급수가열기 동체 감육 현상 규명을 위한 유동해석 연구

신민호(경희대)† ·황경모(KOPEC)*·김경훈(경희대)**

A Study on the Fluid Mixing Analysis for Proving Shell Wall Thinning of a Feedwater Heater

Min Ho Shin, Kyeong Mo Hwang, Kyung Hoon Kim

Key Words: Fluid Mixing Analysis(유동해석), Wall Thinning(감육), Flow-Accelerated Corrosion(유동가속부식), Extracting Nozzle(추기노즐), Impingement Baffle(충격판)

Abstract

There are multistage preheaters in the power generation plan to improve the thermal efficiency of the plant and to prevent the components from the thermal shock. The energy source of these heaters comes from the extracted two phase fluid of working system. These two-phase fluid can cause the so-called Flow Accelerated Corrosion(FAC) in the extracting piping and the bubble plate of the heater for example, in case of point Beach Nuclear Power Plant and in the Wolsung Nuclear Power Plant.

The FAC is due to the mass transport of the thin oxide layer by the convection.

FAC is dependent on many parameters such as the operation temperature, void fraction, the fluid velocity and pH of fluid and so on. Therefore, in this paper velocity was calculated by FLUENT code in order to find out the root cause of the wall thinning of the feedwater heaters. It also includeed in the fluid mixing analysis model are around the number 5A feedwater heater shell including the extraction pipeline. To identify the relation between the local velocities and wall thinning, the local velocities according to the analysis results were compared with distribution of the shell wall thickness by ultrasonic test.

1. 서 론

원자력 발전소 2차측의 고압 급수가열기 5A 동체측으로는 고압터빈에서 추기되는 증기와 습분분리재열기 및 급수가열기 6A에서 배수되는 물이 들어가서 증기발생기에 공급되는 급수를 가열한다. 특히, 고압터빈에서 들어오는 추기증기는 고온, 고압, 고속의 2상 증기이므로 전열관 손상을 방지하기 위하여 추기증기 유입부에 설치된 충격판(Impingement Baffle)에 부딪친 후 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 있으며, 그 해 11월에는 미국 Fort Calhoun 원전의 급수가열기 5번 추기노즐 충격판 주변에서 심각한 감육손상이 발생되어 침식보강용접(Flush Patch Weld)을 수행한 바 있다(1). 국내에서도 2000년 10월 특정 가압경수로형 원전의 급수가열기 5A와 5B에서 유사한 손상을 경험하여 보강용접을 수행한 바 있다(2). 국내 원전 2차측의 급수가열기 설계 방식은 대부분 유사하기 때문에 이러한 급수가열

† 경희대학교 대학원 기계공학과
E-mail : stjdaus@hanmai.net, TEL : (031)201-2874
*한국전력기술(주) 재료기술연구그룹
E-mail : hkm@kopec.co.kr
TEL : (031)289-4287 FAX : (031)289-3189
**경희대학교 기계산업시스템공학부 기계공학전공
E-mail : kimkh@khu.ac.kr TEL:(031)201-2509

기 추기노즐 충격판 주변의 동체 감육손상은 원전 안전과 급수가열기 건전성 확보 차원에서 중요하게 고려해야 할 것으로 판단된다.[3, 4]

이에 따라 본 연구에서는 급수가열기 동체 감육 손상의 원인규명을 위하여 유체유동 측면에서 분석하였다. 일반적으로 탄소강 재료의 감육현상은 단상 보다는 2상 유체에서 더 심한 것으로 알려져 있기 때문에 급수가열기 내부로 들어오는 배관라인 중 추기증기 배관라인과 인접 동체를 연구대상으로 선정하였다. 유체유동 현상 해석은 상용 수치해석 코드인 FLUENT를 사용하였으며 결과 검토를 위하여 급수가열기 추기노즐 주변의 동체두께 측정데이터를 코드해석 결과에 따른 국부유속과 비교하였다.

2. 해석모델 구성 및 지배방정식

2.1 해석모델 구성

급수가열기 충격판에 반사되는 유체의 유동 및 동체감육 특성 연구를 위하여 유한체적법을 근간으로 하는 상용 전산 수치해석 코드인 FLUENT를 사용하였다. 열유동 혼합해석 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 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. Fig. 2는 단일블럭(Single Block)으로 구성한 해석모델의 격자구성을 보여준다. 격자수는 총 43,264개(x×y×z = 52×16×52)로 구성하였으며 유체거동이 복잡하거나 중요하게 고려되는 부위에 대해서는 조밀하게 격자를 배열하였다. 원통형인 동체와 배관은 수직으로 연결되어 있어 일반적인 사각격자로는 연결부의 형상을 적절하게 표현할 수 없으므로 불규칙적인 곡면의 연결부분 묘사에 적합한 Quad/Tri:Wedge 격자 방식을 사용하였다.

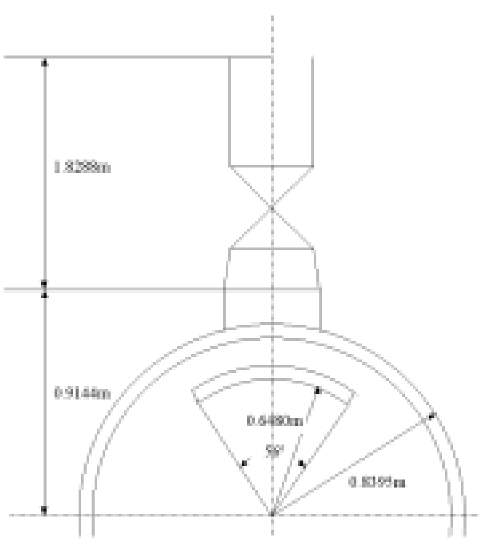

Fig. 1 A Half cross-sectional view

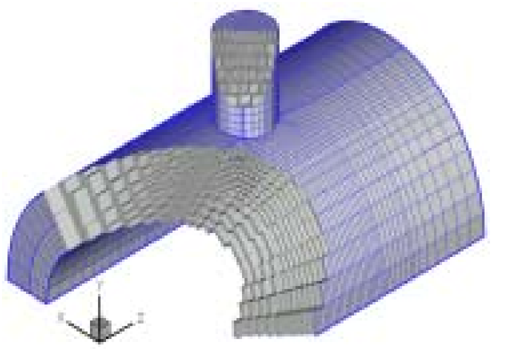

Fig. 2 Cell divisions

2.2 지배방정식

급수가열기 추기노즐로 유입되는 증기의 Re수를 평가하면 약 1.0×10^5이고, 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. FLUENT 코드에서 일반적으로 적용할 수 있는 난류모델로는 Constant Viscosity Model, RNG(ReNormalized Group) k-ε Model, k-ε Model 등이 있다. 그 중, k-ε Model과 RNG k-ε Model은 시간변화에 따른 와류점성(Eddy Viscosity) 특성과 Re수가 높은 유동의 특성을 보다 정확하게 예측하지만 해석시간이 다소 많이 소요된다[5]. 그렇지만 본 해석모델은 추기라인에서 유입되는 증기가 충격판에 부딪힌 후 동체 벽면으로 반사되어 흐르고 일부는 충격판에서 분리된 후 후면에서 재결합된다. 이러한 유동특

성은 k-ε Model 보다 RNG k-ε Model이 더 정확하게 예측하는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 본 연구에서는 보다 정확한 해를 구하기 위하여 RNG k-ε 난류모델을 적용하였으며, 추기라인과 급수가열기 외벽은 단열조건을 적용하였다. 급수가열기 내부의 유동장을 기술하는 RNG k-ε 난류모델의 지배방정식은 아래와 같이 연속 방정식, 운동량 방정식, 난류운동에너지 방정식 및 난류운동에너지소산률 방정식으로 나타낼 수 있다.

연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \qquad (1)$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad (2)$$

난류운동에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k)=\frac{\partial p}{\partial x_j}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}+G-\rho\varepsilon \qquad (3)$$

난류운동에너지소산율 방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}+$$

$$\frac{\epsilon}{k}(C_1 G-)C_2\rho\epsilon-\frac{C_\mu\eta^3(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}\cdot\frac{\rho\epsilon^2}{k} \qquad (4)$$

여기서, ρ, u_i, μ, k, ε 및 p는 각각 밀도, 속도성분, 점성계수, 난류운동에너지, 난류운동에너지소산율 및 압력을 나타낸다. 또한 응력텐서 τ_{ij}, 난류동점성계수 μ_t, 난류생성항 G, 난류상수 C_1, C_2, σ_k, σ_ε, η, η_o 및 β는 아래와 같다.

$$\tau_{ij}=-(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \qquad (5)$$

$$\mu_t=C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (6)$$

$$G=2\mu_t S_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \qquad (7)$$

$$S_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \qquad (8)$$

$$\eta=S\frac{\varepsilon}{k} \qquad (9)$$

$$S=\sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \qquad (10)$$

σ_k=0.719, σ_ε=0.719, η_o=4.38, β=0.012, C_1=1.42, C_2=1.68, C_μ=0.085

3. 경계조건 및 수치해석

급수가열기 및 추기라인 내부의 작동유체는 1.013×10^5Pa에 대한 포화조건에서의 단상 증기로 가정하였다. 입력 경계조건으로 사용되는 추기라인의 유속은 균일속도 조건을 적용하였으며 속도계산에는 원전 2차측의 열평형도에 제시되어 있는 운전 데이터를 적용하였다. 동체 전단에서 유입되는 유체의 유속 계산에도 열평형도 데이터를 기본으로 하여 동체 내부의 수위를 30%로 가정하고 전열관이 차지하는 면적도 유속 계산에 반영하였다. 해석에 적용된 경계조건과 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Boundary Conditions

항 목	단 위	값	비 고
추기라인 및 동체전단 입구 증기 온도	℃	100	
추기라인 증기 유속	m/sec	10.930	
동체전단 증기 유속	m/sec	1.697	액체 무시
밀도	kg/m^3	0.586	증기
동점도	m^2/sec	2.17×10^{-5}	증기
열팽창계수	K^{-1}	2.17×10^{-3}	증기

FLUENT 코드를 이용한 수치해석은 반복계산시 해의 수렴성을 향상시키기 위하여 모든 종속변수에 대하여 하향이완(Under-relaxation) 개념을 도입하였다. 압력장과 난류량에 대해서는 선형이완(Linear Relaxation) 방법을 적용하고 이완계수로서 0.7과 0.4를 적용하였다. 그리고 속도성분들에 대해서는 오류시간간격이완(False Time Step Relaxation) 방법을 적용하고 오류시간간격은 0.01을 적용하였다. 해석은 2초를 400Step으로 구분하여 계산하였으며 Step 당 250회 반복계산 하도록 구성하였다.

4. 유동해석 결과

터빈에서 추기되는 고속, 2상 증기의 유동이 급수가열기 동체 감육에 어떤 영향을 미치는지를 확인하기 위하여 FLUENT 코드를 이용하여 유체 유동해석을 수행하였다.

Fig. 3과 4는 동체벽면의 국부압력 변화와 압력분포를 보여준다. Fig. 5와 6은 동체벽면의 x 방

향 국부속도 변화(u)와 속도분포, Fig. 7과 8은 동체벽면의 y 방향 국부속도 변화(v)와 속도분포 그리고 Fig. 9와 10은 동체벽면의 z 방향 국부속도 변화(w)와 속도분포를 보여준다. Fig. 3, 5, 7, 9에서 $(P-P_s)/P_s$는 동체출구 압력에 대한 국부압력 변화, z/r은 추기노즐 중심부를 기준으로 노즐반경(r)에 대한 z 방향 거리의 비, x/r은 추기노즐 중심부를 기준으로 노즐반경에 대한 x 방향 거리의 비를 나타낸다. 그리고 u/V_0, v/V_0, w/V_0는 x, y, z 방향의 국부속도 변화를 무차원화 한 것이며, V_0는 해석모델의 동체측으로 유입되는 초기 평균속도를 나타낸다. Fig. 3과 4에서 볼 수 있듯이 노즐중심에서 +z 방향으로 거리가 증가하면서 노즐 좌우측에는 부압이 점차 커지다가 노즐반경 거리에 가까운 z/r=0.8에서 부압이 최고에 달한 후 점차 압력이 회복되었다. 이러한 부압발생으로 인하여 동체 내부는 복잡한 유동형태가 나타난다. Fig. 5와 6은 동체벽면의 x 방향 국부속도 변화와 속도분포를 나타낸 것으로서 노즐 중심에서는 만곡 충격판의 영향으로 증기가 동체벽면을 따라 흐르지만 +z 방향으로 거리가 증가하면서 u는 점차 작아지다가 z/r이 1.06과 1.33 사이에서 흐름방향이 역전되었다. 이러한 영향은 노즐 인접후단에 작용한 부압 때문인 것으로 판단된다. Fig. 7과 8은 동체벽면의 y 방향 국부속도 변화와 속도분포를 나타낸 것으로서 동체벽면에서의 v는 거의 정체되기 때문에 동체벽면에서 약간 떨어진 부위에서 계산된 값이다.

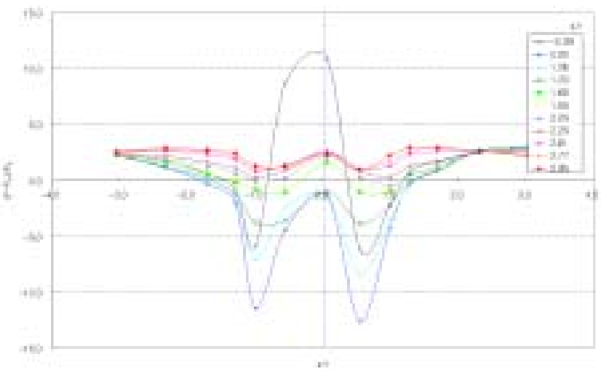

Fig. 3 Pressure profiles of adjacent shell wall

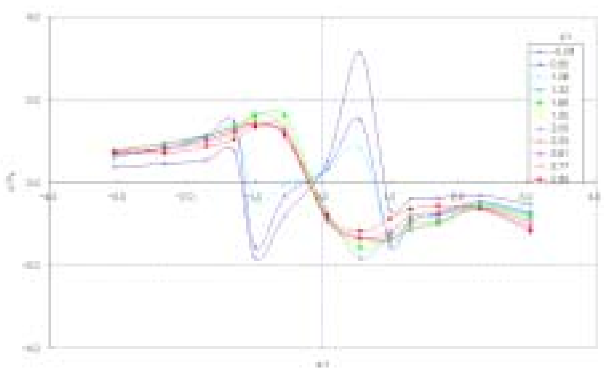

Fig. 5 *u* profiles of adjacent shell wall

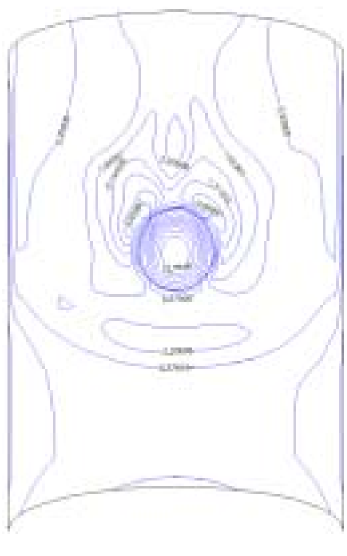

Fig. 4 Pressure distribution

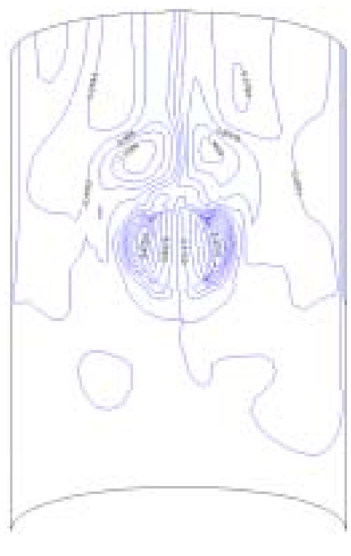

Fig. 6 *u* distribution

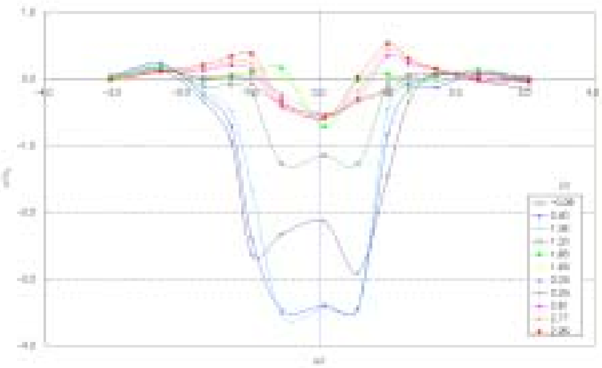

Fig. 7 *v* profiles of adjacent shell wall

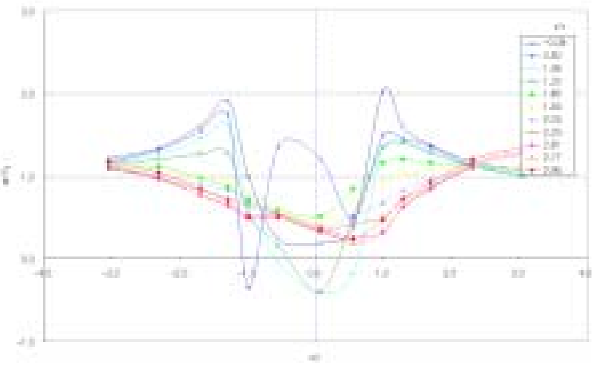

Fig. 9 *w* profiles of adjacent shell wall

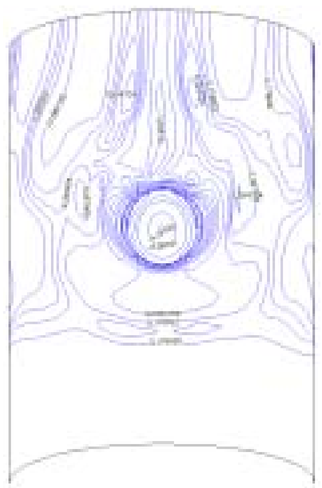

Fig. 8 *v* distribution

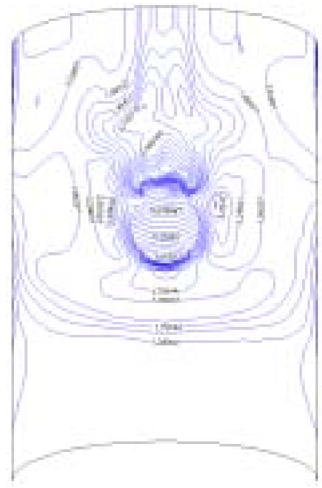

Fig. 10 *w* distribution

그림에서 볼 수 있듯이 z/r=-0.09에서 v/V_o는 노즐 중심에서는 약 -2.2이고 노즐벽면 부위(x/r=±1.0)에서는 약 -3.0 정도였다. 노즐 가장자리의 유속이 더 빠른 이유는 충격판에 수직으로 작용하는 증기의 압력 때문인 것으로 추정된다. +z 방향으로 거리가 증가하면서 노즐 내부의 *v*는 음으로 증가하였다. 이 때 노즐 좌우쪽의 x/r=±2.3 부근에서는 역류가 발생하였다. 계속해서 +z 방향으로 거리가 증가함에 따라 노즐 중심축의 *v*는 점차 저하되었다. 그리고 노즐 측면에서 발생한 역류는 z/r이 0.8에서 2.25까지의 거리에서는 x/r=2.3에서 최대치를 보이다가 z/r이 2.61에서부터는 x/r=0.99에서 최대치를 보였다. 이러한 유동현상은 그림 8에서 명확하게 확인할 수 있으며 좌우가 거의 흡사한 유동경향을 나타내었다. Fig. 9와 10은 동체벽면의 z 방향 국부속도 변화와 속도분포를 나타낸 것으로서 *w*는 노즐 중심에서 x/r이 1.0과 -1.0 부근에서 가장 큰 값을 나타내었으며, z/r이 증가함에 따라 점차 감소하였다.

이러한 z 방향의 큰 국부속도는 급수가열기 전체 내면에서 볼 때 다른 여러 부위에서도 나타났다. 해석결과에 따른 유동특성이 동체감육에 미치는 영향을 검토하기 위하여 각 방향의 국부유속을 급수가열기 추기라인 인접부의 동체두께 측정 데이터와 비교하였다. 두께측정은 추기라인과 인접한 급수가열기 동체 전면의 198개 부위와 후면의 144개 부위를 대상으로 초음파 두께측정(UT)을 수행하였다. 측정부위 사이의 간격은 5.08cm(2in)였다. 실제 배관을 대상으로 하여 감육연구를 수행한 결과에 따르면 벽면과 나란히 흐르는 유체는 감육에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 제시하고 있다. 그리고 동체벽면에 수직으로 부딪치는 국부속도를 나타내는 *v*는 노즐 벽면에서 양측면으로 노즐반경 정도의 거리에서 가장 크게 나타났으며 후단으로 가면서 큰 *v*는 노즐중심 축을 향하여 이동하는 것으로 나타났다. 이러한 유동현상은 동체두께 감육 현상과 거의 흡사한 경향을 보였다.

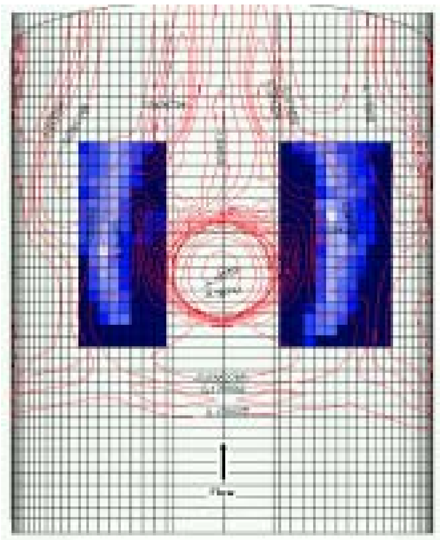

Fig. 11 Comparison of Wall Thinning Configuration and *v* Distribution

이에 따라 동체 벽면의 감육현상은 동체 내부로 들어 온 추기증기가 충격판에 부딪친 후 국부적인 부압의 영향으로 유체가 역류하여 동체 벽면에 수직으로 영향을 미치는 *v*의 국부유속에 민감한 것을 알 수 있다. 선행 감육연구 결과에서도 유체가 재료 벽면과 수직으로 충돌하는 부위에서 감육이 가장 심하게 나타난다고 제시하고 있다. *w*는 노즐 인접 양측면에서 가장 큰 국부유속을 보였으며 큰 국부유속은 급수가열기 전체 내면에서 볼 때 다른 부위에서도 나타나기 때문에 동체두께 감육 현상과의 유사성은 찾아보기 어려웠다. 이러한 사실은 벽면과 나란히 흐르는 유체는 감육에 영향을 미치지 않는다는 사실과 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 동체두께 감육현상과 *v* 분포를 중첩하여 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 동체벽면을 향하여 흐르는 *v* 분포는 동체두께 감육현상과 거의 흡사한 경향을 보였다. 즉, *v*가 클수록 동체두께는 많이 얇아진 사실을 알 수 있다.

5. 결 론

원자력 발전소 2차측의 고압터빈에서 추기되는 고온, 고압의 2상 증기로 인하여 급수가열기 내벽이 감육되는 현상을 유체유동 측면에서 규명하기 위한 연구를 수행하였다. 유체유동 현상 해석은 상용 수치해석 코드인 FLUENT를 사용하였다. 해석결과에 따른 유동특성과 동체감육의 상관성 검토는 초음파 두께측정 장비를 이용하여 측정한 동체 두께 감육분포와 국부유속을 비교하였다. 해석결과, 추기증기는 급수가열기 내부의 전열관 손상을 방지하기 위하여 설치된 충격판에 부딪치고 추기라인 노즐 후단에서는 심한 부압이 발생하였다. 이러한 부압 때문에 동체 벽면과 충격판 사이에서는 심한 난류형성과 동시에 유체 흐름이 역류하는 현상이 나타났다. 동체 두께 감육분포와 국부유속을 비교한 결과, 급수가열기 벽면과 평행하게 흐르는 *u*와 *w*는 감육현상과 크게 상관이 없음을 확인하였으며 동체 벽면을 향하여 수직으로 부딪치는 *v*의 영향이 감육현상에 지배적임을 확인하였다. 이러한 연구결과는 흐르는 유체와 접촉하는 기기재료 중 유체가 수직으로 부딪쳐 흐름정체가 발생하는 부위에서 감육이 가장 심하게 발생된다고 알려진 사실과 잘 일치하였다. 또한 이러한 연구결과는 발전소 급수가열기 손상을 사전에 예방할 수 있는 설계개선과 동체 감육손상 관리에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 2003년도 경희대학교 지원에 의한 결과이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Fort Calhoun, 1999, "Shell Wall Thinning of Feedwater Heater", OE 10710, INPO.

(2) KHNP, 2000,"A techmical investigation paper of the body thickness verification in Go-ri num. 1 feedwater heater.

(3) G. J. Bignold et al., 1981, "Proc. 8th Intern. Congress Metallic Corrosion", DECHEMA, West Germany, vol.2, pp. 1548.

(4) C. P. Dillon, 1986, "*Corrosion Control in the Chemical Process Industries*", McGraw-Hill, Inc.

(5) CHAM, 1994, "*An Introduction into the Method for Implementing Multi-Block Grids and/or Grids with Refinements in FLUENT*", CHAM TR/401, Ver. 2.1.