Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 36, No. 12, pp. 1535~1542, 2012

<응용논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.12.1535 ISSN 1226-4873

대규모해석을 활용한 수직형 배열회수 증기발생기의 안전설계에 관한 연구

류태영* · 양상모* · 장현민* · 최재붕† · 명기출** ·이동윤**· 최신범***
* 성균관대학교 기계공학부, ** (주) 신텍, ***한국원자력연구원

Study on Safety Design of Vertical-Type Heat Recovery Steam Generator Based on Large-Scale Analysis

Tae-Young Ryu*, Sang-Mo Yang*, Hyun-Min Jang*, Jae-Boong Choi†, Ki-Chul Myung** and Dong-Yun Lee** and Shin-Beom Choi***
* School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan Univ.,
** SeenTec Co.
*** Korea Atomic Energy Research Institute

(Received November 15, 2011 ; Revised September 13, 2012 ; Accepted September 20, 2012)

Key Words: Finite Element Method(유한요소법), Large-Scale Analysis(대규모해석), Thermal Fatigue(열피로), Heat Recovery Steam Generator(배열회수 증기발생기)

초록: 배열회수 증기발생기는 복합발전플랜트에서 사용되는 주요기기로서, 박판으로 제작된 대형구조물이며 열변형과 열피로에 매우 민감하다. 따라서 운전 중에 발생하는 열피로에 의한 파손을 예방하기 위하여 대규모해석 기반의 안전성 평가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 대규모해석을 수행하고 이를 활용하여 배열회수 증기발생기의 손상 메커니즘 분석 및 해결방안을 도출하고자 한다. 또한 이를 반영하여 열변형과 열피로를 예방하고 건전성을 확보할 수 있는 모델을 제안 및 검증하고자 한다. 이는 수직형 배열회수 증기발생기의 안전성 향상을 위한 기초자료로 활용된다.

Abstract: A Heat Recovery Steam Generator(HRSG) is the main component of a Combined Cycle Power Plant(CCPP). It is a very large structure that is made from relatively thin metal sheets. Therefore, the structural integrity of an HRSG is very important to ensure safe operation during plant lifetime. In particular, thermal deformation and thermal fatigue have been revealed as the main causes of the mechanical degradation of an HRSG. In order to prevent unexpected damage, safety evaluation based on a large-scale analysis is necessary. Therefore, this study aims to improve the safety of HRSG by using Finite Element Analysis(FEA) results derived from large-scale analysis. Furthermore, the modified design is verified by comparing it with the original one. This result will be used as basic data for improving the safety of a vertical-type HRSG.

1. 서론

복합발전플랜트(Combined Cycle Power Plant, CCPP)는 시스템 효율 증대를 위해 가스터빈의 배기가스를 이용해 배열회수 증기발생기(Heat Recovery Steam Generator, HRSG)에서 증기를 생성하고 스팀 터빈을 구동해 추가로 전력을 생산하는 발전시스템이다. 일반 화력발전소의 효율 38~40% 수준에 비해 CCPP는 55%의 높은 효율을 가지고 있고, 일반 화력발전소에 절반수준인 건설비와 짧은 건설기간, 빠른 운전기동특성 등 여러 가지 장점을 갖추고 있다.[1,2] 그러나 CCPP는 기저부하용이 아닌 첨두부하용으로 건설되기 때문에 전력수요에 맞추어 잦은 기동정지 및 부하변동 운전을 하게 되며, 이로 인해 기저부하용으로 지속적인 운전을 하는 발전소에서는 예상하지 못한 문제들이 발생한다.[3] 특히 CCPP의 주요기기 중 하나인 HRSG의 내부케이싱(inner casing)에서는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 열변형과 열피로에 의해 균열발생 및 파손사례 등이 발생한다. 따라서 잦은 기동정지 및 부하변동에 따른 운전조건에서 HRSG의 구조건전성은 매우 낮은 것으

† Corresponding Author, boong33@skku.edu
ⓒ 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

로 판단된다.

일반적으로 HRSG는 구조상 수직형과 수평형으로 분류하며, 본 논문에서는 수직형 HRSG를 연구대상으로 선정하였다. 수직형 HRSG는 높이가 40 m인 대형 구조물이며, 내부케이싱 두께가 6 mm인 박판으로 제작되었다. 앞서 언급한 바와 같이 첨두부하에 제한적으로 가동되는 CCPP의 특성상 HRSG는 큰 열변형의 반복에 따른 열피로 현상이 발생할 가능성이 크며, 이는 HRSG의 안전성에 큰 영향을 미치게 된다. 수직형 HRSG에서 주요 파손 사례들은 천이덕트(transition zone)에서 주로 발생한다. 천이덕트는 HRSG 전체에서 가장 높은 온도·압력의 가스가 통과하는 부위이며, Fig. 2에 수직형 HRSG의 개요도 및 천이덕트의 위치를 도시하였다. 또한, 국내외에서 이코노마이저(economizer)와 과열기(superheater)등과 같은 HRSG 내의 열교환기 및 증기드럼(steam drum)등에 관한 연구[1~4]는 많이 수행되었지만, HRSG 내부케이싱 및 천이덕트의 안전성 평가에 관한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 상용 수직형 HRSG의 구조건전성을 대규모해석을 통해 평가하고, 안전성 향상을 위한 개선책을 제시하고자 한다.

2. 대규모해석 기반의 안전성 평가

2.1 전역해석을 통한 취약부위 선정

전술한 바와 같이 수직형 HRSG는 박판으로 구성된 거대한 구조물이며, 따라서 해석 시 많은 컴퓨터 자원과 계산 시간을 필요로 한다. 따라서 이번 절에서는 유한요소모델 검증 및 취약부위 선정을 위한 전역해석에 대해 서술하였다.

2.1.1 CAD 및 유한요소모델 작성

본 논문에서 사용된 해석모델은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 일반적으로 사용되는 수직형 HRSG의 내부케이싱과 천이덕트를 위주로 작성하였다. 내부케이싱은 가스터빈에서 나온 가스와 외부의 압력경계이며, 천이덕트는 가스터빈과 내부케이싱을 연결하는 구조물이다. 천이덕트와 내부케이싱은 HRSG의 외벽을 구성하며, 모두 6 mm 두께의 박판으로 제작되었으며, 작은 압력 변화에도 큰 변형이 발생할 수 있다. 기존 수직형 HRSG에는 고온·고압인 가스터빈 배기가스에 의한 과도

Fig. 1 Crack and fatigue damage in transition zone

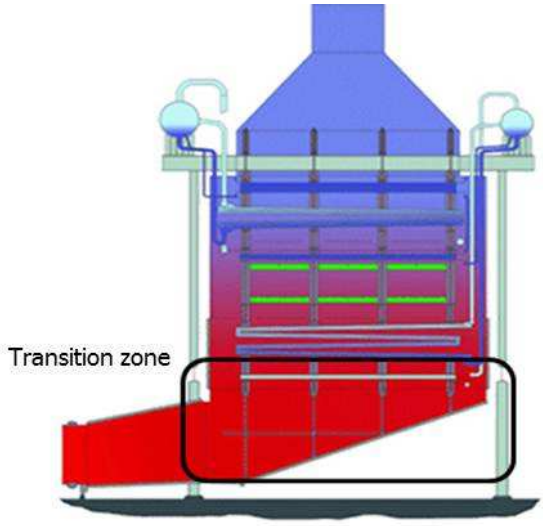

Fig. 2 Transition zone of vertical type HRSG

한 변형을 막기 위하여 많은 스티프너(stiffener)들을 사용한다. 스티프너는 구조물의 강성(stiffness)를 증가시키기 위하여 사용하는 구조물로서, T형, H형 또는 C형 강재 빔을 천이덕트 및 내부케이싱에 용접으로 접합하여 설치된다. 또한 내부케이싱은 고온의 가스터빈 배기가스가 열교환기에서 효율적으로 열전달 되도록 배기가스의 경로를 유도하는 유도벽(guide plate)을 포함하고 있으며, 내부케이싱의 상부에는 구조물 전체를 지탱하기 위한 지지대(hot-beam)가 설치되어 있다. 상기 서술한 구조물들 중 HRSG의 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 스티프너이므로, 실제와 유사하게 구조를 모사하여 해석 결과에 정확성을 기하였다. 또한 HRSG의 대칭성을 이용하여 ½모델(half model)을 작성하였으며 해석시간을 단축하였다. 모델링은 Inventor 2010[5]을 이용하여 수행하였으며 스티프너, 유도판 및 지지대를 고려한 전역해석을 위한 CAD 모델은 Fig. 3에 도시하였다. 유한요소모델은 492,833개의 절점(node)과 1,512,125개의 요소(element)로 구성하였으며, 복잡한 형상의 원활한 표현을 위하여 3차원 4절점 사

면체요소(3-dimensional tetrahedron element)를 사용하여 작성하였다. 유한요소모델 작성에는 Altair Hypermesh ver.9[6]을 이용하였다.

2.1.2 유한요소해석 조건

HRSG는 고온·고압의 배기가스가 통과하는 기기로서, 고온 강도 특성이 우수한 재료를 사용하여 제작된다. 또한, 사용되는 재료는 각 부위에 인접하는 배기가스의 온도에 따라 다르게 사용된다. 배기가스의 온도가 가장 높은 천이덕트 및 내부케이싱의 하부에는 고온에서 우수한 강도특성을 가지는 SA387 Gr.22강을 사용하고 있으며, 상부에는 SA387 Gr.12강을 사용하고 SA387 Gr.12강의 경계부로부터 사용된 가스가 배출되는 연돌까지는 SS400강을 사용하여 제작되고 있다. 해석에 사용된 재료들의 물성을 Table 1~Table 3에 정리하였다. 열전달 및 열응력 해석에 적용하기 위하여, 재료들의 물성은 기계적 물성 및 열 물성을 포함하였다. 그러나 Table 3에 제시된 SS400강의 경우 구조 정해석만 수행하였기 때문에 열 물성은 제외하고 기계적 물성만 표현하였다.[7]

하중조건으로써 HRSG의 설계 운전압력인 264 mmAq(=2.6 kPa) 크기의 압력을 전체모델 내부케이싱 및 천이덕트 내벽면에 적용하였다. 유도판의 경우 가스 누설을 고려하여 내측·외측 면 모두에 해당 압력을 적용하였다. 경계조건으로 지지대 하부 고정부에 상·하 방향 구속을 적용하였으며, ½모델 절단부에 XY-평면 대칭조건을 적용하고, HRSG의 열팽창 중심을 표현하기 위하여 모델의 중앙부에 X-방향 구속을 적용하였다. 전체모델의 구조 정해석에 사용한 경계조건을 Fig. 4에 도시하였다. 정의한 하중조건 및 경계조건을 바탕으로 구조 정해석을 수행하였다. 유한요소해석은 범용 해석 프로그램인 ANSYS ver.12.1[8]을 이용하였다. 대규모해석(large-scale analysis)은 100만 자유도(degree of freedom) 이상인 모델을 활용하여 수행된 해석을 의미하며,[9~11] 본 해석에 사용된 유한요소모델은 약 200만 자유도를 가진 거대 모델이다. 해석 시간 단축을 위해 8-node를 가진 PC(Personal Computer) 클러스터(cluster)를 구축하고 이를 활용하여 대규모해석을 수행하였다.

2.1.3 전역해석을 통한 취약부위 선정

전역해석 결과 천이덕트와 내부케이싱이 만나는 굴곡부에 최대 등가응력(von Mises equivalent stress) 112 MPa이 발생하며, HRSG 하부 천이덕트의 스티프너 굴곡 부분에서 응력집중 현상이

Table 1 Mechanical and physical properties of SA387 Gr.22

Temp. (°C)	Thermal Conductivity (J/sec·m·°C)	Specific Heat (J/kg·°C)	Young's Modulus (GPa)	Coeffi. of Thermal Expansion (mm/m)
50	40.77	453	202.43	0.31
100	40.63	476	199.53	0.93
200	40.04	519	193.33	2.28
300	38.71	559	186.43	3.68
400	36.84	601	178.49	5.27
500	34.80	656	169.00	6.90
600	32.89	737	157.59	8.54
700	29.02	859	142.06	10.27

Table 2 Mechanical and physical properties of SA387 Gr.12

Temp. (°C)	Thermal Conductivity (J/sec·m·°C)	Specific Heat (J/kg·°C)	Young's Modulus (GPa)	Coeffi. of Thermal Expansion (mm/m)
50	36.50	454	209.05	0.31
100	36.91	477	205.74	0.93
200	37.21	513	198.90	2.28
300	36.71	551	192.14	3.68
400	35.46	596	183.65	5.27
500	33.76	650	174.52	6.90
600	31.94	734	162.41	8.54
700	30.05	913	146.25	10.27

Table 3 Mechanical properties of SS400

Temp. (°C)	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio
50	209.05	0.3
100	205.74	0.3
200	198.90	0.3
300	192.14	0.3
400	183.65	0.3
500	174.52	0.3
600	162.41	0.3
700	146.25	0.3

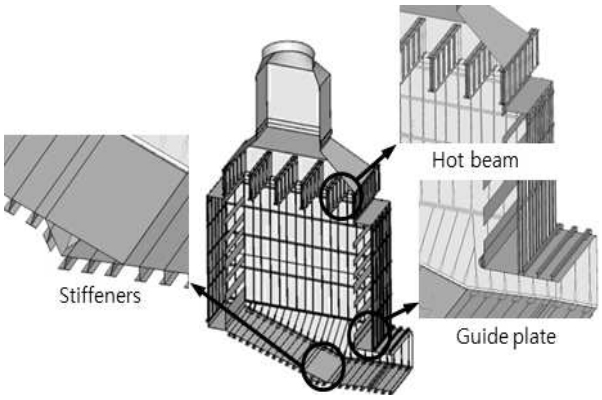

Fig. 3 Half model of HRSG inner casing

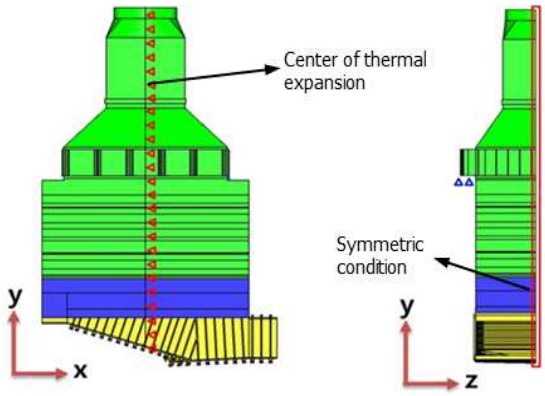

Fig. 4 Boundary condition of HRSG half model

발생하였다. 상대적으로 얇은 두께를 가지는 내부케이싱은 내부압력에 의하여 매우 큰 변형이 발생하였고, 이에 반해 천이덕트는 변형이 상대적으로 크지 않았다. 이런 큰 변형 차이가 천이덕트와 내부케이싱 접합부의 응력집중 현상의 원인으로 생각된다. 스티프너에 발생한 응력집중 현상의 경우 스티프너의 역할과 천이덕트의 변형에 의한 것으로 판단된다. 스티프너는 구조물의 대변형을 막기 위한 것으로, 내부케이싱은 박판으로 구성되어 내압에 의해 대규모 변형이 발생하기 때문에 응력집중이 발생하는 것으로 판단된다. 또한, 해석에 사용된 모델의 경우 스티프너가 천이덕트에 용접으로 접합되어 천이덕트의 변형과 불균형 열전달에 따른 대규모 변형이 발생한다. 따라서 스티프너 코너부에 상대적으로 큰 굽힘모멘트가 작용하기 때문에 응력집중 현상이 발생하게 된다. 위와 같은 해석 결과는 스티프너 절손과 이탈, 내부케이싱에 파손이 발생하는 등 실제 파손 사례들과 일치한다. 위와 같은 전역해석 결과를 바탕으로 취약부위를 선정하였으며, 보다 상세한 해석을 위해 부분모델을 작성하였다. 응력집중 현상이 발생한 천이덕트를 중심으로 일부 내부케이싱을 포함하는 범위로 해석대상을 한정하였으며, 전체모델과 마찬가지로 안전성에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 스티프너의 형상을 자세히 모사하였다.

2.2 국부해석을 통한 취약부위 분석

전 장에서 수행한 전역모델 정해석 결과를 활용하여 부분모델을 작성하고, 이를 이용하여 국부해석을 수행하였다.

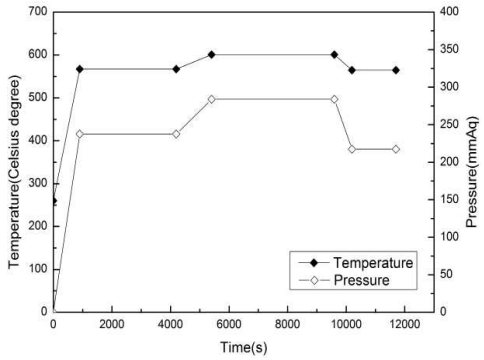

Fig. 5 Idealized transient of start-up

2.2.1 해석방법 및 모델

국부해석의 유한요소모델은 263,224개의 절점과 784,334개의 요소로 구성하였으며, 3차원 4절점 사면체요소를 이용하여 작성하였다. 재료물성은 전체해석과 같은 물성을 적용하였으며, SS400강의 경우 부분모델에 포함된 기기들을 제작하는데 사용되지 않았기 때문에 본 해석에서는 제외하였다. 부분해석의 하중조건을 정의하기 위하여 실제 운전 중인 HRSG의 온도 및 압력을 측정하고 측정된 데이터의 노이즈(noise) 등을 제거하여 Fig. 5와 같은 이상화된 start-up 운전이력을 작성하였다. 작성된 운전이력은 초기에 온도 및 압력이 급격히 증가하며, 그 후 온도 및 압력이 주기적으로 변동하는 양상을 보인다. 하중조건은 실제 HRSG의 운전조건을 모사하기 위하여 start-up 운전이력과 같은 온도 및 압력의 배기가스가 내부케이싱 내부에서 유동한다고 가정하였다. 배기가스의 온도는 내벽에 대류열전달 된다고 가정하였으며, 압력의 경우 내부케이싱의 모든 내벽에

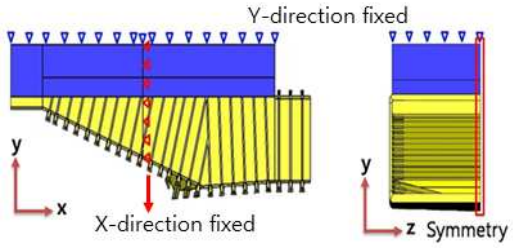

Fig. 6 Boundary condition of local model

작용하는 것으로 가정하였다. 또한 내부케이싱 및 천이덕트의 외벽은 실제 HRSG설치 시 시공하는 외부 단열재를 고려하여 단열조건으로 가정하였다.

내부케이싱 내부의 유체의 유동을 가정하기 위하여 대류열전달계수 h를 정의하였다. h는 Dittus-Boelter 상관관계[12] 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.3} \quad (1)$$

여기서, Nu는 Nusselt 수, Re는 Reynolds 수 그리고 Pr은 Prandtl 수이다. Nu가 정의되면 h는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$h = Nu \frac{k}{D} \quad (2)$$

여기서, k는 유체와 접하는 재료의 열전도계수이며, D는 수력직경이다.

경계조건으로서 2장의 전체모델 해석과 같이 열팽창중심, 대칭조건 등을 고려하였으며, 내부케이싱의 절단면에 Y-방향 구속조건을 적용하였다. 국부해석에 적용한 경계조건을 Fig. 6에 도시하였다.

2.2.2 천이덕트의 취약부위 선정

Fig. 7은 천이덕트를 대상으로 한 국부해석의 900sec에서 등가응력분포로서, 배기가스 입구에서 가장 가까운 스티프너에서 최대등가응력 109 MPa이 발생하며, 그 외의 스티프너에서도 응력집중 현상이 발생하였다. 이는 앞서 수행한 전체모델 구조정해석 결과 및 실제 파손 사례와 일치하는 결과로, 이에 따라 국부해석 결과는 타당한 것으로 판단된다. 또한 최대등가응력은 900 sec에서 나타났으며, 이는 이상화된 하중 조건에서 온도 및 압력이 가장 급격하게 변화하는 구간이다. 따라서 갑작스런 온도 및 압력의 변화는 천이덕트의 구조건전성에 악영향을 미치는 것으로 판단된다. 위치에 따른 응력분포 차이를 확인하기 위해 천이덕트 하단의 스티프너 굴곡부를 대상으로 7개의 관심부위를 선정하였다. Point #1은 가스터빈 배기가스 입구에서 가장 가까운 스티프너의 굴곡부이며, Point #7은 가장 먼 스티프너 굴곡부이다. 각 관심부위에서의 등가응력은 Table 4와 같이 정리하였으며, 배기가스 입구에서 가장 가까운 Point #1의 응력은 등가응력 90.92 MPa로 나타나 배기가스 입구에서 가까울수록 큰 응력이 발생하는 것으로 파악되었다. 이는 천이덕트 경계부인 입구 쪽에서 고온에 따른 큰 변형이 발생하기 때문이며, 또한 스티프너 굴곡부에서의 응력집중현상은 열전달 속도 차이에 의한 불균등한 열팽창이 주요 원인이다.

스티프너를 구성하는 재료는 SA387 Gr.22로서 HRSG의 가동온도인 600℃에서 항복강도 140.4 MPa을 가진다. 따라서 국부해석결과에 의하면 스티프너는 start-up 과정에서 안전한 것으로 판단된다. 그러나 구조물에 발생한 최대응력은 항복강

Table 4 Max. von Mises equivalent stress at critical points

Critical Location	Max. von Mises equivalent Stress (MPa, at 900sec)
Point #1	90.92
Point #2	81.92
Point #3	47.20
Point #4	14.58
Point #5	14.20
Point #6	8.49
Point #7	34.86

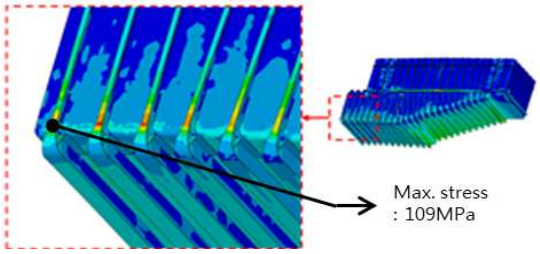

Fig. 7 Contour plot on equivalent stress

도의 78%에 해당하는 크기로서, 안전계수를 고려하지 않은 본 해석에서 매우 큰 응력으로 생각된다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 첨두부하에 사용되는 CCPP의 특성 상 잦은 기동 정지 및 재가동이 반복되기 때문에 열피로 현상에 의한 파손 발생 가능성이 높은 것으로 판단된다.

단순 저주기 열피로 외에도 화염·유체의 유동에 의한 동적 효과와 고온 크리프 효과 등의 영향도 고려해 보았다. 동적 효과의 측정을 위하여 가동중인 HRSG에서 진동 측정을 수행하였으며, 그 결과 HRSG에 작용하는 동적 효과는 미미한 것으로 판단하였다. 또한, 크리프 현상의 경우 900 sec에서 발생하는 최대 등가응력 109MPa 영역에서는 충분한 검토가 필요하나, 해석 결과 최대 등가응력이 지속되는 시간은 가동 초기 제한된 시간 뿐이며, 그 이외에는 20MPa이내의 낮은 응력 수준을 유지한다. 그러므로, 저주기 열피로 현상이 본 논문의 연구대상인 수직형 HRSG의 주요 파손기구로 판단된다.

3. 수직형 HRSG의 안전성 향상을 위한 천이덕트 설계 변경

3.1 설계 변경의 필요성

실제 현장에서 사용되고 있는 수직형 HRSG에 대하여 유한요소해석을 통하여 안전성평가를 수행하였다. 기기 안전성에 큰 영향을 미치는 요소들의 모사를 중점으로 유한요소모델을 작성하였으며, 구조 정해석을 통하여 해석범위를 한정하여 부분모델을 작성하였다. 또한, 부분모델을 바탕으로 start-up 운전이력을 이용하여 국부과도해석을 수행하였다. 과도해석 결과 해당 조건에서 HRSG는 안전한 것으로 판단되지만, 잦은 기동정지 및 재가동을 반복하는 CCPP의 특성상 열피로 현상에 취약하다고 판단되었다. 이는 내부케이싱과 스티프너가 용접으로 접합되어 있어 온도차이에 따른 열팽창 차이에 의해 야기된다. 따라서, 본 논문에서는 스티프너와 내부케이싱의 접합기구를 움직임이 자유로운 구조로 제안하여 열팽창 차이에 따른 응력집중현상을 완화하고자 한다.

3.2 접합 자유도에 따른 영향 분석

전술한 바와 같이, HRSG의 스티프너는 심한 응력집중 현상으로 인하여 피로파손 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 따라서 본 논문에서는 앞서 언급한 문제들을 해결하기 위하여 스티프너 형상 및 접합조건을 변경하고자 한다.

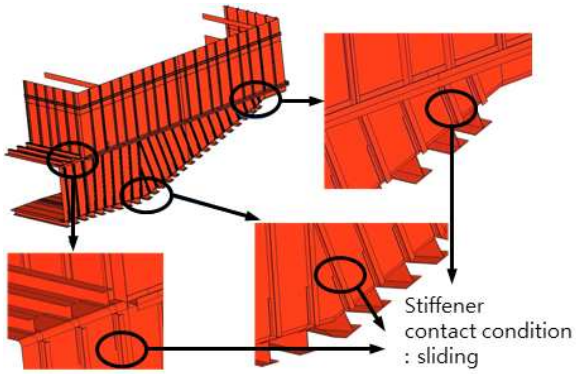

Fig. 8 HRSG CAD model considering sliding contact condition

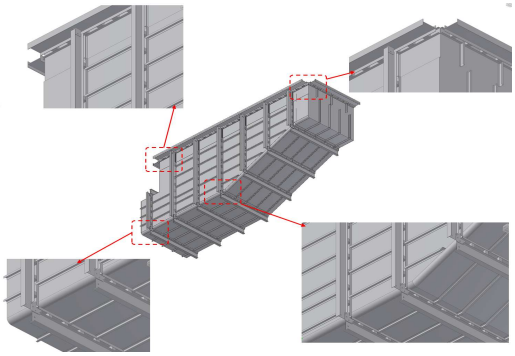

Fig. 9 Redesigned HRSG CAD model

2.2절에서 사용되었던 부분모델을 수정하여 Fig. 8과 같이 개선 모델을 제안하였다. 가장 심한 응력집중이 발생하였던 스티프너 굴곡부는 관심부위가 아니므로 단순화 하였다. 또한, 내부케이싱과 스티프너 사이에는 마찰을 고려한 접촉조건을 적용하여 스티프너의 움직임에 자유도를 부여함으로써 불균일한 열팽창이 일어나더라도 이를 흡수할 수 있도록 구성하였다. 본 논문에서 제시한 개선모델의 타당성을 검증하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 8의 개선 CAD 모델을 활용하여 절점 203,471개 요소 664,904개로 유한요소모델을 작성하였으며, 복잡한 형상의 명확한 표현을 위하여 3차원 사면체요소를 이용하였다. 해석에 사용된 물성 및 경계조건은 2.2절의 국부해석과 같이 적용하였으며, 하중조건은 2.1절의 전체해석과 같이 설계운전압력인 264 mmAq를 적용하여 구조정해석을 수행하였다. 추가로, 스티프너와 천이덕트 및 내부케이싱 사이에 마찰을 고려한 접촉 경계조건을 적용하였다. 일반적

으로 금속 사이의 마찰은 계면의 상태 및 윤활 여부에 따라 마찰계수가 0.01~1.4까지 상이하게 나타난다.[13] 본 논문에서는 윤활이 고려되지 않은 금속과 금속 사이의 마찰계수인 0.9를 해석에 적용하였다.

3.3 안전성 향상 모델 제안

천이덕트와 유도판이 만나는 굴곡부와 스티프너에서 응력집중현상이 발생하여 다른 곳에 비해 높은 등가응력을 나타내었다. 하지만 기존 모델의 정해석 결과와 비교하였을 때, 기존 전체모델의 구조 정해석의 최대 등가응력은 112 MPa이었던 것에 반해 개선된 모델은 최대 등가응력 137 kPa로 크게 감소하였다. 이는 스티프너와 내부케이싱 사이의 접촉조건(sliding 조건)에 따른 불균일 팽창을 슬라이딩 조건으로 해소하였기 때문인 것으로 판단된다. 기존 모델은 내부케이싱과 스티프너가 용접으로 접합되어 있어 두 구성요소 사이의 상대적인 변형에 취약한 모습을 보였으나, 개선된 모델은 이를 내부케이싱과 스티프너 사이의 상대운동으로 흡수함으로써 발생하는 응력 수준이 낮아진 것으로 생각된다. 이와 같은 원리로 개선된 모델은 온도 및 압력이 급격하게 변하는 실제 운전 환경에서 상대적인 열 팽창 차이가 주요 파손 요인으로 분석된 기존 모델에 비하여 높은 안전성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 9은 최종적으로 제안한 수직형 HRSG의 개념도로서, 스티프너와 구조물의 접합조건을 슬라이딩 조건으로 적용하고, 해석 결과를 바탕으로 스티프너의 개수를 제한하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 복합화력발전소의 수직형 HRSG의 안전성향상을 위한 설계변경에 관한 연구를 수행하였으며 그 내용은 다음과 같다.

(1) 상용 수직형 HRSG의 전체모델에 대하여 유한요소해석을 통해 주요 관심부위를 도출하고 해석범위를 한정하였다.

(2) 한정된 해석범위를 바탕으로 부분모델을 작성하고, 과도해석을 통하여 열피로 및 열변형에 따른 파손 가능성을 확인하였다.

(3) 천이덕트와 스티프너 접합 조건을 슬라이딩 조건으로 변경하여 작성한 HRSG 개선모델을 제안하고 그 유용성 및 타당성을 수치해석을 통하여 검증하였다.

본 논문의 연구 결과, 기존 수직형 HRSG모델은 반복된 열 하중에 의한 피로현상으로 인해 구조물의 건전성에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 안전성 향상을 위하여 HRSG모델을 개선하고, 이를 대규모해석을 통하여 검증하였다. 그 결과, 제시된 모델은 높은 안전성을 확보할 것으로 생각되며, 앞으로 산업 현장에서 이를 활용하여 구조물의 안전성 향상을 확보할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 논문은 (주)신텍과의 산학협력과제의 결과로 (주)동서발전 및 국토해양부 LNG플랜트사업단의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다. 또한, 본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 세계수준연구중심대학육성사업(WCU)으로부터 지원받아 수행되었습니다. (R33-2008-000-10027)

참고문헌

(1) Cha, H., Kim, K. J., Song, Y. S. and Kim, J. R., 2010, "Dynamic Simulation of HRSG System According to Start-up/Shutdown Curve," *KSME Fall Conference*, pp. 3744~3748.

(2) Lee, C. H., Kim, S. H. and Kim, J. H., 2000, “The Analysis of Dynamic Behavior for Horizontal Drum Type HRSG,” *KSME Fall Conference*, pp. 645~650.

(3) Chong, C. H. and Song, J. I., 2008, "Effect on Thermal Performance of Superheater Module under Part Load Operation in HRSG," *Journal of Energy Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 161~166.

(4) Kim, T. S., Lee, D. K., and Ro, S. T., 2000, "Analysis of Thermal Stress Evolution in the Steam Drum During Start-up of a Heat Recovery Steam Generator," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 20, pp. 977~992.

(5) Autodesk, 2009, "Autodesk Inventor User Manual," *Autodesk Inc.*

(6) Altair Engineering, 2008, "Hypermesh and Batchmesher," *Altair Engineering.*

(7) America Society of Mechanical Engineers, 2007, "ASME Code Sec.II - Materials," *ASME Boiler and Pressure Vessel Code,* New York.

(8) ANSYS, 2008, "Introduction of ANSYS ver. 12," *ANSYS Inc.*

(9) Lee, C. S., Chung, S. W., Shin, H. and Kim, S. J., 2005, "Virtual Material Characterization of 3D Orthogonal Woven Composite Materials by Large-Scale Computing," *Journal of Composite Materials*, Vol. 39, No. 10, pp. 851~863.

(10) Liu, Y., 2006, "A New Fast Multipole Boundary Element Method for Solving Large-Scale Two-Dimensional Elastostatic Problems," *Internatonal Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 65, pp. 863~881.

(11) Kim, J. S., Lee, S. M., Lee, J. Y., Jeong, H. S. and Lee, S. M., 2012, "Development of Pre- and Post-Processing System for Supercomputing Based Large-Scale Structural Analysis," *Society of CAD /CAM Engineers*, Vol. 17, No. 2, pp. 123~131.

(12) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 2002, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," 5th edition, Jhon Wiley & Sons, New York, pp. 491~495.

(13) Ludema., K. C., 1996, "Friction, Wear, Lubrication," CRC Press, New York, pp. 96~98.