

급수가열기 추기노즐 충격판 주변의 동체감육 현상의 완화를 위한 실험 및 수치해석적 연구

정 선 희[†], 김 경 훈*, 황 경 모**, 송 석 윤***
경희대학교 대학원, *경희대학교 산학협력기술연구원, **KOPEC, ***KEPRI

Experimental and Numerical Analysis in the Surroundings of Impingement Baffle Plate of the Extracting Nozzle for Disclosing Shell Wall Thinning of a Feedwater Heater

Sun-Hee Jung, Kyung-Hoon Kim*, Kyeung-Mo Hwang**, Seock Yoon Song***
Graduate school, Kyung Hee University, Yongin 446-710, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin 446-710, Korea

**Korea Power Engineering Co., Inc, Giheung. 446-593

***Korea Electric Power Research Institut, Deajeon. 305-380

(Received August 8, 2007; revision received October 17, 2007)

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 results using the FLUENT code and the down scale experimental data on effect of geometry of the impingement baffle plate on the shell wall thinning. Additionally, a new type impingement baffle plate was installed above the impingement baffle plate in the feedwater heater and then the numerical and experimental study were performed in the same progress.

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

1. 서 론

2007년 4월을 기준으로 20기의 원자력발전소가

가동중에 있다. 최근 건설되고 있는 원자력 발전소 2차 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 절

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2874; fax: +82-31-201-3288

E-mail address: aeny99@khu.ac.kr

차 얇아지고 결국에는 기기의 압력경계 부분이 파손에 이르게 된다. 이러한 현상을 감육(Wall Thinning)이라 한다. 유동가속부식이란, 기계적인 손상과는 달리 유체의 와류(Turbulent) 흐름과 이에 따른 물질이동의 상승효과로부터 금속표면 산화막의 용해 또는 물질전달 속도가 더욱 빠르게 일어나는 현상을 말한다. 원자력 발전소에서 유동가속부식은 배관에서 주로 문제가 되어 왔으나⁽¹⁾ 가동년수가 증가함에 따라 급수가열기, 습분분리재열기 등과 같은 기기에서도 주요 문제점으로 나타나고 있다.⁽²⁾

고압터빈에서 급수가열기로 들어오는 추기증기는 고온, 고압, 고속의 2상 증기이다. 급수가열기의 내부에 설치된 전열관이 추기증기에 직접 노출될 경우에 손상이 발생할 수 있다. 이 손상을 방지하기 위하여 전열관의 위쪽으로 충격판(Impingement Baffle Plate)을 설치하게 된다. 유입된 추기증기는 이 충격판에 부딪친 후, 모든 방향으로 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 있다.⁽³⁾ 그 해 11월에는 미국 Fort Calhoun 원전의 급수가열기 5번 추기노즐 충격판 주변의 동체에서 심각한 감육손상이 발생되어 침식보강용접(Flush Patch Weld)을 수행하였다.⁽⁴⁾ 국내에서도 2000년 10월 특정 가압경수로형 원전의 급수가열기 5A와 5B에서 유사한 손상을 경험하여 보강용접을 수행하였다.⁽⁵⁾

국내 원전 2차측의 급수가열기 설계 방식은 대부분 유사하기 때문에 이러한 급수가열기 동체 감육손상은 원전의 안전운영과 급수가열기 건전성 확보 차원에서 중요하게 고려해야 한다. 따라서, 급수가열기 추기노즐 충격판 주변의 동체감육 현상규명을 위한 연구가 진행되었다.⁽⁶⁾ 충격판의 형상에 일정한 직경을 가진 구멍을 여러개 뚫은 다공충격판(Porous Plate)을 급수가열기 내부의 충격판 위에 추가적으로 도입하여 동체감육 현상의 완화의 정도에 대한 연구가 진행되었다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 선행 연구결과를 바탕으로 충격판 형상의 변형 및 급수가열기 내부의 충격판 위에 새롭게 설계된 충격완화판의 도입을 통하여 급수가열기 동체의 감육 현상이 완화되는지 수치해석과 실험을 수행하여 결과를 비교·검토하였다.

2. 해석 및 실험모델 구성

급수가열기의 경우 실제로는 2상의 증기가 추기노즐을 통해 급수가열기로 유입이 되나, 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 동일하다는 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.⁽⁸⁾ 이와 같은 문제로 실험설비는 상사를 통하여 1:2 비율로 축소하여 진행되며, 역학적 상사를 통하여 실험조건을 도출하게 된다. 본 연구에서는 완전 상사가 이루어진 실험조건으로 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

급수가열기 충격판에 반사되는 유체의 유동 및 동체 감육 특성을 연구하여 동체 감육 현상의 완화를 위한 방법을 찾고자 하였다. 급수가열기 내부에 충격판의 형상에 따라 유체의 유동을 살펴보고, 충격완화판을 추가적으로 도입하여 동체 감육 현상의 완화가 이루어지는지 살펴보기 위해서 상용수치해석 프로그램인 FLUENT로 해석을 수행하였다.⁽⁹⁾ 해석모델 구성은 국내 가압경수로형 원전 2차측의 급수가열기 5A를 대상으로 하였다. 급수가열기 5A 동체 부분과 고압터빈에서 추기되는 추기라인의 일부를 해석대상으로 결정하였다.

Fig. 1은 급수가열기 5A의 반단면도를 보여준다. 해석범위는 그림에서 볼 수 있듯이 동체 상단의 절반과 추기라인의 유량조절밸브 후단을 대상으로 하였다. 동체 내부에 있는 전열관은 관심대상이 아니므로 해석범위에 포함시키지 않았다. Fig. 2는 단일블럭(Single Block)으로 구성한 해석모델의 격자구성을 보여준다. Cell 수는 약 120,000개

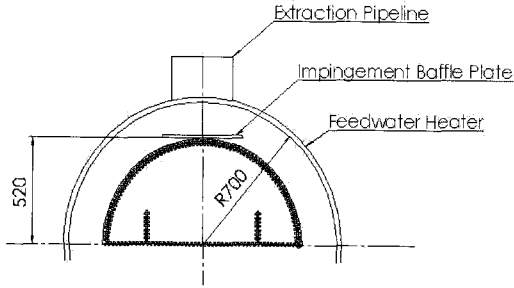


Fig. 1 Half cross-sectional view.

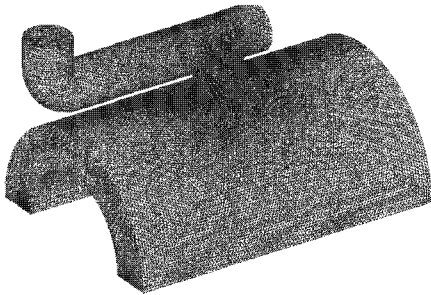


Fig. 2 Cell division.

의 삼각격자(Triangle)로 구성하였다.

급수가열기 추기노즐로 유입되는 증기의 Re수를 평가하면 2.8×10^5 이고, 추기증기는 충격판에 부딪친 후 모든 방향으로 반사된다. 따라서 해석 대상 모델 내부의 구조와 열유동 조건을 고려하여 물리적으로 적절한 수치해를 얻고자 급수가열기 내부의 유동을 3차원, 정상상태 및 난류로 간주하였다. 난류 점성모델로는 추기라인에서 유입되는 증기가 충격판에 부딪친 후 동체 벽면으로 반사되어 흐르고 일부는 충격판에서 분리된 후, 후면에서 재결합되는 유동특성 해석에 적합하다고 알려진 RNG k-ε Model을 적용하였다.⁽⁸⁾ 난류 점성비(Turbulent Viscosity Ratio)는 추기노즐 전단의 밸브를 감안하여 10%로 설정하였다. 수치해석을 위한 이산화(Discretization) 기법으로 Linear, 모델턴과 체적분율에 대해서는 Second Order Upwind를 적용하였다.

급수가열기 및 추기라인 내부의 작동유체는 공기로 15 °C, 1.013×10^5 Pa의 상태이다. 입력경계 조건으로 사용되는 추기라인의 유속은 균일속도 조건을 적용하였으며, 속도계산에는 원전 2차측의 열평형도에 제시되어 있는 운전 데이터를 적용하였다. 해석 및 실험에 적용된 경계조건과 물

Table 1 Boundary conditions

Items	Unit	Value
Extraction Nozzle velocity	m/s	13.125
Density	kg/m ³	1.29
Viscosity	kg/m-sec	1.98×10^{-5}
Temperature	°C	15

성치는 Table 1과 같다.

2.2 충격판 및 충격완화판

2.2.1 충격판의 형상

급수가열기 추기라인의 고압터빈에서 들어오는 고온, 고압, 고속의 추기증기는 동체 내부의 충격판에 부딪친 후 반사되어 급수가열기 동체 내벽에 부딪쳐 동체 감속을 일으키는 것으로 알려져

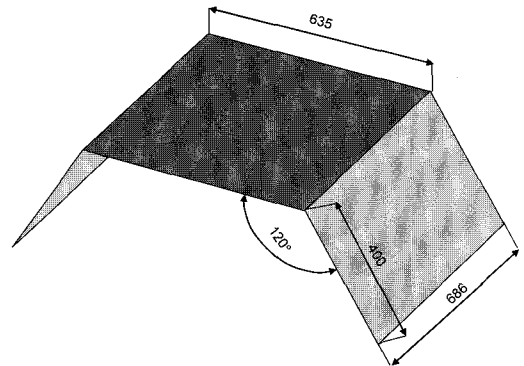


Fig. 3 Squared type impingement baffle plate.

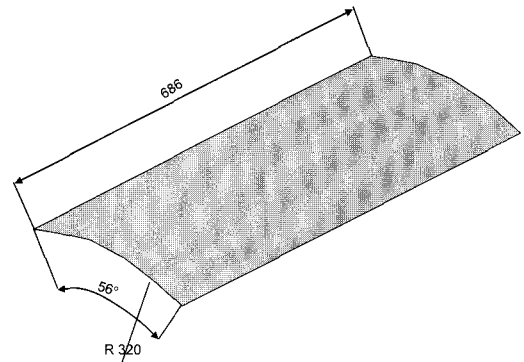


Fig. 4 Curved type impingement baffle plate.

있다. 따라서 본 연구에서는 추기증기가 동체 내부의 충격판에 부딪친 후 반사되어 흐르는 유동의 방향을 바꿔주어 동체에 부딪치는 운동량을 없애고자 하는 생각으로부터 동체감육 현상을 완화할 수 있는 방안으로 충격판 형상을 변형시키는 방법을 고안하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 해석 및 실험의 수행과정에서 사용되어진 각각의 충격판의 형상을 나타내고 있다. Fig. 3은 특히 특정 가압경수로형 원자력발전소에 실제로 사용되어지고 있는 각형 충격판 모델이고, Fig. 4는 개선된 곡률 충격판 모델이다. 2가지 충격판 모델은 급수가열기 동체 내부에 삽입되어 각각의 경우에 따라 해석 및 실험을 진행하였다.

2.2.2 충격완화판의 형상

급수가열기 동체 감육 현상을 완화시키기 위하여 충격판의 형상을 변화시키는 방법 이외에 새로운 충격완화판을 도입하여 추가적으로 급수가열기 동체 내부에 설치하는 방안에 대한 연구를 진행하였다. 충격완화판은 추기노즐보다 약간 큰 직경의 구멍 크기로 반곡된 판에 구멍을 뚫어 개선된 곡률충격판 위에 설치하는 형태를 취하였다. Fig. 5는 해석 및 실험에 사용되어진 새로이 설계된 충격완화판의 형상을 나타내었다.

2.3 실험 모델

급수가열기의 실제조건을 그대로 재현하여 실험하기는 매우 어려우므로 상사법칙을 적용하여 실험모델을 제작하였다. 상사법칙이란 기하학적 상사(Geometric Similitude), 운동학적 상사(Kinematic Similitude)가 만족되고 무차원 독립변수가 같다

면 결국 무차원 증속변수가 같게 된다는 것이다. 실험모델은 1/2의 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.

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

급수가열기 실험모형의 관심부위는 추기라인과 인접한 동체 내부이며 원통 내부에서 상하부가 분리되어 있는 형태이므로, 동체의 하부는 모형에서 제외하였으며, 내부에는 충격판과 전열관 및 전열관 지지대를 설치하였다. 실험모형 제작에는 급수가열기 동체 내부에서 추기노즐에 의한 유동상태의 모습을 직접 볼 수 있도록 투명 아크릴로 제작하였으며, 전열관 다발은 재질이 가벼운 알루미늄관을 사용하여 제작하였다. 또한 유동형상을 가시화하기 위하여 연 발생 장치를 배관 내부

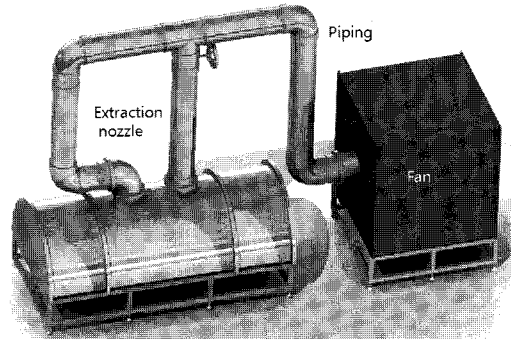


Fig. 6 Layout of test rig.

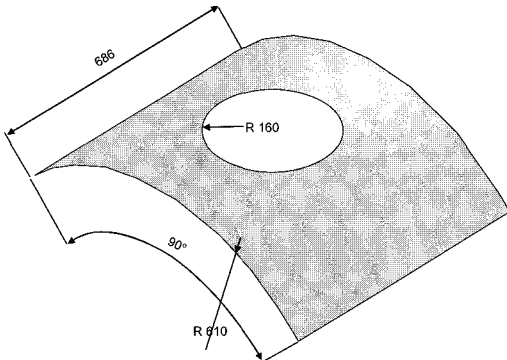


Fig. 5 New type impingement baffle plate.

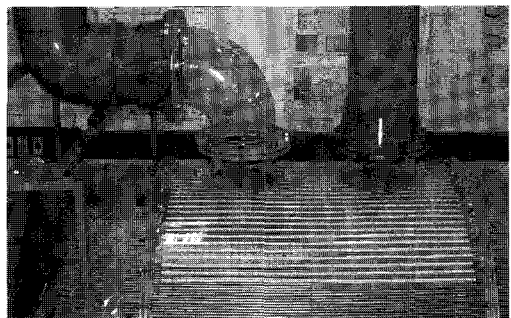


Fig. 7 Picture of test section.

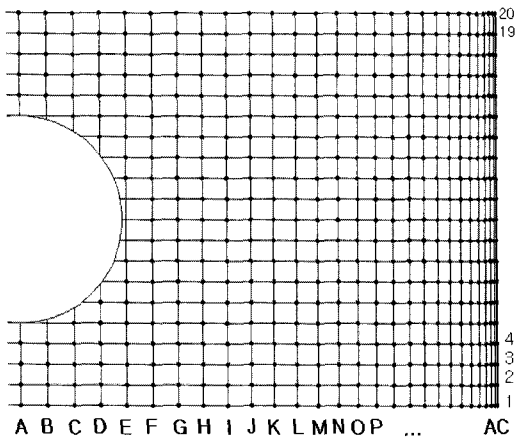


Fig. 8 Pressure measuring points.

에 설치하였다. Fig. 6은 상사된 급수가열기 동체의 실험모형을 나타낸 것이며, Fig. 7는 내부형상을 보여준다.

급수가열기 내부에 충격판 및 충격완화판을 도입하였을 때의 유동과 감육의 정도를 알아보기 위하여 Fig. 8과 같이 30 mm 간격으로 가로방향은 A~AC까지 세로방향으로는 1~20까지의 배열로 약 600개의 구멍을 뚫어 벽면의 압력을 측정하는 실험을 진행하였다. 또한, 추기라인 주변의 유동을 제한하기 위하여 연 발생장치로 가시화실험을 수행하였다. 실험 조건은 Table 1에서 보는 바와 같이 해석조건과 동일하게 진행하였다.

3. 해석 및 실험결과의 토의

3.1 해석 결과

급수가열기의 추기노즐에서 추기되는 유체에 의한 감육현상을 완화시키는 방안으로 충격판의 형상을 변화시키는 방법과 급수가열기 내부에 추가적으로 충격완화판을 설치하는 방법을 고려하여 수치해석을 수행한 결과를 다음 Fig. 9~Fig. 11에 나타냈다. 해석을 수행한 결과, 각형 충격판의 경우는 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 추기증기가 충격판에 부딪친 후 급격하게 유동의 방향이 변화되어 동체와 충돌하는 지점이 분명하게 나타난다. Fig. 10은 곡률 충격판의 경우로서, 추기증기가 완만하게 유동의 방향이 변화되어 동체와 충돌하게 되는 지점이 각형 충격판보다 아래쪽에 형

성되는 것을 알 수 있었다. 집중 충돌유동으로 인하여 동체벽면에 나타난 가장 큰 압력의 크기가 각형 충격판의 경우 59.9771 Pa이었던 반면, 곡률 충격판의 경우 51.0528 Pa로 압력의 절대치가 전반적으로 작아져서 동체 감육 완화 측면에서 충격판의 형상만으로도 감육 현상이 개선될 수 있음을 보여주었다. 한편, Fig. 11에서와 같이 감육손상의 개선을 위하여 충격 완화판을 설치하여 해석을 수행한 결과, 동체의 벽면에 국소적으로 압력이 집중되던 부분은 나타나지 않고 있으며, 가장 높은 압력의 크기가 10.6796 Pa로 급수가열기 내부에 곡률 충격판만 설치하는 경우보다도 훨씬 더 개선된 것을 알 수 있다.

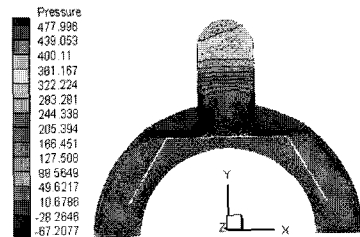


Fig. 9 Pressure and velocity distribution with squared type impingement baffle plate.

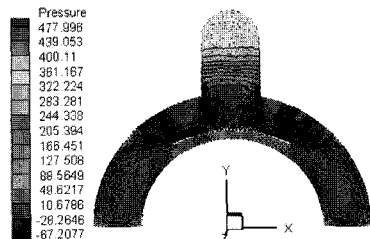


Fig. 10 Pressure and velocity distribution with curved type impingement baffle plate.

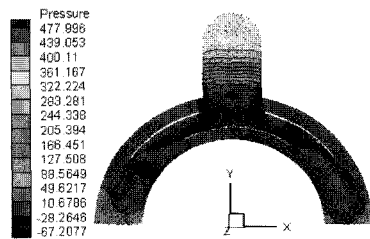


Fig. 11 Pressure and velocity distribution with new type impingement baffle plate.

3.2 실험 결과

3.2.1 압력분포 실험결과

실험을 진행한 결과, 수치해석의 결과로 나타난 동체의 벽면 압력과 비슷한 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. Table 2에서 보는 바와 같이 각형 충격판의 경우에는 급수가열기 동체에 부딪치는 추기유동의 잦은 충돌 지점이 P 라인(추기노즐에서 460mm지점)으로 나타나 있어 Table 3에 나타나 있는 곡률 충격판의 V 지점(추기노즐에서 660mm지점)에 비해서 충돌 지점이 위쪽에 형성되는 것을 알 수 있다. 추기노즐 입구 압력과 차압을 비교하여 보았을 때, 압력값도 각형 충격판의 경우가 최고 압력이 1.03 mmAq인데 비해 곡률 충격판이 -2.27 mmAq로 나타났다. 여기에 Table 4에서 보는 바와 같이 충격 완화판을 추가적으로 설치한 경우에는 각형 충격판과 곡률 충격판에서 나타나던 집중 충돌 부위는 거의 나타나지 않고, 압력값의 분포도 또한 고르게 나타났다. 충격 완화판을 도입한 경우 최고 압력은 -4.29 mmAq로 세 경우 중에서 가장 낮게 나타나고 있어서 개선된 모습을 확인할 수 있다.

3.2.2 유동가시화 실험결과

연 발생장치로 추기라인 주변의 유동을 재현할

수 있도록 유동가시화 실험을 진행하였다. Fig. 12~ Fig. 14는 유동가시화 실험을 한 결과로서 급수가열기 실험모델 정면에서 촬영한 그림이다. 유동가시화 실험은 유동이 안정된 시점에서 연 발생 주입구를 추기라인 중심에서 80mm 떨어진 위치에서 사진촬영을 하였다. Fig. 12는 각형 충격판을 실험한 결과로서, 연기가 충격판에 부딪친 후 충격판의 평판부에 거의 달라붙어 흐르다가 평판부의 끝에서 박리되고 있는 것을 볼 수 있다. 박리된 유동은 거의 평판부와 평행한 지점에 충돌하며, 동체의 안쪽 곡면을 따라 부딪쳐서 일부는 유동의 상부에서 와류를 형성하며, 일부는 하류로 떨어지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13은 곡률 충격판의 경우로서, 추기중기가 충격판에 부딪친 후에 유체가 곡률을 따라 흐르다가 충격판의 끝에서 박리가 되며, 급수가열기 동체 상부의 약 2/3 지점에서 벽면과 충돌하고 있는 것을 볼 수 있다. 여기에서도 확인할 수 있듯이 곡률 충격판을 따라 유체유동이 동체벽면과 함께 확산되어 감을 알 수 있다. Fig. 14는 곡률 충격판에 충격완화판을 추가적으로 도입한 경우이다. 추기노즐에서 유입된 유체는 충격판에 부딪친 후, 급수가열기 쪽으로 유동의 방향이 반사되나 충격 완화판의 설치로 인하여 동체에 미치지 못하고, 충격 완화판에 부딪친 후 아래쪽으로

Table 2 Average of wall static pressure at the measured positions in case of squard type impingement baffle plate(velocity : 14.54m/s, Unit : mmAq)

	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
I	-9.25	-9.25	-9.14	-9.37	-9.46	-9.50	-9.36	-9.41	-9.31	-9.04	-9.04	-9.20
J	-9.70	-9.80	-9.65	-9.76	-9.96	-9.69	-9.82	-9.58	-9.42	-9.22	-9.63	-9.38
K	-9.37	-9.95	-9.72	-9.73	-10.37	-10.06	-10.10	-10.62	-10.10	-9.58	-9.03	-9.01
L	-8.64	-9.30	-8.92	-9.28	-9.00	-9.33	-9.63	-9.34	-9.53	-9.29	-9.03	-9.32
M	-6.90	-7.71	-7.73	-7.73	-7.13	-7.54	-7.78	-8.54	-8.04	-8.19	-8.31	-8.43
N	-4.53	-4.77	-4.70	-5.19	-5.02	-4.85	-4.90	-5.72	-5.48	-5.42	-5.96	-5.93
O	-1.70	-1.78	-1.23	-1.46	-1.10	-1.35	-2.06	-2.53	-1.79	-2.49	-2.73	-2.76
P	-0.41	0.39	0.60	0.87	0.11	1.03	0.63	0.34	-1.65	-0.71	-1.79	-2.27
Q	-2.54	-3.23	-1.87	-1.31	-1.37	-1.29	-1.34	-1.69	-1.36	-2.24	-2.20	-3.59
R	-5.75	-3.88	-3.75	-3.65	-3.73	-3.57	-4.02	-3.53	-3.67	-5.07	-4.91	-4.81
S	-4.86	-4.60	-4.74	-4.64	-4.47	-5.29	-4.99	-5.45	-4.40	-5.32	-4.87	-5.91
T	-5.68	-5.27	-5.13	-5.00	-5.11	-4.98	-5.17	-5.37	-5.37	-5.64	-5.68	-6.45
U	-5.28	-5.36	-5.18	-5.03	-5.33	-5.33	-5.36	-6.51	-6.01	-5.95	-5.87	-6.09

Table 3 Average wall static pressure at the measured positions in case of curved type impingement baffle(velocity : 14.51m/s, Unit : mmAq)

	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
I	-7.40	-7.16	-7.17	-7.24	-7.32	-6.98	-6.82	-6.81	-6.75	-6.37	-6.42	-6.48
J	-7.50	-7.20	-7.65	-7.52	-7.59	-7.16	-6.87	-6.92	-6.60	-6.56	-6.70	-6.75
K	-7.39	-7.57	-7.62	-7.43	-7.70	-7.05	-6.88	-6.86	-6.73	-6.45	-6.54	-6.64
L	-7.79	-7.80	-7.50	-7.48	-7.57	-7.32	-7.20	-7.28	-6.74	-6.62	-6.62	-6.51
M	-7.77	-7.67	-7.83	-7.63	-7.31	-6.91	-7.60	-7.52	-6.95	-6.70	-6.48	-6.62
N	-7.89	-7.88	-8.12	-7.99	-7.60	-7.84	-7.61	-7.74	-7.18	-6.84	-6.82	-6.70
O	-8.07	-7.81	-7.98	-7.65	-7.70	-7.81	-7.56	-7.91	-7.87	-7.01	-7.24	-7.01
P	-8.05	-8.11	-8.43	-8.39	-7.91	-8.30	-8.15	-8.39	-7.41	-7.21	-7.11	-7.13
Q	-7.40	-7.69	-7.79	-8.82	-7.96	-8.16	-8.19	-8.02	-7.72	-7.08	-7.32	-7.01
R	-6.80	-6.87	-7.25	-7.63	-7.82	-7.80	-7.89	-8.03	-7.71	-7.07	-6.85	-6.32
S	-5.21	-5.63	-5.75	-6.31	-6.76	-6.68	-6.66	-6.53	-7.06	-5.93	-6.47	-5.58
T	-3.63	-4.87	-3.92	-4.18	-6.48	-4.02	-4.55	-5.88	-4.97	-4.90	-4.52	-4.53
U	-2.24	-2.16	-2.61	-2.81	-2.27	-3.08	-3.61	-3.11	-2.72	-2.99	-3.39	-2.92
V	-3.23	-4.07	-3.29	-2.82	-2.91	-2.43	-2.79	-2.88	-3.19	-3.56	-3.57	-3.76
W	-4.05	-3.49	-3.58	-3.48	-3.46	-3.40	-3.67	-3.67	-3.73	-4.23	-4.36	-4.77
X	-4.69	-4.44	-4.28	-4.25	-4.42	-4.29	-4.33	-4.34	-4.71	-5.03	-4.86	-4.99
Y	-5.68	-5.79	-5.09	-4.97	-5.21	-5.15	-5.41	-5.06	-5.17	-5.69	-5.15	-5.74
Z	-5.03	-5.44	-5.20	-5.51	-5.64	-6.12	-5.56	-5.70	-5.63	-5.58	-5.57	-5.79
AA	-5.74	-5.78	-5.82	-5.64	-6.32	-6.17	-5.34	-5.88	-5.89	-5.69	-5.65	-5.85

Table 4 Average wall static pressure at the measured positions in case of new impingement baffle plate(velocity : 14.67m/s, Unit : mmAq)

	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
I	-7.63	-7.88	-7.97	-7.86	-8.21	-8.57	-8.55	-8.64	-8.94	-9.31	-8.92	-8.11
J	-7.70	-8.08	-7.76	-8.09	-8.25	-8.25	-8.49	-8.80	-8.63	-8.77	-8.23	-7.27
K	-7.48	-7.86	-7.80	-7.91	-8.06	-8.20	-8.21	-8.61	-8.36	-8.15	-7.56	-6.84
L	-7.47	-7.83	-7.65	-7.82	-7.78	-8.17	-8.15	-8.43	-7.89	-7.28	-6.92	-6.64
M	-7.59	-7.96	-7.72	-7.83	-7.77	-7.56	-7.95	-7.84	-7.25	-6.75	-6.65	-6.76
N	-7.07	-7.45	-7.29	-7.29	-7.07	-7.05	-6.67	-6.80	-6.30	-6.30	-6.44	-6.69
O	-6.94	-7.55	-6.91	-6.79	-7.04	-6.93	-6.54	-6.65	-6.27	-6.48	-6.52	-6.55
P	-6.97	-6.91	-6.79	-6.59	-6.75	-6.64	-6.53	-6.68	-6.17	-6.34	-6.44	-6.52
Q	-6.83	-7.04	-6.72	-6.62	-6.60	-6.48	-6.43	-6.41	-6.25	-6.36	-6.38	-6.31
R	-6.82	-6.95	-6.68	-6.63	-6.50	-6.61	-6.53	-6.42	-6.25	-6.36	-6.25	-6.52
S	-7.06	-6.86	-6.77	-6.65	-6.58	-6.42	-6.44	-6.42	-6.35	-6.31	-6.23	-6.42
T	-6.90	-6.72	-6.71	-6.46	-8.10	-6.39	-6.48	-6.49	-6.32	-6.30	-6.27	-6.09
U	-6.96	-7.13	-6.65	-6.68	-6.67	-6.53	-6.46	-6.38	-6.29	-6.26	-6.33	-6.41
V	-6.66	-6.92	-6.67	-6.46	-6.65	-6.65	-6.23	-6.73	-6.41	-6.47	-6.50	-6.48
W	-6.89	-6.98	-6.75	-6.62	-6.71	-6.73	-6.25	-6.37	-6.30	-6.38	-6.60	-6.58
X	-6.83	-7.16	-6.98	-6.72	-6.65	-6.61	-6.44	-6.53	-6.58	-6.43	-6.32	-6.60
Y	-6.84	-6.31	-6.31	-6.46	-6.59	-6.37	-6.50	-6.61	-6.30	-6.24	-6.36	-6.30
Z	-6.13	-6.55	-6.30	-5.95	-5.93	-6.15	-6.33	-6.38	-6.08	-6.22	-6.09	-6.09
AA	-5.23	-5.79	-5.49	-5.59	-5.71	-5.64	-5.83	-5.75	-5.80	-5.76	-5.66	-5.60
AB	-5.23	-5.17	-5.04	-5.23	-5.06	-5.13	-5.43	-5.66	-5.55	-5.24	-5.06	-5.13
AC	-4.92	-5.25	-4.90	-5.09	-4.95	-4.93	-4.99	-5.08	-4.87	-5.03	-4.84	-4.39

향하는 유동을 확인할 수 있다.

3.3 해석 및 실험 결과 검토

본 연구에서는 고압 급수가열기 내부의 충격판 형상을 각형 충격판, 곡률 충격판 및 충격 완화

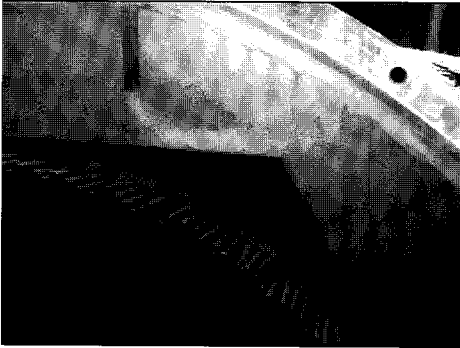


Fig. 12 Flow visualization of squared type impingement baffle plate.

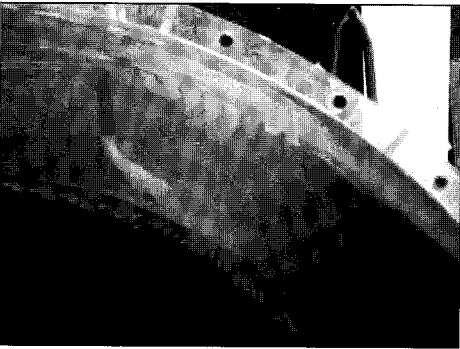


Fig. 13 Flow visualization of curved type impingement baffle plate.

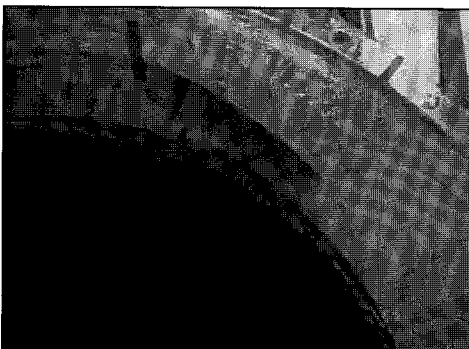


Fig. 14 Flow visualization of new type impingement baffle plate.

판으로 변화시켜 가면서 해석 및 실험을 진행하였고, 그 결과를 비교하여 보면 다음 그림 Fig. 15~Fig. 17과 같다. 해석부분 그래프 안의 사각영역이 실험결과의 영역과 비교되는 구간이다. Fig. 15와 Fig. 16에서 알 수 있듯이 각형 충격판과 곡률 충격판을 급수가열기 내부에 삽입하여 해석 및 실험을 수행한 결과, 2가지 경우 모두 일정한 구간에서 급수가열기 동체로의 높은 압력부위, 즉 집중 충돌 부위가 생겨나고 있음을 확인할 수있었다. 그런데, 곡률 충격판의 경우에 있어서 각형 충격판에 비해 집중 충돌부위가 동체 아래쪽에 형성되는 것을 알 수 있으며, 압력값도

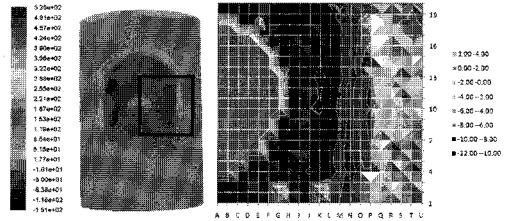


Fig. 15 Comparison between simulation and experiment result in case of squared type impingement baffle plate.

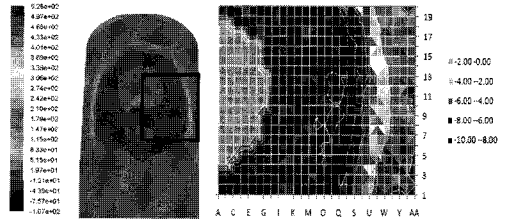


Fig. 16 Comparison between simulation and experiment result in case of curved type impingement baffle plate.

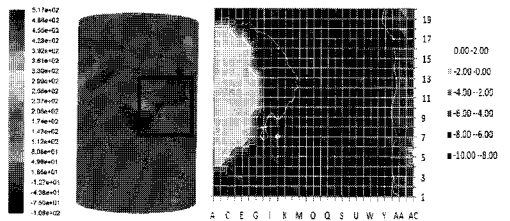


Fig. 17 Comparison between simulation and experiment result in case of new type impingement baffle plate.

낮아진 것을 알 수 있다.

Fig. 17은 충격 완화판을 급수가열기 내부의 곡물 충격판 위에 위치시킨 경우로서, 집중 충돌 부위는 생기지 않으며, 압력값도 훨씬 고르게 분포하고 있다는 것을 알 수 있다.

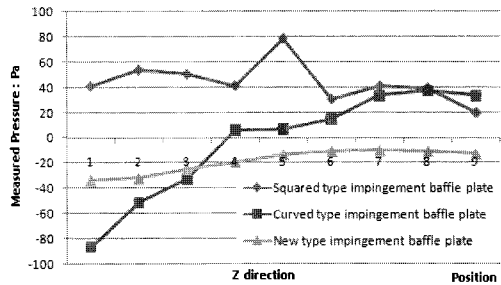
급수가열기 내부 압력의 수치해석과 실험값을 비교하면 다음과 같다. Table 5는 추기노즐을 중심으로 놓았을 때 Z방향으로 ±200 mm, 반경방향으로 700 mm 지역 내에 14개의 열과 9개의 행으로 나누어 126개의 포인트를 정하여 수치해석을 수행한 결과 압력값을 얻어낸 위치를 나타내고 있다. 따라서 Fig. 18에서는 Table 5의 위치 9지점의 압력분포값을 수치해석 결과값과 실험결과치로 비교한 그림이다. A)는 해석의 결과로 Point 9 지점의 각형 충격판, 곡물충격판, 충격 완화판의 압력분포의 경향성을 살펴볼 수 있다. B)의 실험결과는 각각의 충격판 설치한 후 가장 높은 압력을 나타내는 위치의 압력을 비교하여 나타낸 그래프로 각형 충격판의 P지점과, 곡물 충격판의 U지점, 충격 완화판의 AC 지점을 선택하여 비교한 그래프이다.

4. 결론

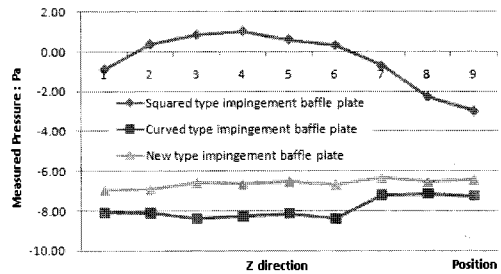
급수가열기 동체부의 감육은 추기노즐을 통과

Table 5 measured point of simulation Analysis

Contents	Column (X mm, Ymm)	Row (Z mm)
point 1	0, 700	
point 2	50, 698.2	
point 3	100, 692	
point 4	150, 683.7	
point 5	200, 670.8	-200,
point 6	250, 653.8	-150,
point 7	300, 632	-100
point 8	350, 606	-50
point 9	400, 574	0
point 10	450, 536	50
point 11	500, 490	100
point 12	550, 433	150
point 13	600, 360	200
point 14	650, 259	



(A) Simulation result



(B) Experiment result

Fig. 18 Comparison between simulation result and experiment result in the point 9.

한 증기가 충격판을 따라 흐르지 않고 반사됨으로써 감육을 발생시키는 것으로 밝혀졌다. 반사된 증기는 동체의 특정부위에 집중적으로 충돌하며 증기의 상태에 따라 유동가속에 의해 부식이 가속되었다. 부식의 발생을 억제하는 방법으로 유동을 방해하여 부식을 막는 방법을 선택하여 이에 따라 추기노즐에 유입되는 증기의 상태에는 영향을 주지 않고 충격판 주변의 유동을 변화시키는 방법으로 새롭게 설계된 충격 완화판을 추가적으로 도입하였다.

기존의 충격판 위에 추기노즐 직경 크기의 구멍을 뚫은 충격판 형태의 충격 완화판을 설치하였을 때, 충격판에 부딪친 후 동체로 반사되는 증기의 유동을 막을 수 있었다. 이것은 기존의 충격판을 제거하지 않고 위에 다른 형태의 판을 설치하므로 급수가열기 동체의 손상을 억제하면서 감육을 개선할 수 있는 효과적인 방법이다.

하지만 고압, 고속, 고온의 유체는 급수가열기 안으로 열교환의 목적으로 급수가열기 내부로 유입이 되는 것으로서 충격 완화판을 도입하였을 때 전열판에서의 열교환 능력에 영향을 미칠 수 있다는 점과 내부에 새로운 충격 완화판을 도입함으로써 내부 유동과 압력에 변화가 있을 수 있

다는 점을 고려해야 할 필요가 있다.

급수가열기 동체의 감육 현상의 개선을 위하여 수행된 충격판 형상 및 충격 완화판의 도입을 통해 수행한 해석 및 실험의 연구결과는 원자력 발전소 급수가열기 동체의 손상을 사전에 예방할 수 있는 재료선정과 수질개선 외에 유동가속부식으로 인한 동체 감육손상 관리에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업과 한국전력공사 전력연구원의 연구개발용역 사업으로 수행된 논문입니다.

참고문헌

1. Keller, H., 1978, Corrosion and erosion problems in saturated steam turbines, AIM Conf., Liege, Belgium, pp. 22-28.
2. Von, W. Kastner. and Riedle, K., 1986, Empirisches modell zur berechnung von materialabtragen durch erosionskorrosion, VGB Kraftwerkstechnik, Vol. 66, pp. 1171-1178.
3. Point Beach 1, 1999. Steam Leak From Low Pressure Feedwater Heater, 1999~2005, LER.
4. Fort Calhoun, 1999, Shell wall thinning of feedwater heater, OE 10710, INPO.
5. KHNP, 2000, "Technical report about the wall thinning of feedwater heater in the Korea nuclear unit."
6. 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.
7. Kim, K. H., Hwang, K. M. and Lee, Woo. 2007, A study on advanced impinging baffle model in extraction nozzle of a feedwater heater, Journal of ILASS-KOREA, Vol. 12, No. 1, pp. 18-29.
8. Kim, K. H., Lee, Woo. and Hwang, K. M., 2007, A study on experiment and numerical analysis for disclosing shell wall thinning of a feedwater heater, KSME, Vol. 31, pp. 1-7.
9. 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.