# 변형 모드를 사용한 구조물의 외력 추정

# Approximation of external forces on structures using mode shapes

2022

# 윤 동 현 (尹 東 玹 Yun, Dong-Hyeon)

# 한 국 과 학 기 술 원 Korea Advanced Institute of Science and Technology

# 기계항공공학부/기계공학과

# 한 국 과 학 기 술 원

# 윤 동 현

## 2022

# 변형 모드를 사용한 구조물의 외력 추정

## 석 사 학 위 논 문

# 변형 모드를 사용한 구조물의 외력 추정

## 윤 동 현

위 논문은 한국과학기술원 석사학위논문으로 학위논문 심사위원회의 심사를 통과하였음

## 2022년 6월 28일

- 심사위원장 이필승 (인)
- 심사위원 김산하 (인)
- 심사위원 유승화 (인)

## Approximation of external forces on structures using mode shapes

Dong-Hyeon Yun

Advisor: Phill-Seung Lee

A dissertation submitted to the faculty of Korea Advanced Institute of Science and Technology in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering

> Daejeon, Korea June 28, 2022

Approved by

Phill-Seung Lee Professor of Mechanical Engineering

The study was conducted in accordance with Code of Research Ethics<sup>1</sup>).

<sup>1)</sup> Declaration of Ethical Conduct in Research: I, as a graduate student of Korea Advanced Institute of Science and Technology, hereby declare that I have not committed any act that may damage the credibility of my research. This includes, but is not limited to, falsification, thesis written by someone else, distortion of research findings, and plagiarism. I confirm that my dissertation contains honest conclusions based on my own careful research under the guidance of my advisor.

# MEE윤동현. 변형 모드를 사용한 구조물의 외력 추정. 기계공학<br/>과. 2022년. 46+iv쪽. 지도교수: 이필승. (한글 논문)Dong-Hyeon Yun. Approximation of external forces on structures<br/>using mode shapes. Department of Mechanical Engineering. 2022.<br/>46+ivpages. Advisor: Lee, Phill-Seung. (Text in Korean)

#### <u>초 록</u>

경쟁이 심해지는 조선업 분야에서 선박의 생산 효율 상승 및 수정 시수 최소화는 경쟁력을 높일 수 있는 중요한 요인이다. 선박의 제조 공정 단계에서 발생하는 변형은 추가 작업 및 생산성 하락으로 경쟁력을 저하시키며, 이를 예방하기 위해선 제조 공정마다 선박이 받는 하중을 추정하여 선박의 변형 원인을 분석할 필요가 있다. 본 학위논문에서는 선박의 Mode Shape 및 Proper Orthogonal Decomposition 기법 등을 사용하여, 각 제조 공정에서 선박에 가해지는 하중을 추정하고자 한다.

<u>핵 심 낱 말</u> 유한요소법, Mode Shape, Proper Orthogonal Decomposition, 하중 추정

#### Abstract

In the shipbuilding industry, where competition is intensifying, increasing the production efficiency of ships and minimizing the number of amendments are important factors that can increase competitiveness. Deformation occurring in the manufacturing process of ships degrades competitiveness due to additional work and productivity decline, and to prevent this, it is necessary to analyze the cause of the deformation of ships by approximating the load on ships in each manufacturing process. In this thesis, the load applied to the sfhip in each manufacturing process is approximated using the ship's Mode Shape and Proper Orthogonal Decomposition technique.

Keywords Finite Element Method, Mode Shape, Proper Orthogonal Decomposition, Force Approximation

목차		•••		•••	•••			• •	• •	• •			••	• •		•	•••	••	 •••	•••	 ••	 •	••	••	••		••	••	••	•••	••	•		••	••		• •		•••	•	i
표 들	<b>닦차</b> .								•••		•••	•			••		•••		 	•	 	 		•	•••	•			••	• •					•••			••		i	ii
그림	목차	•••	•••	•••		•••	••		••		•••	•	•••			• •		•••	 •••	•••	 •••	 	•••		••				••		••		•••	•	•••	••		•••	••	ii	ii

제 1 장	서론 1
제 2 장	문헌 조사
	2.1 Inverse Finite Element Method 3
	2.2 Modal Analysis 4
	2.3 Proper Orthogonal Decomposition
제 3 장	Mode Shape과 Proper Orthogonal Decomposition을 사용한 구조물의 하중 추정 8
	3.1 선박 제조 공정 8
	3.2 Mode Shape Database 12
	3.3 모드 선택 14
	3.4 하중 추정 15
제 4 장	수치 예제 21
	4.1 Rectangular Box
	4.2 선박 데크 블록(E53PC) 24
	4.2.1 블록 운반 공정 24
	4.2.2 블록 조립 공정 28
	4.3 선박 데크 블록(E51GC) 34
	4.3.1 블록 운반 공정 34
	4.4 결과 분석
	4.4.1 오차 원인 추정 38
	4.4.2 모드 선택 40
	4.4.3 하중 모드를 사용한 하중 추정 41
제 5 장	결론
참 고 문	· 헌 46

# 표 목차

4.1 추정한 하중 및 오차	22
4.2 E53PC 조립 공정 test case의 조립 하중 크기	28
4.3 E53PC 조립 공정에서 strain을 통해 추정한 하중 값	33
4.4 E53PC 조립 공정에서 자중을 고려하지 않고 추정한 하중 값	30
4.5 E53PC 조립 공정에서 자중을 고려하지 않고 추정한 하중 값	39

# 그림 목차

2.1 Modal Analysis 예시	5
2.2. snapshot을 사용한 POD 기법	5
3.1 선박의 제조 공정 개요	8
3.2 사용된 선박 데크 블록의 도면	Э
3.3 사용된 선박 데크 블록의 FE Model	9
3.4 선박 데크 블록의 제조 공정 10	0
3.5 <b>U</b> <sub>appr</sub> 와 <b>u</b> <sub>a</sub> , <b>u</b> <sub>b</sub> 예시 이미지	;
3.6 element k의 natural 좌표계 및 <i>r,s,t</i> 값에 따른 strain 지점 19	)
4.1 Rectangular Box의 형상 및 하중 조건 21	
4.2 Rectangular Box의 FE 모델 2	1
4.3 Rectangular Box에서의 Singular Value 값 그래프 22	2
4.4 1~4번 모드의 Mode Shape 22	2
4.5 Test case에서의 하중 상황 23	3
4.6 E53PC 블록 운반 공정 모델의 형상 2	4
4.7 와이어를 제거한 E53PC 운반 모델 및 새로 가해준 구속조건 위치 (우측: -XY view) 24	4
4.8 E53PC 운반 공정에서 Singular Value 값 그래프 2	5
4.9 E53PC 운반 공정에서 센서 데이터로 사용한 Node의 위치 유정에서 센서 데이터로 사용한 Node의 위치	5
4.10 E53PC 모델 전체에 가해지는 z방향 하중 비교 20	6
4.11 구속조건이 가해지는 지점의 z-reaction force 오차 27	7
4.12 E53PC 블록 조립 공정 모델의 형상 및 조립 하중 위치 2	8
4.13 E53PC 블록 조립 공정 모델의 구속조건 위치 24	8
4.14 E53PC 조립 상황에서 전체 Singular Value 값 그래프 29	9
4.15 E53PC 블록 조립 공정에서 가장 높은 두 값을 제외한 Singular Value 그래프	9

4.16 E53PC 조립 공정 test case의 조립 하중 위치 3	0
4.17 센서 데이터로 사용한 Node의 위치 3	0
4.18 조립 하중 지점의 예측 하중 오차 3	1
4.19 변경된 센서 데이터 Node의 위치 3	2
4.20 센서 위치에 따른 조립 하중 지점의 예측 하중 오차	2
4.21 E51GC 블록 운반 공정 모델의 형상 3	3
4.22 와이어를 제거한 E51GC 운반 모델 및 새로 가해준 구속조건 위치 (우측: +XY view) 3	4
4.23 E51GC 운반 공정에서 Singular Value 값 그래프 3	4
4.24 E51GC 운반 공정에서 센서 데이터로 사용한 Node의 위치	5
4.25 E51GC 모델 전체에 가해지는 z방향 하중 비교 3	5
4.26 구속조건이 가해지는 지점의 z-reaction force 오차 3	6
4.27 구속조건이 가해지는 지점의 z-reaction force 오차 3	7
4.28 자중을 제거한 E53PC 블록 조립 공정에서의 Singular Value	8
4.29 자중 고려 유무에 따른 추정 조립하중 값의 오차 3	9
4.30 조립하중의 개수에 따른 Singular Value 4	0
4.31 조립하중의 개수에 따른 조립하중 추정 오차 4	1
4.32 하중 모드 및 Mode Shape 을 사용하여 추정한 조립하중 오차 4	3

### 제 1 장 서 론

대형 구조물의 경우 최종 형상을 기준으로 설계 하중을 만족할 수 있도록 최적 설계가 진행되며, 이로 인해 제조 공정 단계에서 가해지는 하중으로 인해 예기치 못한 변형이 발생하는 상황이 존재한다. 특히, 선박 및 해양플랜트의 초대형 강구조물의 제작을 위해서는 공장 설비, 선행 의장, 조립-탑재 용이성 등을 고려하여 생산이 진행된다. 이 경우 지지대가 존재하지 않아 조립 이전의 단계에서 구조적 취약성을 갖는 블록이 발생한다. 또한 제작단계에서 접하는 다양한 생산 하중으로 인해 발생하는 변형은 수정을 필요로 한다.

이러한 현상들은 생산 효율을 저하시키고 추가적인 수정 시수(MH)를 발생시켜 제조 경쟁력을 약화시키는 주요한 원인이 된다. 뿐만 아니라 파랑하중을 받는 선체 중요 구조가 아 닌 거주구, 엔진룸의 경우 설계 하중이 작으므로, 변형에 취약하다. 때문에 장비 설치 및 도장 이 완료된 이후에도 변형을 수정하기 위한 가열 교정과, 이로 인한 재도장 작업, 접근이 어려 운 구간의 경우 족장 작업 등 수많은 재벌 작업 시수가 발생한다.

이런 문제들의 예측이 어려운 요인은, 생산 중에 기록되지 않는 다양한 하중과 이전 공정에서 발생한 초기 변형 등으로 판단할 수 있다. 경쟁이 심화되는 조선업 특성상 이러한 문제들을 사전에 방지할 수 있는 측정 및 분석 기술의 개발 및 연구 필요성이 제시되었다.

Inverse Finite Element Method(iFEM)는 구조물의 변위, 변형률 및 응력을 감지하는 가장 일반적이고 강력한 기술 중 하나이다. 특히 실시간 형상 추정에서 iFEM은 재료 및 하중 조건으로부터의 독립성과 계산 요구 사항이 적다는 등의 특성으로 인해 점점 더 주목을 받고 있다. 그러나 iFEM은 많은 양의 변형률 데이터를 필요로 하기 때문에 간단한 형상의 구조물 에도 많은 센서를 설치해야 하며, 센서를 설치하는 위치에 있어서도 구조물의 형상과 하중의 방향에 따른 제약이 존재한다. 본 연구의 하중 추정 대상 구조물은 제조공정 단계의 선박 블 록으로, 다량의 센서를 부착한 상태에서 조립이나 용접을 할 수 없어 이러한 iFEM의 적용이

1

용이하지 않다.

Modal Analysis 또한 구조물의 변형을 감지하는 방법으로서 자주 사용된다. 블록의 변형은 Mode Shape의 선형 결합을 통해 얻을 수 있으므로, 블록의 변형에 있어서 지배적인 모드와 해당 모드의 계수를 알면 블록 전체의 변형을 추정할 수 있다. 하지만 Modal Analysis 로 블록의 국부적인 변형을 추정하기 위해선 많은 수의 모드를 사용할 필요가 있기에 이 또 한 구조물에 다량의 센서를 설치해야 한다는 한계가 있다.

본 연구에서는 적은 수의 센서를 사용하여 구조물에 가해지는 하중을 추정하는 것을 목표로 한다. 선박의 경우 제조 공정이 세분화되어 있으며 각 공정에서 예기치 못한 변형이 자주 발생하기 때문에, 하중 추정 대상 구조물로서 선박의 블록을 사용하였다. 블록의 가능한 변형 형태와 Proper Orthogonal Decomposition(POD) 기법을 이용하여 얻어진 새로운 Mode Shape를 통해 고유 모드에서 추정하기 어려운 국소 변형 및 부하를 추정하였다.

2장에서는 먼저 기존의 하중 추정 방법론인 iFEM에 대해 간략히 소개하였다. 이후, 본 연구의 하중 추정 방법론에 사용된 Modal Analysis와 POD의 원리에 대하여 자세히 설명 하였다.

3장에서는 본 연구에서 제안하는 하중 추정 방법론에 대해 묘사하였다. 먼저 해석 대 상 구조물에 대해 소개하였다. 이후, 구조물에서 Mode Shape을 구하는 새로운 방식에 대해 설명하였다. 마지막으로, 획득한 Mode Shape을 통해 구조물 전체의 하중을 추정하는 과정 을 설명하였다.

4장에서는 선박 블록의 하중 추정을 포함한 다양한 예제들을 통하여 하중 추정 방법 론에 대한 검증을 진행하였다.

5장에서는 본 연구의 결론 및 향후 연구 방향에 대해 정리하였다.

2

## 제 2 장 문헌 조사

본 챕터에서는 iFEM, Modal Analysis, 그리고 Proper Orthogonal Decomposition (POD)의 이론에 대해서 설명하였다. 먼저, 하중 및 변형 추정 방법론 중 하나인 iFEM 기법에 대해 간략히 소개하였다. 이후, 고유모드를 사용한 Modal Analysis에 대하여 설명하였다. 마 지막으로, 본 연구에서 POD가 모드를 선택하는데 사용되었기 때문에, POD의 원리에 대한 내 용이 묘사되었다.

#### 2.1 Inverse Finite Element Method

Inverse Finite Element Method(iFEM)란 strain 센서를 사용하여 실시간으로 구조물 의 displacement, strain, 그리고 stress field를 계측하기 위하여 Tessler과 Spangler가 도입한 방법론이다[1][2].

도입 이후 beam, plate, shell, solid 등 여러 요소를 대상으로 역 유한요소가 다양하 게 개발되고 개선되어 왔지만, iFEM 방법론은 일반적으로 strain의 분석 값과 실험 값 사이의 오차 제곱의 합을 최소화하는 least-squares variational principle을 사용한다[3]. 이 공식과 적 절한 역 유한 요소를 사용하면 측정한 strain값을 통해 각 element의 strain을 실시간으로 얻 어낼 수 있다.

iFEM은 구조물 형상의 복잡도에 관계없이 동일한 보편성을 갖고 있으며, 다른 변형 형상 추정 방법론인 Ko 이론 및 Modal 방법보다 정확하게 변형 형상을 예측한다는 것이 증 명되었다[4].

이렇게 iFEM은 일반적으로 실시간 변형 및 하중 추정에 있어서 가장 적합하고 발전 된 방법론 중 하나라고 할 수 있지만, strain field 추정을 위해서 많은 양의 strain 데이터가 필 요하여 구조물에 다량의 센서를 설치할 필요가 있다는 단점이 있다[5]. Shell 요소를 사용하 는 iFEM에서는 주로 FBG 센서를 사용하여 strain 데이터를 측정하는데, 센서는 element의 양 쪽 면에 설치되며 하중의 방향에 따라 길게 센서를 설치해야 하며 센서가 설치되지 않은 부 분의 displacement 추정 값은 낮은 정확도를 가진다[6].

본 연구에서 대상으로 하는 구조물은 제조 공정 단계의 선박으로, 용접, 운반, 조립 등의 공정을 거치기 때문에 많은 양의 센서를 부착하는 것이 불가능하다. 때문에 본 연구에 선 기존의 방법론인 iFEM을 사용하지 않고, 적은 수의 센서만으로도 구조물의 변형 및 하중 을 추정할 수 있는 방법론을 제시하였다.

#### 2.2 Modal Analysis

모든 구조물 그것의 형상과 재질, 구속조건에 따라서 고유한 진동 특성을 가진다. 이 고유한 진동 특성은 외부의 자극과 관계없이 그 구조물이 가지는 본질적인 특성으로, 물체 의 고유진동수와 고유진동수에 대응하는 Mode Shape이 이에 해당한다.

고유진동수에 대응하는 Mode Shape은 고유 모드 라고도 부르는데, 이 고유 모드는 구조물이 주어진 구속조건에서 변형될 수 있는 형상을 의미하며 고유 모드가 단위 시간당 반 복되는 정도를 나타내는 것이 고유진동수이다.

고유진동수 및 고유 모드는 구조물의 강성 및 질량 분포에 따라 결정되며, 구조물의 자유도와 같은 수가 존재하게 된다. 고유진동수의 값이 낮은 고유 모드를 저차 모드, 높은 고 유 모드를 고차 모드라 칭한다. 또한 저차 모드로 갈수록 구조물이 쉽게 변형할 후 있는 형상 이고, 고차 모드로 갈수록 구조물이 변형하기 힘든 형상이라고 할 수 있다.

진동에 의한 구조물의 변형 형상은 이 다양한 Mode Shape을 사용하여 표현 가능하 며, 구조물의 고유진동수와 Mode Shape을 파악하여 구조물의 공진여부 및 진동으로 인한 변형 형상을 예측하는 것이 Modal Analysis이다.

4



그림 2.1 Modal Analysis 예시

실제로 Modal Analysis는 구조물의 실시간 변형을 예측하는데 자주 사용된다. 하지 만 고유 모드는 구조물의 자유도와 동일한 숫자를 가지기 때문에 복잡한 구조물일수록 구조 물의 거동에 개입하는 고유 모드가 많아지고, 때문에 구조물의 거동에 있어 지배적인 모드를 찾는 데에 어려움이 있다. 구조물의 전체적인 변형 양상은 구조물에 존재하는 일부 저차 모 드의 Mode Shape만 사용해서도 추정하는 것이 가능하지만, 구조물의 국부적인 변형을 추정 하기 위해서는 다량의 모드를 고려할 필요가 있고, 이에 따라 구조물에 설치해야 하는 센서 의 수 또한 증가하게 된다는 단점이 존재한다.

## 2.3 Proper Orthogonal Decomposition

Proper Orthogonal Decomposition(POD)는 여러 개의 벡터로 이루어진 snapshot으 로부터 경향성이 높은 기저를 추출하여 전체 시스템의 거동을 모사할 수 있도록 하는 기법이 다. Singular Value Decomposition(SVD) 를 기반으로 하는 POD에서는 경향성이 높은 기저를 계산하기 위하여 snapshot에 SVD을 적용하고, 여기서 자유도가 낮은 기저를 얻어 이를 지배 적인 기저로서 사용한다.



그림 2.2 snapshot을 사용한 POD 기법

그림 2.2는 snapshot을 사용하는 POD 기법에 대해 간략히 나타내고 있다.  $\mathbf{D}$ 는 snapshot 데이터들로 이루어진 행렬이고, 이에 SVD를 적용하면 좌측 특이벡터로 이루어진  $\mathbf{V}^{\iota}$ , singular value로 이루어진  $\mathbf{S}$ , 그리고 우측 특이벡터로 이루어진 행렬인  $\mathbf{v}^{*}$  이 세 행렬 로 분해가 가능하다. 여기서 좌측 특이벡터인  $\mathbf{v}^{\iota}$ 의 열벡터들의 선형 결합을 통해서  $\mathbf{D}$ 를 표 현하는 것이 가능하다. 이 선형 결합의 식에서 singular value 값이 낮은 항들을 0으로 근사하여 없애면,  $\mathbf{v}^{\iota}$  열벡터들 중 일부만으로도  $\mathbf{D}$ 에 근접한 데이터를 뽑아낼 수 있다. 때문에  $\mathbf{v}^{\iota}$ 의 열벡터들 중 높은 singular value 값을 가지는 벡터들이 지배적인 기저로서 전체 시스템인  $\mathbf{D}$ 의 거동을 모사할 수 있게 되는 것이다. 그림 2.2의 과정은 수식 (1), (2), (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{1} \mathbf{y}_{2} \cdots \mathbf{y}_{n} \end{bmatrix} = \mathbf{V}^{L} \mathbf{S} \left( \mathbf{V}^{R} \right)^{T}$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \mathbf{v}_{i}^{L} S_{i} \mathbf{v}_{i}^{R}$$

$$\approx \sum_{i=1}^{k} \mathbf{v}_{i}^{L} S_{i} \mathbf{v}_{i}^{R} (k < n)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{1} & 0 \\ S_{2} & \\ & \ddots & \\ 0 & S_{n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}^{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1}^{L} \mathbf{v}_{2}^{L} \mathbf{v}_{3}^{L} \cdots \end{bmatrix}$$
(2)
$$\mathbf{V}^{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1}^{L} \mathbf{v}_{2}^{L} \mathbf{v}_{3}^{L} \cdots \end{bmatrix}$$
(3)

본 수식에서  $\mathbf{y}_i$ 는snapshot 데이터를 의미하며,  $S_i$ 는 singular value,  $\mathbf{v}_i^L$ 는 좌측 특 이벡터,  $\mathbf{v}_i^R$ 는 우측 특이벡터를 의미한다. 모든  $\mathbf{y}_i$ 값들은 좌측 특이벡터인  $\mathbf{v}_i^L$ 들의 선형 결 합을 통해 표현이 가능하며,  $S_i$ 값은 이  $\mathbf{v}_i^L$  값들의 비중을 나타낸다.

# 제 3 장 Mode Shape과 Proper Orthogonal Decomposition을 사용한 구조물의 하중 추정

본 챕터에선, 구조물의 하중을 추정하는 방법이 묘사되었다. 제조 공정 단계의 선박 을 대상으로 하중을 추정하기 때문에, 선박의 제조 공정에 대해서도 간단히 소개되었다. 대상 구조물의 자세한 제조 공정과 각 공정에서 Mode Shape database를 얻어내고, 이에 Proper Orthogonal Decomposition(POD)를 적용시켜 Mode Shape을 구해낸 방법이 설명되었다. 마 지막으로, 구한 Mode Shape과 센서를 통해 구조물에서 측정한 displacement 혹은 strain을 사용하여 구조물에 가해지는 하중을 추정하는 방법이 묘사되었다.

## 3.1 선박 제조 공정

선박은 기본적으로 도장, 가공, 소조립, 중/대조립 등의 단계를 거쳐서 만들어진 여러 개의 단위 블록으로 구성된다. 블록은 선박을 건조하는데 가장 기초가 되는 것으로, 여러 개 의 블록들이 도크에서 합쳐져 선박이 완성되는 것이기 때문에 블록들 간에 오차가 발생되지 않도록 관리하는 것이 매우 중요하다.



그림 3.1 선박의 제조 공정 개요

만들어진 블록들은 이후 선행 탑재 및 탑재 공정을 거쳐서 지상에서 조립되고, 이후 진수 과정을 거쳐 물에 띄운 뒤 내부 의장/도색 등의 과정을 거쳐서 완성된다.



그림 3.2 사용된 선박 데크 블록의 도면

본 연구에선 선박의 데크 부분에 해당하는 블록인 E53PC 블록과 E51GC 블록을 하중 추정 대상 블록으로 사용하였다. 그림 3.2에는 각 블록의 도면 및 대략적인 크기 정보를 표기 하였다. 그림 3.2의 E51GC 블록 도면에 표시된 부분은 E53PC 블록으로, E53PC 블록은 다른 두 블록과 조립하여 E51GC 블록이 된다.



그림 3.3 사용된 선박 데크 블록의 FE Model

그림 3.3은 본 연구에 사용된 블록의 FE Model 이미지로, 좌측은 E53PC 블록, 우측은 E51GC 블록이다. 사진에 강조된 부분은 Over Head Crane(OHC) rail로, 선박의 프레임이나 대량의 철강자재와 같이 다양한 것들을 들어올릴 수 있는 운반 하역장치인 OHC의 레일이다.

OHC는 선박의 생산성과 직결되는 중요한 장비이며 OHC의 고장은 일시적인 생산 중 단으로 인해 막대한 경제적 피해를 야기할 수 있다. 그런데 E53PC 블록이 E51GC 블록으로 조립되는 과정에서 OHC Rail에 변형이 발생하게 되고, 이로 인해서 추가적인 작업이 고질적 으로 발생하게 된다.

때문에 E53PC 블록이 E51GC 블록으로 조립되는 단계를 세분화하고, 각 단계에서 블 록의 변형 및 가해지는 하중을 추정하여 어느 단계가 OHC Rail의 변형에 영향을 준 것인지 알아낼 필요가 있다.



그림 3.4 선박 데크 블록의 제조 공정

그림 3.4는 하중 추정 대상 블록인 E53PC 블록과 E51GC 블록의 조립 공정을 나타낸 다. 두 선박 데크 블록의 조립 공정은 크게 운반, 회전, 조립 총 세 가지로 분류할 수 있다. E53PC 블록은 먼저 와이어에 매달린 채 운반되고 실제 선박에 조립되는 방향으로 회전되며, 이후 지지대에 놓여 두 개의 다른 블록들과 함께 E51GC 블록으로 조립된다. 이후 E51GC 블 록 또한 와이어를 통해 옮겨지고, 지지대에 놓여 조립하중을 받게 된다. E53PC에 조립되는 다 른 두 블록에는 OHC rail이 설치되어 있지 않기 때문에, 본 연구에선 해당 블록들은 고려하지 않았다.

운반 및 회전 공정은 블록이 와이어를 통해 크레인에 매달려 있는 상태로, 자중 및 장 력 이외에 다른 하중을 받지 않는다. 조립 공정에선 블록이 핀 형상의 바닥에 놓여있는 상태 로, 자중 이외에 추가로 조립하중을 받게 된다. 운반, 회전, 조립 공정 모두 블록의 변형 혹은 파손을 발생시키지 않기 위해 아주 천천히 진행된다. 때문에 본 연구에서 대상으로 하는 구 조물은 strain 및 displacement의 크기가 작고 선형 탄성 재료를 가정하여 모든 상황에서 선 형 정적 해석을 진행하였다.

#### 3.2 Mode Shape Database

일반적으로 Mode Shape은 구조물의 고유진동수에서의 변형 형상을 의미하며, 고유 값 분해를 통해 고유진동수와 Mode Shape을 구할 수 있다. 이 Mode Shape은 구조물 모델 의 전체 자유도 개수만큼 존재하며, 일반적으로 FEM을 통해 Modal analysis를 수행할 경우 엔 계산할 모드 개수를 지정하거나 계산하려는 모드의 범위를 관심 고유진동수 범위로 지정 하여 해석을 진행한다.

이렇게 얻은 Mode Shape을 통해서도 구조물의 변형 형상을 추정하는 것은 가능하 지만 대상 모델의 자유도가 매우 커 많은 수의 모드가 존재하며, 관심 고유진동수 범위를 지 정할 수도 없기에 저차모드를 사용해야 한다. 하지만 저차모드를 사용하여 Modal Analysis를 수행할 경우, local한 변형을 추정하기 위해선 매우 많은 수의 모드를 사용할 필요가 있다. 본 연구의 대상 블록들은 와이어 혹은 조립하중으로 인해 local한 변형이 많이 발생하며, 제조 공정 단계의 블록에 많은 수의 센서를 부착할 수도 없기에 사용 가능한 모드의 개수가 한정 적이다. 때문에 본 연구에선 고유진동수에 따른 Mode Shape이 아닌 다른 방식으로 Mode Shape을 계산하여 사용하였다.

본 연구에서는 대상 구조물의 변형을 잘 대표할 수 있는 변형 형상을 찾기 위해 블록 의 FE Model에 가능한 여러 하중 상황들을 가정하여 적용하였고, 각 하중을 적용하였을 때 나타나는 변형 형상들을 Mode Shape Database로서 Mode Shape을 계산하는데 사용하였다.

$$\mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{R} \tag{4}$$

위 식은 static equilibrium equation으로,  $\mathbf{K}$ 는 강성행렬,  $\mathbf{U}$ 는 모델의 변형,  $\mathbf{R}$ 는 모 델에 가해지는 하중을 의미한다. 이 식에 다양한 하중 상황을 적용하면, n 개의 하중 상황에 대해서 수식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{R}_i \quad (i = 1 \sim n) \tag{5}$$

구조물에 따라 고려할 수 있는 하중 상황이 다르기 때문에 위 식에서의  $\mathbf{R}_i$  및 n을 선택하는 방식은 모두 다르며, 이는 Mode Shape database인  $\mathbf{U}_i$  값에 직접적인 영향을 미치 기 때문에 대상 구조물의 거동을 가장 잘 대표할 수 있는 하중 상황들을  $\mathbf{R}_i$  값으로 선택하는 것이 중요하다. 선박 블록의 하중 추정에서도 제조 공정에 따라 다른 방식으로  $\mathbf{R}_i$ 를 선택하 여 사용하였다.

먼저 운반 공정은 블록이 와이어에 매달려 있는 상태로, 블록이 기울어진 방향 및 각 도를 변화시키며 다양한 하중 상황을 만들었다. 이 공정에서 각 와이어는 길이를 조절하면서 항상 팽팽한 상태로 유지되기 때문에, 와이어가 느슨하여 일부 와이어에 하중이 걸리지 않게 되는 것은 하중 상황에 포함시키지 않았다. 블록이 기울어지는 상황을 구현하기 위하여 FE Model에서 와이어가 연결되는 지점에 구속조건을 주고, 중력의 방향을 변화시키며 해석을 진행하였다.

회전 공정은 블록이 기울어진 각도가 다를 뿐 운반 공정과 같이 와이어에 블록이 매 달려 있는 상황이기 때문에, 운반 공정과 같은 방식으로 블록이 기울어진 방향 및 각도를 조 금씩 변화시키며 다양한 하중 상황을 만들었다.

마지막으로 조립 공정에선 블록이 핀 모양의 지지대 위에 놓인 상황이기 때문에, 운 반 및 회전 공정처럼 다양한 각도로 기울어지는 것은 고려할 수 없다. 하지만 이 공정에선 블 록이 지지대 위에 놓인 채로 일부 지점에 조립 하중을 받게 된다. 때문에 조립 공정에선 조립 하중이 가해지는 지점을 특정하여 각 지점에 가해지는 하중의 크기 및 방향을 바꿔가는 방식 으로 하중 상황을 고려하였다.

13

#### 3.3 모드 선택

3.2에서 얻은 Mode Shape Database를 전부 Mode Shape으로 사용하려면 많은 수 의 센서가 필요하기 때문에, Mode Shape Database에 Proper Orthogonal Decomposition (POD)를 적용시켜 가장 경향성이 높은 데이터들을 선택하여 Mode Shape으로 사용하였다.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{1} \mathbf{U}_{2} \cdots \mathbf{U}_{n} \end{bmatrix} = \mathbf{V}^{L} \mathbf{S} \left( \mathbf{V}^{R} \right)^{T}$$
$$= \sum_{i=1}^{n} \mathbf{v}_{i}^{L} S_{i} \mathbf{v}_{i}^{R}$$
$$\approx \sum_{i=1}^{k} \mathbf{v}_{i}^{L} S_{i} \mathbf{v}_{i}^{R} (k < n)$$
(6)

여기서  $\mathbf{U}_i$ 는 i번째 Mode Shape Database를 의미하고,  $\mathbf{V}_i^L$ 는 POD를 통해 얻어낸 i 번째 Mode Shape, k는 선택한 모드의 개수를 의미한다. Mode Shape Database를 snapshot 데이터로서 사용하고, 여기에 Singular Value Decomposition(SVD)을 적용하였다. Singular value인  $S_i$ 값이 높은 것일수록 더 경향성이 높은 것이기 때문에, 높은  $S_i$ 값을 가지는  $\mathbf{V}_i^L$ 들 을 Mode Shape으로 사용하였다. 위 식에서 볼 수 있듯이 singular value인  $S_i$ 가 작은 항들은 제외하고,  $S_i$ 값이 높은 k개의 항들만 남겨도 **D**에 근사한 값을 얻을 수 있다.

여기서 모드의 개수인 *k* 를 몇으로 두는지에 따라 Displacement field 추정의 정확도 가 달라지게 되며, 모드를 몇 개 사용할지는 대상 구조물의 상황에 따라 다르다. 실제로 본 연 구에서는 하중 추정 대상 구조물의 하중 상황마다 모드의 개수를 다르게 사용하였다.

## 3.4 하중 추정

하중을 추정하기에 앞서, POD를 통해 얻은 주요 모드의 Mode Shape의 선형 조합을 통해서 구조물 전체의 displacement field를 계산하였다.

$$\sum_{i=1}^{m} k_i \mathbf{v}_i^L = \mathbf{U}_{appr}$$
(7)

위 식은 m개의 모드를 사용하였을 때, Mode Shape들과 displacement field 추정값 의 관계를 나타내고 있다. 이 식을 통해 displacement field를 추정하기 위해선 각 Mode Shape의 계수를 알 필요가 있으며, Mode Shape의 계수는 모드의 수와 동일한 개수의 센서 를 통해 측정한 일부 지점의 displacement값을 사용하여 구할 수 있다. 아래의 식은 센서 데 이터와 Mode Shape들을 통해 각 Mode Shape의 계수를 추정하는 과정을 나타낸다.

$$\sum_{i=1}^{m} k_{i} \mathbf{v}_{i}^{L} = \sum_{i}^{m} k_{i} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{ia}^{L} \\ \mathbf{v}_{ib}^{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{a} \\ \mathbf{u}_{b} \end{bmatrix} = \mathbf{U}_{appr}$$
(8)

여기서  $k_i$ 는 i 번째 Mode Shape의 계수를 의미하고,  $\mathbf{u}_a$ 및  $\mathbf{u}_b$ 는 각각 구조물에서 센서를 통해 측정한 node들과 측정하지 않은 node들의 displacement 값을,  $\mathbf{v}_{ia}^L$ 및  $\mathbf{v}_{ib}^L$ 는 각각  $\mathbf{v}_i^L$  내에서  $\mathbf{u}_a$  및  $\mathbf{u}_b$ 에 대응하는 node들의 displacement 값을 의미한다. 구조물의 displacement field인  $\mathbf{U}_{appr}$ 는 그림 3.5에서 나타나는 것과 같이, 센서로 측정한 displacement 지점인  $\mathbf{u}_a$ 와 측정되지 않은 나머지 부분인  $\mathbf{u}_b$ 로 나눌 수 있다. 센서를 모드 의 개수와 동일하게 사용하였기 때문에, 벡터  $\mathbf{u}_a$ 는  $m \times 1$ 의 크기를 갖게 된다. 또한 Mode Shape 벡터인  $\mathbf{v}_{i}^{L}$ 는  $\mathbf{U}_{appr}$ 과 같은 크기를 가지며, 같은 방식으로  $\mathbf{u}_{a}$ 에 대응하는 벡터인  $\mathbf{v}_{ia}^{L}$ 과  $\mathbf{u}_{b}$ 에 대응하는 벡터인  $\mathbf{v}_{ib}^{L}$ 로 나눌 수 있다.



그림 3.5  $\mathbf{U}_{appr}$ 와  $\mathbf{u}_{a}$ ,  $\mathbf{u}_{b}$  예시 이미지

$$\sum_{i=1}^{m} k_i \mathbf{v}_{ia}^L = \mathbf{u}_a \tag{9}$$

Displacement field 추정 식에서  $\mathbf{u}_{a}$ 와  $\mathbf{v}_{ia}^{L}$  항을 뽑아내면 수식 (9)를 얻을 수 있다. 이 식에서 벡터 m개의 식과 m개의 미지수  $k_{i}$ 가 존재하기 때문에, 연립방정식을 풀어주면 모드의 계수인  $k_{i}$  값을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1a}^L & \mathbf{v}_{2a}^L & \cdots & \mathbf{v}_{ma}^L \end{bmatrix}^{-1} \mathbf{u}_a$$
(10)

이렇게 계산한 모드의 계수와 Mode Shape을 사용하여 구조물 전체의 displacement field를 추정할 수 있고, 여기에 모델의 강성행렬을 곱해주어 결과적으로 구조물 전체에 가해 지는 하중을 추정하였다.

$$\mathbf{U}_{appr} = \sum_{i=1}^{m} k_i \mathbf{v}_i^L \tag{11}$$

$$\mathbf{KU}_{appr} = \mathbf{R}_{appr} \tag{12}$$

수식 (11), (12)에서 U<sub>appr</sub>는 구조물의 displacement field 추정 값을, R<sub>appr</sub>는 구조물 에 가해지는 하중의 추정 값을 의미한다. 센서를 통해 구조물의 displacement를 바로 측정할 수 있다면 해당 데이터를 바로 Mode Shape database로서 사용하는 것이 가능하다. 하지만 일반적으로 사용되는 센서는 구조물의 displacement가 아닌 strain을 측정하기 때문에, strain 을 사용하여 하중을 추정하는 방법 또한 정리하였다.

Displacement 데이터인 각 Mode Shape들을 strain 값으로 변환시키면, *m* 개의 모드 와 각 모드에 해당하는 strain field를 계산할 수 있다. 구조물의 변형은 각 Mode Shape들의 선형 결합으로 나타낼 수 있고, 각 모드들의 strain 데이터 또한 같은 관계성을 지닌다. 아래 의 식에 Mode Shape과 displacement field 추정 값 사이의 관계 및 모드의 strain 데이터와 strain field 추정 값 사이의 관계를 나타내었다.

$$\sum_{i=1}^{m} k_i \mathbf{v}_i^L = \mathbf{U}_{appr}$$
(13)

$$\sum_{i=1}^{m} k_i \mathbf{\varepsilon}_i^L = \mathbf{\varepsilon}_{appr}$$
(14)

Strain 값은 displacement 값을 통해서 계산이 가능하다. 하지만 구조물의 FE Model 에서, strain과 displacement의 관계를 나타내는 strain-displacement 행렬은 동일한 node라 고 하더라도 element가 다를 경우 다른 값을 가진다. 때문에 strain을 계산하기 위해선 displacement field로부터 각 element의 displacement값을 얻어내 element별로 나눠서 계산 할 필요가 있다. 수식 (15)는 한 element 내의 natural 좌표계에서 displacement와 strain의 관 계를 나타내고 있다.

$$(\mathbf{\varepsilon}_{i}^{L})^{(k)} = \mathbf{\varepsilon}^{(k)}(r, s, t) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ 2\varepsilon_{xy} \\ 2\varepsilon_{yz} \\ 2\varepsilon_{zx} \end{bmatrix} = \mathbf{B}^{(k)}(r, s, t)\mathbf{U}^{(k)} = \mathbf{B}^{(k)}(r, s, t)(\mathbf{v}_{i}^{L})^{(k)}$$
(15)

여기서  $k \doteq$  element의 번호,  $r, s, t \doteq$  natural 좌표계에서의 위치 정보,  $\mathbf{B}^{(k)}(r, s, t)$ 는 element k의 Strain-displacement 행렬을 의미하며,  $\mathbf{\epsilon}^{(k)}(r, s, t)$ 는 element k의 r, s, t지 점에서의 strain 값을 의미한다.  $\mathbf{U}^{(k)}$ 는 element k에 존재하는 node들의 displacement 값 을,  $\mathbf{\epsilon}_{i}^{L}$ 는 i번째 모드의 strain 데이터를 나타낸다.

Strain값은 natural 좌표계에서의 위치 정보인 *r*,*s*,*t* 값에 따라 달라지기 때문에, 실제 구조물을 대상으로 하중 추정을 진행할 경우 센서의 위치에 대응하는 element 및 *r*,*s*,*t* 값을 사용해야 한다. 그림3.6에선 element의 natural 좌표계와 *r*,*s*,*t* 값에 따른 strain의 위치를 표 시하였다.



그림 3.6 element k의 natural 좌표계 및 r,s,t 값에 따른 strain 지점

모든 element로부터 계산한 strain값을 사용하면 각 모드의 strain field를 구할 수 있고, strain field들과 측정한 strain값들을 사용하여 아래와 같이 사용한 모드들의 계수를 구할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{m} k_{i} \mathbf{\varepsilon}_{i}^{L} = \sum_{i}^{m} k_{i} \begin{bmatrix} \mathbf{\varepsilon}_{ia}^{L} \\ \mathbf{\varepsilon}_{ib}^{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{\varepsilon}_{a} \\ \mathbf{\varepsilon}_{b} \end{bmatrix} = \mathbf{\varepsilon}_{appr}$$
(16)

$$\sum_{i=1}^{m} k_i \mathbf{\varepsilon}_{ia}^L = \mathbf{\varepsilon}_a \tag{17}$$

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1a}^L & \mathbf{v}_{2a}^L & \cdots & \mathbf{v}_{ma}^L \end{bmatrix}^{-1} \boldsymbol{\varepsilon}_a$$
(18)

Strain field를 통해 구한 모드의 계수와 Mode Shape을 통해 대상 구조물의 displacement field를 추정할 수 있고, 추정한 displacement field를 통해 구조물 전체에 가해 지는 하중을 추정할 수 있다.

## 제 4 장 수치 예제

## 4.1 Rectangular Box



그림 4.1 Rectangular Box의 형상 및 하중 조건

하중 추정 방법론을 검증하기 위해, Rectangular Box에 하중을 가해주는 상황을 가정 하였다. 위 그림은 Rectangular Box의 기하학적 구조, 하중의 위치, 그리고 경계조건에 대 해 나타내고 있다. 경계조건은 바닥과 닿은 아랫면이 All fixed 된 상태이고, 윗면의 4개 지 점에 각각 z방향 하중이 위로 가해지는 상태이다. FE model에선 하중이 가해지는 4개 지점 을 Node 1~4로 명명하였다.



그림 4.2 Rectangular Box의 FE 모델

4개의 node에 각각 100N의 z-force를 가해주거나 하중을 가해주지 않는 방식으로 하중 상황을 가정하였다. 하중이 전혀 가해지지 않는 상황을 제외하고 15개의 하중 상황이 존재하며, 이 15개 상황을 통해 Mode Shape Database를 생성하였다.







22

그림 4.3에는 Mode Shape Database에 POD를 적용시켜 얻은 Singular Value의 그래 프가 표시되었다. 그래프에 표시된 것처럼, 본 해석에선 Singular Value 값이 높은 4개의 모드 를 사용하여 하중을 추정하였다. 그림 4.4는 사용된 4개 모드들의 Mode Shape을 나타내고 있다.



그림 4.5 Test case에서의 하중 상황

Test case로는 Node 1~4에 각각 100, 50, 100, 200 N의 하중이 가해진 상황을 설정 하였다. 센서 데이터로는 하중이 가해지는 4개 Node의 z-displacement 데이터를 사용하였 다. Test case의 센서 데이터와 POD를 통해 얻은 4개의 Mode Shape을 사용하여 4개의 Node 에 가해지는 하중을 아래와 같이 추정하였다.

Node	1	2	3	4
Reference Force (N)	100	50	100	200
Approximated Force (N)	99.7324	49.8128	99.7020	199.722
Error (%)	0.2676	0.3744	0.2980	0.1390

표 4.1 Rectangular Box 예제에서 추정한 하중 및 오차

### 4.2.1 블록 운반 공정



그림 4.6 E53PC 블록 운반 공정 모델의 형상



그림 4.7 와이어를 제거한 E53PC 운반 모델 및 새로 가해준 구속조건 위치 (우측: -XY view)

기존 E53PC 운반 공정의 모델에는 그림 4.6과 같이 와이어도 truss 요소를 사용하여 모델링이 되어있다. 하지만 실제 E53PC 블록의 운반 공정에선 와이어의 길이를 조정하며 균 형을 유지하기 때문에 truss 요소를 사용하여 해석을 진행하면 오차가 발생하게 된다. 때문에 길이가 불확실한 와이어를 삭제하고, 와이어와 E53PC 블록이 만나는 지점에 그림 4.7과 같이 구속조건을 가해주었다. E53PC 운반 공정에선 블록이 기울어진 각도를 변화시키며 하중 조건을 변화시켜 주 었고, 블록이 기울어지지 않은 상황에 블록이 10° 기울어진 상황(8개)과 20° 기울어진 상황(8 개)를 추가하여 총 17개의 Mode Shape Database를 생성하였다.



그림 4.8 E53PC 운반 공정에서 Singular Value 값 그래프

위 그래프는 Mode Shape Database에 POD를 적용시켜 얻은 Singular Value의 그래프로, 그래프에 표시된 대로 총 3개의 Singular Value 값을 뽑아 이에 대응하는 3개의 벡터를 Mode Shape으로서 사용하였다.



그림 4.9 E53PC 운반 공정에서 센서 데이터로 사용한 Node의 위치

Test Case로는 모델이 x방향으로 5° 기울어진 상황을 사용하였다. 그림 4.9에는 센서의 위치로서 displacement 데이터를 알고 있다고 가정하여 사용한 부분을 표시하였다. 센서의 위치는 Mode Shape Database를 생성할 때 변형이 많이 일어났던 node 중 세 지점을 임의로 선택하여 사용하였다. Mode Shape과 일부 지점의 변형 데이터를 통하여 모델 전체에 가해지는 하중을 계산할 수 있었다. 그림 4.10에서는 각각 test case와 추정 하중(z-force)의 분포를 나타내고 있다.



그림 4.10 E53PC 모델 전체에 가해지는 z방향 하중 비교

블록 운반 공정에서는 와이어를 제거하고 와이어가 모델에 연결된 node를 그림 4.7 에 표시된 것처럼 구속조건으로써 사용하였기 때문에, 해당 node에 가해지는 reaction force 를 계산하여 이를 와이어의 장력 추정 값으로 사용하였다. 모델 전체 자유도를 나타내는 강 성행렬과 추정한 displacement 값을 사용하여 reaction force를 계산하였다. 그림 4.11는 구 속조건이 가해지는 9개의 node에서 z방향 reaction force의 오차를 나타낸다.



그림 4.11 구속조건이 가해지는 지점의 z-reaction force 오차

#### 4.2.2 블록 조립 공정

하중 추정 방법론에 있어 센서의 위치에 따른 하중 추정 값의 차이, displacement를 사용한 방식과 strain 값을 사용한 방식의 하중 추정 값 차이에 대해서 알아보기 위해, 본 조립 공정에서는 센서의 위치 및 사용하는 센서 데이터를 변경시키며 3가지 case로 하중 추정을 시도하였고, 이에 따른 결과를 정리하였다.

(1) Displacement를 사용한 하중 추정



그림 4.12 E53PC 블록 조립 공정 모델의 형상 및 조립 하중 위치



그림 4.13 E53PC 블록 조립 공정 모델의 구속조건 위치

그림 4.12과 그림 4.13에는 E53PC 블록의 조립 공정 모델의 형상과 구속조건, 가능한 조립 하중의 위치가 표시되어 있다. 그림 4.13에 표시된 9개의 구속조건 위치에 All fixed 구속조건을 가하면 과구속이 발생하여 모델이 실제 구조물과 다른 변형 형상을 나타낼 수 있기 때문에, 3번 지점엔 x,z translation fixed, 9번 지점엔 x,y,z translation fixed, 나머지 7개의 지점에는 z translation fixed의 구속조건을 가하여 해석을 진행하였다.

E53PC 블록의 조립 공정 모델에선 조립 하중이 가해지는 12개의 node가 존재한다. 각 하중 상황마다 한 개의 하중만 고려를 하였고, +z방향 하중(1000, 2000)과 -z방향 하중(1000,2000) 총 4종류의 하중을 12개의 node에 가해주며 조립하중이 가해지지 않는 상황을 포함하여 총 49개의 하중 상황을 가정하여 Mode Shape Database를 생성하였다.



그림 4.14 E53PC 조립 상황에서 전체 Singular Value 값 그래프



그림 4.15 E53PC 블록 조립 공정에서 가장 높은 두 값을 제외한 Singular Value 그래프

그림 4.14 및 4.15의 그래프는 Mode Shape Database에 POD를 적용시켜 얻은 Singular Value의 그래프로, 그래프에 표시된 대로 총 13개의 Singular Value 값을 뽑아 이에 대응하는 13개의 벡터를 Mode Shape로서 사용하였다.



그림 4.16 E53PC 조립 공정 test case의 조립 하중 위치

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Reference Force(N)	-2400	-1200	-800	800	1200	2400	-1000	-1500	1500	1000	10000	10000

표 4.2 E53PC 조립 공정 test case의 조립 하중 크기



그림 4.17 센서 데이터로 사용한 Node의 위치

Test Case로는 각 Node에 임의의 하중을 가해준 상황을 사용하였고, 그림 4.16 및 표 4.2에 적용한 하중의 위치 및 크기를 설명하였다. 그림 4.17에는 센서의 위치로서 displacement 데이터를 알고 있다고 가정하여 사용한 부분을 표시하였다. 센서의 위치는 FE 모델에서 변형이 가장 많이 일어나는 지점들 중 일부를 임의로 골라 사용하였다. Mode Shape과 일부 지점의 변형 데이터를 통하여 12개 Node에 가해지는 조립하중을 추정하였고, 그림 4.17에 추정한 조립하중의 오차를 표시하였다.



그림 4.18 조립 하중 지점의 추정 하중 오차

#### (2) 센서의 위치를 변경한 하중 추정

센서의 위치가 하중 추정에 영향을 미치는지 알아보기 위하여 같은 test case에서 센서의 위치로서 사용하는 지점만을 변경하여 하중을 다시 추정하였다. 이때 센서의 위치는 조립하중이 가해지는 Node 주변의 Node들 중에서 임의로 골라 사용하였다. 변경된 센서의 위치를 사용하여 추정한 조립하중의 오차를 앞서 추정한 조립하중의 오차와 함께 그림 4.20에 표시하였다.



그림 4.19 변경된 센서 데이터 Node의 위치



그림 4.20 센서 위치에 따른 조립 하중 지점의 추정 하중 오차

#### (3) Strain 값을 사용한 하중 추정

측정값으로 Displacement가 아닌 strain 데이터를 사용하여 하중을 추정하는 방법론 검증을 위해 (1)과 같은 case에서 측정 데이터만을 strain으로 바꾸어 하중을 추정하였다. 그 림 4.15에 표시된 Singular Value를 사용하였고, 사용한 조립하중의 크기 및 위치는 각각 그 림 4.16 및 표 4.2에, 센서의 위치는 그림 4.17에 표시되었다. Strain 데이터를 사용하여 추정 한 하중을 표 4.3에 표시하였고, displacement 및 strain 데이터를 사용하여 추정한 하중의 오 차값을 비교하여 그림 4.21에 표시하였다.

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Reference	-2400	-1200	-800	800	1200	2400	-1000	-1500	1500	1000	10000	10000
하중(N)	2400	1200	000	000	1200	2400	1000	1500	1500	1000	10000	10000
추정	-2342	-1137	-737.2	859 5	1227	2428	-973 5	-1477	1529	1029	10030	-9975
하중(N)	2312		, 37.E	000.0		2.20	5, 5.5	, ,	.323	1025		5575

표 4.3 E53PC 조립 공정에서 strain을 통해 추정한 하중 값



그림 4.21 Strain 및 Displacement를 사용하여 추정한 조립하중 값의 오차

## 4.3 선박 데크 블록(E51GC)

4.3.1 블록 운반 공정



그림 4.22 E51GC 블록 운반 공정 모델의 형상



그림 4.23 와이어를 제거한 E51GC 운반 모델 및 새로 가해준 구속조건 위치 (우측: +XY view)

기존 E51GC 운반 공정의 모델에는 그림 4.6과 같이 와이어도 truss 요소를 사용하여 모델링이 되어있다. E53PC 모델과 같은 이유로 길이가 불확실한 와이어를 삭제하고, 와이어 와 E51GC 블록이 만나는 지점에 그림 4.7과 같이 구속조건을 가해주었다. E51GC 운반 공정 에서도 블록이 기울어진 각도를 변화시키며 하중 조건을 변화시켜 주었고, 블록이 기울어지 지 않은 상황에 블록이 10° 기울어진 상황(8개)과 20° 기울어진 상황(8개)를 추가하여 총 17 개의 Mode Shape Database를 생성하였다.



그림 4.24 E51GC 운반 공정에서 Singular Value 값 그래프

위 그래프는 Mode Shape Database에 POD를 적용시켜 얻은 Singular Value의 그래프로, 그래프에 표시된 대로 총 3개의 Singular Value 값을 뽑아 이에 대응하는 3개의 벡터를 Mode Shape으로서 사용하였다.



그림 4.25 E51GC 운반 공정에서 센서 데이터로 사용한 Node의 위치

Test Case로는 모델이 y방향으로 15° 기울어진 상황을 사용하였다. 그림 4.9에는 센서의 위치로서 displacement 데이터를 알고 있다고 가정하여 사용한 부분을 표시하였다. 센서의 위치는 모델의 구속조건 위치에서 거리가 먼 임의의 세 지점을 골라 사용하였다. Mode Shape과 일부 지점의 변형 데이터를 통하여 모델 전체에 가해지는 하중을 계산할 수 있었다. 그림 4.10에서는 각각 test case와 추정 하중(z-force)의 분포를 나타내고 있다.



블록 운반 공정에서는 와이어를 제거하고 와이어가 모델에 연결된 node를 그림 4.7 에 표시된 것처럼 구속조건으로써 사용하였기 때문에, 해당 node에 가해지는 reaction force 를 계산하여 이를 와이어의 장력 추정 값으로 사용하였다. 모델 전체 자유도를 나타내는 강 성행렬과 추정한 displacement 값을 사용하여 reaction force를 계산하였다. 그림 4.11는 구 속조건이 가해지는 36개의 node에서 z방향 reaction force의 오차를 나타낸다.



그림 4.27 구속조건이 가해지는 지점의 z-reaction force 오차

### 4.4 결과 분석

#### 4.4.1 오차 원인 추정

조립 공정의 경우, 0.001% 이내의 오차로 하중 추정이 가능하였던 운반 공정과 달리 최대 10% 까지의 추정 하중 값 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 운반 공정과 조립 공 정 모두 동일한 하중 추정 방법론을 적용하였고, Mode Shape database를 뽑는 방식에서만 차이점이 존재하였다.

조립 공정에서 Mode Shape database를 뽑는 과정에서 조립하중만 고려한 것이 아 니라 자중 또한 같이 고려하였는데, 자중으로 인한 변형이 지배적인 변형이었기에 조립하중 을 추정하는 데에 오차가 발생한 것으로 판단하였다. 또한 실제로 센서를 통해 하중을 추정 할 경우, 이미 자중이 가해지고 있는 상황에서 센서를 부착하기 때문에 자중을 고려하지 않 는 편이 정확한 하중 추정이 가능하다고 판단하여 조립하중만을 고려한 Mode Shape database를 사용하여 하중 추정을 진행하였다.



그림 4.28 자중을 제거한 E53PC 블록 조립 공정에서의 Singular Value

그림 4. 28에 각 모드들의 Singular Value값과 선택한 모드들을 표시하였다. 12개의 모드를 사용하여 하중을 추정하였고, 0.001% 이내의 오차로 조립하중을 추정하였다. 표 4.4 에 E53PC 조립 공정을 대상으로 조립하중 만을 사용하여 Mode Shape database를 결정하 였을 때의 하중 추정 값을 나타냈고, 그림 4.22에는 자중의 고려 여부에 따른 조립하중 추 정 값의 오차를 비교하여 표시하였다.

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Reference	-2400	-1200	-800	800	1200	2400	-1000	-1500	1500	1000	10000	10000
아공(N)												
추정	-2400	-1200	-800.0	800.0	1200	2400	-1000	-1500	1500	1000	10000	-10000
하중(N)												

표 4.5 E53PC 조립 공정에서 자중을 고려하지 않고 추정한 하중 값



그림 4.29 자중 고려 유무에 따른 추정 조립하중 값의 오차

#### 4.4.2 모드 선택

E53PC 블록 및 E51GC 블록의 하중 추정 과정에서, Mode Shape은 snapshots 에 Singular Value Decomposition(SVD)를 적용시켜서 나온 singular value 값이 높은 것들을 골라서 사용하였다. 이 때 블록의 운반 공정에서는 대상 구조물과 관계없이 3 개의 모드 만으로 하중 추정이 가능하였지만, E53PC 블록의 조립 공정에서는 13 개의 모드를 사용하여 하중 추정이 가능하였다.

Mode Shape 을 결정하기 위해 사용한 Proper Orthogonal Decomposition 기법은 snapshots 에서 경향성이 높은 데이터를 모드로서 추출하는 방식으로, 독립적인 데이터가 다양할수록 많은 수의 모드가 나타나게 된다. 때문에 모드 개수의 차이는 하중 상황으로서 가정한 하중들의 차이로 인한 것이라고 할 수 있다. 이를 검증하기 위해 E53PC 블록의 조립 공정 모델을 대상으로 조립 하중의 개수를 변화시키며 총 4 가지의 상황에서 하중 추정을 진행하였다.



그림 4.30 조립하중의 개수에 따른 Singular Value

그림 4.23 은 E53PC 블록의 조립 공정에서 고려한 조립하중의 수에 따른 Singular Value 그래프를 나타낸다. 선택한 Singular Value 값들의 비교를 위해, 각 상황에서 지배적으로 나타나 높은 Singular Value 를 가진 첫번째 모드는 제외하였다. 그래프를 통해 알 수 있듯이, 하중 추정을 위해 필요한 모드의 수는 고려한 조립하중의 수와 동일하게 나타난다. 각 블록의 운반 공정에서는 조립하중이 존재하지 않고 자중의 방향만이 변하기 때문에 자중이 x,y,z 방향의 독립적인 하중으로 분해되어 3 개의 Mode Shape 이 나타나고, 조립 공정에서는 각 조립하중으로 인해 조립하중과 같은 수의 Mode Shape 이 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 4.31 에는 사용한 조립하중 수에 따른 조립하중 추정 오차를 나타내었다.



그림 4.31 조립하중의 개수에 따른 조립하중 추정 오차

#### 4.4.3 하중 모드를 사용한 하중 추정

본 연구에서 제시한 하중 추정 방법론에선 고유진동수에 따른 Mode Shape 을 사용하지 않고, 구조물에 가해질 수 있는 하중 상황을 가정하여 이 때 발생하는 변형 형상을 Database 로 사용하여 POD 를 통해 Mode Shape 을 계산하였다. 동일한 방식으로 변형 형상들이 아닌 하중 상황 자체에 POD 를 적용해주면 지배적인 하중 모드들을 획득할 수 있고, 이 하중 모드들의 선형 조합으로 하중을 추정하는 것이 가능하다. 센서 값과의 대조를 위해선 하중 모드를 결국 displacement 혹은 strain 값으로 변환할 필요가 있다. 하지만 기존 방법론에선 모든 Mode Shape Database 를 대상으로 displacement 혹은 strain 값을 계산했던 반면에, 하중 모드를 사용하면 선택된 일부의 모드에 대해서만 계산을 진행하면 되기 때문에 계산 시간적인 측면에서 이점이 있다. 수식 (19), (20)은 하중모드 및 이에 따른 displacement field 를 계산하는 과정을 나타낸다.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{1} \mathbf{R}_{2} \cdots \mathbf{R}_{n} \end{bmatrix} = \mathbf{F}^{L} \mathbf{S} \left( \mathbf{F}^{R} \right)^{T}$$
$$= \sum_{i=1}^{n} \mathbf{f}_{i}^{L} S_{i} \mathbf{f}_{i}^{R}$$
$$\approx \sum_{i=1}^{k} \mathbf{f}_{i}^{L} S_{i} \mathbf{f}_{i}^{R} (k < n)$$
$$\mathbf{u}_{i}^{L} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{f}_{i}^{L}$$
(19)

수식 (19), (20)에서  $\mathbf{f}_i^L$ 는 POD 를 통해 얻어낸 i 번째 하중 모드,  $\mathbf{u}_i^L$ 은 i 번째 하중 모드에서의 displacement field 를 나타낸다.  $\mathbf{u}_i^L$ 를 i 번째 Mode Shape 으로서 사용하면, 기존 방법론과 동일한 방식으로 하중을 추정할 수 있다. 4.4.1 의 자중을 고려하지 않은 E53PC 블록의 조립 공정을 대상으로 Mode Shape과 하중 모드를 사용하여 하중을 추정하였다. 추정한 하중 값의 오차를 비교하여 그림 4.31 에 나타냈다.



그림 4.32 하중 모드 및 Mode Shape 을 사용하여 추정한 조립하중 오차

## 제 5 장 결론

구조물의 변형이나 하중, 응력 등을 추정하는 기술은 구조물 진단 기술로서 매우 빠 른 속도로 발전하고 있다. 대형 구조물 중에서도 선박은 제조 단계에서 다양한 변형이 발생 하고 이는 추가 작업 및 생산력 저하로 경쟁력을 낮추는 주요한 요인이기 때문에, 구조물 진 단 기술의 적용이 필수적이다. 하지만 제조 공정 단계의 선박은 완성된 구조물이 아니기 때문 에 다량의 센서를 부착하는 것이 불가능하고, 선박 블록이 받는 하중의 특성 상 국부적인 변형 이 발생하는 경우가 많기 때문에 기존의 구조물 진단 기술들은 적용하기 힘들다는 단점이 있다.

본 연구에서는 구조물에 부착하는 센서의 수를 최소화하는 것을 우선으로 하였고, 적 은 수의 센서를 사용하여 구조물 전체의 변형 및 하중을 추정하는 방법론을 개발하였다. 구조물 이 받을 수 있는 하중 상황을 가정하여 구조물의 가능한 변형 형상들로 이루어진 Mode Shape Database를 생성하였고, 이에 Proper Orthogonal Decomposition을 적용하여 구조물의 거동 을 표현할 수 있는 최소한의 Mode Shape을 추출하였다. 구조물의 변형 형상을 이 Mode Shape의 선형 조합을 통해서 표현하였고, Mode Shape과 동일한 개수의 센서를 사용하여 각 Mode Shape의 계수를 계산할 수 있도록 하였다. 결과적으로 구조물의 변형 형상을 추정하 였고, 이를 통해 구조물 전체에 가해지는 하중을 추정하였다.

하중 추정 방법론에 대해서 선박 블록의 FE Model을 사용하여 검증을 진행하였다. 블록 운반 공정에서는 선박 전체에 가해지는 하중을 0.001% 이내의 오차로 추정하였고, 블록 조립 공정에서는 조립 하중을 10% 이내의 오차로 추정하였다. 조립 공정에서 오차가 발생하 였던 원인은 자중이 지배적인 하중으로 작용하였기 때문이었고, 실제 상황을 고려하여 자중 을 제거한 해석에서는 조립 공정도 운반 공정과 마찬가지로 0.001% 이내의 오차로 조립하중 추정이 가능하였다. 동일한 예제에 대해 센서의 위치만 변경하여 해석을 진행한 경우에는 두 하중추정 결과값이 유의미한 차이를 보이지 않았다. 본 연구에서 제안한 하중 추정 방법론에 있어서 중요한 요소는 센서의 위치가 아닌 Mode Shape Database의 선택 방식과 사용하는 Mode Shape의 개수인 것으로 나타났다. 제조 공정에 따라 하중 추정에 필요한 모드의 개수 가 다르게 나타났는데, 이는 Mode Shape Database로서 고려해준 독립적인 하중 상황의 수 에 따라 달라지는 것으로 확인되었다. Mode Shape 대신 하중 상황에 POD를 적용시켜 하중 모드를 생성하였고, 이를 통해 하중 추정을 진행하였다. Mode Shape을 사용하였을 때와 같 이 0.001% 이내의 오차로 하중을 추정할 수 있었고, Mode Shape을 사용한 방법론보다 계산 시간에 있어 이점이 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

[1] Tessler, A.; Spangler, J.L. A Variational Principal for Reconstruction of Elastic Deformation of Shear Deformable Plates and Shells; NASA TM-2003-212445; NASA Langley Research Center: Hampton, VA, USA, 2003.

[2] Tessler, A.; Spangler, J.L. A least-squares variational method for full-field reconstruction of elastic deformations in shear-deformable plates and shells. Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 2005, 194, 327–339.

[3] Kefal, A.; Oterkus, E. Isogeometric iFEM Analysis of Thin Shell Structures. Sensors 2020, 20, 2685. https://doi.org/10.3390/s20092685

[4] Esposito, M.; Gherlone, M. Composite wing box deformed-shape reconstruction based on measured strains: Optimization and comparison of existing approaches. Aerosp. Sci. Technol. 2020, 99, 105758.
[5] OBOE, Daniele, et al. Shape sensing of a complex aeronautical structure with inverse finite element method. Sensors, 2021, 21.4: 1388.

[6] OBOE, Daniele, et al. Comparison of strain pre-extrapolation techniques for shape and strain sensing by iFEM of a composite plate subjected to compression buckling. Composite Structures, 2021, 262: 113587.

[7] BOGERT, Philip; HAUGSE, Eric; GEHRKI, Ralph. Structural shape identification from experimental strains using a modal transformation technique. In: *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. 2003. p. 1626.

[8] DVORKIN, Eduardo N.; BATHE, Klaus-Jürgen. A continuum mechanics based four-node shell element for general non-linear analysis. *Engineering computations*, 1984.

[9] WANG, Zuo-Cai, et al. Strain modes based dynamic displacement estimation of beam structures with strain sensors. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23.12: 125045.

[10] ZHANG, Qing; FU, Xing; REN, Liang. Deflection estimation of beam structures based on the measured strain mode shape. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30.10: 105003