압터빈에서 추기되는 고온, 고압의 2상 증기로 인하여 급수가열기 내벽 동체가 감육되는 현상을 유체유동 측면에서 규명

하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

본 연구는 2상 조건에서의 실험 및 수치해석 결과가 단상에서의 결과와 어떠한 차이를 보이는가를 규명하였다. 선행 연구에서는 수치해석에 의한 비교만을 제시하였으나 본 연구에서는 실제 급수가열기의 1/2모델을 이용하여 현장과 동일한 조건 하에 실험을 실시함으로써 실험과 수치해석의 비교가 가능하도록 하였다. 또한 실제 모델의 충격판 형태와 더불어 개선된 형태의 충격판 형상인 곡률 및 충격 완화판에 대한 2상 실험도 실시하였다.

유체유동 현상 해석은 상용 수치해석 코드인 Fluent를 사용하였다. 수치해석 결과를 비교 분석해본 결과, 2상에서의 높은 압력 분포 영역은 단상에서의 영역과 대체로 비슷하였지만 단상에 비해 조금 더 확장되었음을 알 수 있었다.

실험 결과의 경우에는 수치해석의 결과와 동일하게 2상에서의 높은 압력 분포 영역이 단상에서의 결과보다 확장되었고 최대 압력 절대값 또한 증가한다는 것을 확인하였다.

단상과 2상에서의 유체 유동 해석 값들의 결과가 상이한 이유는 2상 조건에서는 습분에 의해서 실험장치 내부의 공기에 물 입자가 유입되어 전체적인 유동 유체 입자의 무게가 증가되었기 때문으로 생각된다.

단상 조건에 비하여 2상 조건에서의 수치해석 및 실험값이 상승한 결과가 동체 내부의 감속 완화에 대한 연구에 영향을 미칠 만한 차이는 아니라고 판단되어진다. 압력값은 다공 충격판을 제외하고 수치해석과 실험 모두에서 평균적으로 50 Pa 정도의 차이가 나타났기 때문이다. 다공 충격판은 압력의 산발적인 분포로 인하여 단상과 2상간의 차이가 거의 나타나지 않았다. 이를 통해 단상에서의 수치해석 및 실험의 결과가 실제 조건인 2상에서의 결과와 큰 차이가 없음을 확인하였고, 선행적으로 수행되었던 단상 조건에서의 결과에 대한 신뢰도를 높일 수 있었으며 다공 충격판의 개선점 또한 확인할 수 있었다.

따라서 선행연구에서 수치해석으로만 제시하였던 2상 조건에서의 동체 내부 감속 지점을 실험을 통해 보다 명확하게 확인할 수 있었다. 한편, 급수가열기 추기노즐 주위의 동체 벽면에서의 감속 완화방안으로 제시되었던 곡률 및 충격 완화판 형태의 충격판에 대한 검증은 2상 조건에서도

확실하게 성립됨을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제시된 결과가 몇 가지 경우에 대한 정성적인 비교이기 때문에 현장으로의 직접적인 적용에는 다소 무리가 있겠지만, 이러한 연구 결과를 바탕으로 발전소 급수가열기 추기노즐 주위의 동체 손상을 사전에 예방할 수 있는 설계개선과 동체 감속 완화 방안 관리에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

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

참고문헌

1. Von W. Kastner and Riedle, K., 1986, Empirisches Modell zur Berechnung von Materialabtragen durch Erosionskorrosion, VGB Kraftwerkstechnik, Vol. 66, pp. 1171-1178.
2. Point Beach 1, 1999, Steam Leak From Low Pressure Feedwater Heater, 1999~2005, LER.
3. Fort Calhoun, 1999, Shell Wall Thinning of Feedwater Heater, OE 10710, INPO.
4. KNHP, 2000, Technical Review for Proving the Shell Wall Thinning of the Feedwater Heater, Mechanical Department, Technical Review Report.
5. K. H. Kim, et al., 2005, Fluid Mixing Analysis for Predicting Shell Wall Thinning of a Feedwater Heater, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 173-180.
6. K. H. Kim, Lee, W. and Hwang, K. M., 2007, A Study on Experiment and Numerical Analysis for Disclosing Shell Wall Thinning of a Feedwater Heater, Transaction of KSME B, Vol. 31, No. 1, pp. 1-7.
7. K. H. Kim, Hwang, K. M., Jung, S. H. and Song, S. Y., 2007, 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, pp. 821-830.
8. K. H. Kim, Hwang, K. M., Lee, W. and Jin, T. E., 2008, 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, pp. 25-32.
9. Fluent Inc, 2006, Fluent 6.x Training Notes, pp. 1-56.