

# 유한요소해석을 위한 석탄화력발전소의 보일러와 지지 철골의 통합모델 개발

이부윤

계명대학교 기계자동차공학전공

## Development of Integrated Model of Boiler and Its Supporting Steel Structure of Coal-Fired Power Plant for Finite Element Analysis

Boo-Youn Lee

Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University

**요약** 본 연구에서는 정격 출력 375 MW급의 석탄화력발전소의 보일러 및 보일러를 지지하는 철골의 유한요소해석을 위한 보일러-철골 통합모델을 개발하였다. 본 연구는 SAP2000 프로그램을 사용하여 지진하중에 대하여 통합모델을 해석함으로써 차후에 보일러와 철골의 안전성을 평가할 것을 염두에 두고 수행한 선행 연구이다. 보일러 내부의 수많은 관으로 구성되는 복잡한 과열기, 재열기, 절탄기, 멤브레인벽에 대하여 단순화 기법을 사용하여 강성과 관성의 관점에서 등가인 보요소, 셸요소, 솔리드요소로 모델링하는 방법을 제시하였다. 그리고 보일러와 철골 간의 연결을 위한 모델링 방법도 제시하였다. 보일러를 철골의 거더에 매다는 역할을 하는 많은 행거는 개수를 줄여서 등가 행거로 변환하여 모델링하였다. 보일러 외벽의 빅스테이에 부착된 보일러 스톱퍼는 스톱퍼와 철골 기둥 사이의 연결 관계를 고려하여 변위를 연계시켜 모델링하였다. 개발된 보일러-철골 통합모델에 대하여 자중조건에 대한 정적해석을 수행하여 변형형태를 평가하였다. 자중조건에 대한 해석결과, 철골 부재들과 보일러의 주요 구성품들의 거동이 타당한 것으로 나타났다. 결론적으로 본 연구에서 개발된 통합모델은 보일러 및 보일러를 지지하는 철골의 지진에 대한 안전성 평가에 충분히 활용이 가능한 것으로 판단된다.

**Abstract** An integrated finite element model composed of a boiler and its supporting steel structure for a 375-MW coal-fired power plant was developed. This study used the developed model for seismic analysis using SAP2000 software. For the complex superheaters, reheaters, economizers, and membrane walls of the boiler, which consisted of numerous tubes, a method of modeling them by the equivalent elements in the viewpoint of stiffness and/or inertia was proposed. In addition, a method of modeling for the connection between the boiler and steel structure was proposed. Many hangers that connect the boiler to the girders of a steel structure were transformed into equivalent hangers by decreasing the number. The displacements of the boiler stoppers on the buckstay and the posts of the steel structure were coupled by considering their interface condition. Static analysis under the self-loading condition for the developed integrated model was implemented, and the results of deformation indicated that the behavior of the steel members and the major components of the boiler were appropriate. In conclusion, the integrated model developed in this study can be used to evaluate the safety of the boiler and steel structure under seismic loads.

**Keywords** : Boiler, Coal-Fired Power Plant, Finite Element Analysis, Integrated Model, Steel Structure

---

\*Corresponding Author : Boo-Youn Lee(Keimyung Univ.)

email: bylee@kmu.ac.kr

Received December 19, 2019

Accepted April 3, 2020

Revised January 16, 2020

Published April 30, 2020

## 1. 서론

발전소에 설치되는 주요 설비와 기기는 지진이 발생하더라도 파손되지 않도록 안전하게 설계되어야 하며, 석탄화력발전소의 경우도 예외가 아니다[1-3]. 본 연구는 정격 출력이 375 MW인 실제 석탄화력발전소의 보일러(boiler)와 보일러를 지지하는 철구조물(철골)을 대상으로 하며, Fig. 1은 이 석탄화력발전소의 보일러와 철골의 형상을 나타낸다.

석탄화력발전소의 핵심 기기 중의 하나인 보일러는 석탄을 연소시킬 때 발생하는 열을 이용하여 전열관 내의 물을 가열함으로써 고온고압의 증기를 생산하는 역할을 한다. 따라서 보일러 가동 시에 열변형에 의해 수많은 전열관이 팽창하게 되므로, 보일러를 철골에 설치할 때 Fig. 1에 표시된 바와 같이 철골의 상부에 위치한 대형 거더(girder)에 수백 개의 행거(hanger)를 사용하여 보일러를 매달게 된다. 그런데 보일러가 행거만에 의해 철골에 설치되면 지진하중이나 풍하중이 가해질 때 보일러 전체가 수평방향으로 흔들리게 되므로, 수평방향 흔들림을 구속하기 위한 지지구조로는 Fig. 2와 같이 보일러 외벽의 벽스테이(buckstay)에 부착된 스톱퍼(stopper)와 철골의 기둥(post)이 역할을 한다. 스톱퍼와 기둥이 스톱퍼 길이방향과 기둥 길이방향으로 상호 슬라이딩이 가능하게 설치하게 되며, 보일러는 수직방향과 수평방향의 열변형이 자유롭게 되면서 수평방향 흔들림도 제한된다.

이전까지는 일반적으로 석탄화력발전소의 설비제작사들은 보일러와 철골의 내진설계 시에 지진에 대한 거동을 평가하기 위하여 보일러와 철골을 분리하여 해석을 수행해 왔다. 즉, 철골의 지진해석 시에는 관련 기술규격은 UBC[4], ASCE7-16[5] 등을 따르며, Kumar 등[6]과 같이 보일러의 무게를 보(beam)요소로 모델링된 철골에 분포시키고 응답스펙트럼(response spectrum)해석, 시간이력(time history)해석, 푸쉬오버(pushover)해석[7,8] 등을 통하여 철골의 안전성을 평가하게 된다. 압력부인 보일러를 구성하는 각종 기기의 경우에는 관련 기술규격은 ASME Boiler & Pressure Vessel Design Code[9] 등을 따르며 지진에 의해 각 기기의 위치에서 발생하는 가속도를 하중으로 가하여 정적해석에 의해 안전성을 평가하게 된다.

근래에 들어서 지진이 흔한 남미 국가에 건설되는 석탄화력발전소의 발주처는, 지진이 발생하더라도 수주 이내에 발전소를 재가동할 수 있을 정도로 설비를 안전하게 설계해야 한다는 것을 요구하는 추세이다. 이러한 배

경 하에서, 지진에 의한 파손 발생 시에 보일러를 지지하는 철골의 경우에는 외부에 노출되어 쉽게 접근이 가능하므로 수리하기가 힘들지 않으므로 수주 이내에 파손된 부재를 교체함으로써 복구가 가능한 측면이 있다. 그러나 많은 기기와 부품으로 구성되고 구조가 복잡한 보일러의 경우에는 기기가 파손되는 경우에 내부로 접근이 힘들기 때문에 수리에 장시간이 소요될 수밖에 없다. 특히 보일러 내부에 설치되는 과열기(SH: superheater), 재열기(RH: reheater), 절탄기(ECO: economizer) 등의 각종 열교환기는 수많은 관다발(tube bundle) 또는 관군(tube bank)이 복잡하게 연결되므로, 지진 발생 시에 관들이 흔들리면서 서로 충돌하여 파손되면 수주 이내에 복구할 수가 없다. 그러므로 지진하중 하에서 발생할 수 있는 복잡한 보일러 내부 기기들 사이의 충돌 또는 보일러와 철골 사이의 충돌에 의한 파손 가능성을 평가하려면 서로 상호작용하면서 거동하는 보일러와 철골을 통합한 모델을 사용한 유한요소해석이 필요하다.

이와 관련한 연구로서 Cruz 등[10]은 보일러-철골 통합모델을 사용하여 지진하중에 대하여 푸쉬오버해석과 시간이력해석을 수행하여 비선형 범위에서 철골의 거동을 평가하였는데, 이때 보일러의 내부 기기들은 실제보다 매우 간략하게 모델링하여, 내부 기기들의 실제 거동을 평가하는 데는 한계가 있었다. 그리고 최근에 Lee[11]는 본 연구를 위한 선행연구로서, 보일러의 벽과 지붕(roof)을 구성하는 멤브레인벽(membrane wall)(Fig. 2 참조)을 단순한 형상의 등가 평판으로 모델링하는데 적용하기 위하여, 멤브레인벽의 등가 셸(shell)요소의 직교이방성 탄성상수(orthotropic elastic constant)를 결정하는 방법을 제시한 바 있다.

이러한 배경 하에서, 석탄화력발전소 주요 설비의 내진설계 과정에서 보일러와 보일러 지지 철골을 통합한 유한요소해석 모델을 개발하여 지진에 의한 거동을 평가하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 정격 출력 375 MW급의 석탄화력발전소의 보일러와 보일러 지지 철골에 대하여 지진 하중에 의한 거동을 유한요소해석을 통하여 평가하기 위한 사전 연구로서, 보일러-철골 통합모델을 개발하고자 한다. 특히 형상과 구조가 복잡한 보일러의 모델링 방법에 치중하고 보일러와 철골 간의 연결 방법도 제시하였다. 본 연구에서 보일러 내부에 설치되는 과열기, 재열기, 절탄기 등 각종 열교환기의 많은 관다발 또는 관군은 단순화하여 모델링하기 위해 실제와 동일한 굽힘(bending)거동을 나타내는 등가 보 요소 또는 등가 셸요소로 모델링하게 되는데, 이 등가 요

소들의 물성치를 결정할 때에는 상용 프로그램인 ANSYS Workbench[12]를 사용하였다. 그리고 보일러-철골 통합모델링에는 토목 구조물의 해석과 설계에 강점을 갖는 상용 프로그램인 SAP2000[13]을 사용하였다. 마지막으로, 개발된 보일러-철골 통합모델에 대하여 자중조건에 대한 정적해석을 수행하여 전체적인 거동 양상과 변형형태 등을 평가함으로써 통합모델의 타당성을 확인하고자 한다.

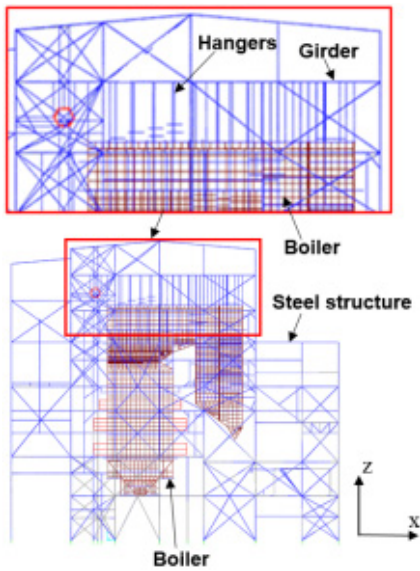


Fig. 1. Boiler and its supporting steel structure for 375-MW coal-firing power plant

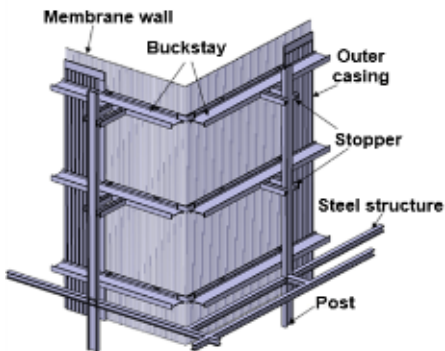


Fig. 2. Sketch of boiler wall and steel structure

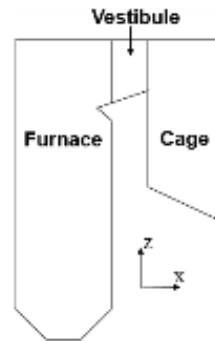


Fig. 3. Sketch of boiler

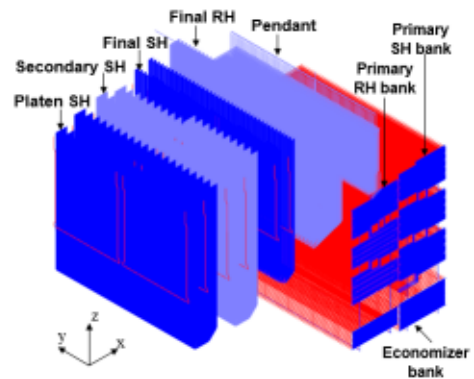


Fig. 4. Tube bundles and banks in boiler

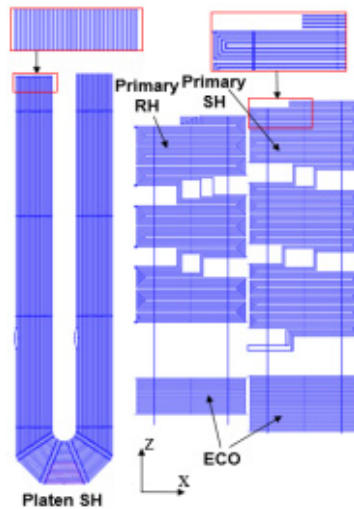


Fig. 5. Typical tube bundle and bank

## 2. 보일러 내부 관다발과 관군의 등가 요소 모델링

지금부터 본 연구에서 지진하중에 대한 유한요소해석을 위해 개발한 정격출력 375 MW급 석탄화력발전소의 보일러와 철골을 통합한 모델링 방법에 대하여 기술하고자 한다. 이 장에서는 먼저 보일러 내부에 배치되는 복잡한 형태의 많은 관다발과 관군의 모델링 방법을 다루고자 한다. 관 재료의 탄성계수는 207 GPa, 프와송비는 0.3, 밀도는 7,860 kg/m<sup>3</sup>이다.

본 연구에서 다루는 보일러는 Fig. 3과 같이 버너(burner)에서 석탄을 연소시켜 발생하는 연소가스에 의해 1차적으로 열교환이 일어나는 연소로(furnace), 배기가스에 의해 2차적으로 열교환이 일어나는 케이지(cage), 그리고 이 둘 사이의 연결통로(vestibule)로 구분할 수 있다. 관 내의 물을 고온고압의 증기로 변환시키는 열교환을 위하여 보일러 내부에는 Fig. 4와 같이 평판과열기(platen SH), 1차과열기(primary SH), 2차과열기(secondary SH), 1차재열기(primary RH), 최종과열기(final SH), 최종재열기(RH), 절탄기(economizer) 등의 수많은 헤더(header), 관다발, 관군 등이 설치된다.

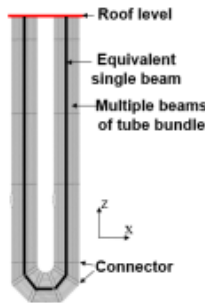


Fig. 6. Sketch of tube bundle and equivalent single beam models for platen SH

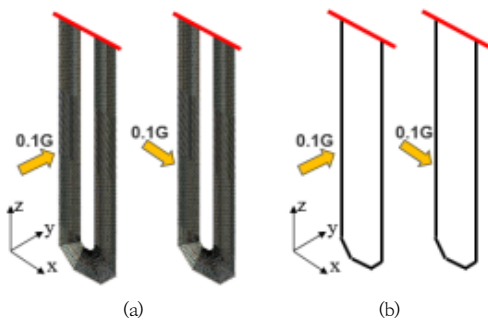


Fig. 7. Two finite element models for platen SH  
(a) Multiple beams (b) Equivalent single beam

Fig. 5에는 연소로에 설치되는 관다발 중에서 대표적인 평판과열기와 케이지에 설치되는 관군인 1차과열기, 1차재열기, 절탄기의 단면 형상을  $x-z$  평면에 나타내었는데, 이 단면에 수직하게  $y$ 축방향으로 수십 개의 관군이 반복되어 배치된다.

보일러 내부의 이러한 관다발과 관군을 상세히 모델링하는 것은 보일러-철골 통합모델 개발과 지진해석에 과도한 시간이 소요되므로 현실적으로 불가능에 가깝다고 하겠다. 따라서 본 연구에서는 이러한 관다발과 관군들을 굽힘에 대한 강성과 관성의 관점에서 등가인 보요소와 셸요소로 모델링하는 방법을 사용하였다. 이 등가 요소들의 물성치를 결정하기 위하여 각 관다발과 관군들에 대해 유한요소해석을 수행하고, 해석프로그램으로 ANSYS를 사용하였다.

먼저 관다발을 등가 보요소로 모델링하는 방법에 대하여, 평판과열기를 예로 들어서 설명하고자 한다. Fig. 6은 평판과열기의 단면 형상과 등가 보요소를 나타내는데, U자 형태를 이루는 26 줄의 관다발이 중간에 있는 여러 개의 연결기(connector)에 의해 묶여 있다. 각 관의 단면적은 464.5 mm<sup>2</sup>이다. 26 줄의 관다발을 모두 고려하면 26 줄의 복수 보로 모델링할 수 있다. 이제 이 26 줄의 복수 보를 굽힘 강성과 관성의 관점에서 등가인 한 줄의 보로 대체하고자 한다.

이를 위하여 ANSYS를 사용하여 우선 Fig. 7(a)와 같이 26 줄의 보로 모델링된 평판과열기 관다발에  $y$ 축방향과  $x$ 축방향으로 각각 0.1G(G: 중력가속도)의 가속도 하중을 가하는 경우를 해석하여 변위를 구하였다. 이때 경계조건으로서 지붕에 연결된 위치는 고정하고, 각 연결기 위치에서 줄과 줄 사이의 변위는 연계시켰다. 평판과열기 관다발의 해석결과로서 Fig. 8(a), (b)는 각각  $y$ 축방향과  $x$ 축방향 하중에 의한 변위크기의 분포를 나타내는데, 하단에서 발생하는 최대변위는  $y$ 축방향 하중일 때 116.4 mm이고  $x$ 축방향 하중일 때 34.8 mm이다.

다음은 Fig. 7(b)와 같이 평판과열기 관다발을 한 줄의 등가 보로 모델링하고, 등가 보의 단면적은 26 줄의 관의 단면적의 합인 12,077 mm<sup>2</sup>로, 밀도는 원래 관과 같도록 설정하였다. 관다발일 때와 동일한 경계조건을 지정하고 동일한 가속도를 가하는 경우를 해석하였다. 이때 Fig. 9와 같이 정의되는 등가 보 단면의 면적관성모멘트(area moment of inertia)  $I_{\alpha}$ ,  $I_{\beta}$ 를 지정해야 하는데, 이는 등가 보의 해석결과 계산된 최대변위가 관다발의 해석결과와 같게 되도록 시행착오법으로 구하였다. 이 등

가 보에 대하여  $I_\alpha$ ,  $I_\beta$ 의 값을 변화시켜 가면서 반복해석을 수행하여 최대변위가 관다발의 해석결과와 같게 되는  $I_\alpha$ ,  $I_\beta$ 의 값을 찾았다. 시행착오법의 결과로서,  $I_\alpha = 1.620 \times 10^6$ ,  $I_\beta = 1.726 \times 10^6 \text{ mm}^4$ 일 때  $y$ 축방향과  $x$ 축방향 하중에 의한 변위크기의 분포를 Fig. 10(a), (b)에 각각 나타내었다. 결과적으로 한 줄의 등가 보의 하단에서 발생하는 최대변위는  $y$ 축방향 하중일 때 116.3 mm이고  $x$ 축방향 하중일 때 34.8 mm로서 관다발의 해석결과와 동일한 결과를 얻었다. 따라서 이 한 줄의 등가 보의 굽힘 강성과 관성의 관점에서 관다발과 등가인 것으로 판단된다.

추가적으로 평판과열기의 관다발의 상부에 위치한 헤더는 길이가 길고 원통 형상이므로 보요소로 모델링하였다. 그리고 평판과열기와 유사한 형태의 관다발로 구성되는 2차과열기, 최종과열기, 최종재열기도 평판과열기와 동일한 방법으로 각각의 관다발에 대하여 단일 등가 보 요소의 단면적과 면적관성모멘트를 구하고, 헤더 등을 포함하여 보요소로 모델링하였다. Fig. 11에는 연소로 내부의 전체 열교환기, 즉 평판과열기, 2차과열기, 최종과열기, 최종재열기의 관다발과 헤더의 완성된 SAP2000 모델을 나타내었다. Fig. 11에서 관다발의 상부에 위치한 수평방향의 보요소들은 헤더들이 모델링된 것을 나타낸다.

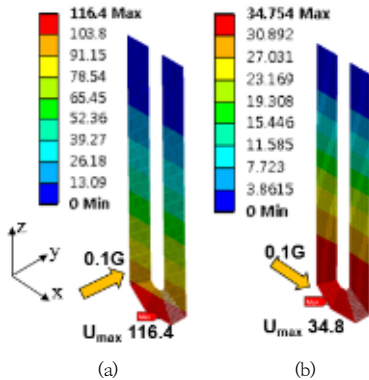


Fig. 8. Analysis results of multiple beams for platen SH  
(a)  $y$ -axis loading (b)  $x$ -axis loading

한편, 케이지 내부에도 1차과열기, 1차재열기, 절탄기 등의 복잡한 관군이 설치된다. 이 중에서 1차과열기와 1차재열기는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 지그재그 형태를 이루는 4 줄의 관으로 구성된다. 이 1차과열기와 1차재열기는 평판과열기와 동일한 방법을 사용하여 관다발을 단일 등가 보요소로 모델링하고 등가 보의 단면적, 면적관

성모멘트, 밀도를 결정하였다.

마지막으로 케이지 내부에는 1차재열기와 1차과열기의 아래쪽에 복잡한 관군으로 이루어진 절탄기가 설치되는데(Fig. 5 참조), 이는 관군의 형태를 고려하여 등가 셀 요소로 모델링하고자 한다.

Fig. 9. Area moment of inertia of equivalent beam

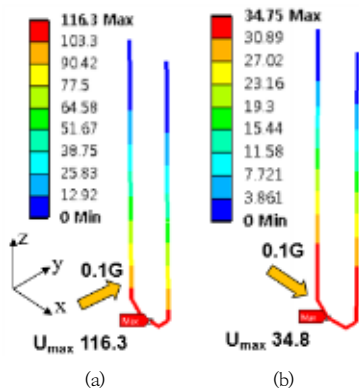


Fig. 10. Analysis results of equivalent single beam for platen SH  
(a)  $y$ -axis loading (b)  $x$ -axis loading

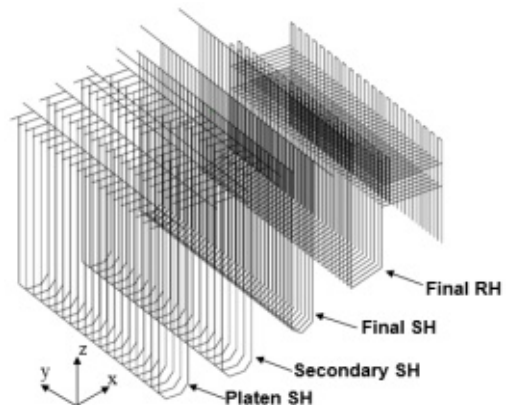


Fig. 11. Modeling of headers and tube bundles in furnace



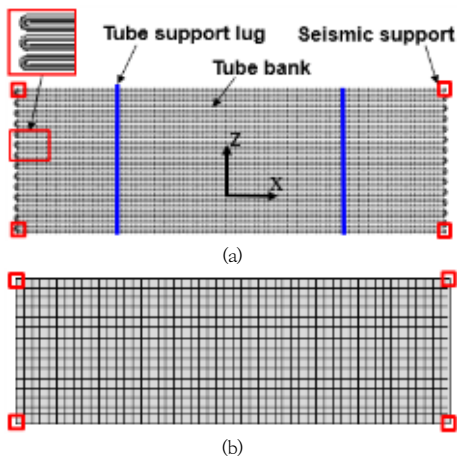


Fig. 12. Two finite element models for RH-side ECO  
(a) Beam (b) Equivalent shell

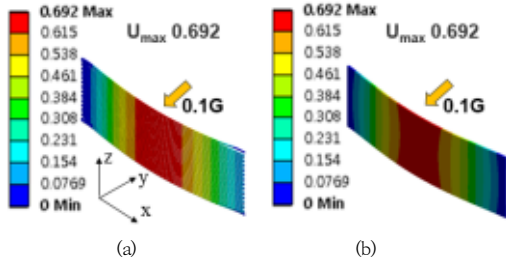


Fig. 13. Analysis results of RH-side ECO  
(a) Beam (b) Equivalent shell

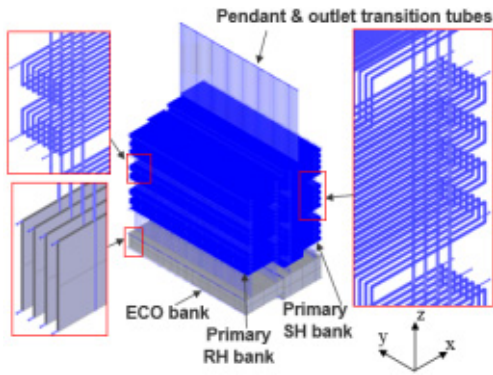


Fig. 14. Modeling of tube banks in cage

이 중에서 재열기축의 절탄기를 예로 들어 등가 셸요소로 모델링하는 방법에 대해 설명하고자 한다. Fig. 12(a)는 재열기축 절탄기 단면의 관을 보요소로 모델링한 형상을 나타내는데, 외경이 38 mm인 한 줄의 보요소가  $x-z$  평면 상에서 지그재그 형태로 꺾어지면서 적층되어 있는 모양을 나타낸다. Fig. 12에서 수직방향의 관 지지리그(tube support lug)는 관들을 묶어주는 역할을

하며, 네 모서리에 위치한 내진지지부(seismic support)는 관군 전체가 흔들리는 것을 방지하는 역할을 한다. 이제 재열기축 절탄기 단면에 적용된 관을 실제대로 모델링한 이 보모델을 굽힘 강성과 관성의 관점에서 등가인 평판 셸모델로 대체하는 방법을 제시하고자 한다.

이를 위하여 ANSYS를 사용하여 우선 Fig. 12(a)의 보모델에 대하여 단면에 수직인  $y$ 축방향으로 0.1G의 가속도 하중을 가하는 경우를 해석하였다. 이때 경계조건으로서 네 모서리의 내진지지부는 고정하고, 관지지리그 위치의 절점들은 변위를 연계시켰다. 재열기축 절탄기의 보모델의 해석결과로서 Fig. 13(a)는 가속도 하중에 의한 변위크기의 분포를 나타내는데, 전체 거동이 굽힘변형을 보이면서 좌우의 가운데에서 발생하는 최대변위는 0.692 mm로 나타났다.

다음은 ANSYS를 사용하여 Fig. 12(b)와 같이 재열기축 절탄기 단면을 평판으로 단순화하여 등가 셸요소로 모델링하고, 등가 셸요소의 두께는 관의 외경과 같게 38 mm로 정하였다. 등가 셸요소의 밀도는 단순화된 평판의 무게가 실제 관군의 무게와 같게 되도록 결정하였다. 보모델과 동일한 경계조건을 지정하고 동일한 가속도를 가하는 경우를 해석하였다. 그리고 이 등가 셸요소의 탄성계수  $E$ 를 지정해야 하는데, 이는 등가 셸모델의 해석결과와 최대변위가 보모델의 해석결과와 같게 되도록 시행착오법으로 구하였다.

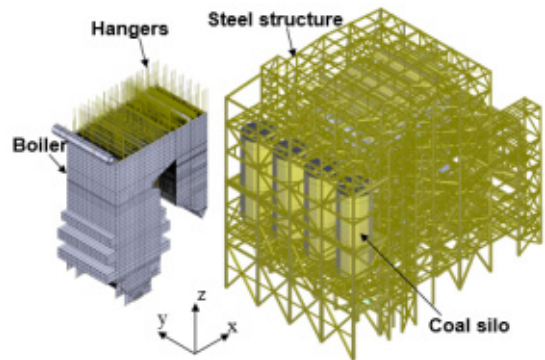


Fig. 15. Integrated finite element model composed of boiler and its supporting steel structure

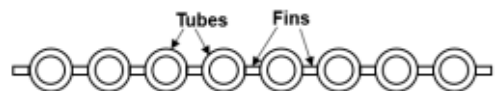


Fig. 16. Sketch of cross section of membrane wall

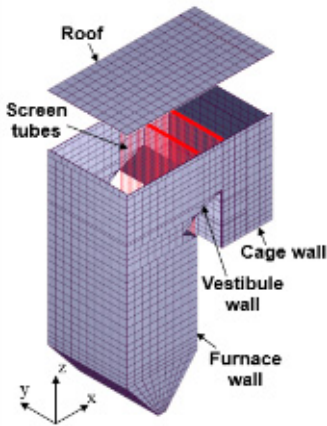


Fig. 17. Modeling of boiler wall and roof

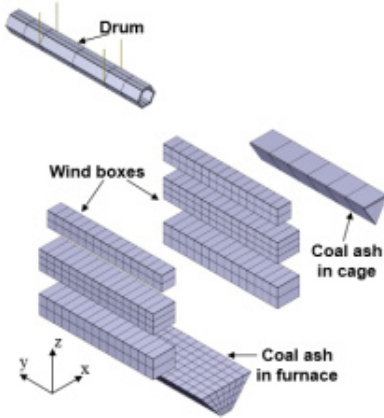


Fig. 18. Modeling of big-size heavy components

등가 쉘모델에 대하여  $E$  값을 변화시켜 가면서 반복 해석을 수행하여 최대변위가 보모델의 해석결과와 같게 되는  $E$  값을 찾았다. 시행착오법의 결과로서,  $E=53,364$  GPa일 때 등가 쉘모델의 변위크기의 분포를 Fig. 13(b)에 나타내었다. 결과적으로 등가 쉘모델의 전체 거동이 굽힘변형을 보이면서 좌우의 가운데에서 발생하는 최대변위는  $0.692$  mm로서 보모델의 해석결과와 동일한 결과를 얻었다. 따라서 이 등가 쉘모델은 굽힘 강성과 관성의 관점에서 보모델과 등가인 것으로 판단된다.

그리고 재열기측 절탄기와 유사한 형태의 과열기측 절탄기도 동일한 방법으로 등가 쉘요소로 모델링하고 두께와 밀도를 정하고, 시행착오법의 반복해석을 통하여 탄성계수  $E$ 를 구한 결과,  $E=54,232$  GPa일 때 보모델의 해석결과와 일치하였다.

Fig. 14에는 케이지 내부 1차과열기, 1차재열기, 절탄기의 관군의 완성된 SAP2000 모델을 나타내었다. 그리

고 Fig. 14에는 추가적으로 펜던트(pendant) 및 출구관(outlet transition tubes)들도 보요소로 모델링되어 있다.

### 3. 보일러와 철골을 통합한 모델링

이 장에서는 앞장에서 다룬 보일러 내부의 관다발과 관군을 제외한 나머지 기기 및 부품들의 모델링 방법과 보일러-철골 통합모델의 구성에 대하여 기술하고자 한다.

먼저 SAP2000을 사용하여 모델링한 최종 결과물인 보일러-철골 통합모델을 Fig. 15에 나타내었는데, 좌측의 보일러는 행거에 의해 우측의 철골 상부에 있는 거더에 연결된다. 통합모델에 사용된 유한요소의 종류는 쉘요소, 보요소, 솔리드(solid)요소, 점질량(point mass) 등이며, 총 요소 수는 182,456개, 총 절점 수는 140,987개이다. 이하에서는 보일러 내부의 관다발과 관군을 제외한 나머지 설비 및 기기들의 모델링 방법과 보일러-철골 통합모델의 구성에 관하여 설명하였다.

먼저 철골의 각 부재는 보요소로 모델링하고 단면치수는 프레임단면(frame section) 기능을 사용하여 지정하였다. 철골 재료의 탄성계수는  $207$  GPa, 프와송비는  $0.3$ , 밀도는  $7,860$  kg/m<sup>3</sup>이다. 철골의 사일로베이(silobay)에는 Fig. 15에 표기된 바와 같이 원통형상의 석탄사일로 4기가 설치된다. 석탄을 포함한 사일로 한기의 무게는  $926$  Ton으로, 크기가 크고 무거우므로 지진하중하에서 철골의 거동에 큰 영향을 미친다. 이를 감안하여 이 사일로는 용기를 실제의 치수와 재질을 고려하여 보요소로 모델링하고, 사일로 내부에 적재된 석탄은 무게중심 위치에 점질량으로 모델링하였다.

다음은 관다발과 관군을 제외한 보일러의 나머지 기기 및 부품들의 모델링에 대하여 설명하고자 한다. 먼저 보일러의 연소로, 케이지, 연결통로의 벽과 지붕은 멤브레인벽으로 만들어진다. 이 멤브레인벽의 단면은 Fig. 16과 같이 수많은 관과 핀(fin)이 용접되어 제작되는 매우 복잡한 구조이므로 실제 형상대로 모델링하여 보일러-철골 통합모델에 포함시켜 해석하는 것이 현실적으로 불가능하다. 그러므로 이 멤브레인벽은 Lee[11]가 제시한 방법을 사용하여 단순한 형상의 평판으로 가정하여 직교이방성 탄성상수를 갖는 등가 쉘요소로 모델링하였다. 이와 같이 등가의 직교이방성 쉘요소로 모델링된 보일러의 벽과 지붕을 Fig. 17에 나타내었으며, 추가적으로 연결통로에 위치한 수직방향의 스크린관(screen tube)은 보요소로 모델링하였다.

한편, 보일러에는 관다발이나 관군이 아니면서, 체적이 크고 무거운 드럼(drum), 윈드박스(wind box), 석탄재(coal ash) 등이 위치한다. 이것들은 보일러-철골 통합모델의 해석 시에 지진하중에 대한 각각의 거동을 평가할 관심 대상이 아니므로, Fig. 18과 같이 형상을 단순화하여 등가 강체(rigid) 슬리드요소로 모델링하고 강체의 무게가 실제의 무게와 같게 되도록 밀도를 지정하였다. 한편 드럼과 각종 헤더류에 연결된 배관들은 배관의 연결부에 질량을 배분하여 점질량으로 모델링하고, 기타 무게를 무시할 수 없는 소형 부속품들도 그 위치에 점질량으로 모델링하였다.

보일러를 철골의 거더에 매다는 역할을 하는 원형봉형상의 행거들은 보요소로 모델링하였는데, 실제 행거의 개수가 총 604개로 매우 많으므로 개수를 줄여서 총 294개의 등가 행거로 변환하였다. 등가 행거의 위치는 Fig. 19의 평면도에 표시하였는데 그룹 1은 연소로측, 그룹 2는 연결통로측, 그룹 3은 케이지측, 그룹 4는 드럼측을 나타낸다. 보일러 중량이 철골의 거더에 적절하게 분산되도록 실제 행거가 배치되는 것을 고려하여, 각 그룹에 속하는 등가 행거들의 단면적의 합이 해당 그룹의 실제 행거들의 단면적의 합과 같게 되도록 등가 보요소의 직경을 결정하였다. Fig. 20은 보요소로 모델링된 행거를 나타낸다. 행거 재료의 탄성계수는 207 GPa, 프와송비는 0.3, 밀도는 7,860 kg/m<sup>3</sup>이다. 그리고 등가 행거의 보요소에서 최하단 절점은 보일러 지붕의 셸요소 또는 드럼의 슬리드요소의 절점과 공유시키고, 최상단 절점은 철골 거더의 보요소의 절점과 공유시켰다.

한편, 보일러 벽의 외면에는 강성을 보강하고 보일러의 수평방향 흔들림을 제한하기 위하여 Fig. 2에 표기된 바와 같이 보일러의 외벽에 여러 층의 수평 벽스테인과 2중 외팔보 형태의 스톱퍼가 설치된다. 이 벽스테인과 스톱퍼는 Fig. 21에 나타난 것과 같이 보요소로 모델링하였다.

벽스테인과 스톱퍼 재료의 탄성계수는 207 GPa, 프와송비는 0.3, 밀도는 7,860 kg/m<sup>3</sup>이다. 그리고, Fig. 22에 표시된 바와 같이 스톱퍼는 철골 기둥과 맞닿아 있어서 횡방향으로는 기둥과 같이 움직이며, 스톱퍼의 길이 방향과 철골 기둥의 길이방향(z축방향)으로는 상호 슬라이딩이 가능하다. 이러한 조건을 감안하여, 스톱퍼와 기둥이 접하는 절점의 횡방향 변위를 연계시켰다.

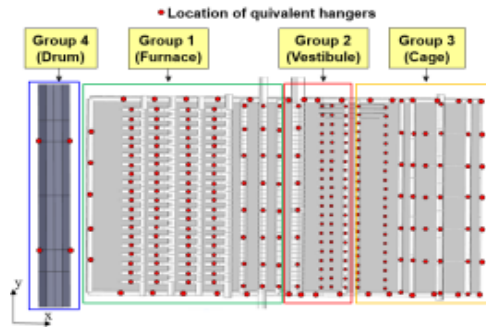


Fig. 19. Location of equivalent hangers

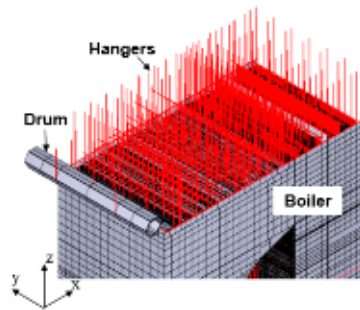


Fig. 20. Modeling of equivalent hangers

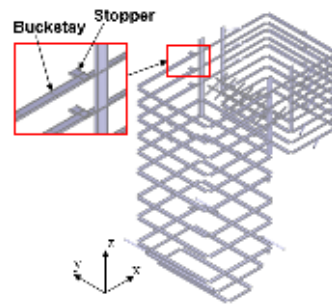


Fig. 21. Modeling of buckstays and stoppers

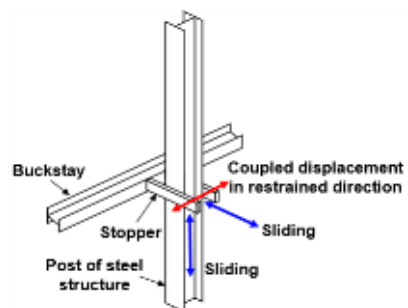


Fig. 22. Interface condition between stopper and post



이상과 같은 모델링 과정을 통하여 Fig. 15에 나타난 SAP2000용 보일러-철골 통합모델을 완성하였다.

#### 4. 자중조건에 대한 보일러-철골 통합모델의 해석

지금까지 설명된 복잡한 과정을 통하여 완성된 보일러-철골 통합모델의 타당성을 확인하기 위하여, 1차적으로 본 연구에서는 SAP2000을 사용하여 자중조건 하에서 정적해석을 수행하였다.

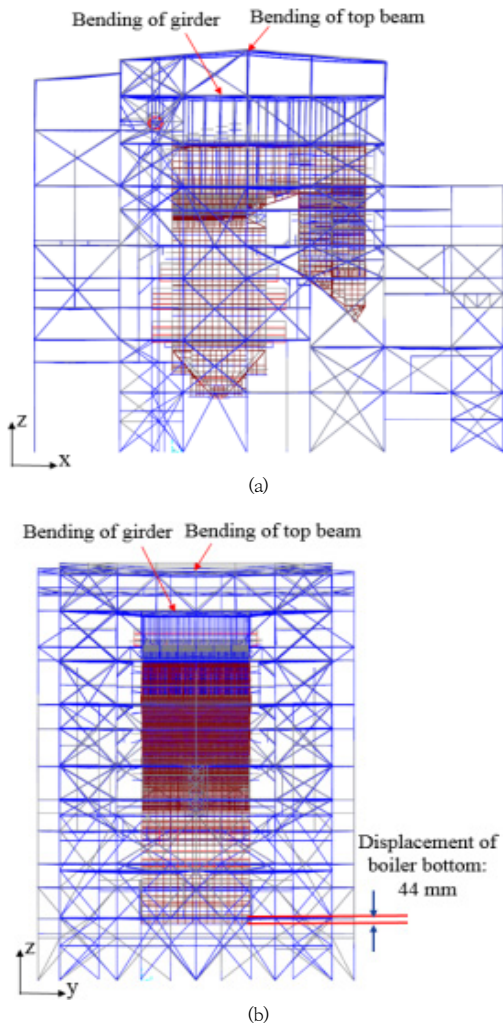


Fig. 23. Deformed shape of integrated model under self loading  
(a) Front view (b) Side view

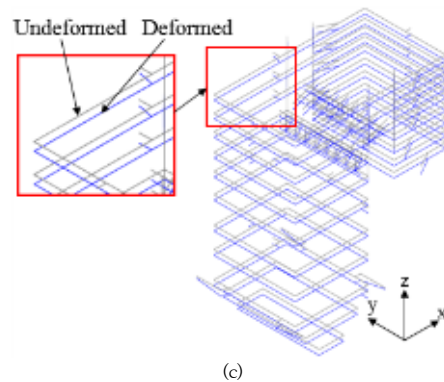
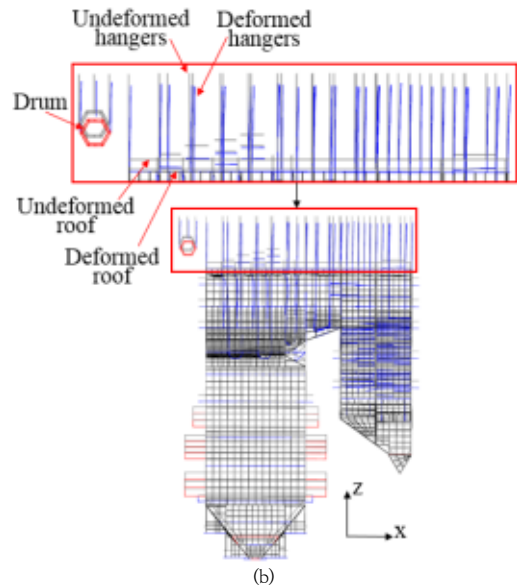
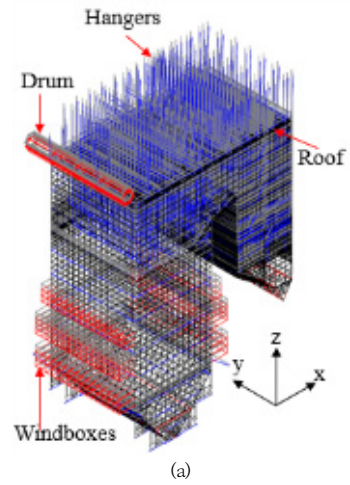


Fig. 24. Deformed shape of boiler under self loading  
(a) Isometric view (b) Front view (c) buckstays and stoppers

정적해석을 위한 하중조건은 통합모델을 구성하는 모든 철골 부재, 석탄 사일로, 공기예열기(air preheater), 탈질설비(SCR) 등 철골 위에 설치되는 주요 기기, 보일러를 구성하는 제반 기기 및 부품들의 중량을 모두 고려하였다. 경계조건으로는 철골의 최하단 기초(foundation)에 위치한 절점들의 모든 자유도를 구속하였다.

이하의 자중조건 하에서의 해석결과에서 변형형상을 나타낼 때 변형량의 확대계수를 20배로 설정하여 도시하였다. 해석결과로서 먼저 보일러 및 철골 전체의 변형형상을 Fig. 23(a), (b)에 정면도와 측면도로 나타내었다. Fig. 23을 보면 행거에 의해 철골 거더에 매달린 보일러의 중량으로 인하여 철골 상부의 보와 거더의 중앙부가 아래쪽으로 처지는 굽힘변형이 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 행거에 의해 철골에 매달린 보일러는 전체적으로 아래쪽으로 처지면서 보일러 하단의 수직변위가 44 mm로 나타났다.

추가적으로, 보일러의 변형형태를 파악하기 위하여 복잡한 철골을 제외하고 행거와 드럼을 포함한 보일러 전체의 변형형상을 Fig. 24(a), (b)에 나타내었다. Fig. 24(b)를 보면 드럼과 각종 열교환기를 지지하는 행거들 및 지붕이 변형되는 형태와 이에 따라 보일러 전체가 아래쪽으로 처지는 양상을 확인할 수 있다.

한편, Fig. 24(c)에는 보일러 외벽에 부착되는 벽스테인과 스토퍼판의 변형형상을 나타내었다. Fig. 22에서 나타난 바와 같이 스토퍼는 철골 기둥과 맞닿아 있으므로 지진과 같은 횡방향 하중이 가해질 때는 철골 기둥과 같이 움직이며, 스토퍼의 길이방향과 기둥의 길이방향(z축 방향)으로는 상호 슬라이딩이 가능하도록 모델링되어 있다. Fig. 24(c)를 보면 자중조건 하에서 하중이 아래쪽으로 작용하므로 벽스테인과 스토퍼 전체가 자연스럽게 아래쪽으로 처지는 변형형태를 확인할 수 있다.

이와 같이 본 연구에서 개발한 보일러-철골 통합모델에 대하여 자중조건 하에서 정적해석을 수행한 결과, 철골 부재들과 보일러의 주요 구성품들의 거동은 타당한 것으로 판단된다. 본 연구의 결과물인 이 보일러-철골 통합모델은 차후에 진동모드해석과 지진하중에 대한 응답스펙트럼해석을 위하여 활용할 계획이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 정격 출력 375 MW급의 석탄화력발전소의 보일러와 보일러 지지 철골의 유한요소해석을 위한

SAP2000용 보일러-철골 통합모델을 개발하였다. 본 연구는 지진하중에 대한 해석 및 평가에 통합모델을 활용할 것을 염두에 두고 수행되었다. 특히 형상과 구조가 복잡한 보일러의 모델링 방법에 치중하였으며, 보일러와 철골 간의 연결을 위한 모델링 방법도 제안하였다.

보일러 내부의 수많은 관으로 구성되는 복잡한 과열기, 재열기, 절탄기, 멤브레인벽에 대하여 단순화된 모델링 방법을 제시하였다. 연소로와 케이지 내의 각종 과열기와 재열기의 관다발들은 굽힘에 대한 강성과 관성의 관점에서 등가인 단일 보요소로 모델링하였다. 이때 등가 보의 단면적, 밀도, 면적관성모멘트는 가속도 하중 하에서 등가 보의 변형이 실제 관다발의 변형과 같게 되도록 결정하였다. 케이지 내의 절탄기의 관군은 굽힘에 대한 강성과 관성의 관점에서 등가인 쉘요소로 모델링하였다. 이때 등가 쉘의 두께, 밀도, 탄성계수는 가속도 하중 하에서 등가 쉘의 변형이 실제 관군의 변형과 같게 되도록 결정하였다. 멤브레인벽은 평판으로 단순화하여, 직교이방성 탄성상수를 갖는 등가 쉘요소로 모델링하였다. 그 밖의 체적이 크고 무거운 드럼, 윈드박스, 석탄재 등은 관성이 등가인 강체로 모델링하였다.

보일러와 철골을 통합하기 위한 효과적인 모델링 방법을 제시하였다. 보일러를 철골의 거더에 매다는 역할을 하는 많은 행거는 개수를 줄여서 등가 행거로 변환하여 보요소로 모델링하였다. 보일러 외벽의 벽스테인과 스토퍼는 보요소로 모델링하고, 스토퍼와 철골 기둥 사이의 연결 관계를 고려하여 변위를 연계시켰다.

개발된 보일러-철골 통합모델에 대하여 자중조건에 대한 정적해석을 수행하여 변형형태를 평가하였다. 해석 결과, 보일러의 중량에 의해 철골은 상부의 보와 거더에서 굽힘변형이, 보일러는 행거와 더불어 아래쪽으로 처지는 변형이 나타났다. 벽스테인과 스토퍼의 변형형태도 철골 기둥과의 연결관계가 반영되어 타당하게 나타났다. 이를 통하여 개발된 통합모델에서 철골 부재들과 보일러의 주요 구성품들의 거동이 타당한 것으로 판단된다.

추후에 이 보일러-철골 통합모델을 사용한 진동모드 해석과 지진하중에 대한 응답스펙트럼해석의 후속 연구 결과도 발표할 예정이다.

## References

- [1] J. H. Hur, H. K. Kim, M. J. Shin, "Improvement Plan of Seismic Retrofitting Support System for Establishing

Earthquake Disaster Prevention Policy," *J. of KAIS*, Vol.18, No.7, pp.611-617, 2019.

<https://www.dbpia.co.kr > Article > NODE07225531>

- [2] T. S. Won, K. H. Cho, S. H. Kim, "A Study on Developments of Technical Regulation for Seismic Design Code for Thermal Power Plant Facilities in Korea," *Proc. of the KIEE Autumn Conference*, Korean Institute of Electrical Engineers, pp.278-284, 2015.  
<http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07203936>
- [3] E. Cruz, D. Valdivia, "Performance of Industrial Facilities in the Chilean Earthquake of 27 February 2010," *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol.10, No.1, pp.83-101, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/tal.679>
- [4] UBC(Uniform Building Code)1997, International Code Council, California, 1997.
- [5] ASCE7-16: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers, 2016.
- [6] R. A. Kumar, C. Umarani, "Behaviour of Thermal Power Plant Boiler Support Steel Structure under Seismic Excitations," *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, Vol.8, No.1, pp.74-80, 2019.  
<http://www.trp.org.in/issues/behaviour-of-thermal-po-plant-boiler-support-steel-structure-under-seismic-excitations>
- [7] D. K. Kim, *Dynamics of Structures*, Goomi Book Co., Seoul, 2005.
- [8] S. H. Kim, H. Rhee "Seismic Analysis of the Reflective Metal Insulation for Thermal Shielding of Main Equipments of Nuclear Power Plants," *J. of KAIS*, Vol.17, No.6, pp.166-172, 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.6.166>
- [9] ASME Boiler & Pressure Vessel Design Code, American Society of Mechanical Engineers, 2010.
- [10] E. Cruz, R. Garcia, G. Vera, D. Valdivia, "An Evaluation of a Simplified Analysis Model for the Earthquake Response of a Coal Fired Boiler and its Steel Support Structure," *Proc. of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008.  
<ftp://jetty.ecn.purdue.edu/spuiol/Andres/files/14-0174.PF>
- [11] B. Y. Lee, "Method of Determining Orthotropic Elastic Constants of Equivalent Shell Elements for Boiler Membrane Wall of Coal-Fired Power Plants," *J. of KSMPPE*, submitted, 2019.
- [12] ANSYS, *ANSYS Revision 11.0 User's Manual*, ANSYS Inc., 2007.
- [13] SAP2000, *SAP2000 Ver. 11 User's Manual*, Computer and Structures Inc., 2007.

이 부 윤(Boo-Youn Lee)

[정회원]



- 1984년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1991년 8월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1984년 3월 ~ 1998년 2월 : 한국중공업(주) 기술연구원 구조강도연구팀장
- 1998년 3월 ~ 현재 : 계명대학교 기계자동차공학전공 교수

<관심분야>

최적설계, 구조설계, 전산응력해석 등