

# 급수가열기 충격판 설계변경에 따른 동체감육 완화에 관한 유동해석 연구

김경훈\*, 황경모\*\*, 진태은\*\*\*

## A Study on the Fluid Mixing Analysis for the Shell Wall Thinning Mitigation by Design Modification of a Feedwater Heater Impingement Baffle

K. H. Kim, K. M. Hwang, T. E. Jin

### Abstract

Feedwater heaters of many nuclear power plants have recently experienced wall thinning damage, which will increase as operating time progresses. As it is judged that the wall thinning damages have generated due to local fluid behavior around the impingement baffle installed in downstream of the high pressure turbine extraction steam line to avoid colliding directly with the tubes, numerical analyses using PHOENICS code were performed for two models with original clogged impingement baffle and modified multi-hole impingement baffle. To identify the relation between wall thinning and fluid behavior, the local velocity components in x-, y-, and z-directions based on the numerical analysis for the model with the clogged impingement baffle were compared with the wall thickness data by ultrasonic test. From the comparison of the numerical analysis results and the wall thickness data, the local velocity component only in the y-direction, and not in the x- and z-direction, was analogous to the wall thinning configuration. From the result of the numerical analysis for the modified impingement baffle to mitigate the shell wall thinning, it was identified that the shell wall thinning may be controlled by the reduction of the local velocity in the y-direction.

**Key Words:** Feedwater Heater(급수가열기), Extraction Steam(추기증기), Impingement Baffle(IB, 충격판), Clogged IB(막힌충격판), Multi-hole IB(다공충격판)

\* 경희대학교, 기계공학과

\*\* 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

\*\*\* 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

### 1. 서론

원자력 발전소 2차측의 고압 급수가열기 5A 동체측으로는 고압터빈에서 추기(Extraction)되는 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(IB : 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[1], 그 해 11월에는 미국 Fort Calhoun 원전의 급수가열기 5번 추기노즐 충격판 주변에서 심각한 감육손상이 발생되어 침식보강용접(Flush Patch Weld)을 수행한 바 있다[2]. 국내에서도 2000년 10월 특정 가압경수로형 원전의 급수가열기 5A와 5B에서 유사한 손상을 경험하여 보강용접을 수행한 바 있다[3]. 국내 원전 2차측의 급수가열기 설계방식은 대부분 유사하기 때문에 이러한 급수가열기 추기노즐 충격판 주변의 동체 감육손상은 원전 안전과 급수가열기 건전성 확보 차원에서 중요하게 고려되어야 한다.

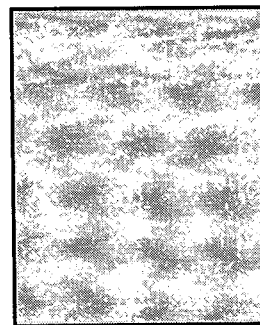
본 연구에서는 급수가열기 추기노즐 주변의 동체감육의 원인을 유체유동 측면에서 분석하고, 동체감육을 완화시킬 수 있는 충격판 설계변경 연구를 수행하였다. 이를 위하여 기존의 막힌충격판(Clogged IB) 모델을 이용한 유동해석을 수행하여 급수가열기 동체감육 원인을 분석하였다. 또한 기존의 충격판을 설계 개선한 다공충격판(Multi-hole IB) 모델을 이용하여 유동해석을 수행하고 기존의 결과와 비교함으로써 설계개선의 타당성을 검토하였다.

### 2. 해석모델 구성

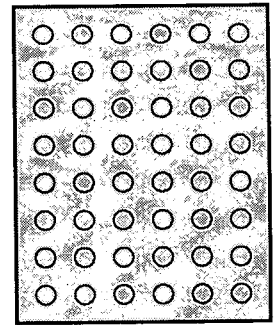
급수가열기 충격판 설계변경에 따른 동체감육 완화 연구를 위한 유동해석은 유한체적법을 근간으로 하는 상용 전산 수치해석 코드인 PHOENICS를 사용하였다. 해석모델은 국내 가압경수로형 원전 2차측에 설치되어 있는 급수가열기 5A의 추기 배관라인 주변의 동체를 대상으로 하였다.

동체감육 완화연구를 위하여 두 개의 모델을 구성하였다. 하나는 기존의 구멍없는 충격판(그림 1)을 이용한 Clogged IB 모델이고 나머지 하나는 구멍이 뚫린 다공충격판(그림 2)을 이용한 Multi-hole IB 모델이다. <그림 3>은 급수가열기 5A의 반단면도를 보여준다. 해석범위는 그림에서 볼 수 있듯이 동체 상단의 절반과 추기라인의 차단밸브 후단을 대상으로 하였으며 두 종류의 충격판을 동체 내부에 각각 모델링 하였다. 동체 내부에 있는 전열관은 관심대상이 아니므로 해석범위에 포함하지 않았다.

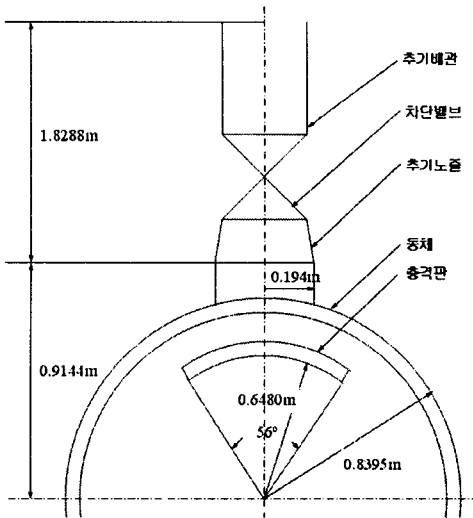
<그림 4>는 단일블럭(Single Block)으로 구성된 해석모델의 격자구성을 보여준다. 격자수는 총 43,264개( $x \times y \times z = 52 \times 16 \times 52$ )로 구성하였으며 유체거동이 복잡하거나 중요하게 고려되는 부위에 대해서는 조밀하게 격자를 배열하였다.



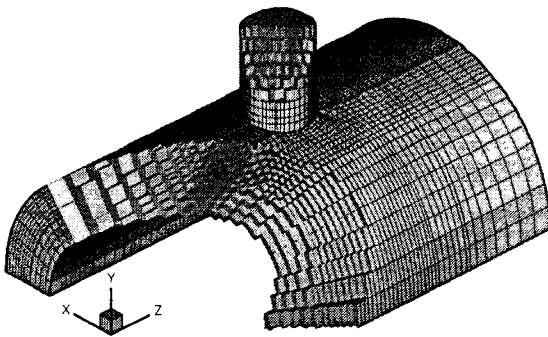
<그림 1> Clogged IB 모델



<그림 2> Multi-hole IB 모델



<그림 3> 급수가열기 5A의 반단면도



<그림 4> 해석모델 격자구성

해석모델 내부의 구조와 열유동 조건을 고려하여 물리적으로 적절한 수치해를 얻고자 급수가열기 내의 유동을 3차원, 비정상상태, 압축성 및 난류로 간주하였다. 추기증기는 충격판에 부딪친 후 모든 방향으로 반사되며, 실측결과 말발굽형태로 감육이 진행되었으나 정확히 좌우 동형이 아니었기 때문에 3차원으로 모델링 하였다. 비정상상태 해석은 유체거동이 정상상태로 되는 시점의 결과를 확인하기 위함이었으며 2초 시점의 유체거동을 정상상태와 사전 비교한 결과 거의 차이가 없음을 확인하였다. 추기증기는 건도가 약 90% 정도이

므로 압축성 유체로 가정하였고, 급수가열기 추기노즐로 유입되는 증기의 Re수를 평가하면 약  $1.0 \times 10^5$ 이므로 난류로 모델링 하였다. 난류 해석에는 시간변화에 따른 와류점성(Eddy Viscosity) 특성과 Re수가 높은 분리-재부착류의 유동의 특성을 보다 정확하게 예측하는 것으로 알려진 RNG (ReNormalized Group) k-ε 모델을 적용하였다[4]. 추기라인과 급수가열기 외벽은 단열조건을 적용하였다.

### 3. 경계조건 및 수치해석

유동해석 결과를 비교하기 위하여 Clogged IB와 Multi-hole IB 모델에 동일한 경계조건을 적용하였다. 급수가열기 및 추기라인 내부의 작동유체는  $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ 에 대한 포화조건에서의 단상 증기로 가정하였다. 실제 추기증기는 2상이지만 추기증기의 건도가 90% 정도이므로 단상인 증기로 가정하더라도 유체의 거동은 거의 유사할 것으로 예상된다. 입력 경계조건으로 사용되는 추기라인의 유속은 균일 속도 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 <표 1>과 같다.

<표 1> 경계조건

항목	단위	값	비고
Steam temperatures in the extraction pipeline and the shell inlet	℃	100	
Steam velocity in the extraction pipeline	m/sec	10.930	
Steam velocity in the shell inlet	m/sec	1.697	
Density	kg/m <sup>3</sup>	0.586	Steam
Kinetic viscosity	m <sup>2</sup> /sec	$2.17 \times 10^{-5}$	Steam
Thermal expansion coefficient	K <sup>-1</sup>	$2.17 \times 10^{-3}$	Steam

PHOENICS 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. 속도성분들에 대해서는 오류시간간격이완(False Time Step Relaxation) 방법을 적용하고 오류시간간격은 0.01을 적용하였으며 난류강도는 5%를 적용하였다. 해석은 2초를 400Step으로 구분하여 계산하였으며 Step 당 250회 반복계산 하도록 구성하였다.

#### 4. 유동해석 결과

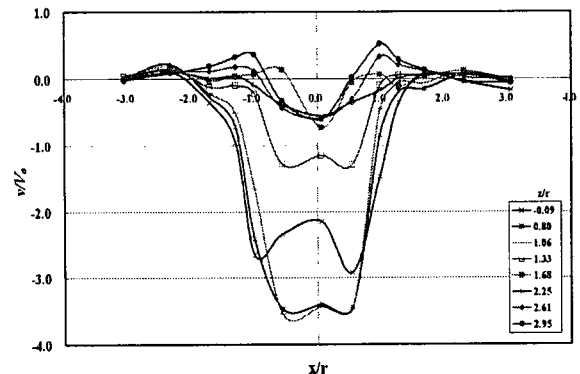
##### 4.1 Clogged IB 모델 해석결과 및 감속영향 분석

터빈에서 추기되는 고속, 2상 증기의 유동이 급수가열기 동체감속에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Clogged IB 모델을 이용한 유동해석을 수행하였다. 해석시간은 동체 전단의 유체가 모델을 완전히 빠져나갈 것으로 예상되는 2초 동안 수행하였다. 해석결과는 동체 인접부에서의 x-방향 국부유속( $u$ , 원주방향), y-방향 국부유속( $v$ , 반경방향) 및 z-방향 국부유속( $w$ , 축방향)을 실측에 의한 동체감속 데이터와 비교하였다. 데이터는 동체 내벽에서 0.032m 위치에서 취득하였다. 이는 유체가 동체 벽면에 충돌한 후 정체되기 때문에 두 번째 셀을 대상으로 하였다.

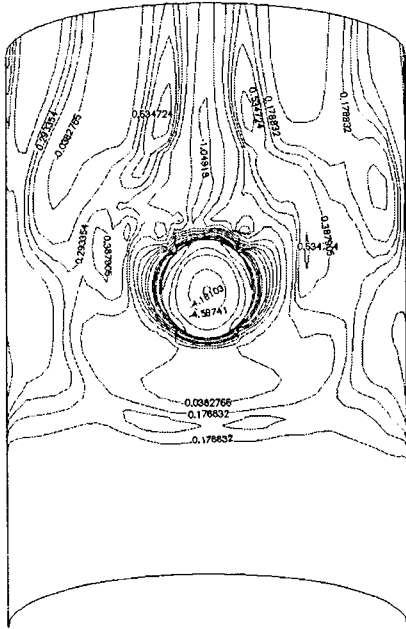
Clogged IB 모델을 이용한 유동해석 결과, 노즐중심에서 +z 방향(동체출구)으로 거리가 증가하면서 노즐 좌우측에는 부압이 점차 커지다가 노즐반경 거리에서 부압이 최고에 달한 후 점차 압력이 회복되었다. 이러한 부압발생으로 인하여 동체 내부는 복잡한 유동형태가 나타났다. x 방향 국부유속( $u$ )은 노즐 중심에서 만곡 충격판의 영향으로 증기가 동체벽면을 따라 흐르다가 +z 방향으로 거리가 증가

하면서  $z/r$ 이 1.06과 1.33 사이에서 흐름방향이 역전되었다. 여기서  $r$ 은 노즐반경을 의미한다. 이러한 영향은 노즐 인접후단에 작용한 부압 때문인 것으로 판단된다.

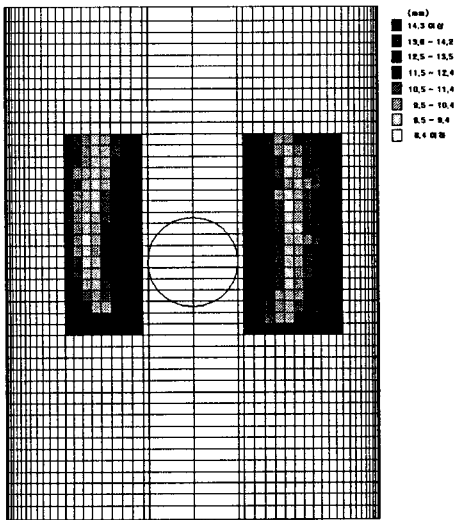
<그림 5>와 <그림 6>은 동체벽면의 y 방향 국부유속 변화와 속도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이  $z/r = -0.09$ 에서  $v/V_0$ 는 노즐 중심에서는 약 -2.2이고 노즐벽면 부위( $x/r = \pm 1.0$ )에서는 약 -3.0 정도였다. 여기서,  $v/V_0$ 는 y 방향의 국부유속 변화를 무차원화 한 것이며,  $V_0$ 는 해석모델의 동체축으로 유입되는 초기 평균속도를 나타낸다. 노즐 가장자리의 유속이 더 빠른 이유는 충격판에 수직으로 작용하는 증기의 반력 때문인 것으로 추정된다. +z 방향으로 거리가 증가하면서 노즐 내부의  $v$ 는 음으로 증가하였다. 이때 노즐 좌우쪽의  $x/r = \pm 2.3$  부근에서는 역류가 발생하였다. 계속해서 +z 방향으로 거리가 증가함에 따라 노즐 중심축의  $v$ 는 점차 저하되었다. 그리고 노즐 측면에서 발생한 역류는  $z/r$ 이 0.8에서 2.25까지의 거리에서는  $x/r = 2.3$ 에서 최대치를 보이다가  $z/r$ 이 2.61에서부터는  $x/r = 0.99$ 에서 최대치를 보였다. 이러한 유동현상은 그림 6에서 명확하게 확인할 수 있으며 좌우가 대칭인 유동경향을 보였다.



<그림 5> 동체벽면의 y 방향 국부유속 변화 (Clogged IB 모델)



<그림 6> y 방향 속도분포 (Clogged IB 모델)



<그림 7> 감육분포

$z$  방향 국부유속( $w$ )은 노즐 중심에서  $x/r$ 이 1.0과 -1.0 부근에서 가장 큰 값을 나타내었으며,  $z/r$ 이 증가함에 따라 점차 감소하였다. 이

러한  $z$  방향의 큰 국부유속은 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 50.8mm(2in)였다. 그림 7은 UT 결과에 따른 동체두께 감육분포를 보여준다. 동체의 초기 설계두께는 14.29mm(0.5625 in)였으며 측정된 두께에 따라 8단계로 구분하여 색칠을 하였다. 밝은 색은 감육이 많이 진행되어 두께가 얇게 측정된 부위이고 진한 색은 감육이 심하지 않은 부위이다. 최소 측정두께는 8.4mm였다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 추기라인 노즐벽면으로부터 노즐반경 정도 거리의 좌우측에서 감육이 비교적 많이 진행되었으며 흐름방향 후단(+ $z$  방향)으로 갈수록 감육이 심한 부위는 중심으로 이동하였다.

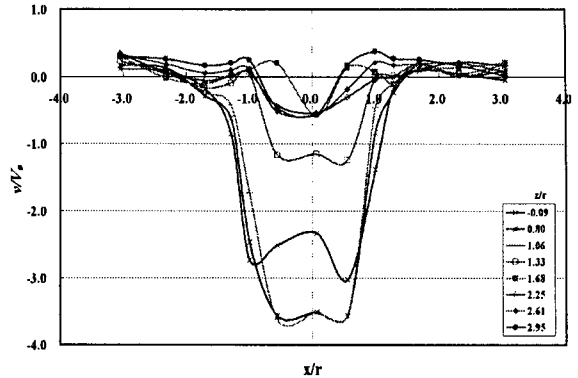
동체두께 측정 데이터와 각 방향의 국부유속을 비교한 결과  $u$ 는 노즐 인접 양측면에서 가장 크지만 동체감육과는 무관한 것으로 확인되었다. 실제 배관을 대상으로 하여 감육 연구를 수행한 결과에 따르면 벽면과 나란히 흐르는 유체는 감육에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 제시하고 있다[5]. 그리고 동체벽면에 수직으로 부딪치는 국부유속을 나타내는  $v$ 는 노즐 벽면에서 양측면으로 노즐반경 정도의 거리에서 가장 크게 나타났으며 후단으로 가면서 큰  $v$ 는 노즐중심 축을 향하여 이동하는 것으로 나타났다. 이러한 유동현상은 동체두께 감육 현상과 흡사한 경향을 보였다. 이에 따라 동체 벽면의 감육현상은 동체 내부로 들어온 추기증기가 충격판에 부딪친 후 국부적인 부압의 영향으로 유체가 역류하여 동체 벽면에 수직으로 영향을 미치는  $v$ 의 국부유속에 민감한 것을 알 수 있었다. 선행 감육연구 결과에

서도 유체가 재료 벽면과 수직으로 충돌하는 부위에서 감육이 가장 심하게 나타난다고 제시하고 있다[6, 7].  $w$ 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.

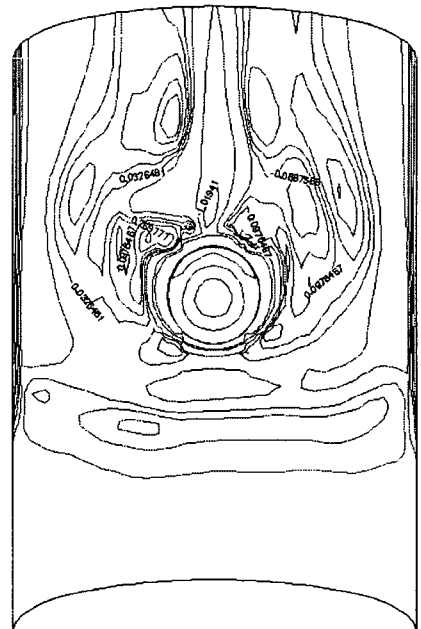
4.2 Multi-hole IB 모델 해석결과 및 동체감육 완화효과 분석

급수가열기 동체감육의 영향을 완화하기 위하여 기존 충격판의 형상을 변형한 Multi-hole IB 모델을 대상으로 유동해석을 수행하였다. 해석조건과 데이터 취득 부위는 기존 Clogged IB 모델의 해석결과와 비교하기 위하여 동일하게 설정하였다.

Multi-hole IB 모델을 이용한 유동해석 결과,  $y$  방향 국부유속 분포를 제외한 동체 벽면의 압력분포,  $x$  방향 및  $z$  방향의 국부유속 분포는 Clogged IB 모델의 해석결과와 거의 동일하였다. <그림 8>은 Multi-hole IB 모델 해석결과로 나타난  $y$  방향 국부유속 변화를 나타내고 <그림 9>는  $y$  방향 속도분포를 나타낸 것이다. <그림 8>에서 볼 수 있듯이 전반적인  $v$  변화는 <그림 5>와 유사하였으나 추기노즐 주변에서 동체 벽면에 수직으로 부딪치는  $+y$  방향 국부유속( $v$ )은 비교적 많이 완화된 것을 알 수 있다. 예로서 Clogged IB 모델에서는  $x/r = 1.0, z/r = 2.95$  부위에서  $v/V_0$ 가 0.520으로 최대인 반면 Multi-hole IB 모델에서는  $v/V_0$ 가 0.369로 최대치를 나타내었다. 이러한 현상은 그림 9에서도 확인할 수 있으며 추기노즐 주변에서 국부적으로 동체에 수직으로 향하는  $+y$  방향 유속이 많이 저하된 것을 알 수 있었다. 다공충격판에 하부에서 전열판으로 향하는  $-y$  방향 유속은 추기라인에서 들어오는 유속의 최소 1/4 정도로 약화되어 전열판에 미치는 영향도 크지 않음을 확인하였다.

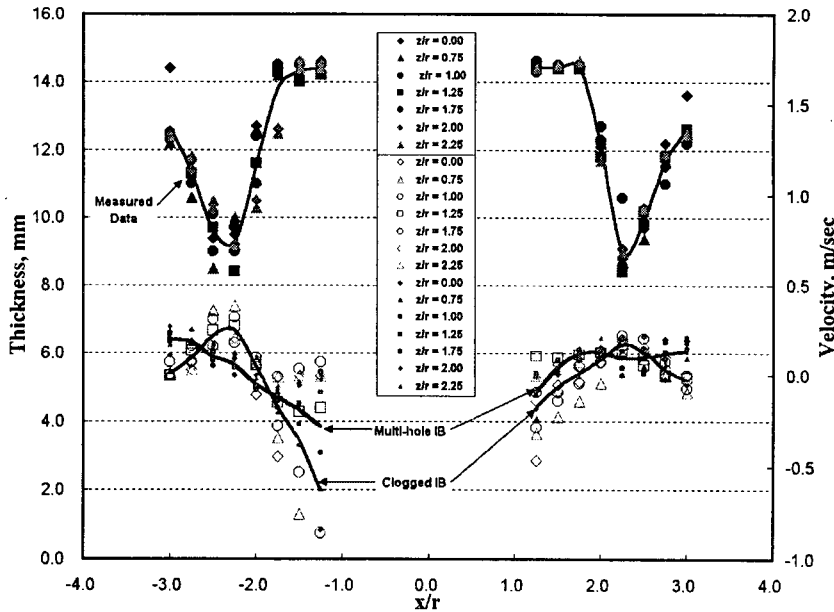


<그림 8> 동체벽면의  $y$  방향 국부유속 변화 (Multi-hole IB 모델)



<그림 9>  $y$  방향 속도분포 (Multi-hole IB 모델)

<그림 10>은 UT 측정에 의한 동체두께 데이터와 Clogged IB 및 Multi-hole IB 모델의 해석결과에 따른  $y$  방향 국부유속을 비교하여 그림으로 제시한 것이다. 여기서, 상단의 채워진 도형은 동체두께를 나타내고 아래의 빈 도형과 작은 도형은 Clogged IB 및 Multi-hole IB 모델의 해석결과에 따른  $y$  방향 국부유속



<그림 10> 실측두께와 해석결과 비교

을 나타낸다.  $x/r$ 이  $\pm 1.0$  사이는 추기노즐이 존재하는 부위이다. 비교한 부위는 측정 데이터가 존재하는 노즐 좌우측에서  $z/r$ 이 0부터 2.25까지이며, 실선은 동체두께와  $y$  방향 국부 유속의 평균 추이선이다. 그림에서 볼 수 있듯이 동체두께가 가장 얇은 부위는 Clogged IB 모델의 가장 빠른  $y$  방향 국부유속과 정확히 일치하고 있으며, Multi-hole IB 모델의 결과를 나타내는  $y$  방향 국부유속은 비교적 넓은 범위에 걸쳐 분산된 것을 알 수 있다. 결과적으로 동체 벽면에 수직으로 부딪치는 빠른  $y$  방향 국부유속이 다공충격판으로 인하여 분산되었으며, 이로 인하여 동체 벽면의 감육현상은 완화될 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로  $120\sim 180^\circ\text{C}$ 의 유체 온도에서 유속이 30% 저하될 경우 약 50%의 감육완화 효과가 나타나는 것으로 알려져 있다[8].

### 5. 결론

급수가열기 추기노즐 주변의 동체감육 원인을 유체유동 측면에서 분석하고, 동체감육을

완화시킬 수 있는 충격판 설계변경 연구를 수행하였다. 해석모델은 기존 급수가열기에 적용하고 있는 충격판을 이용한 Clogged IB 모델과 기존의 충격판을 다공충격판으로 개선한 Multi-hole IB 모델을 이용하여 유동해석을 수행하였다. Clogged IB 모델의 해석결과는 UT 측정데이터와 비교하여 감육원인을 분석하였으며, 설계 변경한 Multi-hole IB 모델의 해석결과는 Clogged IB 모델의 해석결과 및 UT 측정데이터와 비교하여 동체감육 완화 가능성을 검토하였다.

그 결과 급수가열기 벽면과 평행하게 흐르는  $x$  방향 국부유속과  $z$  방향 국부유속은 감육현상과 크게 상관이 없음을 확인하였으며 동체 벽면을 향하여 수직으로 부딪치는  $y$  방향 국부유속의 영향이 감육현상에 지배적임을 확인하였다. 이러한 결과는 흐르는 유체와 접촉하는 기기재료 중 유체가 수직으로 부딪쳐 흐름정체가 발생하는 부위에서 감육이 가장 심하게 발생된다고 알려진 사실과 잘 일치하였다. 그리고 기존의 충격판을 다공충격판으로 변경하여 유동해석을 수행한 결과, 동체 벽면

에 수직으로 부딪치는 국부유속은 기존 보다 약 30% 정도 완화된 것을 확인하였다. 이러한 결과에 따라 실제 발전소의 급수가열기 충격판 설계를 다공형으로 변경할 경우 상당한 수준까지 동체감육을 완화시킬 수 있을 것이라는 결론을 얻었다.

주 작 성 자 : 김 경 훈

논 문 투 고 일 : 2005. 01. 11

논 문 심 사 일 : 2005. 05. 02(1차), 2005. 05. 25(2차),  
2005. 06. 10(3차)

심 사 판 정 일 : 2005. 06. 10

## 참고문헌

- [1] Point Beach 1, "Steam Leak From Low Pressure Feed-water Heater", LER 1999-005, Rev.0, 1999.
- [2] Fort Calhoun, "Shell Wall Thinning of Feedwater Heater", OE 10710, INPO, 1999.
- [3] KHNP, "고리 1호기 급수가열기 동체측 두께검증 기술검토서, 제 1발전소 기계부 설계반, 2000.
- [4] CHAM, "An Introduction into the Method for Implementing Multi-Block Grids and/or Grids with Refinements in PHOENICS", CHAM TR/401, Ver. 2.1, 1994.
- [5] H. Keller, "Corrosion and Erosion Problems in Saturated Steam Turbines", AIM Conf., Liege, Belgium, pp. 22-28, 1978.
- [6] G. J. Bignold et al., "Proc. 8th Intern. Congress Metallic Corrosion", DECHEMA, West Germany, vol.2, pp. 1548, 1981.
- [7] C. P. Dillon, "Corrosion Control in the Chemical Process Industries", McGraw-Hill, Inc., 1986.
- [8] KEPCO, "Monitoring Corrosion in Nuclear Piping Systems", TR.96NW01. J1999.346, 1998.

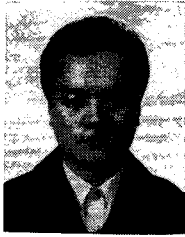


● 저자소개 ●



김경훈

1976 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과 학사  
1979 홍익대학교 공과대학 정밀기계공학과 석사  
1985 홍익대학교 공과대학 기계공학과 박사  
1982~현재 경희대학교 테크노공학대학 기계 산업시스템공학부 교수  
관심분야: 유체기계 유동특성, 유동가시화, 수격현상, 열유체 유동해석



황경모

1991 동국대학교 공과대학 화학공학과 학사  
2003 경희대학교 공과대학 기계공학과 석사  
1992~현재 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소 책임연구원  
관심분야: 원전수명관리, 주기적안전성평가, 배관감속, 열수력 해석



진태은

1981 연세대학교 공과대학 기계공학과 학사  
1985 연세대학교 공과대학 기계공학과 석사  
1994 연세대학교 공과대학 기계공학과 박사  
1985~현재 한국전력기술(주) 전력기술개발연구소 수석연구원  
관심분야: 원전수명관리, 주기적안전성평가, 용접부 건전성평가, 가압열충격