

고압형 급수가열기 동체 감육 완화를 위한 추기노즐 주변의 유동특성 연구

서 혁 기, 김 윤 신, 김 경 훈[†], 황 경 모^{*}

경희대학교 대학원 기계공학과, [†] 경희대학교 기계공학과 ^{*}한국전력기술(주)

A Study on the Flow Characteristic of surroundings of the Extracting Nozzle for Shell Wall Thinning of a Feedwater Heater

Hyuk-Ki Seo, Yoon-Shin Kim, Kyung-Hun Kim[†], Kyeong-Mo Hwang^{*}

ABSTRACT: 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. This paper describes operation of experience and numerical analysis composed similar condition with real high pressure feedwater heater. This study applied several 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), Feedwater Heater(급수가열기), Extracting Nozzle(추기노즐), Impingement Baffle(충격판)

1. 서 론

원자력 발전소의 탄소강으로 제작된 동체는 유체 흐름과 접촉할 경우에는 유동가속부식(FAC : Flow Accelerated Corrosion)이라는 손상을 받아 두께가 점차 얇아지고 결국에는 기기의 압력경계 부분이 파열되는 사고가 발생할 수도 있다.

유동가속부식 손상은 대부분 탄소강 배관에서 발생되어 왔으며, 1986년 12월 미국의 Surry 2 호기에서 급수관이 파열⁽¹⁾⁽²⁾되어 인명피해가 발생된 이후에 유동가속부식을 관리하기 위한 관심이

집중되어 왔다. 국내에서도 원자력 발전소의 가동 연수가 증가함에 따라 유동가속부식으로 인한 배관 손상사례가 점차 증가 되고 있다.

최근에는 유동가속부식으로 인한 감육손상이 배관뿐만 아니라 열교환기, 복수기 등에서도 발생되고 있다. 실제 1999년 11월 미국 Fort Calhoun 원전의 급수가열기 5번 동체부에서 심각한 감육손상이 발생되었으며, 국내에서도 2000년 10월 특정 가압경수로형 원전의 급수가열기 5번 동체부에서 유사한 손상을 경험하여 보강용접을 수행한 바 있다⁽³⁾.

한편, 기존의 연구에서는 상용 수치해석 코드인 Fluent를 이용하여 유체유동 해석을 수행하였고 결과 검토를 위하여 급수가열기 추기 노즐 주변의 동체두께 측정데이터를 코드해석 결과에 따

[†] Corresponding author

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

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

른 국부유속과 비교하였다⁽⁴⁾. 또한 선행 연구에서는 충격판 주위의 실제 유동현상을 파악하기 위하여, 실험장치를 모사하여 제작하였고, 연 발생장치를 이용한 유동 가시화 실험과 국부유속을 측정하기 위한 실험도 수행하였다. 이 선행 연구의 결과로 기존의 충격판 모델의 실험에서 나타난 급수가열기의 동체부의 감육은 추기노즐을 통과한 증기가 충격판을 따라 흐르지 않고 반사됨으로써 감육을 발생시키는 것으로 밝혀졌다⁽⁵⁾.

더욱이 동체의 감육현상에 관한 원인 규명 연구 후, 후속으로 진행되었던 연구에서는 급수가열기의 동체 감육 현상을 막기 위해서 추기 유체의 동체 벽면쪽으로 향하는 유동 방향을 변화시키는 방법을 선택하여 동체 감육 현상을 완화할 수 있는지에 대한 연구를 진행하였다. 추기 유체의 유동방향을 변화시키기 위해 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⁽⁶⁾.

한편, 본 연구에서는 원자력 발전소 2차측 실제의 현장상황과 유사한 조건을 조성하여 실험을 수행하고, 해석값들을 비교 검토하는 것을 목적으로 하며, 이에 따라 고압형 급수가열기 추기노즐 주위의 유동특성을 분석하여 급수가열기 동체 내부의 감육현상을 완화할 수 있는 방안을 찾고자 한다.

2. 수치해석 및 실험 방법

현장에서 사용하는 급수가열기의 경우 2상의 증기가 추기노즐을 통해 급수가열기로 유입이 된다. Fig. 1은 고압터빈에서 급수가열기로 추기되는 추기증기계통의 개략도를 나타낸다. 실험에 있어서 실제의 조건을 완벽하게 재현시키며 실험하기가 어렵기 때문에 실험설비의 상사를 통하여 1:2 비율로 축소하여 진행되며, 역학적 상사를 통하여 실험조건을 도출하게 된다. 따라서 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.

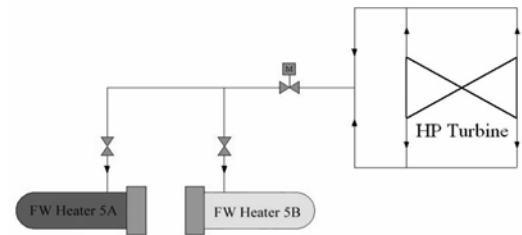


Fig. 1 Schematic diagram of extraction steam system

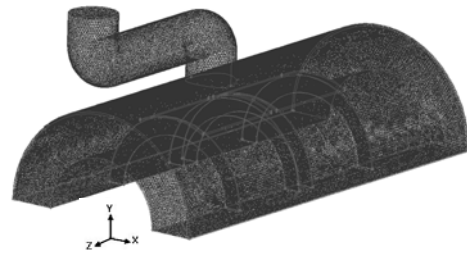


Fig. 2 Modeled Geometry & Cell Divisions

2.1 수치해석

Fig. 2는 고압형 급수가열기의 해석 모델 격자 구성을 나타낸다. 해석범위는 해석 모델을 통해 알 수 있듯이 동체 상단의 절반과 추기라인의 유량조절밸브 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 측정되는 것이 아니기 때문에, 동체의 중심으로부터 98%지점에서의 압력을 측정하기 위하여 2단 체적(Double Volume)으로 형성된 해석 모델을 구성하였다.

또한, 실제 현장에서 급수가열기로 공급되는 유체는 2상의 유체로, 이 조건을 조성하기 위하여, 작동유체는 1 atm에 대한 100°C의 습증기로 가정하였다. 입력 경계조건으로 사용되는 추기라인의 유속은 균일속도 조건을 적용하였으며, 속도계산에는 발전소 2차측의 열평형도를 이용하였다. 이외에 해석에 사용된 경계조건과 물성치는 Table 1과 같다.

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

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

및 난류로 간주하였다.

난류모델에는 Constant Viscosity model과 k-ε model, RNG k-ε model 등이 있는데, 각 난류모델의 특성과 급수가열기 내부유동의 특성을 고려하여 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해 본 연구에서는 RNG (ReNormalized Group) k-ε model을 적용하였고, 난류강도(Turbulence Intensity)와 난류점성비(Turbulent Viscosity Ratio)는 추기노즐 전단의 밸브를 감안하여 모두 20%로 설정하였다. 수치해석을 위한 이산화(Discretization) 기법으로서 압력에 대해서는 Linear, 모멘텀과 체적분율에 대해서는 First Order Upwind를 적용하였으며, 압력-속도 커플링에 대해서는 수렴률 개선을 위한 SIMPLE 알고리즘을 적용하였다.

2.2 실험장치

Fig. 3은 실험을 통해 급수가열기 추기노즐 주변의 유동특성을 알아보기 위하여 실제 급수가열기를 1:2 비율로 상사시킨 실험장치 그림이다. 이 실험장치의 구성은 크게 급수가열기 동체 모형, 유량공급용 송풍기, 배관, 가습기, 측정 장치로 구성되어 있다.

급수가열기 동체 모형은 내부유동을 관찰할 수 있도록 투명 아크릴로 제작하였고, 실제로 특정 원자력 발전소에서 사용되어 지고 있는 충격판 형상인 각형 충격판을 Fig. 4의 (a)와 같이 제작하였다.

또한 동체감육을 완화하기 위한 형상인 곡률충격판과 충격 완화판을 각각 Fig. 4-(b)와 Fig. 5-(a)와 같이 제작하였고 동체에 가해지는 압력을 비약적으로 줄이기 위해 고안된 다공 충격판을 Fig.

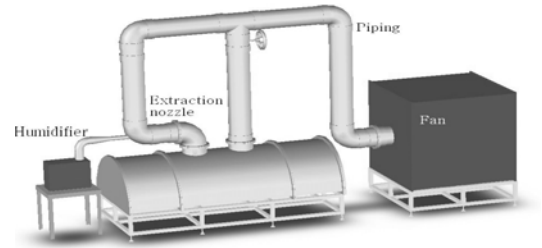


Fig. 3 Feedwater Heater Model

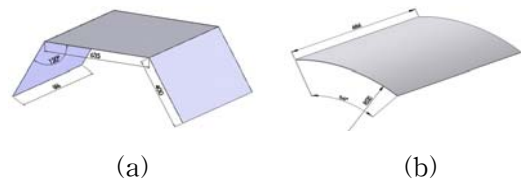


Fig. 4 Square Type IB and Curved Type IB



Fig. 5 Mitigating Type IB and Multi-Hole Type IB



Fig. 6 Pressure Measuring Hole & DAQ System(Data Acquisition System)



Fig. 7 Humidifier

5-(b)와 같이 제작하여 설치하였다. 다공 충격판의 구멍 개수와 크기는 수치해석을 통해 선행적으로 검증한 후, 가장 효율적인 모델을 채택하였다. 또 유체가 직접적으로 전열판 쪽으로 유입되는 것을 방지하기 위하여 상판과 하판의 다공의 배열을 엇갈리게 설계하여 추기증기에 의한 전열

관 파손이 발생하지 않도록 하였다. Fig. 6은 급수가열기 동체 벽면에서의 압력분포를 살펴보기 위하여 급수가열기 모형인 아크릴 동체 상에 정압공 511개를 뚫고 측정장치를 연결한 그림이다.

실험과정을 살펴보면, 먼저 유량공급용 송풍기로부터 추기라인과 동체에 유량을 공급하고, 유량조절부에서 유량을 조절하여 추기라인과 동체에 설치된 피토관으로부터 유동의 속도를 14.51m/s로 맞춘다. 유동이 안정된 후 동체에 설치된 압력공을 통해 각 위치에서의 압력을 측정하였다.

Fig. 6에는 Scanning Box를 활용하여 압력을 측정하고 LabVIEW를 통해 측정된 압력 데이터를 수집 정리하는 DAQ 시스템도 나타낸다.

실험 조건에서의 2상의 조건을 만족시키기 위하여 Fig. 7과 같은 습분 발생 장치를 통해 건도를 0.9로 조절하여 2상조건의 실험을 실시하였다.

3. 수치해석 및 실험 결과

3.1 수치해석결과

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 그리고 Fig. 11은 각각 각형충격판, 곡률충격판, 충격완화판 및 다공충격판이 설치된 고압형 급수가열기에서 추기노즐 주변의 유동특성을 Fluent를 이용하여 해석한 후, Tecplot을 이용하여 동체 반경의 98% 지점에서의 압력 분포를 비교하여 나타낸 것이다.

Fig. 8의 각형 충격판에서 수치해석 결과를 살펴보면 급수가열기 동체의 추기노즐을 중심으로 원주방향에 대하여 ± 0.4 m 지점에서 압력이 집중되는 것을 알 수 있다. 따라서 이 지점에서 동체 감육이 발생할 확률이 높다. 또한 급수가열기의 축 방향으로 노즐의 중심에서 -0.4 m 떨어진 지점에서도 압력이 집중되는 것을 알 수 있다. Fig. 9의 곡률 충격판에서의 압력집중영역은 추기노즐을 중심으로 원주 방향에 대하여 ± 0.5 m 부근에 나타났고, 각형 충격판에서의 결과와 비교했을 때, 동체 하단으로 압력집중영역이 후퇴하였음을 알 수 있다. 또한 집중되는 압력의 수치가 낮아졌음을 확인할 수 있다. Fig. 10의 충격 완화판과 Fig. 11의 다공 충격판의 경우에는 원주방향에 대하여 압력이 집중되는 영역은 나타나지 않았다. 그러나 Fig. 10의 충격 완화판의 경우에는 급수가열기 동체의 축 방향에 대하여 -0.1 m 지점에서

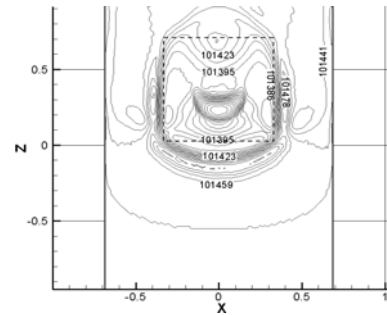


Fig. 8 Pressure Distribution of Squared Type Impingement Baffle Plate

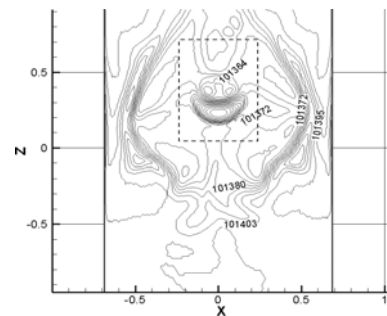


Fig. 9 Pressure Distribution of Curved Type Impingement Baffle Plate

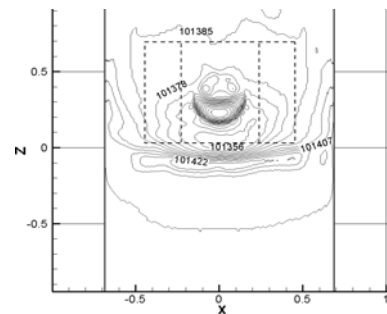


Fig. 10 Pressure Distribution of Mitigating Type Impingement Baffle Plate

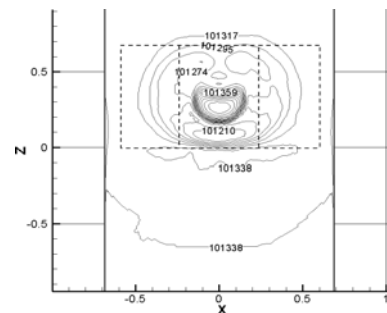


Fig. 11 Pressure Distribution of Multi-Hole Type Impingement Baffle Plate

압력이 집중되는 영역이 나타났다.

급수가열기 동체 내부에 충격판의 형상을 달리 하여 수치해석을 실시하고, 이에 따른 추기노즐 주변의 유동특성을 종합하면 충격판의 종류에 따른 압력 집중 영역은 각형 충격판과 곡률 충격판의 경우, 압력이 집중되는 영역이 뚜렷하게 나타났다. 충격 완화판은 이러한 집중되는 압력 분포를 완화시켜주는 효과를 보였다. 다공 충격판의 경우, 충격 완화판보다 개선된 결과를 나타내었다. 이에 따라 추후 문제화될 수 있는 상부판과 하부판 사이의 내압 상승을 해결할 수 있을 것으로 생각된다.

3.2 실험 결과

현재 실제 현장에서 사용되는 급수가열기를 상사시켜 실험을 실시하고, 데이터를 취득하였다. 이에 따른 실험결과를 Fig. 12부터 Fig. 13에 나타냈다.

Fig. 12는 각형 충격판을 급수가열기 내부에 설치하고 이에 따른 추기노즐 주변의 유동특성을 나타낸 결과이다. 실험결과를 살펴보면, 급수가열기 원주 방향으로 P열 부근에서 압력이 집중되며 이 부근의 압력값은 101609 Pa로 측정되었다.

Fig. 13은 곡률 충격판을 설치한 경우에 대한 실험 결과이다. 각형 충격판과 마찬가지로 원주 방향에 대하여 압력이 집중되는 영역이 나타났다. 압력이 집중되는 영역으로는 S열부터 W열까지 비교적 넓은 영역에서 압력이 집중된 것을 알 수 있다. 최대 압력값은 101547 Pa 정도로 각형 충격판의 경우보다 다소 낮아졌다.

충격완화판이 설치된 급수가열기 모델의 추기노즐 주변의 유동특성으로 인한 동체 압력 분포의 결과는 Fig. 14에 나타났다. 전체적으로 동체 내부의 압력분포가 비슷하게 나타났으나 동체 하단부로 점차 증가하는 추세를 보이고 있다. 따라서 압력이 집중되는 영역은 원주 방향으로 ZA부터 ZC영역에 이르는 지점까지 분포되었고, 최대 압력값은 101480 Pa로 측정되었다.

Fig. 15는 다공 충격판을 급수가열기 내부에 적용시켰을 경우의 실험결과이다. 실험결과를 살펴보면 동체 내부의 압력분포가 전체적으로 고르게 형성되었음을 알 수 있다. 이는 충격 완화판보다 압력분포의 산발성, 압력 절대값의 감소를 나타냈다. 따라서 이 실험에서 최대 압력값을 논하는

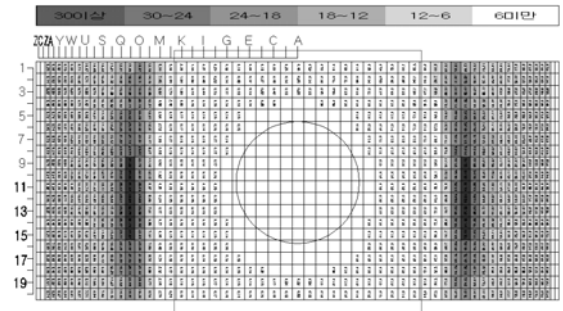


Fig. 12 Pressure Distribution of Squared Type Impingement Baffle Plate

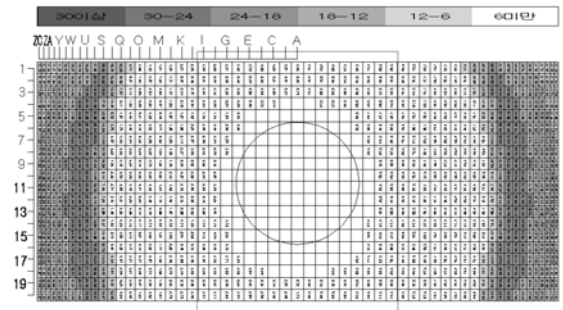


Fig. 13 Pressure Distribution of Curved Type Impingement Baffle Plate

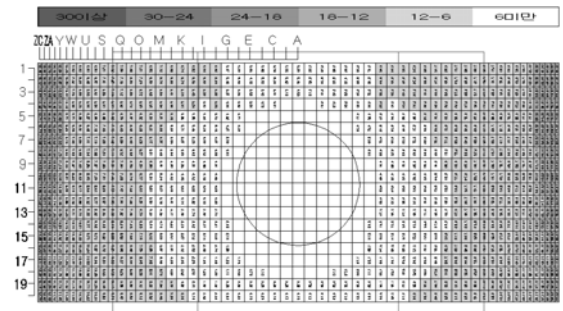


Fig. 14 Pressure Distribution of Mitigating Type Impingement Baffle Plate

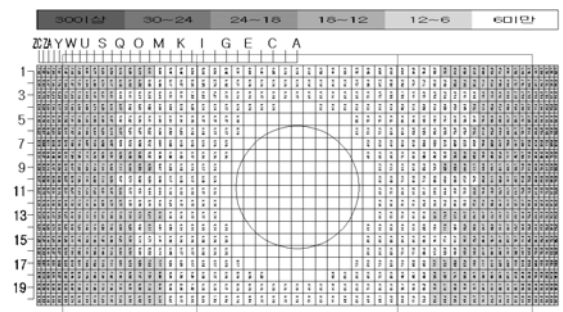


Fig. 15 Pressure Distribution of Multi-Hole Type Impingement Baffle Plate

것은 의미가 없다.

실험 결과를 종합해 보면, 수치해석과 마찬가지로 충격판의 종류에 따른 압력 집중 영역은 각형 충격판과 곡률 충격판의 경우, 압력이 집중되는 영역이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 충격 완화판과 다공 충격판은 이러한 영역이 나타나지 않은 것으로 볼 때, 집중되는 압력 분포를 완화시켜주는 효과가 있고 이에 따라 동체 감육 측면에서 많은 도움이 될 것으로 예상된다.

4. 결론

원자력 발전소 2차측의 고압터빈에서 추기되는 고온, 고압의 2상 증기로 인하여 급수가열기 내벽 동체가 감육되는 현상을 유체유동 측면에서 규명하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

본 연구는 충격판의 형상에 따라 추기노즐 주변의 유동특성에 대하여 2상 조건에서의 실험 및 수치해석 결과를 비교하였다. 선행 연구에서는 충격 완화판에 해당하는 수치해석과 실험을 다루고 있으나 본 연구에서는 다공 충격판에 대한 내용을 포함하여 이전의 연구에 비하여 추기노즐 주변의 유동특성에 대하여 포괄적으로 다루었다.

유체유동 현상 해석은 상용 수치해석 코드인 FLUENT를 사용하였다. 수치해석 결과를 분석해 본 결과 충격판의 형상에 따라서 추기노즐 주변의 유동특성에 많은 차이가 있는 것으로 나타났다.

실험결과와 경우에서도 수치해석의 결과와 동일하게 나타났으나 수치해석 결과에서 나타났던 축방향의 압력 집중 영역은 실험에서 다루지 못하였다. 본래 급수가열기 실험은 고압형과 저압형을 같이 다루게 되는데, 축 방향에 대한 실험은 저압형 급수가열기의 추기노즐로 인하여 데이터 취득이 불가능하다. 따라서 실험에서는 급수가열기 동체의 원주 방향에 대한 압력분포만 다루었다.

수치해석과 실험결과에서 각형 충격판을 동체 내부에 설치한 경우 추기노즐과 근접한 지역에서 압력값이 크고, 압력이 집중되는 영역이 나타났다. 따라서 압력이 집중되는 영역에서 동체 감육이 발생할 가능성이 크다. 곡률 충격판의 경우에는 압력집중 영역이 동체 하단부로 후퇴하였고 압력값도 각형 충격판의 경우와 비교할 때, 다소 낮아졌지만 여전히 감육의 가능성은 있을 것으로 예상된다. 그러나 충격 완화판과 다공 충격판의

경우에서는 추기노즐 주변의 압력이 크게 낮아지고 전체적으로 압력분포가 고르게 형성되었다. 이는 압력집중영역이 나타나지 않기 때문에 동체 감육완화에 큰 역할을 할 것으로 기대된다. 또한, 다공 충격판의 경우에는 충격판에 뚫려있는 구멍으로 인하여 전열판과 직접적인 열교환으로 열교환 효율이 증가될 것으로 예상된다.

따라서 이러한 연구 결과는 발전소 급수가열기 추기노즐 주위의 동체 손상을 사전에 예방할 수 있는 설계개선과 동체 감육 완화 방안 관리에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 한국전력공사 전력연구원에서 발주한 연구의 위탁연구과제로서 수행한 결과이며, 관계기관의 협조에 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. NRC, 1988, "Feedwater Line Break, Supplement 3", Notice pp. 86 - 106
2. NRC, 1987, "Thinning of Pipe Walls in Nuclear Power Plants", Bulletin 87 - 01
3. KHNP, 2000, "Technical report about the wall thinning of feedwater heater in the Korea nuclear unit", Technical report 00NJ12
4. Kyung Hoon Kim, Kyung Mo Hwang, Tae Eun Jin, 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
5. Kyunghoon Kim, Woo Lee, Kyungmo Hwang, 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
6. Sun Hee Jung, Kyung Hoon Kim, Kyung Mo Hwang, 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