

저압형 급수가열기 추기노즐에서 동체 감육 완화에 관한 연구

김경훈[†] · 황경모^{*} · 서혁기^{**}

A Study on the Relief of Shell Wall Thinning of Low Pressure Type Feedwater Heater Around the Extraction Nozzle Identified

Kyung Hoon Kim, Kyeong Mo Hwang and Hyuk Ki Seo

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

Abstract

The current machinery and tools of secondary channel of the nuclear power plants were produced in the carbon-steel and low-alloy steel. What produced with the carbon-steel occurs wall thinning effect from flow accelerated corrosion by the fluid flow at high temperature, high pressure. Several nuclear power plants in Korea have experienced wall thinning damage in the area around the impingement baffle-installed. Wall thinning by flow accelerated corrosion occurs piping system, the heat exchanger, steam condenser and feedwater heaters etc.. Feedwater heaters of many nuclear power plants have recently experienced sever wall thinning damage, which will increase as operating time progress. This study describes the comparisons between the numerical results using the FLUENT code and experimental data of down scale model.

1. 서론

원전 2차측에서 증기발생기로 들어가는 급수를 배수 및 추기증기로 가열하는 급수가열기에서는 1990년대 초반부터 추기노즐 부근의 동체 국부감육으로 인한 문제가 제기되고 있다⁽¹⁾. 급수가 열기 동체의 국부감육 문제는 고압 및 저압터빈에서 추기되는 증기가 전열관 손상을 방지하기 위 하여 설치된 충격판(impingement baffle)에 부딪친 후 편향되어 벽면에 채충격을 가하는 유동 때문에 발생하는 것으로 추정되고 있다. 이러한 급수가열기 동체 국부감육 손상은 1990년 이후에 급증하고 있으며, 가동년수 증가에 따라 발생빈도는 점차 증가하

고 있다. 국내의 고리 원자력발전소에서도 최소요구두께 이하의 국부감육 손상이 발생하여 침식보강용접(flush patch weld)을 수행한 바 있다. 동 문제로 인하여 국내 전체 발전소에서 급수가열기 추기노즐 주변의 동체를 대상으로 두께측정을 하여 국부감육 정도를 확인한 바 있으며, 그 정도가 고리 발전소 보다는 심하지는 않으나 문제발생의 소지가 잠재하고 있음을 확인하였다⁽²⁾. 최근 미국을 포함한 국내외 발전소에서는 이를 방지하기 위한 대책수립에 몰두하고 있으나 현재까지는 UT(Ultrasonic Test) 검사를 통한 사후 대책수립이 전부이다.

이에 따라 본 연구에서는 저압형 급수가열기 동체 내부에 설치된 충격판의 형상에 따른 추기노즐 주위의 유동특성에 대해 알아보았고, 급수 가열기 추기노즐 주변의 동체 감육의 원인을 유체유동 측면에서 분석하였다. 따라서 충격판 모델에 대해서 유동해석을 수행하고 실험 결과와 비교함으로써 설계 개선의 타당성을 검토하였다.

(2008년 9월 22일 접수 ~ 2008년 11월 10일 심사완료)

^{*}한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

^{**}경희대학교 대학원 기계공학과

[†]책임저자 회원, 경희대학교 기계공학과, 산학협력 기술 연구원

E-mail : kimkh@khu.ac.kr

TEL : (031)201-2509

2. 해석 및 실험모델 구성

2.1 해석모델

급수가열기 충격관에 반사되는 유체의 유동 및 동체 감속 특성 연구를 위하여 상용 전산 수치해석 코드인 FLUENT를 사용하였다. 해석모델 구성은 영광 원자력 발전소 3,4호기의 2차측 2번 저압형 급수가열기를 대상으로 수치해석 모델을 구성하였다. 2번 급수가열기는 고압터빈에서 추기되는 증기와 습분분리재열기, 3번 급수가열기 및 저온재열배수 배관에서 배수되는 물이 동체측으로 유입되며, 고온, 고압 및 고속의 증기가 전열

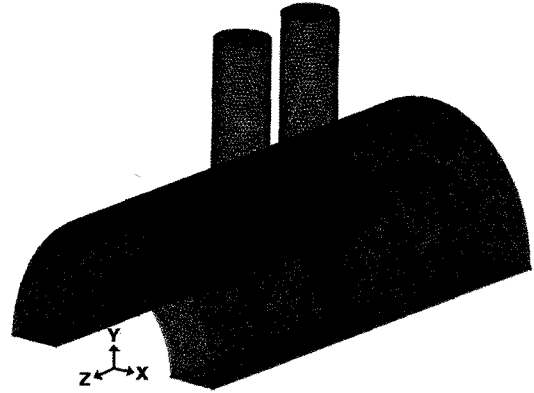


Fig. 3 Modeled geometry & cell divisions

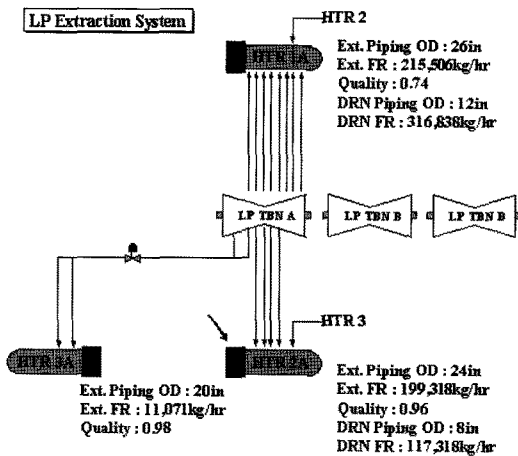


Fig. 1 Schematic diagram of extraction steam system

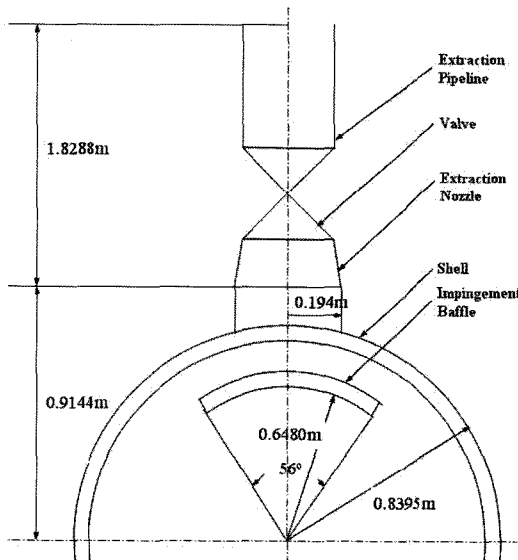


Fig. 2 A half cross-sectional view

관 손상 방지를 위하여 설치된 충격관과 동체에 심한 영향을 미치는 추기라인으로 이를 해석대상으로 결정하였다. Fig. 1은 저압터빈에서 급수가열기로 추기되는 추기증기계통의 개략도를 나타낸다⁽³⁾. 해석대상으로 결정한 급수가열기 HTR 2A를 그림상에 화살표로 나타냈다.

Figure 2는 해석대상으로 결정한 급수가열기 2A의 반단면도를 보여준다. 해석범위는 그림에서 볼 수 있듯이 동체 상단의 절반과 추기라인의 유량조절밸브 후단을 대상으로 하였으며 충격관을 동체 내부에 모델링하였다. 동체 내부에 있는 전열관은 관심대상이 아니므로 해석 범위에 포함시키지 않았다.

Figure 3은 단일블럭(single block)으로 구성된 해석모델의 격자구성을 보여준다. cell은 총 850,000개의 삼각 격자(triangle)로 구성하였다. 급수가열기 내부에 설치되는 충격관은 그 형상에 따라 감속 현상의 차이를 보기 위하여 각형 충격관, 곡률 충격관을 채용한 두 가지 경우에 대하여 모델을 구성하였다.

급수가열기 추기노즐로 유입되는 증기의 Re수를 평가하면 약 2.05×10^5 이고 추기증기는 충격관에 부딪힌 후 모든 방향으로 굴절된다. 따라서 해석대상 모델 내부의 구조와 열유동 조건을 고려하여 물리적으로 적절한 수치해를 얻고자 급수가열기 내의 유동을 3차원, 비정상상태, 압축성 및 난류로 간주하였다.

난류 점성모델로는 추기라인에서 유입되는 증기가 충격관에 부딪힌 후 동체 벽면으로 반사되어 흐르고 일부는 충격관에서 분리된 후, 후면에서 재결합되는 유동특성 해석에 적합하다고 알려진 RNG(ReNormalized Group) k-ε model을 적용하였으며, 추기라인과 급수가열기 외벽은 단열조건을 적용하였다⁽⁴⁾. 난류강도(turbulence intensity)와 난류점성비(turbulent viscosity ratio)는 추기

Table 1. Boundary conditions

Items	Unit	Value
Steam Temperatures in the Extraction Pipeline and the Shell Inlet	°C	100
Steam Velocity in the Extraction Pipeline	m/sec	9.6
Density	kg/m ³	1.29
Viscosity	kg/m-sec	1.98×10 ⁻⁵

노즐 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 수렴을 개선을 위한 SIMPLE 알고리즘을 적용하였다.

급수가열기 및 추기라인 내부의 작동유체는 1.013×10⁵ Pa에서 단상 조건에 대하여 구성하였다. 입력 경계조건으로 사용되는 추기라인의 유속은 균일속도 조건을 적용하였으며 속도계산에는 원전 2차측의 열평형도에 제시되어 있는 운전 데이터를 적용하였다. 해석에 적용된 경계조건과 물성치는 Table 1과 같다⁽⁵⁾.

2.2 실험모델

급수가열기 동체 내부의 실제조건을 재현하여 실험하기는 한계가 있으므로 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 실제 급수가열기의 크기의 1/2비율로 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. 역학적 상사가 이루어질 경우 다른 유체로 실험을 하여도 무방하다는 것을 의미한다. 아래 식에서 하첨자 p는 원형을 의미하고 하첨자 m은 모형을 의미한다.

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

실험 조건은 상온 20°C에서의 공기의 물성치를 적용하였으며, 무차원 파라미터 중 본 실험에 주요한 영향을 주는 인자로서 Reynolds 수만을 고려하였다. 운동학적

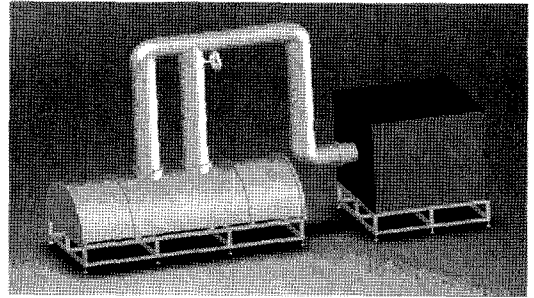


Fig. 4 Feedwater heater model

상사는 원형에서와 같은 방향의 유동과 모형의 축척비를 모든 방향에 적용하였으므로 같다고 보았다.

급수가열기 실험모형의 관심부위는 추기라인과 인접한 동체 내부이므로 동체의 하부는 모형에서 제외하였으며, 내부에는 충격판과 전열관 및 지지판을 설치하였다. 실험모형 제작에는 급수가열기 동체 내부 모습을 볼 수 있도록 투명 아크릴로 제작하였다.

Figure 4는 상사된 급수가열기 동체의 실험모형을 나타낸 것이다. 또한, 실제로 영광 원자력 발전소에서 사용되어지고 있는 2차측 2번의 저압형 급수가열기 동체 내부에 설치된 충격판 형상인 각종 충격판을 Fig. 5와 같이 제작하였다. 그리고 급수가열기 내부로 유입되는 추기증기를 동체의 하단으로 분산하기 위한 방안의 하나인 곡률 타입의 충격판을 Fig. 6과 같이 제작하여 설치하였다.

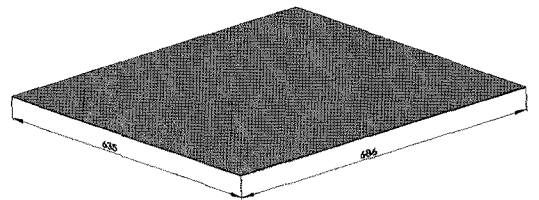


Fig. 5 Square shape impingement baffle

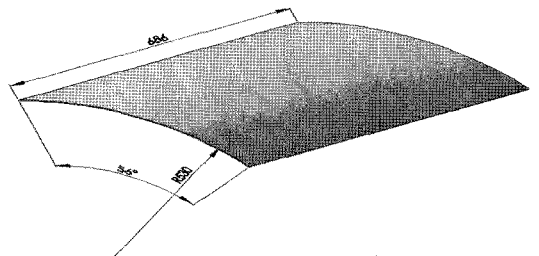


Fig. 6 Curved shape impingement baffle

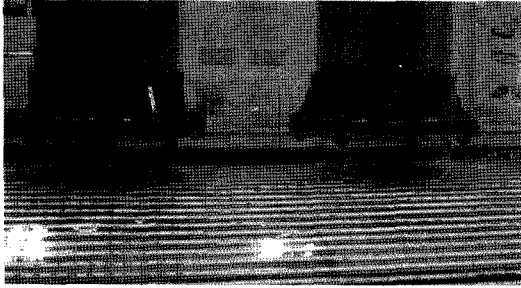


Fig. 7 Pressure measuring hole



Fig. 8 DAQ system (data acquisition system)

Figure 7은 급수가열기 동체 벽면에서의 압력분포를 살펴보기 위하여 급수가열기 모형인 아크릴 동체 상에 15 mm 간격으로 정압공 511개를 뚫은 것이다.

실험과정을 살펴보면, 먼저 유량공급용 송풍기로부터 추기라인과 동체에 유량을 공급하여 추기라인과 동체에 설치된 피토판으로부터 속도를 측정하고, 유량의 속도가 9.6 m/s에 이를 때까지 배관에 설치된 유량조절부에서 유량을 조절하였다. 유동이 안정된 후 동체에 설치된 압력공을 통해 각 위치에서의 압력을 측정하고 분석하였다. Fig. 8은 Scanning Box를 활용하여 압력을 측정하고 LabVIEW를 통해 측정된 압력 데이터를 수집하고 Excel로 정리하는 DAQ 시스템을 나타낸다.

3. 해석 및 실험결과

3.1 해석 결과

해석결과로서 Fig. 9는 저압형 급수가열기에 있어서 각형 충격판을 설치하였을 때의 동체 내부 벽면에서의 국부 압력분포를 보여준다. 여기서 (+x) 방향은 동체 오른쪽으로 원주방향, (+y) 방향은 동체 중심에서 벽면을 향하는 방향이며 (+z) 방향은 동체 축방향을 나타내며 Fig. 3에 표기한 좌표와 일치한다. 그림에 표기된 숫자

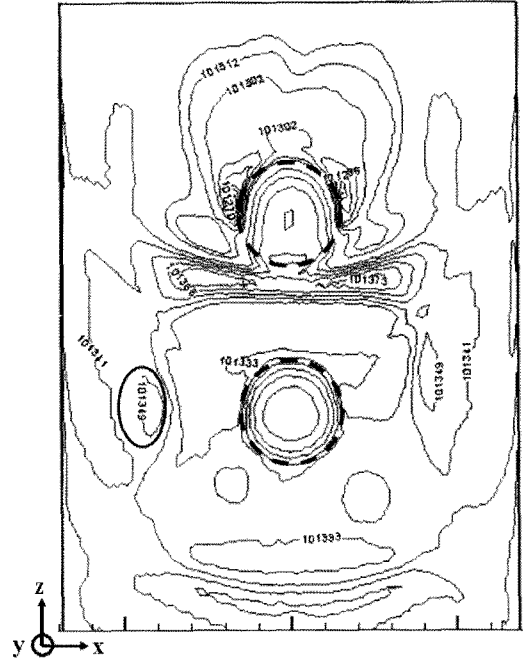


Fig. 9 Pressure distribution (square shape impingement baffle)

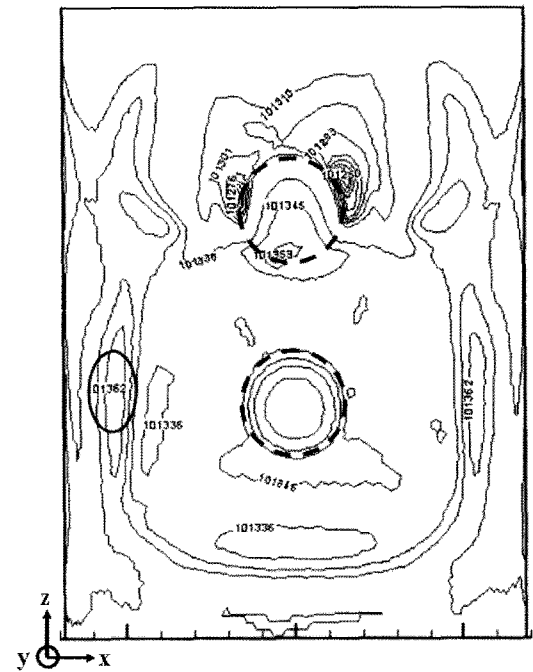


Fig. 10 Pressure distribution (curved shape impingement baffle)

의 수치해석 단위는 Pa 이다.

Figure 9에서 굵은 점선으로 표시된 원이 노즐의 위치

를 나타내며, 두 노즐을 통해서 추기증기가 급수가열기 내부로 유입된다.

급수가열기 내부에 각형 충격판을 설치한 경우, 두개의 추기노즐 사이의 압력이 상당히 높아진 것을 알 수 있다. 이는 그림상의 상단에 위치한 추기노즐에서 들어온 유체가 하단의 추기노즐에서 들어온 유체가 충격판에 부딪힌 후 동체와 부딪쳐 발생하는 현상으로 추정된다. 이는 각형 충격판의 경우, 충격판에 부딪친 유체는 임의의 방향으로 향하게 되는데, 이 때 Fig. 9의 상단에 위치한 추기노즐에서 발생한 유체가 충격판에 부딪친 뒤 (-)z 방향으로 흐르는 유체와 하단에 위치한 추기노즐에서 발생한 (+)z 방향으로 흐르는 유체가 부딪쳐서 높은 압력이 형성되는 것이다.

Figure 10은 곡률 충격판을 설치하였을 때의 저압형 급수가열기 동체 내부 벽면에서의 압력 분포이다. 각형 충격판 설치시에 보였던 추기노즐 사이의 높은 압력 발생지점의 압력이 낮아졌음을 확인할 수 있다. 이는 곡률 충격판의 형상으로 인하여, 유체가 각형충격판에서의 충돌 등에 의한 간섭현상 없이 z축 방향으로의 흐름보다 반경방향인 x축 방향으로의 흐름이 많아졌음을 알 수 있다.

두 그림에서 x축 방향으로 타원의 굽은 실선으로 표시된 부분이 x축 방향의 최대 압력지점인데, 각형 충격판의 경우보다 곡률 충격판의 경우에 x축 방향으로 최대 압력지점이 추기노즐에서 보다 멀어졌음을 알 수 있다. 여기서 각형 충격판은 x축 방향의 길이가 곡률 충격판의 직선길이 490 mm에 비해 약 1.7배 길어서 유체가 충격판에 충돌한 후, 동체에 부딪치게 되는 거리가 가까워 발생한 현상으로 추정된다. 또한 곡률 충격판의 경우 추기된 유체가 각형 충격판과 다르게 급격한 유동의 변화를 보이지 않고 곡률 충격판의 경사면을 따라 완만히 흘러 동체에 부딪힘을 알 수 있다. 그리고 곡률 충격판에서의 압력분포가 각형 충격판에 비하여 추기노즐에서 멀리 떨어져 넓은 영역에 고루 분포되어 나타남을 확인할 수 있다.

3.2 실험결과

저압형 급수가열기에 대한 실험 결과로 Fig. 11은 각형 충격판을 설치한 경우 동체 내부의 압력분포를 나타낸 그림이다. 각형 충격판의 경우 해석결과와 유사하게 추기노즐 사이에서 가장 높은 압력 분포가 나타났다. 또한 충격판의 끝단에서부터 압력값이 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 실험에서 압력값의 단위는 mmAq로 가

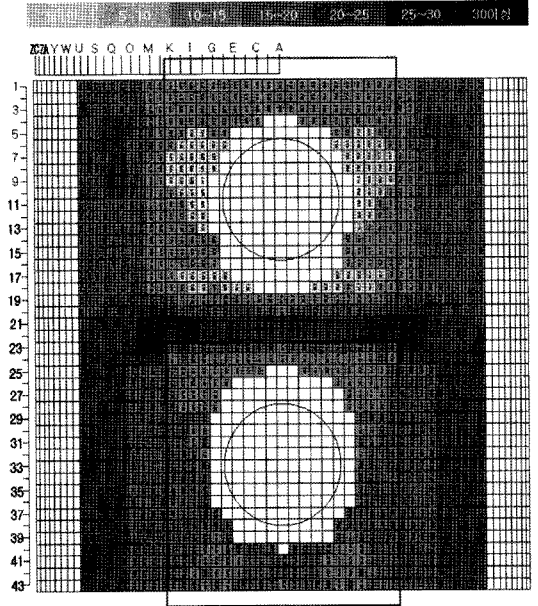


Fig. 11 Pressure distribution resulting from experiment (square shape impingement baffle)

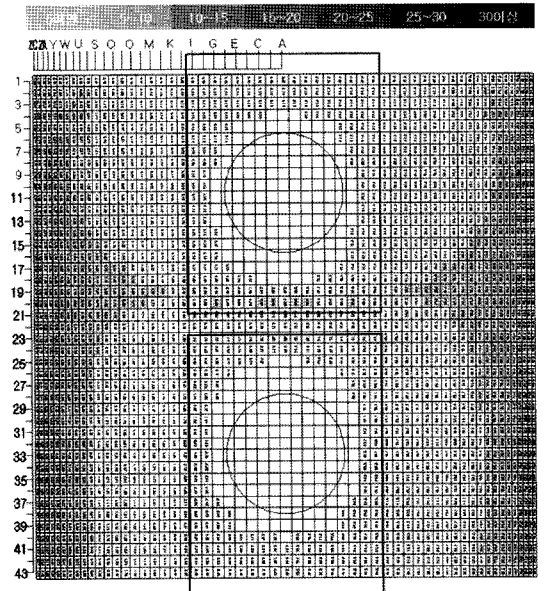


Fig. 12 Pressure distribution resulting from experiment (curved shape impingement baffle)

장 높은 값은 23.13 mmAq로 추기노즐사이에 충격판이 반경방향으로 끝나는 지점에 나타났으며 데이터 전체의 평균 압력값은 13.55 mmAq로 나타났다.

Figure 12는 곡률 충격판 설치시 동체 내부 벽면의 압

력분포를 나타낸 그림이다. 반경방향에 대하여 충격판의 끝단부에 압력이 높게 분포된 점으로 미루어 해석에서 확인하였던 압력분포와 유사한 실험 결과가 나타났음을 알 수 있다. 또한 해석값과 마찬가지로 각형 충격판에서 보였던 추기노즐사이의 높은 압력분포는 나타나지 않았으며 x축 방향으로 곡물 충격판의 끝단을 지난 지점에서 높은 압력값이 나타나는 것으로 유체가 곡물 충격판의 표면을 따라서 흐르다가 곡물 충격판의 끝단에서 굴절되어 동체 내부 벽면으로 반사된 것으로 추측된다.

각형 충격판과 압력값을 비교하면 가장 높은 압력값은 7.41 mmAq로 각형 충격판과 마찬가지로 추기노즐 사이에 충격판이 반경방향으로 끝나는 지점에 나타났다. 또 데이터 전체의 평균 압력값은 2.66 mmAq로 각형 충격판에 비하여 전체적인 동체압력이 현저히 낮아졌음을 알 수 있다.

선형 감속연구 결과에서도 유체가 동체 벽면과 수직으로 충돌하는 지점에서 감속이 가장 심하게 나타난다고 제시하고 있다⁶⁾. 이는 곡물 충격판이 각형 충격판에 비해 동체 감속면에서 개선된 충격판이라고 설명할 수 있다.

3.3 해석 및 실험결과의 비교

급수가열기 동체 내부의 압력분포에 대하여 수치해석을 통해서 얻어진 해석과 실험값에 대하여 상응하는 위치에서의 결과를 비교하여 그래프로 각각의 경향이 어떻게 나타나는지 비교하였다. 그 결과, 절대값의 차이는 다소 나타났지만, 모든 경우에서 해석값과 실험값은 유사한 압력분포 경향을 나타냈다. Fig. 13은 각형충격판을 적용한 저압형 급수가열기의 O열에 대한 해석과 실험값을 수평방향(Z축)에 대해서 비교한 것이고, Fig. 14는 동일한 모델의 34번열에 대하여 수직방향(Y축)에 대하여 비교를 한 그림이다. 각각의 열은 Fig. 11에 나타나 있

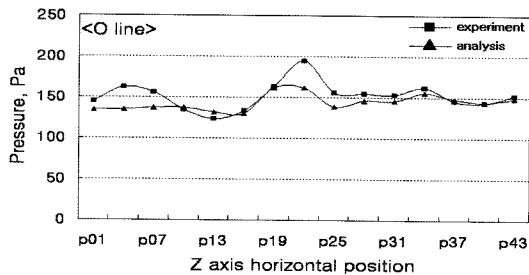


Fig. 13 Comparison experiment and analysis (square shape impingement baffle)

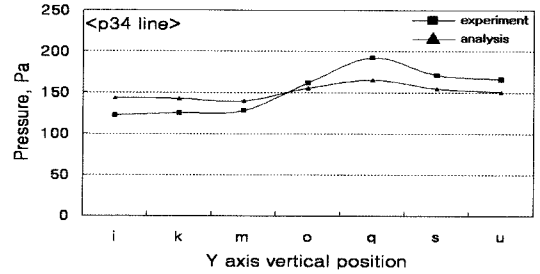


Fig. 14 Comparison experiment and analysis (square shape impingement baffle)

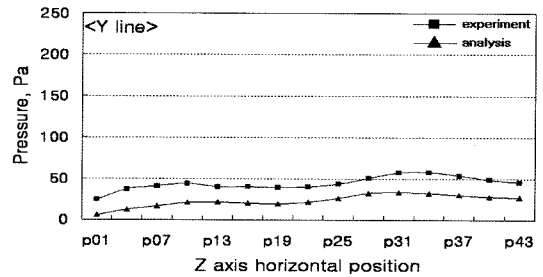


Fig. 15 Comparison experiment and analysis (curved shape impingement baffle)

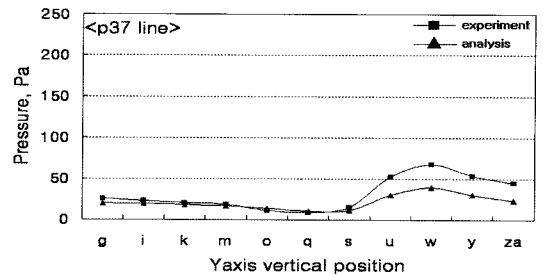


Fig. 16 Comparison experiment and analysis (curved shape impingement baffle)

다. 그리고 Fig. 15는 곡물 충격판을 적용한 저압형 급수가열기의 Y열에 대한 해석과 실험값을 수평방향(Z축)에 대해서 비교한 것이고, Fig. 16은 동일한 모델의 37번열에 대하여 수직방향(Y축)에 대하여 비교를 한 그림이다. 마찬가지로 각각의 열은 Fig. 12에 나타나 있다.

실험과 해석의 한 열을 선정하여 서로 비교하였고 두 그래프의 형상이 다른 이유는 다른 열을 선정하였기 때문이다. 그래프를 살펴보면, 압력이 집중되는 부위의 위치의 경향이 매우 유사하다는 것을 알 수 있다. 전체적인 압력값에 대하여 살펴보면, 곡물 충격판에서의 압력값이 각형 충격판에서의 압력값보다 더 낮은 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

원자력 발전소 2차측의 터빈에서 추가되는 유체로 인하여 급수가열기 내벽이 감육되는 현상을 유체유동 측면에서 규명하기 위한 연구를 수행하였다. 상용 수치해석 코드인 FLUENT를 이용하여 저압형 급수가열기의 수치해석을 수행하였고, 실제 급수가열기를 1/2비율로 상사한 실험모델로 실험을 수행하여 압력분포를 비교하였다. 그 결과 저압형 급수가열기 내부 유동에 대한 수치해석 결과와 실험 결과가 유사하게 나타났음을 확인하였다. 급수가열기 내부로 유입된 추기증기는 급수가열기 내부의 전열관 손상을 방지하기 위하여 설치된 충격관에 부딪치고 뒤쪽 추기라인 노즐에서 발생한 유체의 유동으로 인하여 동체 벽면에 수직으로 부딪치는 현상을 확인하였다. 그리고 2가지 형태의 충격관에 대한 실험과 해석에서 곡률 충격관이 각형 충격관보다 동체 감육 측면에서 개선된 충격관이라는 사실을 밝혔다. 그러나 동체 하단부위의 압력집중 현상은 여전히 개선할 사항으로 예상된다. 그러나 이러한 연구 결과가 발전소 급수가열기 손상을 사전에 예방할 수 있는 설계개선과 동체 감육손상 관리에 유용하게 사용될 수 있을 것이라고 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Point Beach 1, 1999, "Steam Leak From Low Pressure Feedwater Heater", 1999-005, LER.
- (2) Fort Calhoun, 1999, "Shell Wall Thinning of Feedwater Heater", OE 10710, INPO.
- (3) K. H. Kim, K. M. Hwang and H. K. Seo, 2008, "Technical Report", KOPEC, Vol. 2, pp. 13~18.
- (4) 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.
- (5) K. H. Kim, K. M. Hwang and T. E. Jin, 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.
- (6) K. H. Kim, W. Lee, K. M. 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.