

원전 6단 급수가열기 추기증기 입구노즐 주변의 동체 국부 감육 원인 분석

송석윤 · 김형남^{*†}

Analysis of Local Wall Thinning around the Extraction Steam Entrance for the 6th Feedwater Heater Shell in the Nuclear Power Plants

Seok-Yoon Song^{*}, Hyung-Nam Kim^{*†}

Key Words : Feedwater Heater(급수가열기), Wall Thinning(감육), Flow Accelerated Corrosion(유동가속부식), Ultrasonic Thickness Measurement(초음파두께측정)

ABSTRACT

The feedwater heaters are critical components in a nuclear power plant. As the operation years of heaters go by, the maintenance costs required for continuous operation increase. When the carbon steel components in nuclear make contact with running fluid, the wall thinning caused by FAC (flow accelerated corrosion) can be generated. Local wall thinning is inevitable at the area around wet steam entrance to be attacked due to the long term operation. Sometimes the shell with thinned wall is eventually ruptured. To identify the relationship between the local wall thinning and fluid behavior of the feedwater heater, the practical data of a plant, which were based on ultrasonic thickness measurement tests, were analyzed and CFD(Computed Fluid Dynamics) analyses were performed.

1. 서론

원자력발전소에서 급수가열기는 핵심기기중 하나로, 재생 사이클을 담당하는 기기이다. 일반적으로 급수가열기는 주어진 온도, 압력 및 부식 환경에 견디고 발전소 수명기간동안 사용이 가능하도록 설계되지만, 가동 년수가 증가함에 따라 예기치 못한 원인으로 손상되어 누설이나 파손이 발생할 가능성이 있다. 국내의 원자력발전소에서 운전되고 있는 급수가열기는 20년 이상 경과됨에 따라 운전 및 정비 비용이 증가되고 있다. 침식, 부식 및 진동으로 전열관(tube)의 손상에 의한 누설과 동체(shell) 내부 및 구성품 감육이 급수가열기의 주된 고장이다.⁽¹⁾

급수가열기 동체 측의 응축영역(condensing zone)은 증기와 응축수의 2상 혼합물 유동에 의한 유동가속부식이 발생하

며, 일부 영역에서 장기간에 걸친 감육은 피할 수 없다. 급수가열기에서 유동가속부식에 의한 감육은 동체와 탄소강 튜브에서 발견되어 왔다. 그러나 이 영역은 유지보수를 위해 접근이 어려운 영역이고, 고장도 주로 여기서 발생하고 있다. 유동가속부식은 탄소강이나 저합금강의 정상적인 보호 산화막이 박리되어 물의 흐름이나 물-증기 혼합물 속으로 유리되어 가는 과정이다. 이는 기계적인 손상과는 달리 유체의 난류(turbulence) 흐름과 이에 따른 물질이동의 상승효과로부터 금속표면 산화막의 용해 또는 물질전달 속도가 더욱 빠르게 일어나는 현상이다.

원자력발전소의 가동 년수가 증가함에 따라 유동가속부식은 급수가열기, 습분분리재열기 등과 같은 기기에서도 주요 문제점으로 나타나고 있다.⁽²⁾ 특히 급수가열기 동체의 국부 감육 손상으로 많은 정비가 이루어지고 있다. 압력용기인 급수가열기 동체의 감육으로 인해 수격작용, 가동 시 걸리는 부하 등과

* 한국전력공사 전력연구원

† 교신저자 E-mail : sysong@kepri.re.kr

같이 상태의 갑작스러운 변화 혹은 운전압력에 의한 과도한 응력으로 인해서 얇아진 구성품이 손상되거나 기기의 압력경계 부분이 파손에 이르게 된다.

고압터빈에서 고압급수가열기로 공급되는 추기증기는 고온, 고압 및 고속의 2상 증기이다. 그리하여 급수가열기 내부에는 추기증기 입구노즐 하부, 관다발(tube bundle) 상부에 충격판(impingement plate)이 설치되어 있으며, 충격판은 습분을 동반한 추기증기의 효과를 완화시키기 위해 급수가열기 설계에 채택되었다. 급수가열기로 유입된 추기증기는 이 충격판에 부딪친 후, 모든 방향으로 흐르기 때문에 급수가열기 동체 내벽에 국부적인 감육 손상을 유발할 가능성이 있다.

2상 유동이 일어나는 배관이 단상유체의 배관보다 감육 속도가 높은 것으로 나타나며 이는 증기에 포함되어 있는 물방울 입자의 크기, 배관표면에서의 액체의 막 두께, 막과 물방울의 확산속도 및 국부적으로 용해되어 있는 철이온 농도에 깊은 관련이 있는 것으로 알려져 있다.⁽³⁾

배관개소(component)에 국부 감육이 발생하면 배관의 일부를 잘라내고 새로운 배관으로 교체하면 된다. 그러나 급수가열기 동체는 감육된 부분을 잘라내고 교체하기가 매우 어려우며, 일부를 잘라내어 정비해도 지속적인 문제를 수반하게 된다.

본 연구에서는 국내 원자력발전소 고압급수가열기 동체에서 국부 감육 손상된 사례를 초음파두께측정 결과를 이용하여 감육 경향, 감육량, 감육이 발생하는 위치 등을 분석하였다. 또한 분석대상 고압급수가열기 내부에서 증기의 3차원적인 유동 수치해석을 수행하여 국부 감육이 발생하는 원인을 규명하였다.

2. 급수가열기 동체 국부 손상 사례 분석

특정 발전소 고압급수가열기 동체의 고압터빈 추기증기 입구노즐 주변을 초음파두께측정 결과 최고 감육된 곳의 두께는 Table 1과 같다. 고압급수가열기 12대 중 A호기 6단 고압급수가열기가 다른 고압급수가열기에 비해 동체가 많이 감육되었음을 볼 수 있다. 6A 및 6B 고압급수가열기 동체의 두께측정 최소값은 24.21 및 25.16 mm로써 설계두께(31.75 mm) 대비 7.54 및 6.59 mm(23.7/20.8 %) 감육되어 다음 계획예방정비 기간까지 감육이 진행될 경우 최소요구두께(23.5 mm) 보다 작아질 것으로 예상되어, 10차 계획예방정비 기간에(2007.05.26~06.18) 동체의 감육된 영역을 절개하고 같은 재질, 같은 두께의 판으로 용접하여 정비하였다.

분석대상인 특정 호기의 6단 고압급수가열기는 고압터빈 5단 추기증기와 7단 고압급수가열기 응축수배수가 동체로 유입되어 전열관을 통하여 급수를 가열한다. 2곳의 가열증기 유입

원 중에서 고압터빈 5단 추기증기 입구노즐 주변의 동체 감육이 많이 발생되고 있다. Table 2는 6단 고압급수가열기 사양을 나타낸다. Fig. 1은 6단 고압급수가열기 동체의 상부 정면도로 충격판의 위치, 구조 등을 나타내고 있다.

Fig. 2는 동체의 상부에서 본 평면도로 충격판의 위치, 동체 절개지역 등이 표시되어 있다. 동체의 절개 영역은 원주방향으로 충격판 가장자리에서부터 하부까지 일정 길이로, 동체의 길이방향은 충격판 길이의 약 2배 정도를 절개하였다. 절개 영역은 주로 감육이 많이 된 곳으로 정비가 필요한 영역이다.

Table 1 Measured minimum thickness of high pressure heater shells

Heater	Design thickness (mm)	Measured minimum thickness(mm)	
		A unit	B unit
5A	31.75	29.77	31.70
5B		31.06	29.09
6A	31.75	24.21	30.23
6B		25.16	29.85
7A	38.10	38.68	34.87
7B		38.56	35.95

Table 2 Specification of 6th heater

Item	Shell Side	Tube Side
Design pressure(kg/cm ²)	28.2	158.2
Design temperature(°C)	232.2	230
Operating pressure(kg/cm ²)	17.95	176.2
Operating temperature(In/Out)(°C)	206.1/180.3	174.7/203.3
Shell material	ASTM A516 Gr.70	
Shell thickness(mm)	31.75	
Shell size(mm)	2,159(ID)×10,744.2(L)	

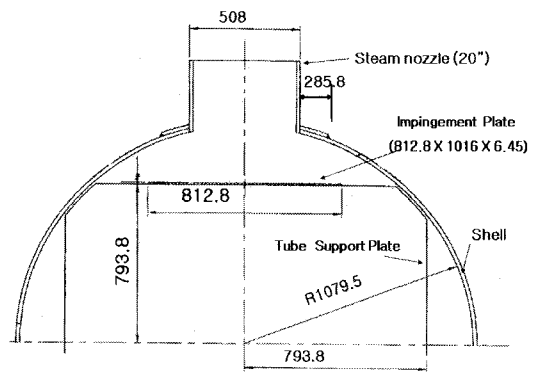


Fig. 1 Half cross sectional view of 6th heater

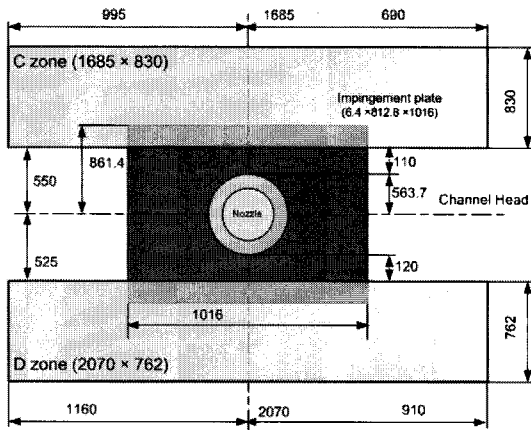


Fig. 2 Schematic drawing of shell cutting area for 6A heater

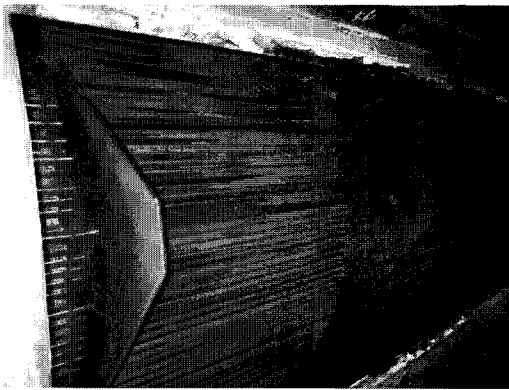


Fig. 3 Picture of shell cutting area for 6A heater

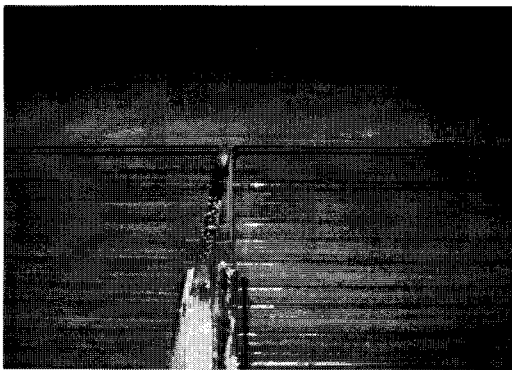


Fig. 4 Close-up picture of shell cutting area for 6A heater

Fig. 3은 6단 고압급수가열기 동체의 절개 사진을 나타내며, 충격판, 관지시대, 전열관 등을 볼 수 있다. Fig. 4는 6단 고압급수가열기 동체의 절개부위의 확대 사진으로 충격판의 위치가 잘 나타나 있다.

Fig. 5는 동체를 절개 전(2007년 5월)에 측정한 6A 고압급

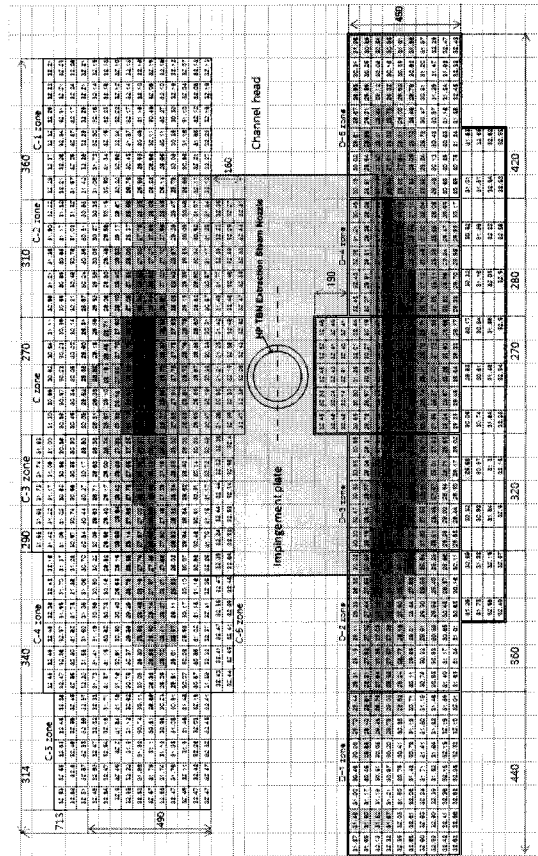


Fig. 5 Plan view and measured shell thickness for 6A heater (10th O/H)

수가열기 동체의 고압터빈 5단에서 유입되는 영역의 두께 측정 결과를 충격판 위치와 함께 그림으로 나타내었다. 두께가 얇아질수록 색이 짙게 표시하여 나타내었다. 감육이 발생하는 영역은 원주방향으로는 동체의 추기증기 입구노즐 가장자리에서부터 724 mm 떨어진 지점부터 1260 mm까지이고, 동체의 길이방향으로는 추기증기 입구노즐의 중심에서 채널헤드 쪽으로 435 mm, 채널헤드의 반대쪽으로 1000 mm까지의 영역이 감육되어 동체의 두께가 30 mm 이하로 측정되었다. 동체의 감육이 많이 진행된 영역은 충격판 가장자리에서부터 원주방향으로는 하부이며, 길이방향으로는 충격판 영역과 충격판을 벗어난 일정 지역임을 알 수 있다.

Table 3은 절개하여 정비된 특정 호기 6A 및 6B 고압급수가열기의 고압터빈 추기증기 입구노즐 주변부 동체의 최저두께 측정값을 8차에서 10차의 계획예방정비 기간에 따라 나타낸 것이다. 운전시간이 경과될수록 감육이 진행되어 동체의 두께는 감소하는 것을 알 수 있다.

Table 4는 6A 및 6B 고압급수가열기의 고압터빈 5단에서 추기된 증기가 들어오는 입구노즐 주변부 동체의 최저두께 측정값을 설계두께 대비 감육량, 설계두께 대비 감육률을 나타낸

Table 3 Measured minimum shell thickness around steam entrance of 6A, B heaters

Inspection	6A		6B	
	C zone	D zone	C zone	D zone
8th O/H	25.35	24.34	25.45	27.31
9th O/H	25.23	24.21	25.16	27.21
10th O/H	24.97	24.21	24.98	27.05

(Inspection : 8th O/H(2004.10), 9th O/H(2006.1), 10th O/H(2007.5), unit : mm)

Table 4 Local wall thinning at steam entrance zone of 6th heater shell

Inspection	6A		6B	
	C zone	D zone	C zone	D zone
Measured Thickness	24.97	24.21	24.98	27.05
Wear Value(mm)	6.78	7.54	6.77	4.7
Wear Rate(mm/yr)	0.565	0.628	0.615	0.427

(Maximum thickness: 32.82, Inspection: 10th O/H(2007.5), Commercial operation: A unit(1995.3.30), B unit(1996.1.1), unit : mm)

Table 5 Measured maximum wear rate for 1 refueling period of 6A,B heater shells

Inspection	6A		6B	
	C zone	D zone	C zone	D zone
8th O/H-9th O/H	0.67	0.34	0.29	0.13
9th O/H-10th O/H	0.35	0.51	0.67	0.39

(Inspection: 8th O/H(2004.10), 9th O/H(2006.1), 10th O/H(2007.5), unit : mm)

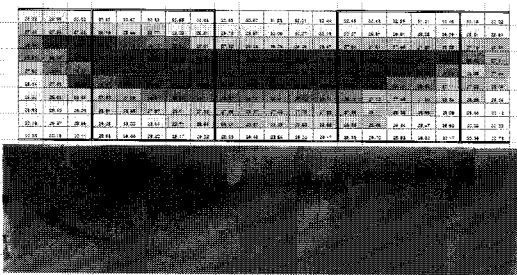


Fig. 6 Comparison between thickness measurement and picture of wall thinning area for 6A heater shell

것으로 0.427~0.628 mm/yr로 계산되었다. Table 5는 6A 및 6B 고압급수가열기의 1 운전주기(16개월) 기간의 감육량 중 각 영역의 최고 감육량을 나타낸 것으로 0.67~0.13 mm/1주기로 계산되었다.

Fig. 6은 6A 고압급수가열기의 동체의 감육된 영역의 두께

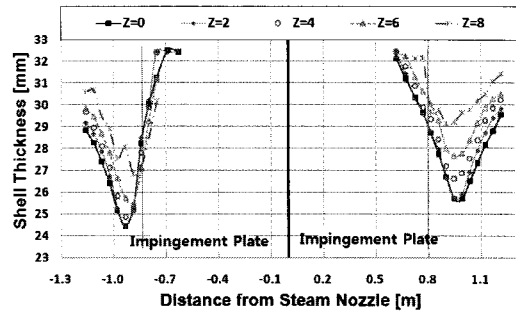


Fig. 7 Shell thickness along the circular direction distance from steam nozzle for 6A heater

측정 값과 절개부 내면의 감육 사진을 함께 나타낸 것으로, 동체의 외부에서 두께측정 결과와 실제로 동체의 내면에서 감육이 거의 일치되어 나타 나고 있음을 알 수 있다. 그러므로 급수가열기 동체의 전체적인 감육 정도와 위치를 초음파두께 측정검사 결과가 잘 나타내주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 6A 고압급수가열기 추기증기 입구노즐 중심 단면에서 좌우로 원주방향 거리에 따른 동체의 두께를 그래프로 나타낸 것이다. 입구노즐 중심 단면에서부터 좌우의 특정 위치에서 거리에 따라 급격하게 두께가 감소하였다가 회복되고 있음을 볼 수 있다. 동체의 원주방향으로 좌측 영역에서 670 mm부터 감육이 시작되고 907 mm에서 가장 깊이 감육되었다. 충격판의 위치가 입구노즐의 중심에서 803.83 mm 떨어진 지점이므로 충격판의 바로 위에서 감육 이 시작되어 충격판의 위치보다 약간 아래쪽 에서 가장 많이 감육 되었음을 알 수 있다. 동체의 원주방향으로 추기증기 입구노즐을 중심으로 좌우의 감육 깊이가 다름을 알 수 있다. 이것은 입구노즐 상류측 유동 교란요소인 엘보우의 방향에 따라 증기의 유동이 한쪽으로 많이 형성되는 것으로 추정된다. 또한 동체의 길이방향으로는 입구노즐에서 거리가 멀어질수록 감육된 부위가 입구노즐 중심 쪽으로 형성됨을 알 수 있다.

3. 급수가열기 동체 국부 감육 원인 분석

3.1 급수가열기 증기 유동 수치해석

원자력발전소 현장에 설치되어 운전중인 6단 고압급수가열기에서 발생한 동체의 국부 감육 손상의 원인을 밝히기 위하여 상용 전산유체역학 해석 프로그램(FLUENT)을 사용하여 고압급수가열기 내부에서 증기의 유동, 유속 및 압력분포를 분석하였다.

동체 내부에는 전열관, 충격판, 관지지대(tube supports), 배플(baffle) 등의 여러 가지 요소들이 복잡하게 구성되어 있

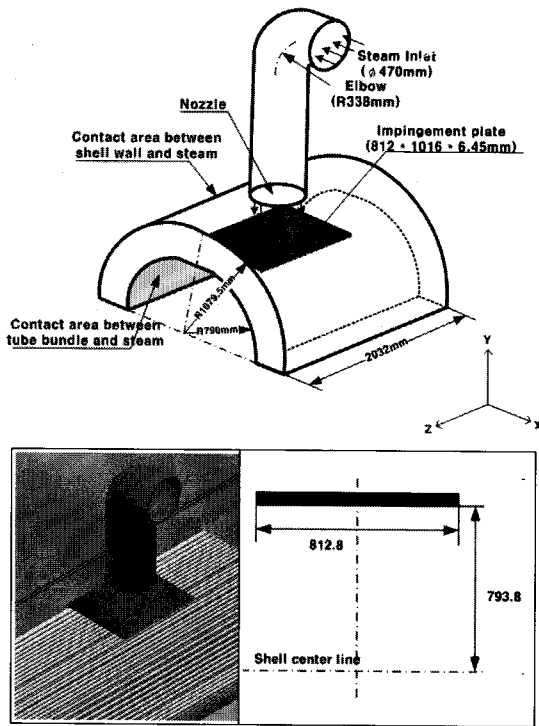


Fig. 8 Geometry and size of flat impingement plate

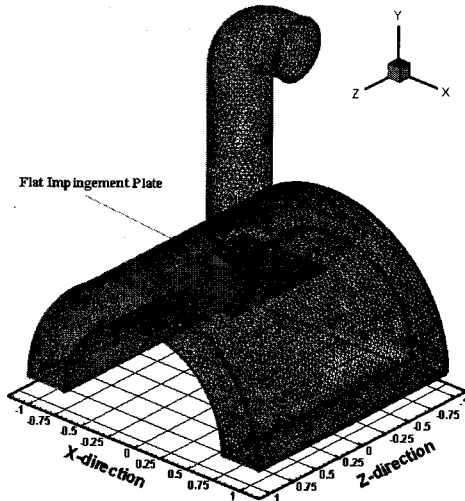


Fig. 9 Grid generation of flat impingement plate

다. Fig. 8은 동체 내부의 유동 구간에 평면 충격판이 설치된 경우의 형상 및 치수를 나타낸 것이다. 이외에 동체의 길이방향(Z-축) 거리는 단순히 증기가 양쪽 방향으로 퍼져나가는 현상만을 확인하고자 충격판 길이의 2배인 2,032 mm로 선정하였다. 급수가열기 상부로 터빈에서 공급되는 추기증기 공급배관이 엘보우에 연결되고 배관을 통하여 입구노즐에 연결되며, 급수가열기 내부에는 관다발 상부에 평판 형상의 충격판이 있

으며 충격판 아래에는 다수의 전열관이 조밀하게 밀집된 관다발 형상으로 설치되어 있다.

본 해석은 급수가열기 내부에서 2상 증기의 유동으로 동체 벽면에서 발생하는 국부 감속 현상을 확인하기 위해서 동체 내부의 충격판 부근의 유동구간에서 증기의 유속 변화와 압력분포를 분석하는 것이 주요 목적이다. 그러므로 동체의 하부는 본 연구에서 고려하는 국부 감속 발생에 민감하지 않기 때문에 하부영역을 제외한 동체의 상부영역만을 해석 대상으로 모델링하였다. 또한 고압터빈에서 추기증기가 공급되는 배관의 전단부에 있는 엘보우가 동체 내부로 유입되는 추기증기의 유속 분포에 미치는 영향을 고려하고자 이를 해석 영역에 포함시켰다.

해석 대상 유체인 추기증기는 동체 내부에 유입시 증기전도가 87.36%인 2상이며, 급수가 흐르는 전열관을 통해 잠열을 전달한 후 응축수로 상변화를 일으키는 복잡성을 가지고 있다. 하지만 본 해석에서는 증기의 온도 및 상변화 보다는 동체 내부에서 습증기의 유동에 의한 압력 분포와 증기 유속을 분석하였다. 그리고 2상인 습증기의 물성치는 증기표에서 액상과 증기상의 값을 찾아 밀도와 점도를 계산하여 적용하였다. 또한 급수가열기 내부의 유동 구간이 상당히 넓고 유동특성을 지배하는 레이놀즈수가 매우 크기 때문에 3차원 압축성 난류유동으로 고려하였다.

일반적으로 FLUENT 코드에서 $k-\epsilon$ Model과 RNG $k-\epsilon$ Model은 난류 유동 해석에 많이 쓰이고 있는 모델로서 시간변화에 따른 와류점성(Eddy viscosity) 특성과 Re 수가 높은 유동의 특성을 보다 정확하게 예측한다. 하지만 해석시간이 많이 소요된다는 단점이 있다⁽⁴⁾. 본 연구의 해석모델은 추기라인에서 유입되는 증기가 충격판에 부딪친 후 동체 벽면으로 반사되고 일부는 충격판에서 분리된 후 후면에서 재결합되는 특성을 가지고 있으며 이러한 유동특성은 $k-\epsilon$ Model보다 RNG $k-\epsilon$ Model이 더 정확하게 예측하는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾ 이에 따라 본 연구에서는 보다 정확한 해를 구하기 위하여 RNG $k-\epsilon$ Model을 적용하였으며, 추기라인과 급수가열기 외벽은 단열조건을 적용하였다.

관다발 사이로 침투하는 증기의 유량은 관다발 둘레의 환형 유로보다 통과 유량이 매우 작고 또한 해석 대상이 아니므로 본 해석에서는 무시하였다. 수치해석을 위한 이산화 기법으로는 유체 압력은 Linear를, 모멘텀과 체적분율은 First Order Upwind를, 압력-속도 커플링에 대해서는 SIMPLE Algorithm을 적용하였다.

본 해석에 사용된 유체의 물성치는 Table 6과 같으며, 제작사 설계 자료 및 발전소 열평형도(heat balance drawing)를 기초로 산출하였다. 증기에 대한 비체적은 정상 100% 출력 조

전에서의 포화압력 및 포화온도 정보를 기초로 구하였다.

추기계통은 터빈 추기노즐에서 급수가열기 입구노즐까지 추기증기를 나른다. 터빈 각각의 추기단에서 추기노즐까지의 압력손실은 3% 이하이다. 또한 추기노즐에서 급수가열기 입구노즐까지의 압력손실은 5% 이하이다.⁽⁶⁾ 그리하여 제작사에서 설계된 자료 분석 결과 고압터빈(HP TBN) 5단에서 추기된 증기의 압력은 251.8 psia이고 배관 관로상에서 2% 정도의 압력손실이 발생하는 것으로 가정하여 급수가열기 공급배관 전단부에서 작용하는 압력은 246.7 psia로 정하였다. 또한 급수가열기의 동체와 연결된 입구노즐에서 작용하는 압력은 244.2 psia이고, 동체 출구까지 증기가 이동하면서 대략적으로 2 psi 정도 압력강하가 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러므로 출구 압력을 242.2 psia로 가정하였다. 따라서 Table 7과 같이 실제 발전소의 급수가열기에서 운전되고 있는 조건에서의 값들과 수치해석 조건을 제시한 것이다.

Fig. 9는 앞서 설명된 유동 영역을 단일블럭(single block)으로 구성하여 해석 모델 격자를 생성한 것이다. 격자수는 총 25만개이며, 곡면 형상에서 비교적 수렴성이 우수한 것으로 알려진 사면체 격자(tetrahedra)를 사용하였다.

Fig. 10은 입구노즐 중심 단면에서 동체 내부의 유동 형상을 확대하여 나타낸 것이다. 동체 내부로 들어온 증기가 충격판에 부딪친 후 평판을 따라 흐르다가 평판 끝부분에서 박리되어 동체의 일부 영역에 유동이 집중되어 부딪치고 동체의 내면을 따라 아래로 흐르고 있음을 보여주고 있다. 일부 증기는 동체에 부딪친 후 동체의 상부로 흐르며 와류가 발생하는 것을 볼 수 있다.

Table 6 Properties of extraction steam

Item	Value	Unit
Fluid type	Wet steam	
Steam quality	87.4	%
Saturation temperature	477.027	K
Saturation pressure	244.36	psia
Specific volume	Liquid	0.001162 m ³ /kg
	Vapour	0.117689 m ³ /kg
	Wet steam	0.103085 m ³ /kg
Density	Liquid	860.14 kg/m ³
	Vapour	8.49 kg/m ³
	Wet steam	9.7 kg/m ³
Viscosity	1.58479×10 ⁻⁵	N.s/m ²

Table 7 Analysis condition

Items	Units	Values
Operating Condition	-	-
- Operating Pressure	Pa	1,582,347
- Gravity	m/s ²	9.81
Boundary Condition	-	-
- Inlet Pressure	Pa	1,599,584
- Outlet Pressure	Pa	1,568,557
- Turbulence Kinetic energy	m ² /s ²	2.04022
- Turbulence dissipation rate	m ² /s ³	88.57730
Solver	-	Segregated 3D, Steady, Absolute
Viscosity Model	-	RNG <i>k-ε</i> Differential Viscosity Model
- Near Wall	-	Standard Wall Function
- Model Constant	-	Cmu : 0.0845 C1-Epsilon : 1.42 C2-Epsilon : 1.68
Material	-	-
- Density	kg/m ³	9.7
- Viscosity	kg/m · s	0.000015748



Fig. 10 Flow pattern of flat impingement plate at center section of inlet nozzle

Fig. 11은 동체의 내벽면에 작용하는 정압분포를 등압선(static pressure contour)으로 나타낸 것이며, X-axis는 입구노즐을 기준으로 동체 중심에서 반경방향 거리이다. 동체의 원주방향으로 입구노즐에서 좌우로 일정 거리에서 정압이 높게 분포하는 것을 볼 수 있다. 정압이 높게 나타나는 영역은 증기 유동이 동체의 벽면에 집중적으로 충돌되는 영역이다. 추기증기가 들어오는 입구노즐 중심(X=0인 축)을 기준으로 동체의

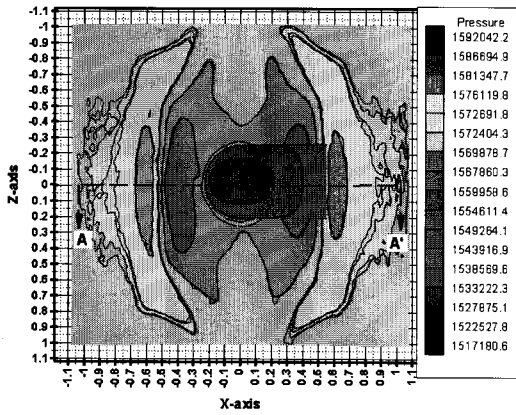


Fig. 11 Static pressure contour around shell inner wall

좌측과 우측 영역의 압력분포가 전반적으로 대칭적인 형태를 보이고 있으나 좌측 영역에서 1,576,12×10⁶ Pa 이상의 고압 영역이 비교적 넓게 분포하는 것으로 해석되었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 상류측 엘보우에서 교란된 증기 유동이 입구 노즐을 통해 분사될 때 충격판의 우측 영역 보다는 좌측 영역으로 더욱더 많은 양이 증기가 충격판에 부딪치고 동체 내벽면의 넓은 영역으로 빠져나가기 때문인 것으로 분석된다.

3.2 사례 및 수치해석 결과 비교

고압급수가열기 동체의 외부에서 초음파두께검사를 수행하여 취득된 동체의 두께데이터와 수치해석 결과를 그래프에 함께 나타내었다. 그리하여 급수가열기 동체 내부로 유입된 추기 증기의 유동으로 인해 동체 국부 감육에 지배적으로 영향을 미치는 매개변수를 찾고자 한다. 다음의 그래프들은 초음파두께 검사로 얻은 동체 두께데이터와 수치해석 결과의 각 요소를 비교하여 그래프로 제시한 것이다.

Fig. 12는 입구노즐의 원주방향 중심 단면에서 좌우로 동체의 원주방향 거리에 따른 동체 벽면에서의 정압의 수치해석 결과와 실제 동체의 두께를 그래프로 나타낸 것이다. 정압이 급격히 증가한 지점부터 감육되기 시작하며 감육이 가장 많이 된 지점은 정압이 최고치에서 낮아진 지점이다. 그리고 수치해석 결과 입구노즐을 중심으로 좌측에서 최대 정압이 발생했으며, 동체의 국부 감육도 우측보다 좌측에서 깊어 발생되었음을 알 수 있다.

Fig. 13은 입구노즐의 원주방향 중심 단면에서 좌우로 동체의 원주방향 거리에 따른 동체 벽면에서의 정압의 수치해석 결과와 실제 동체의 두께를 그래프로 나타낸 것이다. 정압은 증기의 유동이 동체 내벽에 부딪치며 벽면에 가해지는 힘이다. 정압

이 급격히 증가한 지점부터 감육되기 시작하며 감육이 가장 많이 된 지점은 정압이 최고치에서 1단계로 낮아진 지점이다.

Fig. 14는 입구노즐의 원주방향 중심 단면에서 좌우로 동체의 원주방향 거리에 따른 동체 벽면에서의 동압의 수치해석 결과와 실제 동체의 두께를 그래프로 나타낸 것이다. 동압은 증기의 유동이 동체 내벽에 부딪치며 흐르는 속도를 나타낸다. 동압이 급격히 증가하는 지점부터 감육되기 시작하며 감육이

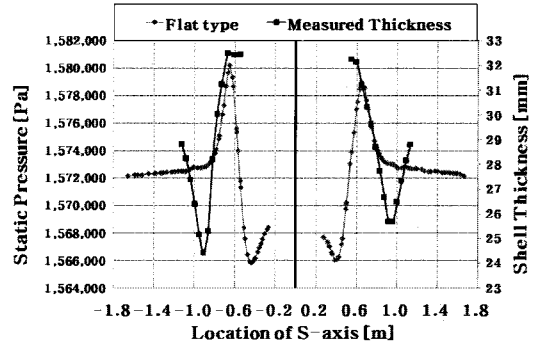


Fig. 12 Static pressure and shell thickness of shell inner wall along the shell circular direction distance

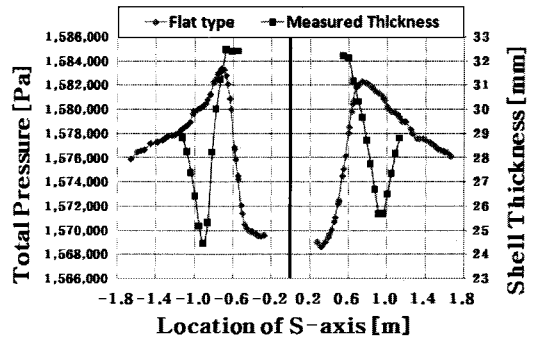


Fig. 13 Total pressure and shell thickness of shell inner wall along the shell circular direction distance

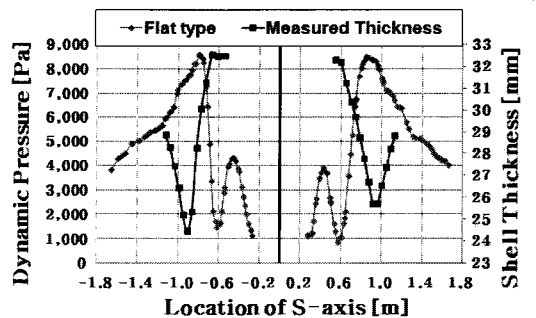


Fig. 14 Dynamic pressure and shell thickness of shell inner wall along the shell circular direction distance

가장 많이 된 지점은 동압이 높았다가 낮아지는 지점이다.

Fig. 12~14에서 추기증기가 동체 내부로 유입되어 충격판에 부딪친 후 동체로 향해 흐르다가 동체 벽면에 재 충돌하는 부위에서 감육이 많이 발생한다. 그리고 가장 감육이 많이 되고 있는 지점은 증기가 동체 벽면에 부딪쳐 흐르면서 정압이 급격히 증가했다가 낮아지고, 전압 및 동압의 변화가 많이 일어나는 지점임을 알 수 있다. 그러므로 동체 내부로 유입된 증기의 유동으로 정압, 전압 및 동압의 수치해석 결과가 동체 내벽에서 실제로 가장 감육이 많이 발생하는 위치를 잘 나타내주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 15는 입구노즐의 원주방향 중심 단면에서 좌우로 동체의 원주방향 거리에 따른 동체 벽면에서의 전단응력의 수치해석 결과와 실제 동체의 두께를 그래프로 나타낸 것이다. 전단응력은 증기의 유동이 동체 내벽에 부딪치며 흐르는 속도의 기울기를 나타내며, 전단응력이 클수록 증기가 동체 내벽에 부딪쳐 속도의 변화가 큰 영역이다. 전단응력의 크기와 동체 국부 감육은 연관성이 없음을 알 수 있다.

Fig. 16은 입구노즐의 원주방향 중심 단면에서 좌우로 동체의 원주방향 거리에 따른 동체 벽면에서 0.03~0.0305 m 떨어진 위치에서 증기의 속도크기를 수치해석 결과와 실제 동체의 두께를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 17은 입구노즐의 원주방향 중심 단면에서 좌우로 동체의 원주방향 거리에 따른 동체 벽면에서 0.03~0.0305 m 떨어진 위치의 증기 속도성분(X-방향, Y-방향)의 수치해석 결과와 실제 동체의 두께를 그래프로 나타낸 것이다. 증기의 속도성분 크기는 증기의 유동이 동체 내벽에 부딪치며 흐르는 속도를 나타낸다. 증기의 속도가 급격히 증가하는 지점부터 감육되기 시작하며 감육이 가장 많이 된 지점은 속도가 가장 높았다가 낮아지는 지점이다.

Fig. 16과 Fig. 17에서 추기증기가 동체 내부로 유입되어 충격판에 부딪친 후 동체로 향해 흐르다가 동체 벽면에 재 충돌하는 영역에서 감육이 많이 발생하며, 증기가 동체 벽면에 부딪쳐 흐르는 속도와 감육 깊이는 상관관계가 있음을 알 수 있다. 그리고 동체 내부로 유입된 증기의 유동으로 증기의 속도가 가장 높은 지점의 수치해석 결과가 동체 내벽에서 실제로 가장 감육이 많이 발생하는 위치를 잘 나타내주고 있음을 알 수 있다. 그러므로 동체 내부로 유입된 증기의 유동으로 증기의 속도크기가 가장 높은 지점의 수치해석 결과가 가장 감육이 깊게 발생된 위치를 잘 나타내주고 있음을 알 수 있다.

유동가속부식에 영향을 주는 인자는 금속재료의 조성에 따른 재질인자, 온도, pH, 용존산소농도 등의 환경인자, 유속, 배관거칠기, 유로, 배관형상, 2상 유동의 경우 증기진도 혹은 공극률 등의 수력학적인자들이 상호 복합적으로 작용하여 영

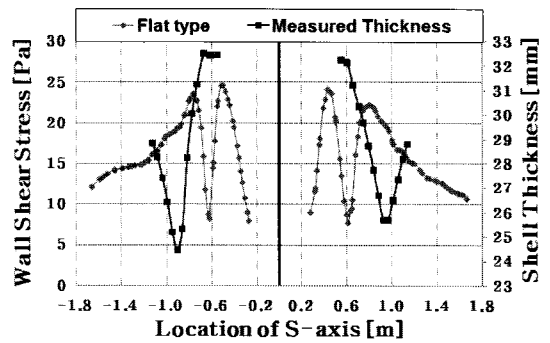


Fig. 15 Wall shear stress and shell thickness of shell inner wall along the shell circular direction distance

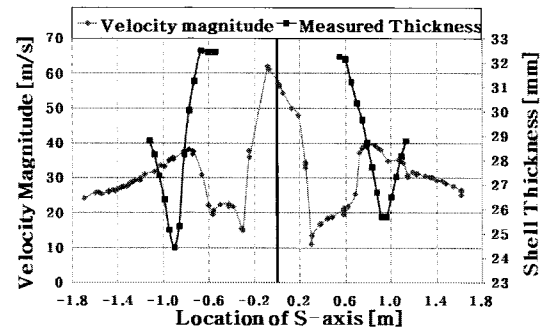


Fig. 16 Velocity magnitude and shell thickness of shell inner wall along the shell circular direction distance

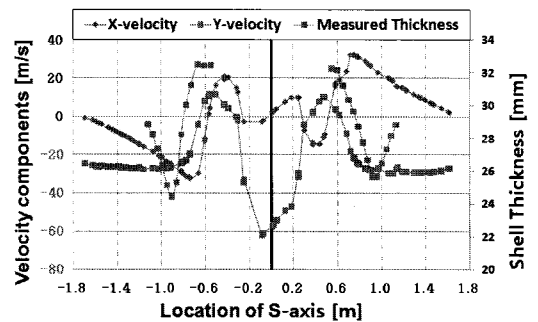


Fig. 17 Distribution of velocity components and shell thickness of shell inner wall along the shell circular direction distance

향을 미친다. 여기서는 재질인자, 환경인자 변수를 고려하지 않고 습증기의 국부적인 난류 유동만을 고려해도 무방한 이유는 급수가열기 내에서는 재질인자와 환경인자는 동일한 것으로 간주되기 때문이다. 즉, 급수가열기로 들어가서 나가는 동안에는 외부의 단열재로 인하여 화학반응을 일으킬만한 열적 변화 요인도 없고 거리와 시간도 짧기 때문이다. 따라서 추기증기가 급수가열기 내부에서 국부 감육에 영향을 미치는 인자는 습증기의 난류유동이 유일하다는 전제조건이 성립한다. 그

리므로 습증기의 유동 특성에 따른 공극률, 유속, 유로형상에 따라서 습증기가 동체 내벽에 부딪치며 흐르는 현상을 동체 내벽에서의 압력과 증기의 속도를 분석하였다. 위의 분석결과 급수가열기 동체 내벽의 국부 감육 현상은 동체 내부로 들어온 습증기의 유동이 동체 벽면에 부딪치는 힘과 속도에 밀접한 연관성을 갖는다는 사실을 알 수 있었다. 이 사실을 통하여 급수가열기 내부의 동체 국부 감육이 예상되는 영역은 증기가 동체 벽면에 집중적으로 부딪치며 빠르게 흐르는 부위이다. 그리고 가장 깊게 감육되는 위치는 높아진 증기속도가 낮아지는 부위에서 발생됨을 알 수 있다. 이는 배관이나 기기 벽면에 수직으로 부딪치며 흐르는 부위에서 감육이 가장 많이 발생한다는 선행 연구^(7~11) 결과와 부합된다. 동체 벽면에 형성되는 마그네타이트가 동체 내벽에 부딪쳐 흐르는 습증기에 의해 특정 부위에서 물질전달이 활발히 진행되어 국부 감육이 더 빨리 진행됨을 알 수 있다. 따라서 증기에 의한 동체 내면에 가해지는 힘을 나타내는 압력과 증기의 속도를 분석하면 동체의 국부 감육 발생 위치를 알 수 있다. 본 논문에서 분석한 대상은 2상의 습증기가 공급되는 탄소강으로 제작된 급수가열기 동체에 대해서 적용이 가능하다.

4. 결론

본 연구에서는 고압급수가열기 동체에서의 국부 감육 사례 분석과 상용 전산 프로그램을 이용한 3차원 증기 유동해석 등을 수행하였으며, 이들 결과에 대한 비교분석 등을 수행하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 추기증기가 들어오는 입구노즐 주변부 좌우 영역에서 집중적으로 국부 감육이 발생하는데 동체의 원주방향으로는 충격판의 바로 아래에서 가장 많은 감육이 일어나고 동체의 길이 방향으로는 충격판의 2배 길이에 걸쳐 감육이 많이 발생한다.
- 2) 급수가열기 동체 내벽의 국부 감육 현상은 동체 내부로 들어온 습증기의 유동이 동체 벽면에 부딪치는 힘과 속도에 밀접한 연관성이 있으며, 급수가열기 내부의 동체 국부 감육이 예상되는 영역은 증기가 동체 벽면에 집중적으로 부딪치며 빠르게 흐르는 부위에서 발생됨을 알 수 있다.

상기의 결과를 습증기가 흐르는 다른 급수가열기에 적용할 경우 기존 해외 탄소강 배관 감육 이론식으로 예측할 수 없는 급수가열기 동체 국부 감육 원인 규명과 발생 부위 및 범위를 보다 정확하게 예측 등에 활용되어 원전 안전성 증대에 기여할 수 있다.

참고문헌

- (1) Song S. Y., Yoo S. Y., 2007, "Analysis of Damage Causes for Feedwater Heater Shell Side in the Nuclear Power Plants," Transactions of Korean Society of Pressure Vessels and Piping, Vol. 3, No. 3, pp. 18~26.
- (2) NRC, 1987, "Thinning of Pipe Walls in Nuclear Power Plants," Bulletin 87-01.
- (3) Chexal, B., Horowitz, J., Dooly, B., Millett, P., Wood, C. and Jones, R., 1998, "Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant," EPRI TR 106611- R1.
- (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) D. Choudhury, 1993, "Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling," Fluent Inc., Technical Memorandum TM-107.
- (6) Electric Power Research Institute, 2002, "Feedwater Heater Maintenance Guide," p2-1-2-6.
- (7) G. A. Delp, J. D. Robison, and M. T. Sedlack, "Erosion/Corrosion in Nuclear Plant Steam Piping: Causes and Inspection Program Guide Lines," EPRI NP-3944.
- (8) EPRI, 1998, "CHECWORKSTM Application Manager," Ver. 1.0D, TR-103198-P3, Final Report.
- (9) KNS, 1990, "핵화학 공학" Korean Nuclear Society, Vol. 27, No. 5, pp. 449~457.
- (10) G. J. Bignold and I. S. Woosly, "Mechanistic Aspects of Erosion/Corrosion under Boiler Feedwater Conditions," BIGNOLD DE WHALLEY, GARBETT and WOOLS, pp. 219~226.
- (11) V. K. Chexal and J. S. Horowitz, 1989, "Flow-Assisted Corrosion in Carbon Steel Piping Parameters and Influences," EPRI.