

Manbridge Crane의 지진해석에 관한 연구

윤 정 방* 박 창 호**

1. 서론

본 연구용역에서는 반도기계주식회사의 의뢰에 의거하여 Manbridge Crane의 지진하중에 대한 구조물의 안전성을 평가하였다. 구조해석은 유한 요소 모형을 사용하여 사하중, 활하중 및 OBE (Operating Basis Earthquake)와 SSE(Safe Shut-down Earthquake)의 지진하중에 관한 해석을 수행하였다. Crane설치지점의 층응답스펙트럼을 입력으로 한 응답스펙트럼해법으로 지진해석을 수행하였다. Trolley의 위치와 정격하중의 유무에 따라서 5개의 구조모형을 작성하여 해석을 수행하였으며, 지진해석에는 35개의 자유진동모드가 고려되었다.

구조해석을 통하여 1) 구조부재의 과도응력 발생여부, 2) 보강재의 좌굴 가능성, 3) Hoist Rope의 안전성, 4) Crane의 전도의 가능성 및 Seismic Lug의 안전성, 5) 지진하중에 대한 제동력, 6) Crane의 주행 Rail로부터의 탈선여부, 7) Traversing Rail의 수직처짐, 8) 주행 Rail 및 End Stopper의 Anchor Bolt의 안정성, 9) Fuel Basket과 Handrail의 안전성을 검토하였다. 해석 결과를 바탕으로 설계시방서에서 제시한 모든 설계요구조건을 만족시킬 수 있도록 수직 Frame의 보강부재를 보강하고, Hoist Rope용량을 증가시키도록 제안하였다.

본 연구용역의 용역비는 총 9,000,000원이었으

며, 연구기간은 1991년 4월 1일부터 3개월간이었으며, 연구책임자는 필자이었다.

2. 구조물의 모형화

2.1 구조물의 개요

Manbridge Crane의 구조는 그림1과 같이 상부의 Traversing Rail Support구조, 2개의 수직 Frame 구조, Saddle부재, Trolley로 크게 나눌 수 있다. 이들 주요 부재에 대한 기능은 다음과 같다.

1) Traversing Rail Support구조: 상부에 위치하며, Traversing Rail을 지지하고 있으며 두개의 수직 Frame구조에 의해 지지되어 있다.

2) 수직Frame구조: 상부에 설치된 Traversing Rail Support구조를 지지하는 두개의 수직 Frame 구조로서, 4개의 Leg, 수평보강부재, X자형과 K자형 보강부재로 구성되어 있다. 각각 Saddle 위에 위치하여, Inspection Deck를 지지한다.

3) Saddle부재: Saddle은 수직 Frame구조를 지지하는 2개의 수평 부재로서, 두개의 Saddle 사이에 설치된 Travelling Drive Assembly에 의해 바닥에 설치된 Travelling Rail위를 주행한다.

4) Trolley: 최대 정격하중(Hoisting Load) 1ton에 대하여 설계된 Hoist와 이의 구동 Mechanism으로 구성되어 있고, Traversing Rail에 매달리어 주행한다.

*정회원, 한국과학기술원 토목공학과, 교수

**정회원, 한국과학기술원 토목공학과, 박사과정

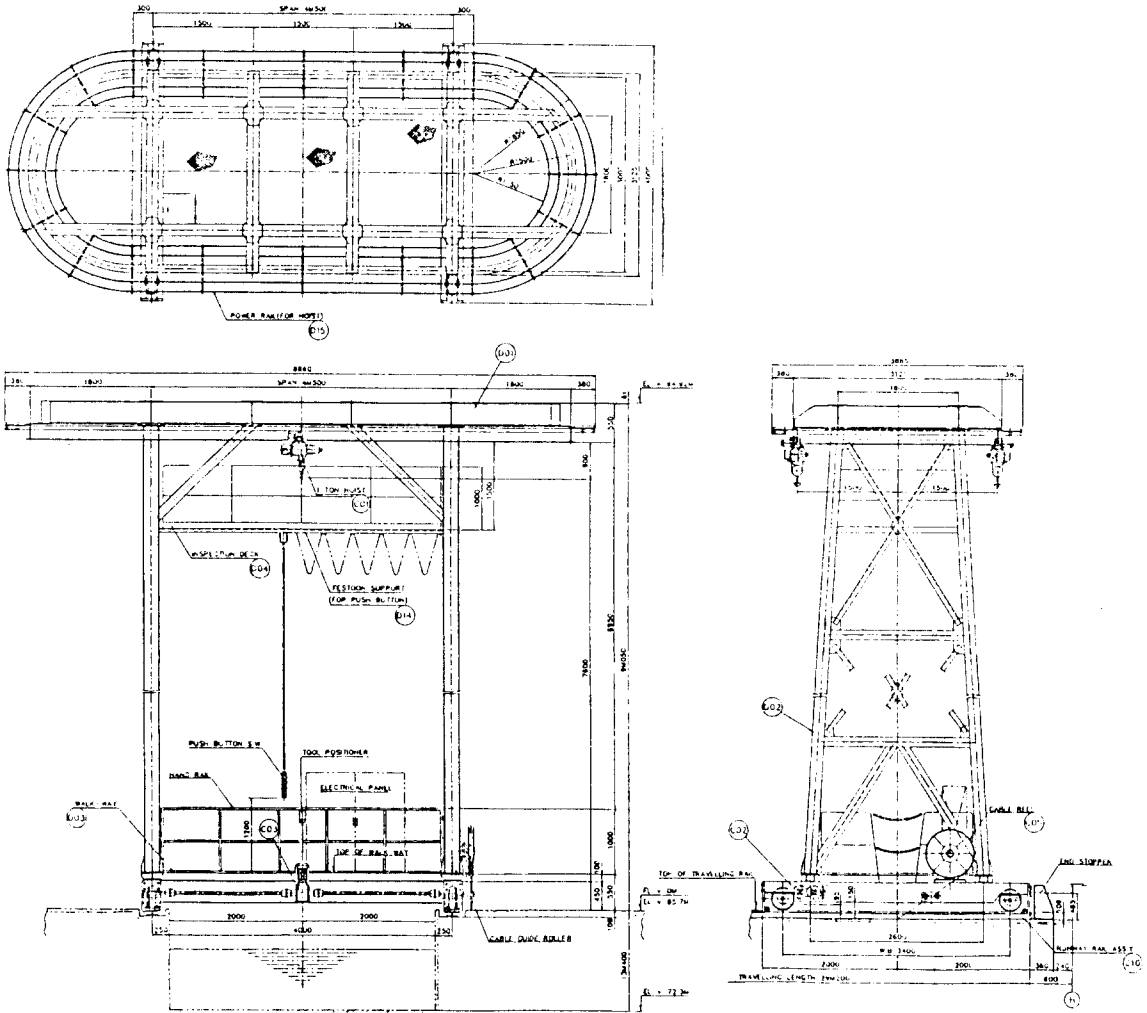


그림 1. Manbridge Crane의 General Assembly Drawing

2.2 전산해석모형

Traversing Rail상에서의 Trolley의 위치와 정격하중의 유무에 따라 다음과 같은 다섯가지의 구조모형에 대해 해석을 수행하였다.

1) Model I : Trolley가 Traversing Rail의 직선부분의 중앙부에 위치하고, 정격하중이 포함된 경우이다. 정격하중에 의한 질량이 Trolley의 중심으로부터 1m 하부에 위치하는, 운영조건중 최악의 경우를 고려하도록 했다. 이 때에 정격하중의 수직운동과 수평방향으로의 Pendulum운동 효과를 고려하였다.

2) Model II : Model I과 유사하나 정격하중이 포함되지 않는 경우이다.

3) Model III : Trolley가 Traversing Rail의 직선부분의 한쪽 단부에 위치하며, 정격하중이 포함된 경우이다. 구조모형에서, 절점, 보요소, 각 요소의 단면 계수, 질량 등을 Model I과 동일한 조건으로 적용하였으나, Trolley와 정격하중의 위치를 Traversing Rail의 직선부분의 단부로 변경하여 해석하였다.

4) Model IV : Model III과 유사하나 정격하중이 포함되지 않는 경우이다.

5) Model V : Trolley가 Traversing Rail에서 주행 방향의 직각방향으로 가장 멀리 이동한 위치인, Traversing Rail의 곡선부분의 중앙부에 위치

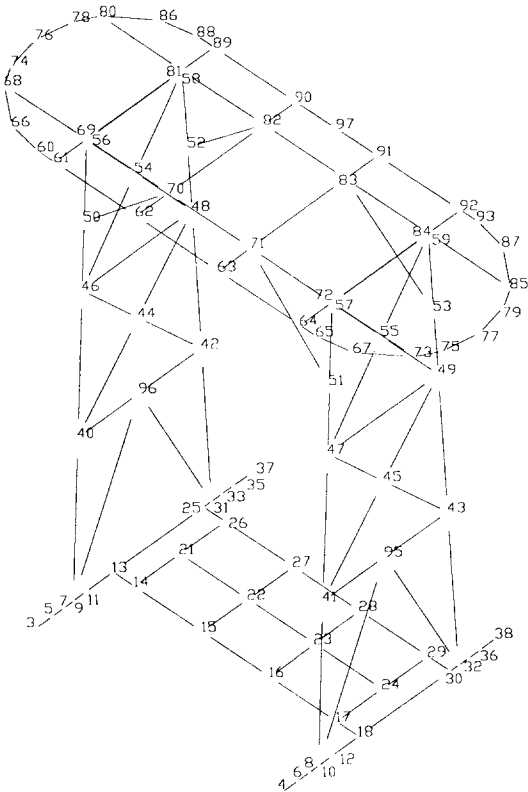


그림 2. Model I의 구조해석모형과 Node Numbering

하고, 정격하중이 포함되지 않는 경우이다. 구조모형의 절점, 보요소, 각 요소의 단면계수, 그리고 Crane의 장치와 부품의 질량 조건을 Model II와 같이 적용시켰다.

Manbridge Crane Model 중에 Model I을 그림 2에 나타내었다. Saddle의 4개 Wheel Assembly에서의 경계조건은 ASME SECTION NOG-4000에 따라 정하였다.

구조물의 질량은 첫째, 구조부재는 단면의 크기에 따라 결정되는 분포 질량으로 산정하였다. 둘째, 구조부재는 아니나 동적거동에 영향을 미칠 수 있는 부재는 집중질량으로 환산하여 적용시켰다. 동적 해석에서는 Rope 및 Hook Block과 권상하중의 Pendulum 영향을 고려하였다.

2.3 자유진동해석

동력학적 해석을 위해 Trolley의 위치와 정격하중의 유무에 따른 다섯가지 경우에 대한 35개의

자유진동수, 자유진동모드 및 모우드질량기여도 (Modal Mass Participation Factor: MPMF)를 구하였으며, Model I에 대한 모우드기여도가 큰 15개의 자유진동수와 모우드질량기여도를 표 1에 나타내었다.

표 1. 자유진동수(Model I)

Mode Number	Freq. (Hz)	MMPF (%)		
		X-DIR.	Y-DIR.	Z-DIR.
1	4.4E-01	0.00	10.05	0.00
2	4.9E-01	11.68	0.00	0.00
3	1.9E+00	48.92	0.00	0.00
4	8.1E+00	0.00	0.06	0.00
5	9.1E+00	0.00	43.38	0.14
6	1.4E+01	0.15	0.00	3.62
7	1.6E+01	6.20	0.02	0.02
8	1.6E+01	2.89	0.00	0.01
9	1.8E+01	0.00	11.80	0.00
10	2.1E+01	8.59	0.33	0.00
11	2.2E+01	4.05	0.12	24.46
12	2.8E+01	2.93	0.20	19.59
13	2.3E+01	0.04	0.79	0.69
14	2.4E+01	8.14	0.12	0.99
15	3.0E+01	0.00	1.21	18.10

2.4 응답 스펙트럼해석

Crane Support지점에서의 수평 및 수직 방향의 OBE와 SSE조건에 대한 응답스펙트럼(FRS)은 Technical Specification for Manbridge(KAERI-KOPEC)에 의거, OBE의 경우에는 감쇠비가 4%인 FRS, SSE의 경우 감쇠비가 7%인 FRS를 사용하였다. 응답스펙트럼해석은 진절에서 구한 35개의 자유진동수와 자유진동모드를 이용하여 수행하였다.

3. 해석 결과

초기설계에 대한 지진해석결과를 바탕으로 수정 보완한 최종설계에 대하여 내진설계조건 만족여부를 분석하기 위하여, 사하중과 함께 OBE, SSE의 지진하중에 대하여 해석을 수행하였다. 해석결과 얻어진 주요 구조 요소에 대한 최대응력, 좌굴하중, Rope Capacity 및 Uplift Force등에 대하여 검토하였다.

3.1 Structural Integrity

구조물에 발생한 최대조합응력(축응력+전단응력)은 표 2에 요약하였으며, 모든 부재에 발생하는 응력은 허용응력보다 작음을 알 수 있다. 여기서 S_y 는 항복강도이다.

표 2. 최대조합응력

Load Combination	Maximum Stress	Allowable Stress
Static	18 MPa	0.6 S_y (=149MPa)
Static+OBE	144 MPa	0.8 S_y (=198MPa)
Static+SSE	183 MPa	0.96 S_y (=238MPa)

3.2 좌굴에 대한 안전성

지진하중에 의한 수직 Frame 구조내의 K-Brace 및 X-Brace의 좌굴에 대한 안전성을 축하중과 휨모멘트의 영향을 고려하여 해석하였다. 사하중의 영향은 지진하중과 비교하여 미소하므로 고려하지 않았다. K-Brace의 경우 중앙점에서 만나는 다른 부재로 인하여 임계좌굴하중이 증가되는 효과를 고려하여 해석한 것이다. 위 효과를 고려할 경우 임계좌굴하중은 인장부재가 없을 때의 1.9배로 증가함을 알 수 있었다. 좌굴에 대한 해석 결과 보강재에 작용하는 최대하중은 임계하중의 43.7%로 좌굴에 대해 안전함을 알 수 있었다.

3.3 Hoist Rope Capacity

Hoisting Rope는 4줄로 구성되어 있는데, 각 하중 조건에 대한 4개의 Rope에 발생하는 최대인장력은 표 3에 요약된 바와 같다. 해석결과 Rope에 최대인장력이 발생하는 경우는, Trolley가

Traversing Rail의 직선부분의 중앙부에 위치하고 정격하중이 포함된 Model I의 경우이다. Rope의 응력은 정격하중의 수직운동에 지배적인 영향을 받는다.

3.4 지진 하중에 의한 Uplift Force

지진에 의해 Saddle부재에서 Wheel Assembly에 발생하는 최대 Uplift하중과 이에 의해 Seismic Lug에 발생하는 최대 응력은 아래의 표 4에 정리하였다. 표 4와 같이 설계된 Seismic Lug가 Uplift Force에 대해 안전함을 알 수 있다.

3.5 급제동에 의한 전도가가능성

Manbridge Crane이 주행중 갑작스런 제동으로 인하여 전도가 발생할 가능성은 지진에 의한 가능성보다 작다. 그러므로 지진의 영향에도 Seismic Lug가 안전하므로 급제동에 의한 전도는 일어나지 않을 것으로 판단된다.

3.6 지진하중에 대한 제동력

지진발생시 Crane이 미끌어지지 않게 하기 위하여, Saddle 부분의 Wheel Assembly에 필요한 최대 제동력은 35.39 KN이다. 현재의 Brake 장치는 자중과 정격하중의 합에 대하여 150%로 설계되었으며, 이는 149KN에 해당된다. 2개의 Saddle에 작용되는 제동력은 70.8KN이며 이는 제동장치의 능력보다 작으므로, 지진하중에 의하여 Manbridge Crane에 수평주행이 발생할 가능성은 없다고 판단된다.

표 3. Hoist Rope Forces(in 4-Wires) for Model I

하 중 종 류	Actual	Design Value	Safety Factor	Check
1) Static Load	9.92 KN	107.40 KN	10.84	O.K.
2) Static + OBE Load	12.74 KN	107.40 KN	8.44	O.K.
3) Static + SSE Load	15.84 KN	107.40 KN	6.76	O.K.

표 4. Maximum Stresses of Seismic Lug by Uplift Force

(단위 : MPa)

하 중 상 태	Uplift Force	전단 응력	허용전단응력	휨응력	허용휨응력
Static + OBE	60.15 (KN)	75.19	0.46 S_y =115	170.55	0.80 S_y =198
Static + SSE	68.83 (KN)	86.04	0.56 S_y =138	195.15	0.96 S_y =238

3.7 지진하중에 의한 탈선가능성

지진에 의해 Saddle 부분의 Wheel Assembly 에 주행방향에 직각인 수평방향으로 발생하는 최대탈선력은 24.48KN이다. 설계된 Seismic Guide Roller의 축에 작용하는 최대전단응력은 SSE조건에서 33.93MPa이고 OBE조건에서 22MPa 이며, 최대 휨응력은 SSE 조건에서 203.45MPa이고 OBE조건에서 132.22MPa이다. 이 최대전단응력과 휨응력은 모두 허용치보다 작으므로 안전하다.

3.8 지진하중에 의한 최대변위

Traversing Rail의 지진하중에 의한 최대 처짐은 Trolley와 정격하중이 Traversing Rail의 직선부분의 중앙에 위치한 Model I의 경우에는 0.0823mm로서 허용치 4.5mm보다 작다. Trolley와 정격하중이 Traversing Rail의 직선부분의 한쪽 끝에 위치한 Model III의 경우에는 0.0542mm로서 역시 허용치 3.6mm보다 작다.

3.9 Anchor Bolt

Anchor Bolt의 최대허용인장력은 132.9KN이고, 최대허용전단력은 SSE 조건에서 55.8KN, OBE 조건에서 45.9KN이다. 그리고 Anchor Bolt를 지지하는 Concrete의 최대허용인장력은 876.12KN이다. 따라서 지진하중에 의해 Anchor Bolt에 작용되는 최대 Uplift Force(=68.83KN)와 최대 탈선력(=24.48KN(SSE), 15.91KN(OBE))은 Anchor Bolt의 허용치를 초과하지 않는다. 그러므로 설계된 Anchor Bolt는 지진에 대해 안전함을 알 수 있다.

3.10 End Stopper

주행 Rail의 끝에 설치된 End Stopper는 각각 6개의 Anchor Bolt에 의해 Concrete 바닥에 고정되어 있다. End Stopper의 한개의 Anchor Bolt에 작용하는 전단력은 0.79ton이다. 이 전단력에 의한 전단응력은 32.87MPa로 허용전단응력 138MPa보다 작아 전단에 대해 안전함을 알 수 있다. Manbridge Crane의 충돌에 의해 Anchor Bolt에 발생하는 인발력(53.89KN)은 Uplift Force에 의해 Anchor Bolt에 작용되는 인발력(68.83KN)보다 작으므로 Anchor Bolt는 안전하다. End

Stopper를 구성하는 Plate에 발생하는 최대전단응력은 9.7MPa이고, 최대휨응력은 30MPa로서 모두 허용치보다 작다. 따라서 End Stopper는 Manbridge Crane의 충돌에 대해 안전하다.

3.11 Handrail

Fuel Basket과 Platform을 지지하고 있는 Handrail의 거동과 응력을 검토하기 위해, Handrail을 구조모형화하여 동적해석을 수행하였다. Handrail은 Manbridge와 비교할 때 상대적으로 강성이 작으므로, Handrail의 효율적인 해석을 위하여 Manbridge와 분리하여 해석하였다. 지진 해석결과 Handrail의 최대조합응력은 SSE 조건에서 146MPa이며, OBE 조건에서 96.11MPa이다. 따라서 지진에 의한 Handrail의 응력이 허용응력을 초과하지 않으므로 설계된 Handrail은 지진에 대해 안전하다고 판단된다.

4. 결론

최종설계안에 대한 Manbridge Crane의 정적 및 내진해석 결과 Crane의 주요부재의 응력이 허용응력보다 작으며, 보강재의 좌굴 및 Seismic Lug와 Guide Roller의 설계도 문제점이 없었다. Fuel Basket과 Movable Platform을 지지하는 Handrail도 지진하중에 대해서 안전하다고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Technical Specification for Manbridge, KAERI-KOPEC KM-357-DT-P001, 1990.
- [2] Crane Manufacturers Association of America, INC.: CMAA.#70, #74.
- [3] American National Standard: Rules for Construction of Overhead and Gantry Cranes, ANSI/ASME NOG-1-1983.
- [4] Overhead and Gantry Cranes, ANSI B30.17-1980.
- [5] American Institute of Steel Construction
- [6] ACI Standard Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures ACI-349, 1988.