

고압 급수가열기 추기노즐 설계변경에 따른 감육 범위 연구

박 상 훈, 유 일 곤, 김 경 훈[†], 황 경 모*

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

A Study on the Wall Thinning Range according to modified Extraction Nozzle Design in High Pressure Feedwater Heater

Sang Hoon Park, Il Gon Yoo, Kyung Hoon Kim[†], Kyeong Mo Hwang*

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 feed-water 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 wall thinning range according to change entrance nozzle diameter and position with reference numerical analysis model's wall thinning range, various numerical analysis models applied. In case of changing diameter, four different diameter is applied. And a side of nozzle position, two different position-vertical type and parallel type-is applied. And then this paper describes operation of numerical analysis which is composed similar condition with real feed water heater. In conclusion, this study shows effective design for shall wall thinning by changing nozzle diameter and position.

Key words: Wall Thinning(감육), Flow-Accelerated Corrosion(유동가속부식), Feedwater Heater(급수가열기), Extracting Nozzle(추기노즐), Impingement Baffle(충격판)

1. 서 론

에너지효율 극대화 및 그린에너지의 활성화 등 최근 국내외에서는 여러 요인들로 인해 원자력 발전소의 운전년수가 증가함에 따라 주요기기의 경년열화 관리 및 성능개선을 통한 계속 운전 가능성 여부가 최대 쟁점으로 부각되고 있다.

최근에 건설되고 있는 원전 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 점차 얇아지고 결국에는 기기의 압력경계 부분이 파손에 이르게 된다. 이러한 현상을 감육(Wall Thinning)이라 한다. 유동가속부식이란, 기계적인 손상과는 달리 유체의 흐름과 이에 따른 물질전달의 상승효과로부터 금속표면 산화막의 용해 또는 분리가 가속되어 일어나는 현상을 말한다. 원자력 발전소에서 유

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-201-2509; fax: +82-2-202-8106

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

동가속부식은 배관에서 주로 문제⁽¹⁾가 되어 왔으나 가동년수가 증가함에 따라 급수가열기, 습분분리재열기 등과 같은 기기에서도 주요 문제점으로 나타나고 있다.⁽²⁾

급수가열기 동체의 국부감육 문제는 고압 및 저압터빈에서 추기되는 증기가 전열관 손상을 방지하기 위하여 설치된 충격판(Impingement Baffle)에 부딪친 후 편향되어 벽면에 재충격을 가하는 유동 때문에 발생하는 것으로 추정되고 있다. 이러한 급수가열기 동체 국부감육 손상은 1990년 이후에 급증하고 있으며, 가동년수 증가에 따라 발생빈도는 점차 증가하고 있다.

실제로 1999년 5월 미국의 Point Beach 1호기에서는 급수가열기 4번 동체에서 감육이 발생하여 증기가 누설되는 사고가 발생한 바 있으며,⁽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 수행한 바 있다.⁽⁵⁾ 동 문제로 인하여 국내 전체 발전소에서 급수가열기 추기노즐 주변의 동체를 대상으로 두께측정을 하여 국부감육 정도를 확인한 바 있으며, 그 정도가 보강용접을 수행했던 발전소 보다는 심각하지는 않으나 문제발생의 소지가 잠재하고 있음을 확인하였다. 최근 미국을 포함한 국내외 발전소에서는 이를 방지하기 위한 대책수립에 몰두하고 있으나 현재까지는 UT(Ultrasonic Test) 검사를 통한 사후 대책수립이 전부이다.

한편, Kim 등^(6,7)은 유동가속부식으로 인하여 급수가열기의 동체가 감육되는 현상의 원인을 유체 유동 관점에서 분석하기 위하여 Fluent코드를 이용한 수치해석과 모사 실험설비를 이용한 실험을 수행하고 결과를 비교 검토한 바 있으며, 이를 통해 급수가열기 내부에 설치되어 있는 충격판의 형태가 국부감육에 큰 영향을 미치는 것으로 확인하였다. 국내 원전 2차측의 급수가열기 설계 방식은 대부분 유사하기 때문에 이러한 급수가열기 동체 감육손상은 원전의 안전운영과 급수가열기 건전성 확보 차원에서 중요하게 고려해야 한다.

본 연구에서는 실험에 사용된 급수가열기 모델

과 실제 모델의 추기노즐 위치가 다른 점에 착안하여 급수가열기의 추기노즐의 설계 조건을 변경하여 이에 따른 동체 내부 감육 정도를 수치해석 결과를 통해 비교해 보았다. 또한 설계 조건의 변경에 의한 급수가열기의 유지·보수 시에 발생하는 경제적인 효과를 검토하였다.

2. 수치해석 모델 및 해석방법

급수가열기 충격판에 반사되는 유체의 유동 및 동체감육 특성 연구를 위하여 상용 전산 수치해석 코드인 FLUENT를 사용하였다⁽⁸⁾. 해석 모델 구성은 국내 가압경수로형 원전 2차측의 급수가열기 5A를 대상으로 하였다. 급수가열기 5A로는 고압터빈에서 추기되는 증기와 습분분리재열기 및 급수가열기 6A에서 배수되는 물이 동체측으로 유입되지만 고온, 고압 및 고속의 증기가 전열관 손상 방지를 위하여 설치된 충격판과 동체에 심한 영향을 미치는 추기라인을 해석대상으로 결정하였다. Fig. 1은 고압터빈에서 급수가열기 5A, 5B로 추기되는 추기증기계통의 개략도를 나타낸다.

Fig. 2는 해석대상으로 결정한 급수가열기 5A의 반단면도를 보여준다. 해석범위는 그림에서 볼 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 구성 하였다. 작동유체는 1 atm에 대한 포화조건에서 15°C 공기로 가정하였다. 입력 경계조건으로

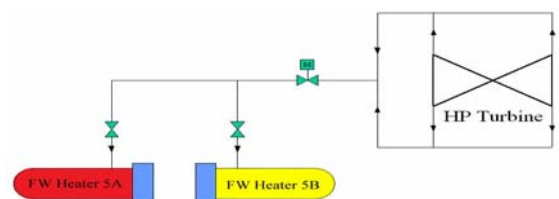


Fig. 1 Schematic diagram of extraction steam system.

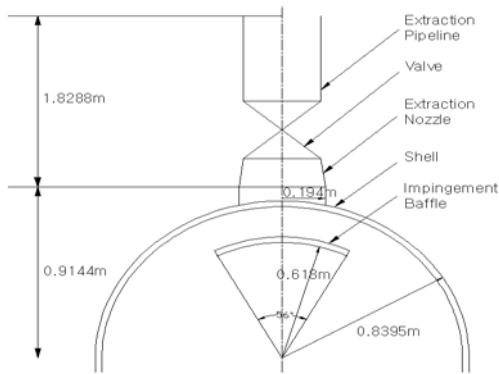


Fig. 2 A half cross-sectional view.

사용 되는 추기라인의 유속은 균일속도 조건을 적용하였으며 속도계산에는 발전소 2차 축의 열평형도를 이용하였다. 이 외에 해석에 사용된 경계조건과 물성치는 Table 1과 같다.

Fig. 3은 급수가열기 해석 모델의 격자 구성을 보여준다. Fig. 4는 추기노즐이 동체와 평행으로 설치된 모델의 단면도이다. (a)는 정면도, (b)는 평면도를 나타낸 것이다. Fig. 5는 추기노즐이 동체와 직각으로 설치된 급수가열기의 단면도이다. (a)는 정면도, (b)는 평면도를 나타낸 것이다.

급수가열기 추기노즐로 유입되는 증기의 Re수를 평가하면 약 2.81×10^5 이고, 추기증기는 충격판에 부딪친 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 k-ε model 등이 있는데 각 난류모델의 특성과 급수가열기 내부유동의 특성을 고려하여 보다 정확한 해석결과를 얻기 위해 본 연구에서는 RNG(ReNormalized Group) k-ε model를 선택하였다.

Table 1 Boundary Conditions

Items	Unit	Value	Remarks
Extraction nozzle velocity	m/s	14.51	Application for analysis result by thermal equilibrium
Density	kg/m ³	1.29	1atm, 15°C air
viscosity	kg/m-s	1.98×10^{-5}	1atm, 15°C air
Temperature	°C	15	air

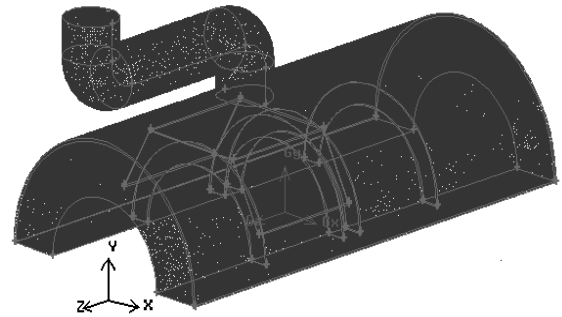


Fig. 3 Modeled Geometry & Cell Divisions.

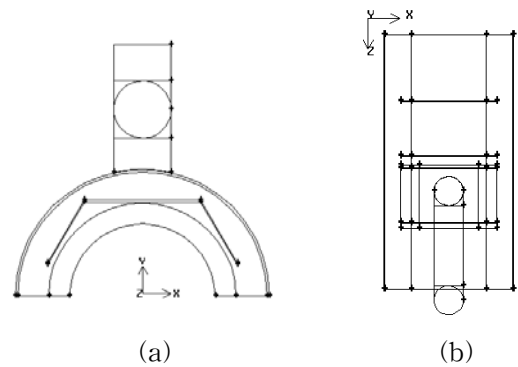


Fig. 4 Cross section view of parallel type model.

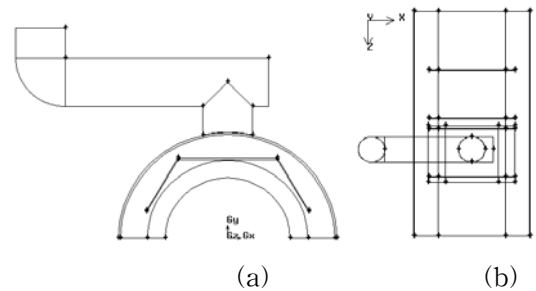


Fig. 5 Cross section view of vertical type model.

3. 해석 결과 및 감속 범위 측정

선행 연구에 따르면 수치해석 결과와 실험 결과가 거의 유사한 것으로 판명⁽⁹⁾되었기에 본 연구에서는 수치해석만을 실시하여 결과를 비교하였다. 또한 추기노즐 형상이 T자관인 경우와 엘보우인 경우에서도 큰 차이가 발생하지 않았기 때문에 실제 급수가열기 모델을 제외한 나머지에서는 엘보우에 관하여 실험을 실시하였다.

3.1 추기 노즐 위치 변경에 따른 결과 분석

본 절에서는 추기노즐의 위치가 동체와 직각인 경우와 평행인 경우에 대한 수치해석을 실시하였다.

Fig. 6은 추기노즐이 동체와 평행하게 위치할 때의 동체 감육범위를 나타낸 그림이다. 화살표는 증기가 유입되는 방향을 표시한 것이다. 그림에 굵은 실선으로 표시된 충격관 좌우측에 동체 반경 방향으로 추기노즐 중심으로부터 좌우로 각각 32°, 38°지점으로부터 8°범위에 길이 약 466 mm, 충격관의 하단 부위로 추기노즐 중심으로부터 좌우로 각각 40°, 39°, 총 79°범위, 노즐 중심으로부터 아래쪽으로 약 240 mm 지점으로부터 약 317 mm에 걸쳐 좌우 대칭으로 감육이 발생하였다.

Fig. 7는 추기노즐이 동체와 직각으로 위치한 경우에 대한 동체 감육 범위를 나타낸 그림이다. 감육 범위는 그림에서 추기 노즐 좌우측으로 동체 반경 방향에 대해 좌측으로 21°지점으로부터 23°범위에 걸쳐 길이방향으로 약 600 mm, 우측으로 29°지점으로부터 13°범위, 길이 약 772 mm 범위로 나타났다. 하단부로는 길이방향으로 노즐 중심으로부터 총 76°범위에 길이는 노즐중심으로부터 약 214 mm 떨어진 지점으로부터 약 300 mm 범위에서 감육이 발생하였다.

Fig. 8은 곡률형충격관에 대한 동체 감육 범위를 나타낸 그림이다. (a)는 추기노즐이 동체와 평행하게 위치한 경우이고 (b)는 추기노즐이 동체와 직각으로 위치한 경우이다.

곡률형충격관에 대한 감육 범위는 추기노즐이 평행하게 위치한 경우 노즐 중심으로부터 좌측으로 28°지점으로부터 31°범위, 약 933 mm 길이, 우측으로 27°지점으로부터 33°범위의 약 910 mm 길이 범위에 걸쳐 감육이 발생하였다. 추기노즐이 직각으로 설치된 경우에는 노즐 중심의 좌측으로 25°범위, 약 202 mm, 우측으로 29°범위, 약 865 mm 길이에 걸쳐 동체 감육이 발생하였다.

수치해석은 실제 사용되고 있는 각형충격판과 곡률형충격판에 대해서 실시하였다. 수치해석 결과에 따르면 추기노즐 위치에 상관없이 각형충격판의 경우 충격관의 좌우측면과 하단부에 감육이 발생한 반면, 곡률형충격판의 경우 양 측면에서

만 감육이 발생하였다. 추기노즐의 위치를 고려하면 평행한 경우 감육 범위가 거의 좌우 대칭의 형태로 발생하였지만, 직각으로 위치한 경우에는

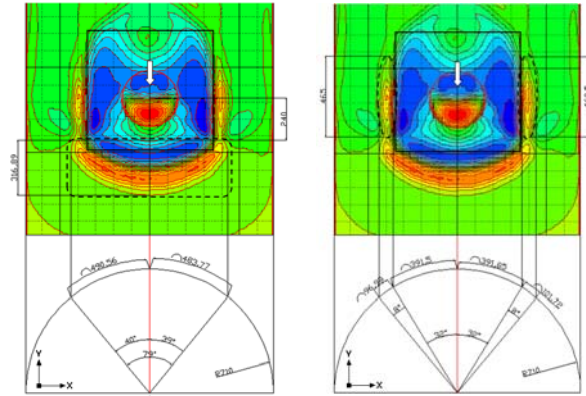


Fig. 6 Wall thinning range of squared type impingement baffle plate at parallel type feedwater heater.

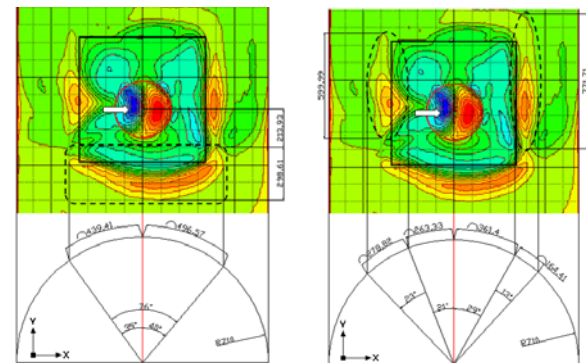


Fig. 7 Wall thinning range of squared type impingement baffle plate at vertical type feedwater heater.

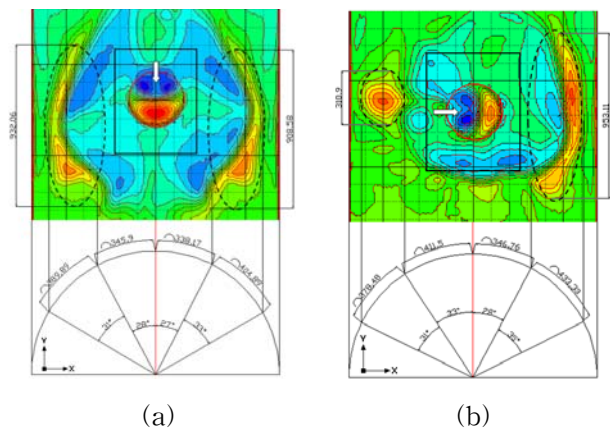


Fig. 8 Wall thinning range of round type impingement baffle

증기 유입 방향과 마주보는 동체 측면에서의 감육이 반대측면에 비해 월등히 크게 나타났다. 이를 통해 추기증기의 유입 방향에 의해 동체 감육 지점이 달라진다는 것을 알 수 있다.

3.2 노즐직경 변경에 따른 결과 분석

추기노즐의 직경을 변화시키기에 따라 동체 내부 압력 분포 및 감육 정도가 어떠한 차이를 보이는지를 수치해석 결과를 통해 비교해 보았다. 단순히 추기노즐의 직경만을 변경할 경우, 노즐을 통해 급수가열기로 유입되는 유량이 변하게 되는데, 이 경우에는 전혀 다른 급수가열기 운전조건이 된다. 따라서 급수가열기 추기노즐의 직경을 변경시키더라도 급수가열기 내부로 일정한 유량이 공급되기 위한 속도를 적용할 필요가 있다. Fig. 9부터 Fig. 12는 이러한 조건을 반영하여 직경을 변화시키고 각각의 조건에 맞는 유속으로 수치해석을 실시한 결과이다. 노즐의 직경 317 mm, 유속 14.51 m/s의 조건을 기준으로 하였다.

Fig. 9는 노즐 직경 228.6 mm, 유속 27.9 m/s의 조건에 대한 수치해석 결과이고, 감육 범위는 반경방향으로 총 72°에 걸쳐 약 290 mm 길이 범위, 추기노즐 좌우측으로 31°지점으로부터 각각 8°범위, 좌측 약 488 mm, 우측 약 563 mm 길이 범위로 나타났다. Fig. 10은 기준조건인 수치해석 결과이다. 감육 범위는 앞 절에서 언급한 Fig. 6의 내용과 동일하다. 또한, Fig. 11은 노즐직경 381 mm, 유속 10.041 m/s의 조건에 대한 수치해석 결과이며, 감육 범위는 반경방향으로 72°범위에 약 271 mm 길이, 추기노즐 좌우측으로는 우측

에 2°범위에 걸쳐 약 50 mm 길이에 걸쳐 감육이 발생하였다. Fig. 12는 노즐 직경 469.9 mm, 유

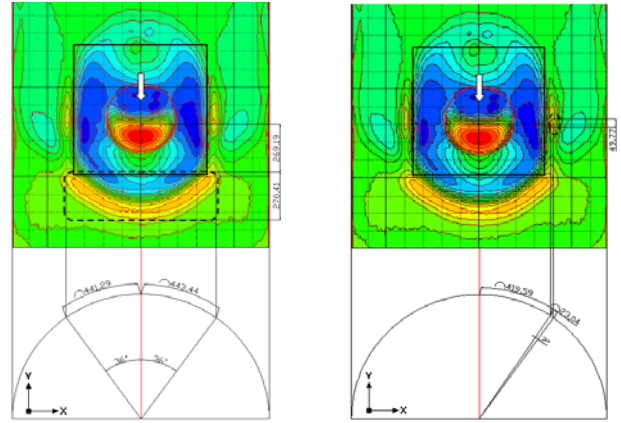


Fig. 10 Wall thinning range of nozzle diameter 317 mm ($v=14.51$ m/s).

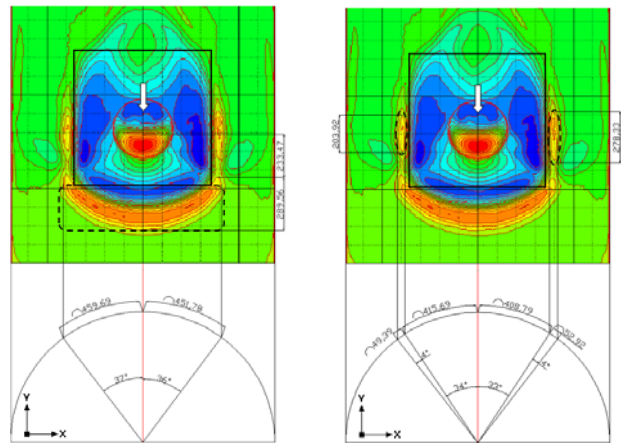


Fig. 11 Wall thinning range of nozzle diameter 381 mm ($v=10.041$ m/s).

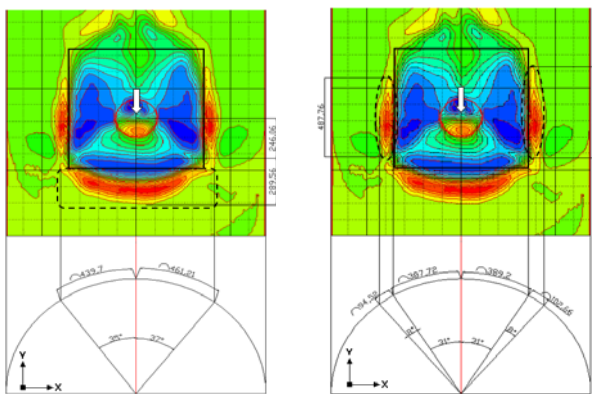


Fig. 9 Wall thinning range of nozzle diameter 228.6 mm ($v=27.9$ m/s).

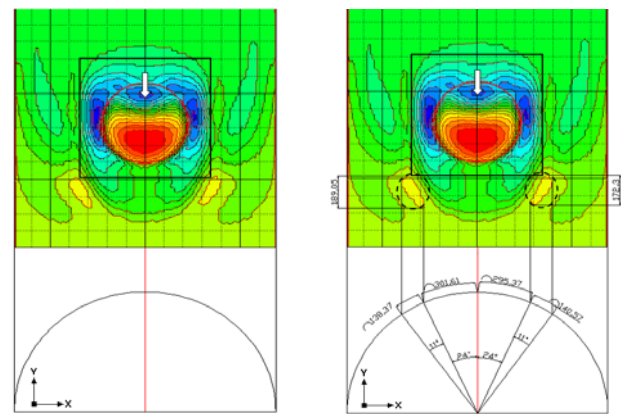


Fig. 12 Wall thinning range of nozzle diameter 469.9 mm ($v=6.604$ m/s).

속 6.604 m/s의 수치해석 결과이다. 감육은 반경 방향으로 각각 24°지점으로부터 11°범위에 걸쳐 좌측 약 190 mm, 우측 약 173 mm 범위로 나타났다.

수치해석의 모델링은 급수가열기 동체 내부에 각형충격판을 설치하고, 추기노즐의 유입부의 형태는 엘보우이며, 추기노즐은 동체와 평행하게 z 축 선상에 위치한다. 수치해석 결과를 분석해 보면, 동일한 유량에 대하여 유입부 노즐이 작아지고 속도가 커질수록 압력이 커지고 동체 내부 감육 범위도 넓어지는 것을 알 수 있다.

4. 결론

선형연구에서 원자력 발전소 2차측의 고압터빈에서 추기되는 고온, 고압의 추기증기로 인하여 급수가열기 동체 내벽이 감육되는 현상을 유체유동 측면에서 규명하기 위한 연구를 수행하였다.

이러한 연구결과를 바탕으로 본 연구에서는 이상 조건에서 추기노즐 설계변경에 따른 감육 범위에 관한 실험을 실시하였다. 상용 수치해석 코드인 FLUENT를 이용하여 이상에 대한 수치해석을 수행하였으며, 각각의 조건에서의 감육 범위를 비교하였다.

수치해석 결과에 따르면 추기 노즐 위치에 따라 동체 내부의 감육 지점이 달라짐을 확인하였다. 평행하게 놓은 노즐에서는 압력분포가 대칭으로 나타나는 반면, 직각을 이루는 경우에는 특히 증기의 유입 방향과 마주보는 방향의 동체 내부 면에서 감육이 더 심한 것으로 나타났다. 이는 추기노즐을 평행하게 설치한 경우 감육 지점을 예측하는데 용이하다고 생각된다.

노즐 직경 변화에 따른 감육 범위를 분석한 결과 일정 유량에서 노즐직경이 증가함에 따라 유속이 감소하여 동체 감육 완화 효과가 발생함을 확인하였다. 그러나 노즐 직경의 증가는 비용의 증가를 동반하기 때문에 유량과 동체 크기를 고려한 적절한 크기의 추기노즐 직경을 선정하는 것이 중요하다.

이러한 연구결과는 기존 급수가열기의 유지·보수 시에 본 연구에서 언급된 데이터를 참고하여 감육이 심하게 발생하는 부분에 대한 예측이 가능하므로 감육 예상지점에 대한 정기적인 초음파 두께 측정을 실시한다면 비용절감 등의 경제

적인 효과가 발생할 것으로 생각된다. 또한 새로운 급수가열기의 설계 시에 감육완화를 위한 자료로써 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

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

참고 문헌

1. H. Keller, 1978, Corrosion and Erosion Problems in Saturated Steam Turbines, AIM Conf., Liege, Belgium, pp. 22-28.
2. Von W. Kastner and K. Riedle, 1986, Empirisches Modell zur Berechnung von Materialabtrag durch Erosionskorrosion, VGB Kraftwerkstechnik, Vol. 66, pp. 1171-1178.
3. Point Beach 1, 1999. Steam Leak From Low Pressure Feedwater Heater, 1999-005, LER.
4. Fort Calhoun, 1999, Shell Wall Thinning of Feedwater Heater, OE 10710, INPO.
5. KHNP, 2000, Technical Review Report for Thickness Verification of Feedwater Heater Shell Side of Kori Unit 1, Mechanical Department, Kori First Plant.
6. K. H. Kim, K. M. Hwang, 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.
7. 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.
8. Fluent Inc, 2006, Fluent 6.x Training Notes, pp.1-1-1-56.
9. KHNP, 2008, Development of the Integrity Evaluation Technique for the BOP Heat Exchangers in NPP's, 106NS08.