ANSYS를 이용한 스캐폴딩 시스템 타워 구조 건전성 평가에 관한 법공학적 연구

김중혁 · 김의수[†] · 박우식 · 문병선 · 고재모 · 박남규 · 윤기봉^{*} · 조성욱^{*}

국립과학수사연구원 · ^{*}중앙대학교 기계공학부
(2013. 6. 18. 접수 / 2013. 10. 14. 채택)

Forensic Engineering Study on Structural Integrity Evaluation of Scaffolding System Tower using ANSYS

J. H. Kim · E. S. Kim[†] · W. S. Park · B. S. Moon · J. M. Goh · N. K. Park · K. B. Yoon^{*} · S. W. Cho^{*}

National Forensic Service

^{*}Department of Mechanical Engineering, Chungang University

(Received June 18, 2013 / Accepted October 14, 2013)

Abstract : Forensic engineering is the application of engineering principles covering the investigation of constructed facilities and systems that fail to perform as intended, causing personal injury or damage to property, environmental, economy etc. In the year 2012, two collapsed accidents of the large scaffolding system in national thermal power station occurred one after another, causing many casualties. In this study, we had performed to investigate the collapsed accident of scaffolding system occurred in the a thermal power station of two accidents. First, the investigation about the collapsed accidents site had performed to understand collapsed state and structures of the scaffolding system. Second, reviewing the materials concerning about the applied weight on the scaffolding system had performed. The applied weight is sum of the weights of the 15 workers, additional materials for coating work and dispersed and loaded shot ball on the foothold etc. the applied weight that calculated exceed more three times than the safe working load. Third, we had confirmed the install state of the materials of the scaffolding system by reviewing the quantity of the materials on the manual and the real system. Last, structural analysis had performed to evaluate structural integrity of the scaffolding system using Ansys. Through a series of this processes, the definite accidents causes of the collapsed scaffolding system revealed. Through these studies, the collapse accident that may occur in the scaffolding system in thermal power station can be minimized by performing specialized and systematic investigation on the accidents in terms of Forensic engineering.

Key Words : forensic engineering, structural integrity evaluation, scaffolding system tower, accident investigation, collapse accident

1. 서론

2012년도 3월, 4월 두 곳의 국내 화력발전소에서 보일러 내부 정비 작업 시 보일러 내부에 설치되는 스캐폴딩 시스템 타워(scaffolding system tower)가 붕괴되어 다수의 사상자를 낸 대형 기계구조물 안전사고가 연이어 발생하였다. 화력발전소 보일러 내부에 설치되는 스캐폴딩 시스템 타워는 일반적인 건설 현장에서 사용되어지는 스캐폴딩 시스템과는 달리 보일러 내부 진입 통로가 매우 좁은 탓에 이동성 및 설치 편의성을 갖추도록 특수 설계되었다. 일반적인 스캐폴딩 시스템은 강관(steel pipe)인 반면 화력발전소에 설치되는 스캐폴딩 시스템 타워는 알루미늄 재질의 접었다 폈다 할 수 있는 유닛(unit) 결합 형태로 유닛들을 쌓아 올려 타워(tower)를 구성하는 조립식으로 되어 있으며, 높이 약 46 m의 총 9개의 타워가 설치되어 타워 간 결합 및 강도 증가의 목적인 다수의 지주들이 타워 간에 설치됨에

따라 전체 구조물을 구성하게 된다. 본 연구에서 다룬 법공학(Forensic Engineering)은 기계구조물의 붕괴, 파단 및 폭발 등의 공학과 관련된 안전사고가 발생했을 경우, 이에 관한 법적 문제에 대해 공학적 전문지식과 사고 조사 경험을 갖춘 전문가가 공학적으로 해명하는 학문 분야이다^{1,2)}. 또한 법공학은 법적 책임 문제를 해명하는 목적외에 동일한 재해를 예방하기 위한 각종 제도와 법적 규제에 관하여 규격 및 정책을 제안함으로써 안전한 사회 실현을 목표로 한다³⁻⁶⁾. 본 연구에서는 화력발전소에서 발생한 스캐폴딩 시스템 타워의 붕괴 사고에 대하여 법공학적 관점에서 전문적이고 체계적으로 사고 원인 조사 및 자료 검토, 분석을 수행하고, 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 이용하여 사고 스캐폴딩 시스템에 대한 구조 해석을 수행함으로써 구조 건전성을 검토하였다. 이러한 일련의 법공학적 연구를 통해 본 사고의 원인을 규명하고, 재조명하여, 유사 및 동종 재해의 발생을 최소화 하고자 한다.

[†]Corresponding Author: Eui Soo Kim, Tel: +82-2-2600-4972, E-mail: es92kim@korea.kr
National Forensic Service, 139, Jiyang-ro, Yangcheon-gu, Seoul 158-707, Korea

(a) Before accidents

(b) After accidents

Fig. 1. Collapsed scaffolding system tower in the thermal power station's the boiler.

2. 사고 개요 및 구조 이해

2.1. 사고 개요

2012년도 국내 화력발전소에서 발생된 스캐폴딩 시스템 타워 붕괴 사고는 3월경 A 화력발전소 스캐폴딩 시스템 타워 붕괴 사고와 4월경 B 화력발전소 스캐폴딩 시스템 타워 붕괴 사고로 A의 경우, 근로자 13명이 추락하여 2명이 사망하고 11명이 부상당하였고, B의 경우, 근로자 5명이 추락하여 1명이 사망하고 4명이 부상당하는 등 두 건 모두 다수의 인적 피해를 초래한 대형 기계구조물 안전사고로 한 해에 한 달의 간격을 두고서 연이어 발생하였다. 본 논문에서는 이 중 인적 피해 규모가 더 크게 초래된 A 화력발전소에서 발생된 스캐폴딩 시스템 타워 붕괴 사고에 대하여 자세히 다루고자 한다. Fig. 1에서는 보일러 내부에 설치되었던 스캐폴딩 시스템 타워의 사고 발생 전 상태와 사고 발생 후 상태를 나타내었다.

2.2. 사고 스캐폴딩 시스템 타워 구조 이해

사고 스캐폴딩 시스템 타워는 아일랜드(Ireland) 국적의 'Instant UpRight Ltd.'사에서 설계, 제작된 모델명 'No. E-1571'로 Fig. 2에 나타난 바와 같이 가로 16.5 m, 세로 16.5 m, 높이 46 m의 총 20층(level)으로 구성되어 있으며, Fig. 3과 같이 접이식 구조의 타워 유닛(unit)들이 결합되어 쌓아올려져 총 9개의 타워로 구성되는 구조이다. 이렇게 구성된 타워 들은 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 바와 같이, 3개

Fig. 2. Drawing of the scaffolding system tower.

Fig. 3. Folding tower unit of the scaffolding system tower.

Fig. 4. Tower set position of the scaffolding system tower.

Fig. 5. Structure of tower set's under section.

의 타워가 1개의 타워 세트(set)로 구성되며, 각각의 타워 세트는 1개의 기초 트러스(base truss)와 ‘좌우’ 2개의 윙 트러스(wing truss)에 의해 보일러 내벽에 지지된다.

3. 사고 원인 검토 및 분석

3.1. 사고 현장 조사

보일러 내부의 스캐폴딩 시스템 타워 붕괴 상태를 파악하고자 Fig. 6에 나타난 바와 같이 좁은 출입구를 통하여 보일러 내부로 진입하였다. 스캐폴딩 시스템 타워는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타난 바와 같이 모두 원형을 유지한 채 한 쪽 면 방향으로 전도된 상태이었으며, 각 타워 간 설치되었던 발판 및 지주 등은 체결 상태에서 이탈되어 붕괴된 상태로 정확한 사고 이전의 설치 상태 및 위치 등의 파악이 불가하였다. 타워 세트의 기초 트러스는 Fig. 9에서 알 수 있듯이 위에서 아래 방향으로의 충격에 의해 변형 및 파손된 상태로 기초 트러스를 구성하는 부재들 중 일부가 변

Fig. 6. Accident plant's boiler state and boiler's entrance.

Fig. 7. The tumbled state of the towers to one side wall.

Fig. 8. Braces and footholds's breakaway state.

형되거나 설치 위치로부터 이탈된 상태이었다. 따라서 사고 당시 스캐폴딩 시스템 타워는 9개의 타워 모두 원형을 유지한 채 Fig. 4에서 나타난 ‘A’면 방향으로 전도된 점, 타워 간 설치되었던 발판 및 지주 등이 이탈되어 붕괴된 점 등으로 보아 Fig. 4에서의 1번 타워 세트가 ‘A’면 방향으로 전도 시작되었으며, 그에 따라 2번 타워 세트와 3번 타워 세트가 연속적으로 전도되어 각각의 타워 간에 설치되어 있었던 발판 및 지주 등이 이탈, 파손되어 붕괴된 것으로 추정된다.

3.2. 사고 당시 작용 하중 검토

사고 당시의 작용 하중을 유추하고자 몇 가지의 사고 당시 특이 사항들에 대하여 검토하였다. 첫째로, 사고 당

시 보일러 내부 코팅 작업을 위해 Table 1에 나타난 바와 같이 작업발판 등의 추가 부재가 설치되었으며, 그에 따

Fig. 9. Damaged base truss's state.

Table 1. Total weight of additional materials for coating work

No.	Material's No.	Materials	Each wt.(N)	Qt.	Wt.(kN)
1	E1571-10	Platform (L=1.83 m)	104.77	40	4.19
2	E1571-11	Sandeck (L=4.3 m)	289.40	34	9.84
3	E1571-12	Spandeck (L=5.21 m)	376.90	40	15.08
4	E1571-18	Cantilever bracket	52.78	40	2.11
5	-	Steel pipe (L=2 m)	49.83	64	3.19
6	-	Foodhold	119.88	14	1.68
Total weight(kN)					36.09

(a) the state on the foothold

(b) Before burying the tape

(c) After burying the tape

Fig. 10. Dispersed and loaded shot ball on the scaffolding system.

라 추가된 부재의 총 중량은 약 36.09 kN에 해당된다. 둘째로, 사고 당시 수행 중이던 샌드블러스팅(sandblasting) 작업 시 사용된 쇼트볼(shot ball)의 일부가 Fig. 10에 나타난 바와 같이 작업발판 등에 분산, 적재된 것을 확인하였으며, 이에 따른 정확한 하중은 알 수 없으나 상당한 분포 하중으로 작용했을 것으로 사료된다. 마지막으로, 사고 당시 스캐폴딩 시스템 타워 위에서 작업 중이던 작업자들은 총 13명으로 한 사람의 몸무게를 65 kgf로 가정하였을 때, 작업자들의 몸무게에 의한 하중은 총 8.29 kN이다. 따라서 사고 당시의 작업자들에 의한 몸무게에 의한 하중 (8.29 kN), 보일러 내부 코팅 작업을 위해 추가된 부재의 중량(약 36.09 kN), 작업발판 등에 분산, 적재된 쇼트볼의 중량 등을 함께 고려하면 사고 당시 작용했을 것이라고 추정되는 작용 하중은 약 44.38 kN 이상의 값을 지니며, 이는 매뉴얼에 해당되는 Fig. 2에 명시된 안전 작업 하중인 14.72 kN(1,500 kgf)을 3배 이상 상회하는 값으로 과하중으로 인한 사고 관련성이 있는 것으로 사료된다.

3.3. 부재 설치 상태 검토

사고 스캐폴딩 시스템 타워의 부재 설치 상태를 파악하기 위해, 설계도에 명시된 부재의 수량과 Fig. 11과 Fig. 12에 나타난 바와 같이 사고 현장 내 자재보관 창고에 보관되어 있는 부재의 수량, 사고 보일러 내에서 수거한 부재의 수량들을 함께 비교, 검토함으로써 부재 누락 상태를 확인하였다. 그 결과, 설계도상 수량과 실제 설치 수량에 따

Fig. 11. Not installed materials stored in the warehouse.

Fig. 12. Reconstruction of damaged materials from the accidents boiler plants.

Table 2. The quantity understanding of not installed materials

No.	Material's No.	Materials	Manual qt.	Install qt.	Miss qt.
1	E1571-16	4,306 mm Plan diagonal brace	64	24	40
2	E1571-03	1-rung Diagonal brace	144	90	54
3	E1571-32	2-rung Diagonal brace	42	30	12
4	E-582-38	Reinforcing coupler brace	122	28	94

Fig. 13. Not installed 'E1571-16' material on the manual.

Fig. 14. Not installed 'E1571-16' material on the picture before accidents.

른 누락 수량을 Table 2에 정리하여 나타내었으며, 이에 따라 4가지의 주요 부재가 상당량 누락되어 있음을 추정할 수 있었다. 누락된 부재들은 다음과 같은 역할을 한다. 'E1571-16, 4,306 mm Plan diagonal brace'는 타워 간 결합 및 타워 지지 역할을 하며, 'E1571-03, 1-rung Diagonal brace'와 'E1571-32, 2-rung Diagonal brace'는 기초트러스, 윙트러스에 설치되는 부재로 트러스 간 결합 역할을 하고, 'E-582-38, Reinforcing coupler brace'는 타워 유닛 보강 역할을 한다. 이 중 3.1항의 사고 현장 조사에서 확인한 타워 전도 상태를 뒷받침할 수 있는 부분으로 타워 간 결합 및 타워지지 역

Fig. 15. Reviewing of the base truss's installment state.

Fig. 16. Base truss's installment state on the picture before accidents.

할을 하는 'E1571-16' 부재의 누락 상태이다. 본 'E1571-16' 부재는 Fig. 13에 나타난 바와 같이, 설계 상 3층, 6층, 9층, 12층, 15층, 18층에 설치하도록 되어 있으나 Fig. 14의 사고 이전의 촬영된 사진 상에서는 전 층에 대해 설치되지 않은 것을 다시금 확인할 수 있다.

사고 스캐폴딩 시스템 타워의 붕괴 시작점에 해당되는 1번 타워 세트의 기초 트러스 상태를 확인한 결과, Fig. 15와 Fig. 16에서 알 수 있듯이, 기초 트러스의 부재 설치 상태가 설계도상에서의 내용과는 달리 상부와 하부 트러스 결합이 반대로 되어 있으며, 구조물에 작용하는 전체 수직 하중이 집중되는 부분인 기초 트러스의 양단 부분에 설계도상에서는 다수의 부재들이 설치되어 있으나 실제로는 부재들이 설치되어 있지 않은 것을 확인하였다. 이러한 설치 상태는 Fig. 17과 Fig. 18에 나타난 바와 같이 사고 후 1번 타워세트 기초 트러스의 변형 및 파손 상태에서도 설명가능하며, 실제적으로 보일러 내벽과 지지되는 부분이 크게 변형되어 파손된 상태인 것을 알 수 있다. 스캐폴딩 시스템은 기초가 트러스 구조로 어느 특정한 부분에 하중이 집중되어 과도한 응력으로 작용하지 않을 수 있도록 부재의 유무와 위치 등을 종합적으로 고려하여 설계하기 때문에 설계상 내용과 같게 부재를 설치하는 것은 매우 중요하며,

Fig. 17. Damaged section of No. 1 tower set's base truss.

특히 모든 하중이 집중되는 기초트러스의 경우에는 부재 하나하나의 설치 상태 및 위치 등에 대한 중요성은 더욱 크다.

3.4. 부재 누락 구조 안정성 평가

부재 누락 상태 중 타워 간 결합 및 타워 지지에 중요한 역할을 하는 부재인 평면대각지주 ‘E1571-03, 1-rung Diagonal brace’의 누락에 따른 구조 안정성에 미치는 영향을 평가하기 위해 유한요소해석 프로그램인 ‘ANSYS’를 이용하여 구조해석을 수행하였다. 평면대각지주(E1571-03)의 누락 상태는 Fig. 13에 나타난 바와 같이 타워 3, 6, 9, 12, 15 층에 대하여 가정하여 적용하였으며, 평면대각지주가 설치된 설계 모델과 평면대각지주가 설치되지 않은 사고 모델을 Fig. 18에 나타난 바와 같이 선, 면 요소를 사용하여 모델링하였다. 해석 모델의 경계 조건은 Fig. 19에 나타난 바와 같이 기초 트러스의 양단인 보일러 내벽에 지지되는 부분에 대해 구속 조건을 적용하였으며, 해석 모델의 재질은 Table 3에 나타난 일반적인 알루미늄의 기계적 물성 값을 적용하였다.

하중 조건으로는 설계 모델과 사고 모델 간의 정성(定

Fig. 18. Structure analysis model.

Fig. 19. Boundary condition of analysis model.

Fig. 20. Design model's structure analysis results.

Table 3. Mechanical properties of aluminum material.

Material	Young's modulus(GPa)	Density (kg/m ³)	Yield Strength (MPa)	Poisson's ratio
Aluminum 6082	70	2700	240	0.3

성)적인 상대 비교를 위해 임의로 가정한 하중(2,100 Pa/

Fig. 21. Accident model's structure analysis results.

tower)이 1번 타워 세트의 최상부면에 작용하는 경우에 대해 해석을 수행하였으며, 이에 대한 해석 결과를 Fig. 20과 Fig. 21에 나타내었다. 해석 결과로부터 알 수 있듯이, 설계 모델은 1번 타워 세트에 작용하는 하중이 2번과 3번 타워 세트로 분산되나 사고 모델은 1번 타워 세트에만 큰 변형 및 응력이 작용하며, 그에 따라 사고 모델의 경우가 설계 모델의 경우 보다 최대 변위가 약 3배 크며, 최대 응력이 약 1.3배 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 평면대각지주(E1571-03)의 누락이 전체 구조물의 구조 안정성을 저하시킬 수 있음을 유추할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 화력발전소에서 발생된 대형 기계 구조물인 스캐폴딩 시스템 타워의 붕괴 사고에 대한 정확한 사고 원인 규명을 위해 현장 조사, 자료 검토, 구조 안정성 평가 등을 수행하였으며, 이에 따라 설계 하중에 대한 작용 하중의 적절성 여부, 설계 상 내용에 맞게 전체 구조물을 구성하는 일부 주요 부재들이 설치되었는지 여부와 부재 누락에 따른 구조 건전성에 미치는 영향 등에 대하여 검토 및 분석을 수행하였다. 그 결과, 첫째, 사고 당시 스캐폴딩 시스템 타워에 작용하였던 작용 하중이 약 44.38 kN 이상으로 매뉴얼 상에 명시된 안전 작업 하중인 14.72 kN의 약 3배 이상을 상회한 것으로 확인되었으며, 둘째, 스캐폴딩 시스템 타워의 구조 안정성에 중요한 역할을 하는 부재들이 상당량 누락되었음을 확인하였고, 셋째, 기초트러스의 부재 설치 상태가 설계도상에서의 내용과 다르게 설치됨에 따라 실제 하중이 집중되는 부분에서의 부재 누락 상태와 파손 상태의

특이 내용이 연관성 있게 나타나는 것을 확인하였다. 마지막으로, Ansys를 이용한 구조 해석을 통해 주요 부재의 누락이 전체 시스템의 구조 건전성에 치명적인 결함을 초래하게 됨을 확인하였다. 따라서 본 사고는 이러한 일련의 범공학적 연구를 통해 전체 구조물을 구성하는 일부 주요 부재들이 설계상에서의 내용과는 다르게 누락 및 올바른 위치에 설치되지 않은 상태에서 매뉴얼 상에 명시된 안전 작업 하중의 약 3배 이상을 초과하는 과도한 작업 하중과 부재 누락이 구조 안정성에 치명적인 결함을 초래하여 사고가 발생한 것으로 판단된다. 이와 같은 동종의 사고 재발을 예방하기 위해서는 시스템적으로 설계 상 내용과 실제 설치 내용 등을 명확히 파악하고 검토하여야 하며, 설계 상 명시된 안전 작업 하중을 초과하지 않도록 상시 확인하여야 할 것으로 사료된다.

References

- 1) B. Sam, "Forensic Engineering : Reduction of Risk Improving Technology", Engineering Failure Analysis, Vol. 14, pp. 1019~1037, 2007.
- 2) H. Brian and T. K. Mohamed, "Non-destructive Testing Techniques for the Forensic Engineering Investigation of Reinforced Concrete Buildings", Forensic Science International, Vol. 167, pp. 167~172, 2007.
- 3) E. S. Kim, J. H. Kim and M. G. Kim, "Forensic Engineering Study on the Explosion Accidents Investigation of the Centrifugal Casting Machine using ADINA FSI", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 26, No. 4, pp. 27~33, 2011.
- 4) E. S. Kim, "A Study on Cause Analysis of the Crash for the Ski Lift", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 24, No. 2, pp. 13~16, 2009.
- 5) E. S. Kim, J. P. Kim, N. K. Park and Y. H. Kim "A Forensic Engineering Study on Bursting Accident of Composite Pressure Vessel in CNG BUS", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 23, No. 5, pp. 15~21, 2008.
- 6) E. S. Kim, S. H. Kim, D. H. Kim, and N. K. Park "Cause Analysis and Measure for Accidents of Door Detachment in Elevator Platform", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 22, No. 2, pp. 1~6, 2007.
- 7) J. H. Park, T. J. Park, H. K. Lim and E. H. Seo "Analysis of Crane Accidents by using a Man-Machine System Model", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 22, No. 2, pp. 59~66, 2007.
- 8) D. H. Kee and W. K. Kim, "Status of Fatal Crane Accidents and Their Safety Measures", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 20, No. 1, pp. 137~142, 2005.