

기기보수용 크레인의 지진해석에 관한 연구

윤 정 방*, 이 동 근*

1. 서 론

본 연구용역에서는 반도기계주식회사가 의뢰한 기기보수용 크레인의 지진하중에 대한 구조적 안전성을 평가하였다. 원자력발전소 내부에 설치되는 기기보수용 크레인은 크게 Overhead Crane, Jib Crane 및 Monorail로 구분할 수 있다. 구조해석은 유한요소 모형을 사용하여 사하중, 정격하중 및 OBE(Operating Basis Earthquake)와 SSE(Safe Shut-down Earthquake)의 지진하중에 관한 해석을 수행하였다. Crane 설치지점의 층응답스펙트럼을 입력으로 하여 응답스펙트럼해법으로 지진 해석을 수행하였다. 최대응답을 얻기 위하여 hoist의 위치를 변화시켜 가면서 해석을 수행하였으며, 중요한 모우드가 빠지지 않도록 충분한 갯수의 자유진동모우드를 해석에 포함하였다.

구조해석을 통하여 1) 구조부재의 과도응력 발생여부, 2) 크레인 지지부의 정착하중 계산, 3) 정착하중에 대한 anchor bolt의 안전성, 4) trolley에 작용하는 하중, 5) girder의 처짐, 6) hoist rope의 안정성 등에 대하여 검토하였다. 해석결과를 바탕으로 설계시방서에서 제시한 모든 설계요구조건을 만족시킬 수 있도록 Overhead Crane의 travelling beam 단면을 조정할 것과 Jib Crane의 anchoring system 변경 및 Monorail의 T/S rail 단면과 anchor pitch의 조정을 제안하였다.

내진해석을 수행한 크레인은 Overhead Crane 4기(11S, 14S, 15S, 16S), Jib Crane 11기(47S, 54S, 55S, 56S, 57S, 58S, 59S, 60S, 61S, 62S, 63S) 및 Monorail 12기(24S, 25S, 26S, 27S, 28S, 33S, 34S, 35S, 36S, 37S, 38S, 39S)이나, 구조물과 내진해석 방법의 유사성 및 지면관계상 본 보고서에서는 Overhead Crane 14S, Jib Crane 58S, Monorail 28S를 중심으로 기술하고자 한다.

본 연구용역의 용역비는 총 19,500,000원이었으며, 연구기간은 1991년 5월부터 9개월간이었으며, 연구책임자는 필자이었다.

2. Overhead Crane 14S에 대한 내진해석

2.1 구조물의 개요

Overhead Crane의 구조는 그림1과 같이 hoist, girder, saddle 및 travelling beam 등으로 구성되어 있으며, 이들 주요 부재의 기능은 다음과 같다.

1) Hoist : 5 ton의 정격하중을 처리할 수 있는 hoisting system과 hoist가 girder를 따라 주행할 수 있도록 하는 trolley로 구성된다.

2) Girder : 크레인의 주요 횡부재로서, 상자형 girder 밑에 trolley의 주행을 위한 T/S rail이 붙어 있다.

3) Saddle : girder의 양단을 지지하면서 travelling beam을 따라 주행한다.

4) Travelling beam : saddle로 지지되는 크레인 전체가 주행하는 통로로써 천정에 정착된 I-beam으로 구성된다.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

2.2 구조해석모형

hoist의 위치에 따른 2개의 구조해석 모형을 그림2에 나타내었다.

1) Model I : hoist가 girder의 중앙에 위치

2) Model II : hoist가 girder의 끝에 위치

beam 요소를 사용하여 girder와 saddle을 모형화 하였으며, 구조부재의 단면특성은 설계도면에 근거하여 구하였다. 또한 구조부재의 질량은 등분

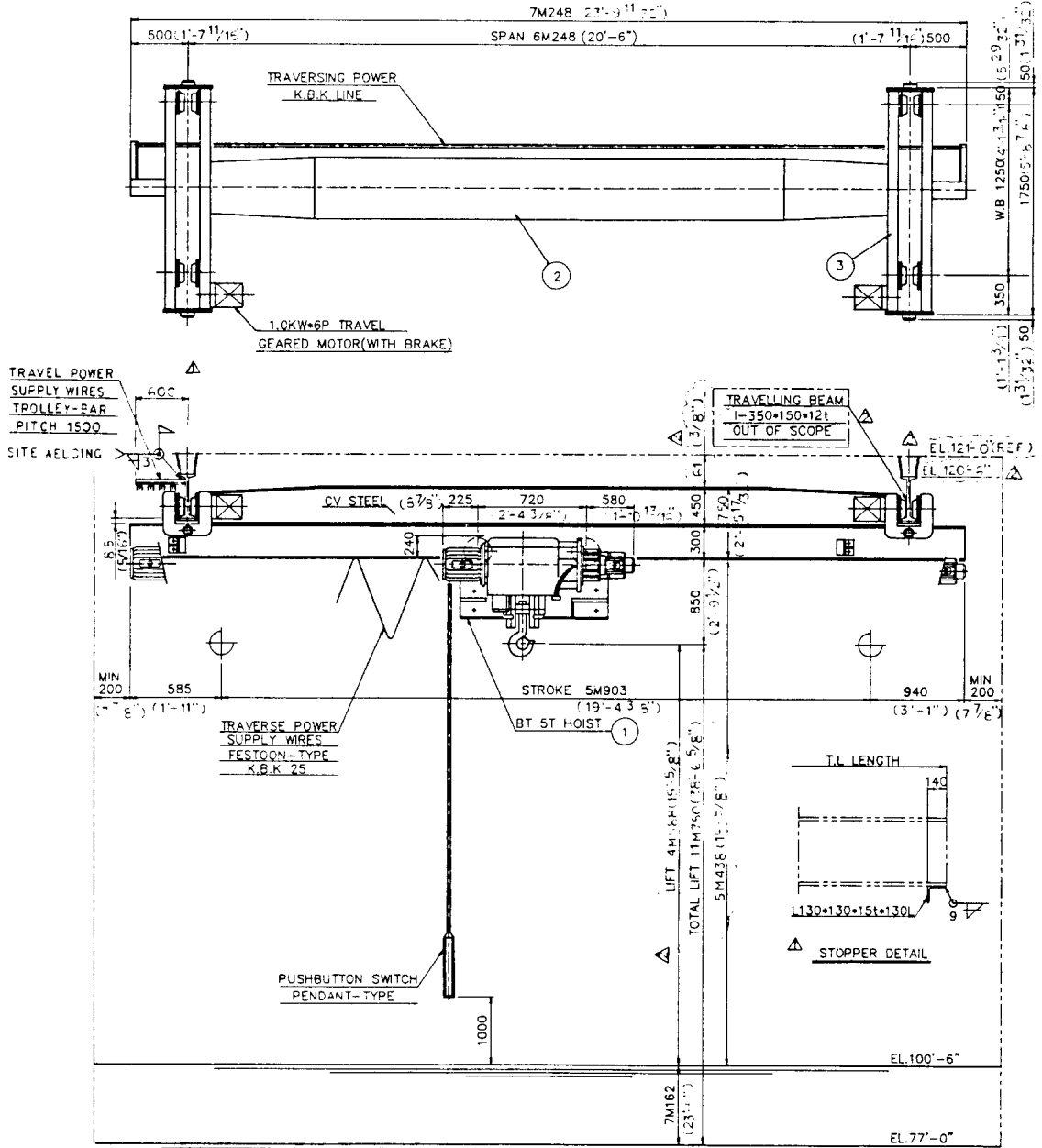
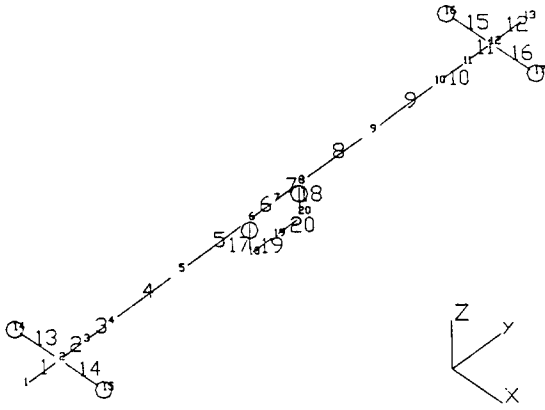


그림1. Overhead Crane 14S

포질량으로, 구조부재가 아니거나 보강재인 경우에는 집중질량으로 나타내었다. Overhead Crane 14S는 seismic category II와 quality class T에 속하기 때문에, 정격하중 5ton을 내진해석시 고려하지 않았다. 즉 정격하중 5ton은 정적해석에서만 하중으로 고려되었으며, 동적해석에서는 질량에 포함되지 않았다. 구조모형에 대한 경계조건으로는 travelling beam의 연직방향과 횡방향 하중에 대한 등가스프링을 사용하였다.

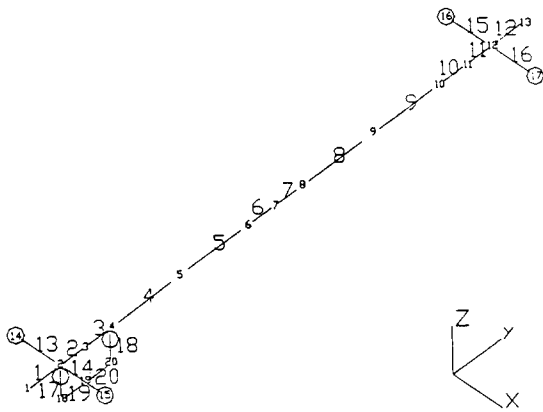
해석 프로그램인 ALGOR SuperSAP에 의한 자유진동해석을 수행하여, 30개의 자유진동수, 자유진동모우드 및 모우드질량기여도(Modal Mass Participation Factor: MMPF)를 구하였으며, Model I에 대한 모우드기여도가 큰 15개의 자유진동수와 모우드질량기여도를 표1에 나타내었다.



Model I

표1. 자유진동수(Model I)

Mode Number	Freq. (Hz)	MMPF (%)		
		X-DIR.	Y-DIR.	Z-DIR.
1	7.9	0	100	0
2	12.6	68	0	0
3	22.7	0	0	77
4	55.1	1	0	0
5	59.3	0	0	0
6	71.8	0	0	0
7	71.9	2	0	0
8	73.6	0	0	0
9	85.5	0	0	0
10	85.5	0	0	0
11	110.2	0	0	20
12	135.8	0	0	0
13	191.8	1	0	0
14	207.6	0	0	0
15	229.7	5	0	0



Model II

그림2. 구조해석모형

2.3 자유진동해석

전술한 구조해석 모형을 사용하여, PC용 구조

2.4 응답스펙트럼해석

크레인 설치지점에서의 수평 및 수직 방향의 OBE와 SSE조건에 대한 층응답스펙트럼(Floor Response Spectrum)을 사용하여 내진해석을 수행하였다. 기술규격서 9-151-M875(KEPCO, 1990)의 규정에 의거, OBE 조건에는 2% SSE 조건에는 3%의 damping ratio를 적용하였다. 응답스펙트럼해석은 전절에서 구한 30개의 자유진동모우드를 이용하여 수행하였으며 모우드간의 응답조합방법으로는 SRSS 방법이 사용되었다.

2.5 해석결과

설계된 구조물에 대하여 내진설계조건 만족여부를 분석하기 위하여, 다음과 같은 세가지 하중조건에 대하여 해석을 수행하였다.

- 1) 사하중+trolley 무게+정격하중
 - 2) 사하중+trolley 무게+OBE 지진하중
 - 3) 사하중+trolley 무게+SSE 지진하중
- 해석결과로부터 구조부재의 과도응력 발생여부,

크레인 지지부의 정착하중, trolley 반력, girder의 처짐, hoist rope의 안전성 등에 대하여 검토하였다.

2.5.1 구조부재의 최대응력

구조물에 발생한 최대응력은 표2에 요약하였으며, 모든 부재에 발생하는 최대응력은 허용응력보다 작음을 알 수 있다.

표2. 크레인 14S 구조부재의 최대응력

하중조건	Maximum Normal Stress*	Maximum Shear Stress
사하중+trolley 무게+정격하중	39MPa(147MPa)	8MPa(86MPa)
사하중+trolley 무게+OBE 지진하중	149MPa(196MPa)	9MPa(114MPa)
사하중+trolley 무게+SSE 지진하중	160MPa(235MPa)	10MPa(137MPa)

* Normal Stress=Axial Stress+Bending Stress

** 괄호안의 값은 허용응력을 나타냄

2.5.2 크레인 지지부의 정착하중

Travelling beam의 정착부에는 크레인의 자중과 정격하중 및 지진하중에 의한 반력이 발생한다. Travelling beam을 따라 2.5m 간격으로 설치된 정착부는 이러한 반력에 대하여 충분히 안전하도록 설계되어야 한다. 이의 설계에 사용할 최대연직반력은 사하중+trolley 무게+정격하중의 경우에 7.7ton이었으며, 횡방향의 최대반력은 사하중+trolley 무게+SSE 지진하중의 경우에 4.7ton이었다.

2.5.3 Trolley 반력

Trolley의 wheel assembly에 girder의 종방향으로 작용하는 최대하중은 4.3ton으로 계산되었다. 지진 발생시 hoist가 미끄러지지 않게 하기 위하여, 현재의 brake장치는 정격하중 5ton의 150%에 대하여 설계되었으며, 이는 7.5ton에 해당된다. 따라서 지진시 hoist의 trolley가 수평주행할 가능성은 없다고 판단된다.

2.5.4 Girder의 처짐

Girder의 최대처짐은 사하중+trolley 무게+정격하중의 경우에 girder의 중앙에서 발생하였으며 그 크기는 1.9mm이었다. 정격하중에 대한 허용처짐이 girder 지간 6.248m의 1/600(CMAA 74) 즉 10.4mm임을 감안하면 girder의 최대처짐은 설계

상의 요구조건을 만족한다.

2.5.5 Hoist rope의 안전성

크레인 14S의 hoist rope는 직경 16mm의 IWRC wire rope 2줄로 구성되어 있으며, 이의 파단강도는 34.4ton이다. 파단강도 34.4ton은 정격하중 5ton에 대하여 안전율 5.0 이상을 주어 설계요구조건을 만족한다.

3. Jib Crane 58S에 대한 내진해석

3.1 구조물의 개요

Jib Crane의 구조는 그림3과 같이 hoist, arm 및 post로 구성되어 있으며, 이들 주요 부재의 기능은 다음과 같다.

1) Hoist : 3ton의 정격하중을 처리할 수 있는 hoisting system과 hoist가 T/S rail을 따라 주행할 수 있도록 하는 trolley로 구성된다.

2) Arm : 크레인의 주요 횡부재로서, 캔틸레버식의 상자형 girder 밑에 trolley의 주행을 위한 I형의 T/S rail이 붙어있다.

3) Post : arm을 지지하는 원통형의 연직부재이며, post의 중간에 설치된 3개의 anchor plate와 post 바닥에서 지지된다.

3.2 구조해석

Arm의 위치가 벽체에 대해서 각각 0°, 45°, 90°인 세가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

표3. 자유진동수(Model I)

Mode Number	Freq. (Hz)	MMPF (%)		
		X-DIR.	Y-DIR.	Z-DIR.
1	17.7	7	38	0
2	41.6	54	2	0
3	146.5	3	36	0
4	215.2	1	16	0
5	331.2	26	0	0
6	429.9	0	0	0
7	521.2	2	0	0
8	544.2	1	1	0
9	651.5	0	2	0
10	788.6	0	0	0
11	974.4	1	1	0
12	1011.6	5	0	0
13	1227.2	0	2	0
14	1382.2	0	0	0
15	1586.3	0	0	0

Arm의 최대처짐은 사하중+trolley 무게+정격 하중의 경우에 arm의 끝단에서 발생하였으며 그 크기는 8.2mm이었다. 정격하중에 대한 허용처 짐이 arm 길이 3.108m의 1/300(CMAA 74) 즉 10.4mm임을 감안하면 arm의 최대처짐은 설계상 의 요구조건을 만족한다.

4. Monorail 28S에 대한 내진해석

4.1 구조물의 개요

Monorail의 구조는 그림4와 같이 hoist와 T/S rail로 구성되어 있다.

1) Hoist : 7.5ton의 정격하중을 처리할 수 있는 hoisting system과 hoist가 T/S rail을 따라 주행할 수 있도록 하는 trolley로 구성된다.

2) T/S rail : I-beam으로 만들어진 trolley의 주행 통로로써, 천정에 5.2m 간격의 anchor support 로 지지된다.

4.2 구조해석

T/S rail의 유연성을 고려하기 위하여, T/S rail의 flange는 beam요소로 web는 shell요소로 모형화하였다. 경계조건으로 T/S rail이 정착부에 서 고정되었다고 보았다.

자유진동해석을 수행하여, 10개의 자유진동수, 자유진동모우드 및 모우드질량기여도를 구하였으며, 그 결과를 표4에 나타내었다.

표4. 자유진동수

Mode Number	Freq. (Hz)	MMPF (%)		
		X-DIR.	Y-DIR.	Z-DIR.
1	2.3	54	0	0
2	13.3	13	0	0
3	18.7	12	0	0
4	33.0	11	0	0
5	48.0	0	24	0
6	89.2	0	0	19
7	138.9	0	0	65
8	171.7	0	0	2
9	292.5	0	0	7
10	342.8	0	53	0

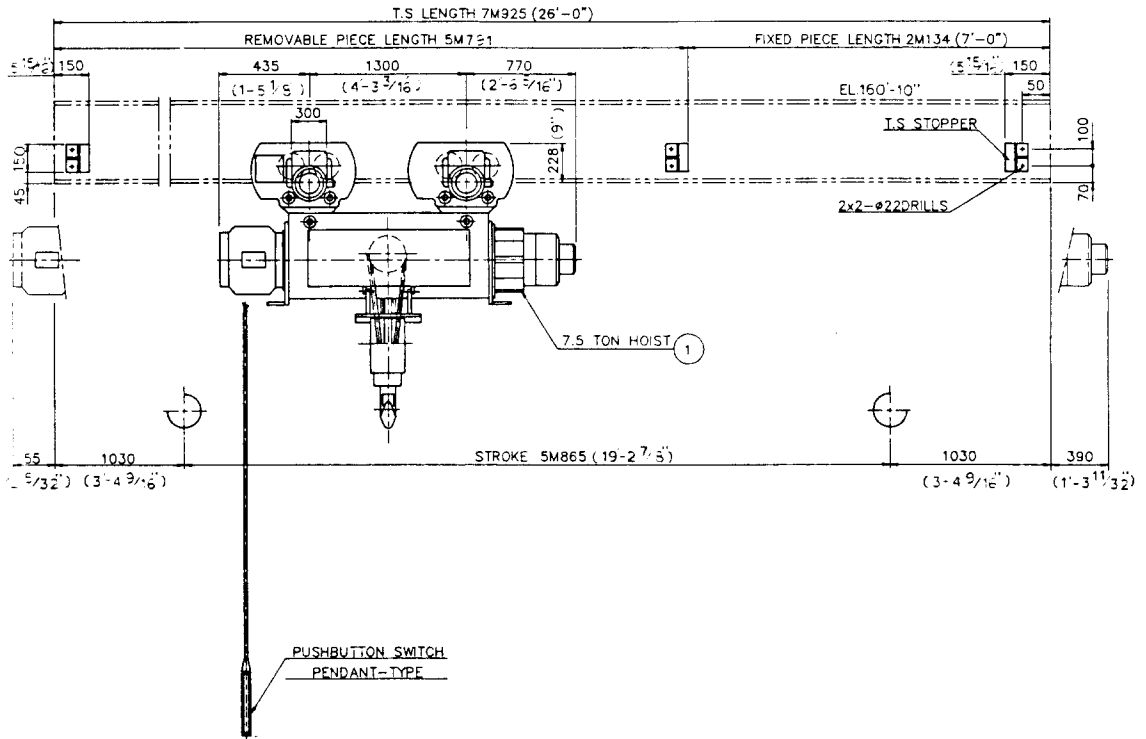


그림4. Monorail 28S

4.3 해석 결과

T/S rail을 따라 5.2m 간격으로 설치된 정착부에는 hoist의 자중과 정격하중 및 지진하중에 의한 반력이 작용한다. 정착부의 설계에 사용할 최대 연직반력은 사하중+trolley 무게+정격하중의 경우에 10.4ton으로 계산되었으며, 횡방향의 최대 반력은 사하중+trolley 무게+SSE 지진하중의 경우에 1.5ton으로 산출되었다.

Trolley의 wheel assembly에 T/S rail의 종방향으로 작용하는 최대하중은 0.6ton으로 계산되었다. 이는 brake 장치의 용량보다 작음을 알 수 있다.

5. 결 언

크레인에 대한 내진해석 결과 구조부재의 응력, trolley의 반력, girder의 처짐 및 hoist rope의 인장력이 안전측임을 확인하였다. 또한 크레인 정착부의 설계에 필요한 정착하중을 구할 수 있었으며, 이에 근거하여 정착부의 간격과 부재의

변경을 제안하였다.

참 고 문 헌

- [1] Technical Specification for Miscellaneous Cranes and Hoists, 9-151-M875, Korea Electric Power Corporation, 1990.
- [2] Specification for Electric Overhead Travelling Cranes CMAA 70, Crane Manufacturers Association of America, 1983.
- [3] Specification for Top Running and Under Running Types of Single Girder Electric Overhead Travelling Cranes CMAA 74, Crane Manufacturers Association of America
- [4] Specifications for Electric Wire Rope Hoists HMI 100, Hoist Manufacturers Institute, USA, 1976.
- [5] Rules for Construction of Overhead and Gantry Cranes, ANSI/ASME NOG-1, ASME, 1983.
- [6] Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design, 9th ed, AISC, 1989.