

철골공장의 일관설계를 위한 크레인 하중 자동화

Crane Load Automization for Integrated Design of Steel Plant

정 기 택*

Chung, Gi-Taek

(논문접수일 : 2000년 8월 10일 ; 심사종료일 : 2001년 4월 30일)

요 지

iTOP(integrated-design Tool Of Plant)은 철골공장을 대상으로 한 모델링, 구조해석, 후처리, 부재설계, 구조계산서, 구조도면 및 물량산출에 이르는 일련의 과정을 유기적으로 통합한 시스템이다. 크레인 주행도를 주요 인터페이스 도구로 이용하고 “크레인 하중조건”이라는 개념을 새로이 도입함으로써, 각 크레인의 주행 범위 및 하중 옵션을 경우별로 설정할 수 있도록 하였다. 이에 따라 크레인거더의 설계 및 해석하중의 계산이 효과적으로 이루어지고, 제반 데이터에 따른 크레인 하중조합의 산정은 완전히 자동화되었다.

핵심용어 : 공장, 설계 통합시스템, 크레인 주행도, 크레인 하중조건

Abstract

iTOP(integrated-design Tool Of Plant) has been developed to integrate the modeling, structural analysis, post-processor, member design, calculation sheet, structural drawing and BOM for steel plant. The crane railway is utilized as the main tool for crane interface and the introduction of “Crane Load Condition” makes it possible to specify the carrying range and loading option of cranes variously for each case. Thus the design of crane girder and the calculation of analysis load are carried out effectively and the determination of sub crane load condition is completely automated.

Keywords : plant, integrated-design tool, crane railway, crane load condition

1. 서 론

컴퓨터와 관련된 하드웨어 및 소프트웨어 기술이 급속히 발전하면서, 건축분야에서도 여러 가지 기능이 결합된 통합시스템으로 그 활용 범위가 확대되어 가고 있다.^{1)~3)} 그러나 건설산업 분야의 한 부분인 공장을 대상으로 한 엔지니어링과 설계에서의 자동화 프로그램의 개발과 보급은 미흡한 실정이다.

공장건물은 일반적으로 두 가지의 중요한 기능을 고려

해서 설계한다. 즉 외부로부터 보호된 작업장을 제공하는 기능과, 거중장치를 이용하여 화물을 이동시키는 기능이다. 작업장의 설계는 일반 건물의 경우와 같이 널리 통용되는 설계지침에 따른 설계 절차가 정례화되어 있는 반면, 이동장치 즉 크레인 시스템을 설치하는 것은 기본설계가 상대적으로 복잡하여 설계 과정에서 적지 않은 어려움을 겪게 된다.^{4)~7)}

크레인의 종류에는 천정주행 크레인(Overhead Travelling Crane), 중심이 낮은 크레인(Underslung),

* 정희원 · (주)아키프로넷, 공학박사

• 이 논문에 대한 토론을 2001년 9월 29일까지 본 학회에 보내주시면 2001년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

동비 크레인(Jib), 고가 이동크레인(Gantry) 그리고 모노레일(Monorail) 등이 있다. 공장건물에서는 이러한 크레인이 단독으로 또는 여러개가 조합을 이루면서 운행된다. 본 논문은 이 중에서 크레인 용량이나 공장의 규모에 관계없이 광범위하게 사용되는 천정주행 크레인을 연구 대상으로 한다.

공장 건물 설계시 천정주행 크레인거더의 설계는 하중 산정이 상대적으로 까다롭고 설계 상제가 복잡해서 구조 기술자들이 많은 시간과 인력을 투입하고 있는 실정이다. 또한 크레인은 가로 및 세로 방향으로 여러 베이에 걸쳐 주행되는 것이 일반적이므로, 공장의 규모가 커질 경우 구조해석에서 고려해야 하는 하중조합이 기하급수적으로 증가하게 되어 구조 실무자가 모든 하중조합을 수동으로 고려하는 것은 현실적으로 거의 불가능하게 된다.

이번에 개발된 철골공장 설계 통합시스템 *iTOP* (integrated-design Tool Of Plant)⁸⁾은 철골공장을 대상으로 한 모델링, 구조해석, 후처리, 부재설계, 구조 계산서, 구조 도면 및 물량 산출에 이르는 일련의 과정을 유기적으로 통합한 시스템이다. *iTOP*에서는 크레인의 종류별 주행 범위를 나타내는 크레인 주행도 (Crane Railway)를 기반으로 하여 크레인에 관계되는 제반 데이터를 인터페이스함으로써 사용자의 편의성을 도모하였다. 또한 크레인 하중조건(Crane Load Condition)이라는 개념을 도입하여 각 크레인의 주행 범위 및 하중 옵션을 설정할 수 있도록 함으로써, 크레인거더의 설계 및 해석하중의 계산에 엔지니어의 판단이 반영되도록 융통성을 부여하였다. 제반 데이터에 따른 크레인 하중조합의 산정은 완전히 자동화되었다.

본 논문에서는 크레인 주행도 및 크레인 하중조건과 관련된 인터페이스 및 자동화 알고리즘에 대하여 상세히 고찰하기로 한다.

2. 크레인 차륜하중

크레인의 주행에 따라 부재설계 및 구조해석에 관련되는 크레인 하중은 다음과 같이 크게 네 가지로 구분된다.^{9)~11)}

- 수직 하중 (Vertical Load)
- 수직 충격 (Vertical Impact)
- 주행방향에 직각으로 작용하는 수평력(Side Thrust)
- 주행방향의 제동력(Traction)

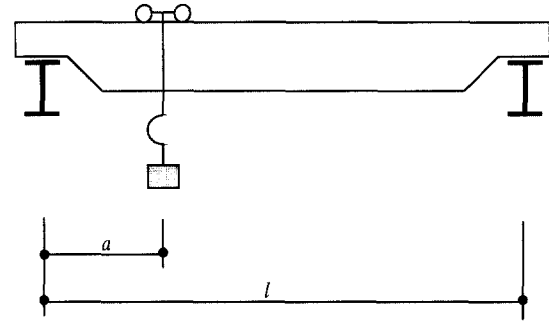


그림 1 천정 주행 크레인 구성

이 중에서 주행방향의 제동력은 크레인 거더를 단순보(한쪽 단부는 힌지, 다른 쪽 단부는 슬롯을 이용한 로울러 지지)로 설계하는 것이 일반적이므로, 본 연구에서는 고려하지 않는다.

결국 공장건물의 구조해석 및 부재설계에 필요한 크레인하중은 각 크레인의 사양을 바탕으로 하여, 크레인이 주행할 때 크레인거더의 지점에서 발생하는 반력과 최대 부재력으로 구성된다. 지점반력과 부재력에 대한 기초데이터가 되는 차륜하중은 후크가 크레인의 한쪽 단부에 최대한 접근하였을 때, 그 쪽 단부에서는 최대가 되고 반대쪽 단부에서는 최소가 된다(그림 1). 이러한 최대 및 최소 하중을 달하중이 있을 경우와 없을 경우로 분류하여 살펴보면 다음 식과 같다.

$$V_{\max} = \frac{W}{n} + \frac{2(C+CT)(l-a)}{n l} \quad (1)$$

$$V_{\min} = \frac{W}{n} + \frac{2(C+CT)a}{n l} \quad (2)$$

$${}_{emp}V_{\max} = \frac{W}{n} + \frac{2 CT (l-a)}{n l} \quad (3)$$

$${}_{emp}V_{\min} = \frac{W}{n} + \frac{2 CT a}{n l} \quad (4)$$

여기서,

V_{\max} : 최대 차륜하중

V_{\min} : 최소 차륜하중

${}_{emp}V_{\max}$: 최대 공수레하중

${}_{emp}V_{\min}$: 최소 공수레하중

- W : 크레인 자중 (Bridge Weight)
- n : 크레인의 차륜 총 개수
- C : 달하중(Capacity)
- CT : 수레하중(Crab and Trolley Weight)
- l : 크레인 스펠
- a : 최소 후크 거리(Minimum Hook Approach)

상기 하중에 수직 충격계수 k_v 를 적용하면 각각에 대한 수직 방향의 계수하중을 산출할 수 있다.

$$imp V_{max} = (1 + k_v) V_{max} \quad (5)$$

$$imp V_{min} = (1 + k_v) V_{min} \quad (6)$$

$$imp, emp V_{max} = (1 + k_v) emp V_{max} \quad (7)$$

$$imp, emp V_{min} = (1 + k_v) emp V_{min} \quad (8)$$

한편 수평 충격계수 k_h 에 따른 수평 방향의 계수하중은 적용 규준에 따라 산출식이 달라지게 된다.

- 국내 강구조 계산규준(1983)¹²⁾을 적용하는 경우

$$H = k_h \frac{V_{max}}{2} \quad (9)$$

- AISC ASD(1989)¹³⁾를 적용하는 경우

$$H = k_h \frac{2(C + CT)}{n} \quad (10)$$

3. 크레인 주행도 및 크레인 하중조건

공장건물의 설계시 크레인 주행도는 공장에서 운행 되는 각 크레인의 주행 범위를 나타낸다. *iTOP*에서는 이러한 크레인 주행도의 개념을 그대로 도입하여 사용자의 편의성을 도모하고, 이후 설명할 크레인 하중조건의 기초 데이터로 활용한다. 그림 2는 프로그램에서 제공하는 크레인 주행도를 예시하고 있다.

크레인의 운행에 따른 영향을 정확하게 분석하기 위해서는, 각 크레인의 운행 범위나 사양, 상호간의 간섭 조건 등을 고려하여 관련 부재의 설계나 구조해석이 이

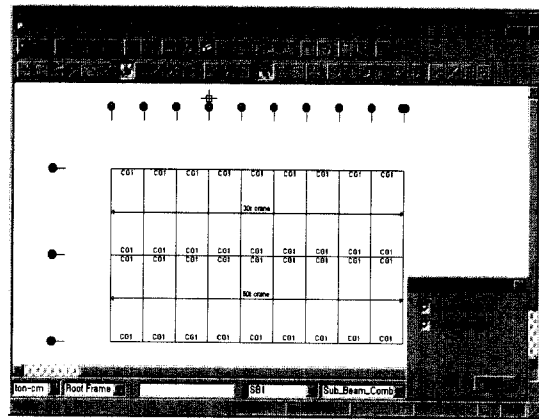


그림 2 크레인 주행도

루어져야 한다. 물론 이러한 사항들은 구조 엔지니어의 독자적인 판단에 의하기 보다는 공장 운영자들과의 긴밀한 협의가 필수적으로 수반되어야 하는 것들이다. 또한 크레인의 횡하중과 풍하중 등의 여타 횡하중을 조합할 경우에는 하중계수에 대한 협의도 이루어지는 것이 바람직하다.

이에 따라 *iTOP*에서 도입한 크레인 하중조건의 개념은 크레인거더의 설계를 비롯한 공장 건물 설계의 경제성 및 정확도를 제고하기 위한 것으로서, 구조 엔지니어가 공장 운영자와 협의하여 크레인의 실제 주행 사양을 면밀히 분석한 후 각 경우별(예를 들어 장기 사양 및 단기 사양)로 필요한 만큼 하중조건을 설정하면 된다(그림 3).

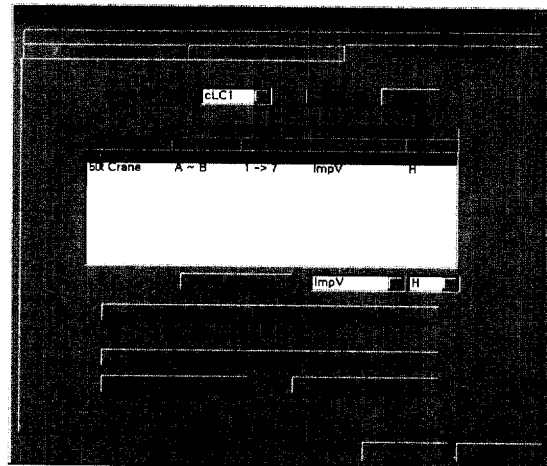


그림 3 크레인 하중조건

표 1 차륜하중 옵션

구분	유형	설명
수직	impV	충격계수를 고려한 차륜하중
	V	충격계수를 고려하지 않은 차륜하중
	imp.empV	충격계수를 고려한 공수레하중
	empV	충격계수를 고려하지 않은 공수레하중
수평	H	수평하중 100% 고려
	0.5H	수평하중 50% 고려
	0	수평하중 고려하지 않음

그림에서 Roof Range는 주행도에서 설정된 범위 내에서 각 하중조건별로 다르게 지정할 수 있으며, Wheel Load Option은 수직(Ver)/수평(Hor) 차륜하중에 대한 유형을 나타낸다. 표 1에 나타난 각 차륜하중의 유형에 따라, 식(1)부터 (10)까지의 기본적인 차륜하중을 바탕으로 최종적인 차륜하중값이 결정된다.

4. 단위 크레인 하중 조합

각 크레인별로 산정된 최대 차륜하중을 크레인의 주행순서대로 첫번째 차륜부터 마지막 차륜까지 크레인 거더 상에 배열한 후, 차륜을 이동시키면서 지점 반력 및 부재력을 산정한다(그림 4). 최대 부재력은 크레인 거더의 설계에 이용하고, 최대 지점반력은 구조해석의 하중데이터로 이용한다.

지점반력 F 는 식(11)과 같이 지점위의 차륜하중과 지점의 좌/우측 차륜하중 및 크레인거더의 자중의 합에 의해 계산된다(그림 5).

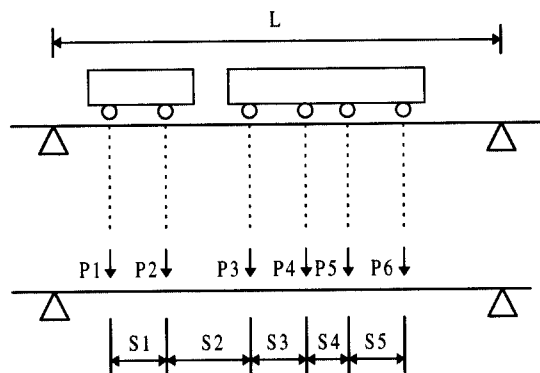


그림 4 차륜하중의 배열

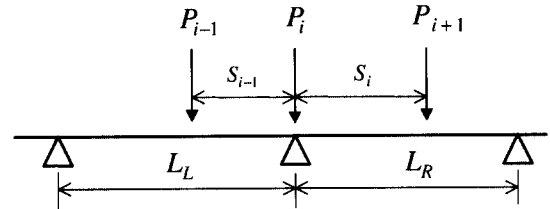


그림 5 구조해석용 지점반력의 산정

$$F = P_i + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{P_j(L_L - S_L)}{L_L} + \sum_{j=i+1}^n \frac{P_j(L_R - S_R)}{L_R} + \frac{1}{2}(w_L L_L + w_R L_R) \quad (11)$$

여기서,

P_i : i -번째 차륜하중

L_L : 지점 좌측의 스패 길이

L_R : 지점 우측의 스패 길이

S_L : 지점 좌측의 차륜 거리 ($= \sum_{k=j}^{i-1} S_k (\leq L_L)$)

S_R : 지점 우측의 차륜 거리 ($= \sum_{k=i}^{j-1} S_k (\leq L_R)$)

S_k : k -번째 차륜과 $(k+1)$ -번째 차륜의 간격

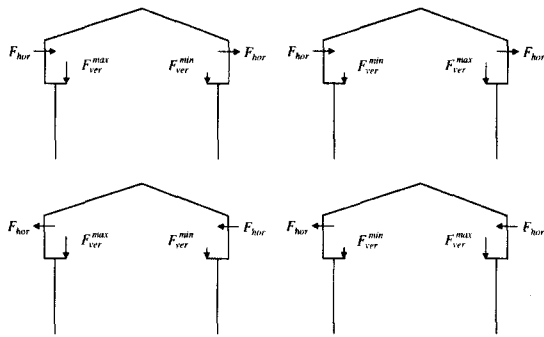
w_L : 좌측 크레인거더의 단위자중

w_R : 우측 크레인거더의 단위자중

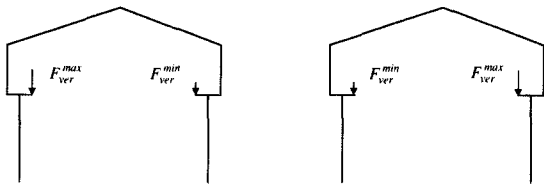
“단위 크레인 하중조합”이란 앞서 기술한 지점반력이 한 베이에서 조합되면서 발생하는 크레인 하중조합을 의미하는데, 수평방향 차륜하중을 고려(표 1의 수평방향 차륜하중 옵션이 0이 아닌 경우)하면 4가지 경우가 발생하고 고려하지 않으면 2가지 경우가 발생한다(그림 6). iTOP에서는 식(11)의 F 의 종류별로 하중의 적정한 위치를 자동으로 찾아주며, 특히 수평하중(F_{hor})의 경우에는 해당 크레인거더의 춤을 정확하게 반영하여 하중의 위치를 찾아준다.

5. 다중 베이상의 크레인 하중조합

여러 베이에 걸쳐 크레인이 주행할 경우에는, 그림 6과 같은 단위 크레인 하중조합이 또다시 조합되므로 하중조합 개수가 기하급수적으로 증가하게 된다. N 개의 베이가 존재하는 경우 i -번째 Main Frame Line (이하 MF Line)에 대한 크레인 하중조합의 수 C_i 를 일반식으로 나타내면 다음과 같다.



(a) 수평방향 차륜하중을 고려하는 경우



(b) 수평방향 차륜하중을 고려하지 않는 경우

그림 6 단위 크레인 하중조합

$$C_i = C_{i,1} \cdot C_{i,2} \cdot \dots \cdot C_{i,N} \quad (12)$$

여기서 $C_{i,j}$ 는 i -번째 MF Line의 j -번째 베이에서 발생하는 단위 크레인 하중조합의 개수로서, 그림 6에 나타난 바와 같이 수평방향 차륜하중의 고려 여부에 따라 4 또는 2가 되고 해당 위치가 크레인의 주행 범위에 포함되지 않으면 1이 된다. 단 $C_{i,j}$ 가 모두 1인 경우, 즉 i -번째 MF Line의 모든 베이이 크레인의 주행 범위에 포함되지 않으면, C_i 는 0이 된다. 각 MF Line 별로 C_i 를 계산하여 이들의 합을 구하면, 하나의 크레인 하중조건에 대한 크레인 하중조합의 총 개수가 된다. 이 때 동일한 하중조합은 프로그램 내부의 검색 기능을 통하여 자동으로 제외된다.

그림 7의 크레인 주행도를 예시하여 크레인 하중조합의 개념을 설명하기로 한다. 여기서는 편의상 문제를 단순화시키기 위해서 Main Frame의 형태와 MF Line의 간격이 모두 동일한 것으로 가정하지만, 실제 모델링에서는 아무런 제약이 없다. "30t Crane"은 Main Frame의 A-B 베이에서 MF Line 1부터 5사이를 주행하며, "60t Crane"은 Main Frame의 B-C 베이에서 MF Line 2부터 8사이를 주행하고 있다.

각 크레인의 수평방향 하중을 모두 고려하면 단위 크레인 하중조합의 수는 4가 되고, 이에 따라 발생하는 전

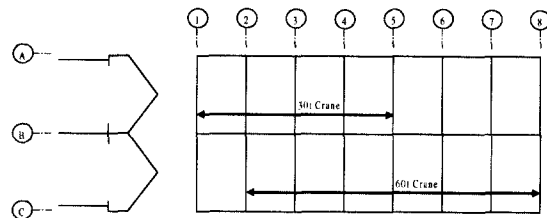


그림 7 크레인 주행도 예시

체 크레인 하중조합의 수를 구하는 과정은 다음과 같다.

- 1) MF Line 1에서는 A-B 베이에만 크레인이 운행되므로 하중조합의 수는 $4 \times 1 = 4$ 로 계산된다.
- 2) MF Line 2에서는 두 베이에서 모두 크레인이 운행되므로 하중조합 $4 \times 4 = 16$ 가지가 추가된다.
- 3) MF Line 3에서는 두 베이에서 모두 크레인이 운행되며 MF Line 2와는 차륜하중 값이 다르므로 하중조합 $4 \times 4 = 16$ 가지가 추가된다.
- 4) MF Line 4에서의 차륜하중 값 및 조건은 MF Line 3과 동일하므로 하중조합이 추가되지 않는다.
- 5) MF Line 5에서는 두 베이에서 모두 크레인이 운행되며 이전의 MF Line과는 차륜하중 값이 다르므로 하중조합 $4 \times 4 = 16$ 가지가 추가된다.
- 6) MF Line 6에서는 B-C 베이에만 크레인이 운행되므로 하중조합 $1 \times 4 = 4$ 가지가 추가된다.
- 7) MF Line 7에서의 차륜하중 값 및 조건은 MF Line 6과 동일하므로 하중조합이 추가되지 않는다.
- 8) MF Line 8에서는 B-C 베이에만 크레인이 운행되며 이전의 MF Line과는 차륜하중 값이 다르므로 하중조합 $1 \times 4 = 4$ 가지가 추가된다.

표 2 크레인 하중조합 산출 과정

Main Frame Line No	Case I	Case II	Case III	Case IV
①	4	4	2	2
②	16	8	8	4
③	16	8	8	4
④				
⑤	16	8	8	4
⑥	4	2	4	2
⑦				
⑧	4	2	4	2
하중조합 총 개수	60	32	34	18

각 크레인의 수평방향 하중의 고려 여부에 따라 하중조합 개수의 산출 과정을 정리하면 표 2와 같다. 여기서 Case I 은 각 크레인의 수평방향 하중을 모두 고

려하는 경우를, Case II 30t 크레인의 수평방향 하중만 고려하는 경우를, Case III는 60t 크레인의 수평방향 하중만 고려하는 경우를, Case IV는 크레인의 수평

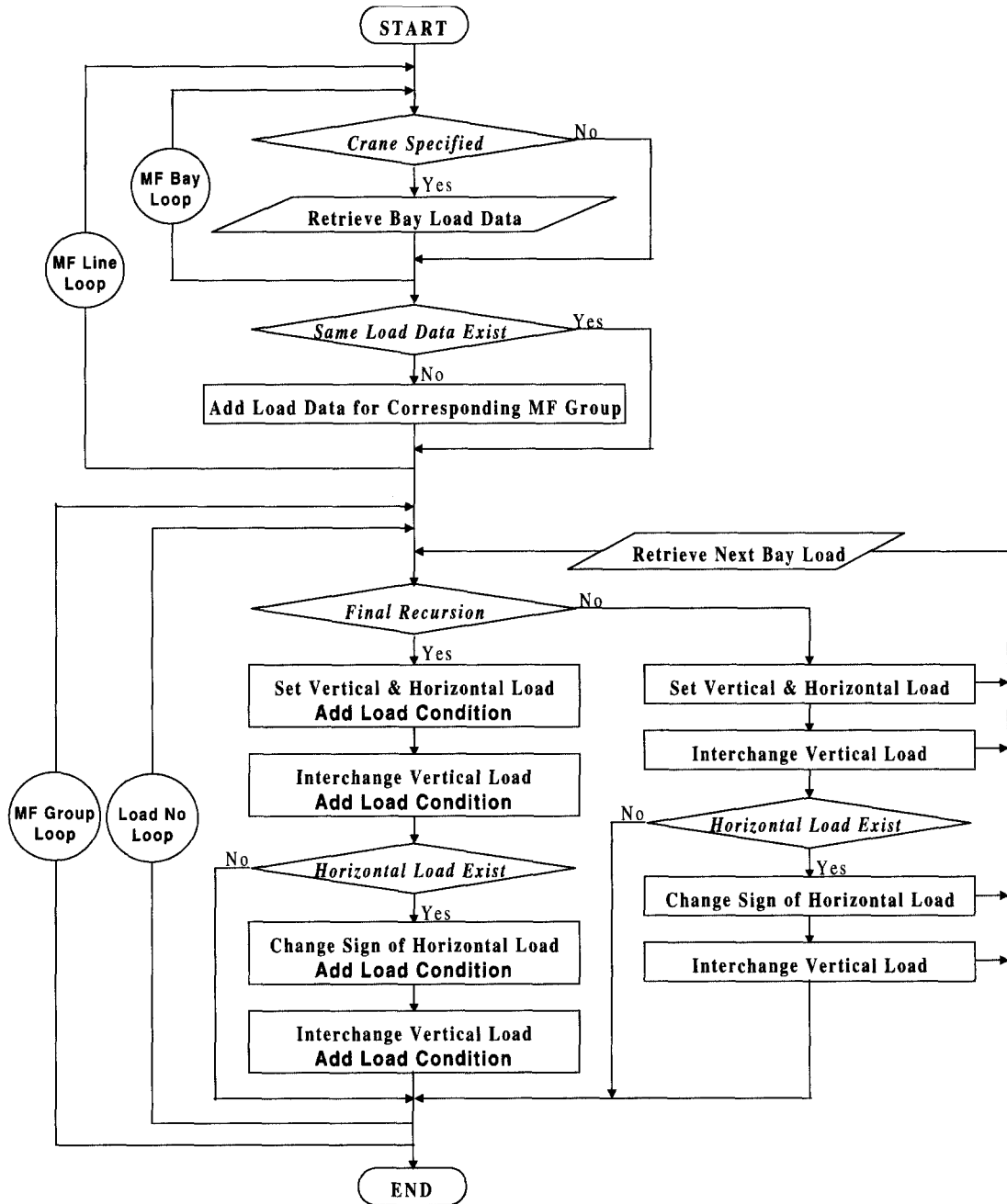


그림 8 크레인 하중조합 산정을 위한 재귀 알고리즘

방향 하중을 하나도 고려하지 않는 경우를 나타낸다.

이와 같이 *iTOP*에서는 각각의 크레인 하중조건별로 부차적인 하중조합들이 자동으로 설정되며, 크레인 하중조합의 개수는 공장의 규모 및 각 주행 크레인의 하중 사양과 주행 범위에 따라 달라지게 된다. 그림 8은 다양한 하중조합을 효과적으로 도출하기 위하여 프로그램에 사용된 재귀 알고리즘(Recursive Algorithm)을 나타내고 있다.

6. 결 론

철골공장 설계 통합시스템 *iTOP*에서는 실무에서 작성되는 크레인 주행도를 주요 인터페이스 도구로 이용하고 “크레인 하중조건”이라는 개념을 새로이 도입함으로써, 각 크레인의 주행 범위 및 하중 옵션을 경우별로 설정할 수 있도록 하였다. 이에 따라 크레인거더의 설계 및 해석하중의 계산이 효과적으로 이루어지고, 제반 데이터에 따른 크레인 하중조합의 산정은 완전히 자동화되었다. 다양한 하중조합을 효과적으로 도출하기 위하여 재귀 알고리즘을 개발 적용하였다.

참 고 문 헌

1. 김치경, 홍성목, “객체지향설계법을 이용한 건축구조설계 통합시스템 개발에 관한 연구(1)”, 대한건축학회논문집, 제8권, 제1호, 1992, pp.171~179
2. 홍성목, 고일두, 허명재, 김치경, “객체지향설계법에 의한 건축구조 통합시스템 개발에 관한 연구”, 대한건축학회논문집, 제8권, 제11호, 1992, pp.129~140
3. 김홍국, 이병해, “철골 구조물의 통합 설계 시스템”, 대한건축학회논문집, 제8권, 제12호, 1992, pp.95~102
4. 박의식 외 9인, “철골구조물설계를 위한 설계자료 (제3권)”, 현대건설주식회사, 1984, p.62
5. 김상호, “공장건물의 구조계산 실예 및 해설”, 제철엔지니어링주식회사, 1989, p.169
6. 이종욱, 윤성수, 장광윤, “구조설계 실무참고서”, 현대건설주식회사, 1991, p.180
7. A. Newman, *Metal Building Systems*, McGraw-Hill, New York, 1997, p.389
8. 정기택 외 5인, “철골공장 설계 통합시스템 *iTOP* 사용설명서”, 현대건설주식회사, 1999, p.346
9. AISC, “Guide for the Design and Construction of Mill Buildings Technical Report No. 13”, Pittsburgh, 1979
10. J. M. Fisher and D. R. Buetner, “Light and Heavy Industrial Buildings”, AISC, Chicago, 1979
11. CMAA, “Specifications for Electric Overhead Travelling Cranes No. 70”, Pittsburgh, 1975
12. 대한건축학회, “강구조계산규준 및 해설”, 1983.
13. AISC, “Manual of Steel Construction-ASD (9th Edition)”, 1989