

# 판토타그래프 구조설계를 위한 기구해석 기법 개발 development of kinematic analysis technique for pantograph structure design

박수홍\* 김휘준\*\* 정경렬\*\* 배정찬\*\*  
Park, Soo-Hong Kim, Hwi-Jun Chung, Kyung-Ryul Bae, Jung-Chan

## ABSTRACT

Pantograph, which collects current from cartenary system, is one of important parts of high-speed train. Kinematic analysis is basic component of pantograph design. But kinematic analysis is very complex and time-consuming. Therefore numerical calculation of pantograph kinematics is necessary. In this study, pantograph kinematic analysis software was developed and relationship between kinematic parameters and pantograph performance was investigated. The software and relationship between kinematic parameters and pantograph performance are helpful to pantograph designers.

### 1. 서론

고속전철의 주요부품중 판토타그래프는 집전장치로 차량에 전력을 공급하는 매우 중요한 장치이다. 이러한 판토타그래프를 설계함에 있어 먼저 고려되어야 할 것이 기구 설계가 있으며, 그후 역학, 공력 그리고 추종성을 위한 판토타그래프의 동특성등을 고려해야 한다. 따라서 판토타그래프는 주어진 가선계의 집전높이에서 집전을 잘 할 수 있도록 설계되어야 한다. 그러나 이러한 기구학 계산은 매우 복잡한 수식을 가지며 계산량이 매우 많아 전산화된 기구해석기법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 single arm type의 판토타그래프 기구해석모델을 수립하고 이를 컴퓨터를 이용하여 수치연산에 의해 기구해석을 수행하는 판토타그래프 기구해석기법을 개발하였다. 그리고 개발된 software를 이용하여 기구입력인자가 판토타그래프에 미치는 영향을 알아보았다. 판토타그래프 설계자는 이 해석기법을 통하여 빠른 시간내에 정확한 기구해석 결과를 얻을 수 있어 기구설계에 도움이 되리라 생각된다.

### 2. 한국형 고속용 판토타그래프의 수학적 모델링

Single Arm type 판토타그래프는 대부분 아래의 그림 1 과 같이 대부분의 연결부가 pin joint로 이루어진 구조를 갖는다. 이를 수학적으로 표현하면 아래의 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $P_2 \sim P_1$  구간과  $P_1 \sim P_4$  구간은 pin joint가 아니라 서로 고정되어 하나의 부재로 작용한다. 그리고  $P_2 \sim P_1 \sim P_4$  부재와  $P_0 \sim P_1$ 부재는 그림에서와 같이 pin joint로 이어져 있다. 그리고  $P_0 \sim P_1$ 부재와  $P_5 \sim P_7$ 부재사이에는 서로 고정되어 하나의 부재로 작용한다. 그림 2와 같은 수학적 모델을 이용하여 펜헤드 지점인  $P_8$ 을 포함한 모든 지점의 궤적 및 작용력을 구하기 위하여 다음의 그림 3과 같이 입력변수를 지정할 수 있다. 여기서  $W$ 는 부재의 자중을 의미하며  $R_{8,x}$ 는 펜헤드와 가선사이의 마찰력등을 포함하는 x 방향 작용력이며  $R_{8,y}$ 는 정적압상력 및 공기유동에 의한 공력등을 포함하는 y 방향 작용력이며, 또한  $M_8$ 은 펜헤드에 작용하는 회전력이다.

\* 산업기술시험원

\*\* 한국생산기술연구원

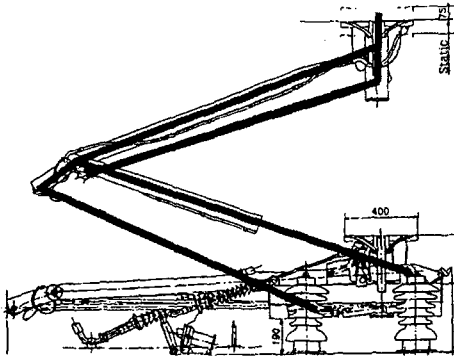


그림 1 Single Arm type 판토티그래프

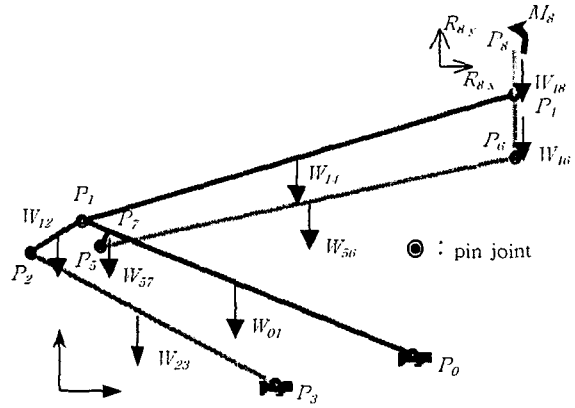


그림 2 Single Arm type 판토티그래프의 수학적 모델

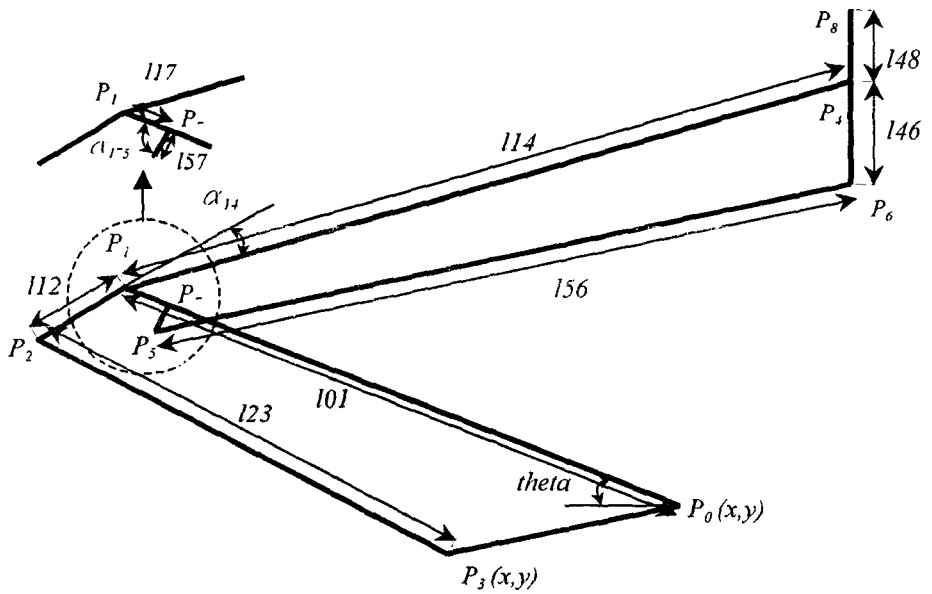


그림 3 Single Arm type 판토티그래프의 수학적 모델의 입력변수

위의 그림 3의 수학적 모델은 4개의 삼각형으로 분해되어 표현될 수 있으며 그 각각의 삼각형으로부터 각 절점에서의 궤적을 구할 수 있다. 위의 결과들로부터 주축  $P_0$ 의 각도가  $\theta$  일 때 각 절점의 궤적은 다음과 같이 구해진다.<sup>(1)</sup>

$$p_{1,x} = p_{0,x} + l_{01} * \cos(\theta) \tag{1}$$

$$p_{1,y} = p_{0,y} + l_{01} * \sin(\theta) \tag{2}$$

$$p_{2,x} = p_{1,x} - l_{112} * \cos(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312}) \tag{3}$$

$$p_{2,y} = p_{1,y} - l_{112} * \sin(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312}) \tag{4}$$

$$p_{4,x} = p_{1,x} + 114 * \cos(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312} - \alpha_{14}) \quad (5)$$

$$p_{4,y} = p_{1,y} + 114 * \sin(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312} - \alpha_{14}) \quad (6)$$

$$p_{7,x} = (101 - 117) * \cos(\pi - \theta) \quad (7)$$

$$p_{7,y} = (101 - 117) * \sin(\pi - \theta) \quad (8)$$

$$p_{5,x} = p_{7,x} + 157 * \cos(\pi - \theta + \alpha_{175}) \quad (9)$$

$$p_{5,y} = p_{7,y} + 157 * \sin(\pi - \theta + \alpha_{175}) \quad (10)$$

$$p_{6,x} = p_{4,x} + 146 * \cos(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312} - \alpha_{14} + \alpha_{145} + \alpha_{546} - \pi) \quad (11)$$

$$p_{6,y} = p_{4,y} + 146 * \sin(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312} - \alpha_{14} + \alpha_{145} + \alpha_{546} - \pi) \quad (12)$$

$$p_{8,x} = p_{4,x} + 148 * \cos(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312} - \alpha_{14} + \alpha_{145} + \alpha_{546}) \quad (13)$$

$$p_{8,y} = p_{4,y} + 148 * \sin(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312} - \alpha_{14} + \alpha_{145} + \alpha_{546}) \quad (14)$$

여기서  $\alpha_{abc}$  는 절점 a, b, c 사이의 각도를 의미한다.

또한 각 부재에 걸리는 하중도 그림 2로부터 각 부재의 힘의 평형방정식을 얻은 뒤 이들을 연립하여 해를 구함으로써 주축에 필요한 회전 모멘트 및 부재에 걸리는 하중을 구할 수 있다. 또한 각부재의 자유체도로부터 15 개의 방정식을 얻을 수 있고 이 식들을 연립하여 15 개의 변수  $R_{0x}, R_{0y}, M_0, R_{1x}, R_{1y}, R_{2x}, R_{2y}, R_{3x}, R_{3y}, R_{4x}, R_{4y}, R_{5x}, R_{5y}, R_{6x}, R_{6y}$  의 해를 구할 수 있다.<sup>[2]</sup>

### 3. Single Arm type 판토티그래프 기구설계지원 S/W 개발

위에서 본 바와 같이 판토티그래프의 궤적 및 판토티그래프 구동에 필요한 주축의 회전력 그리고 각 부재에 걸리는 하중을 주축의 회전각별로 구하는 것은 매우 다양한 변수를 내재하고 있으며 수식 또한 길어 컴퓨터를 이용하여 수치 연산하는 것이 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 판토티그래프 설계에 반드시 필요한 위의 내용을 C 언어를 이용하여 GUI (graphical user interface) 환경 하에서 실행할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다.<sup>[3]</sup> 본 소프트웨어는 위에서 기술한 각 절점의 궤적 및 각 부재에 걸리는 하중등에 관한 수식을 근간으로 작성되었다. 먼저 이 소프트웨어의 구성을 보면 그림 4와 같은 초기화면이 나온다. 그림 5와 같은 기구입력변수 편집기에서 판토티그래프의 기구적인 입력변수들을 수정할 수 있다.

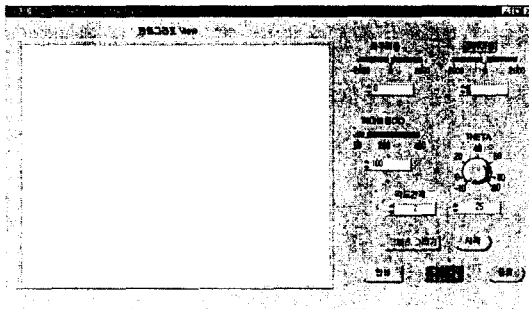


그림 4 판토티그래프 기구해석 S/W 의 초기화면

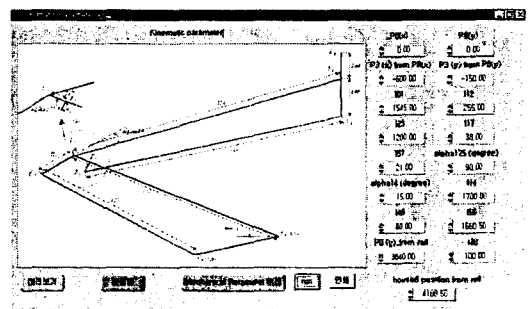


그림 5 판토티그래프 기구해석 S/W 의 기구 입력변수 편집기

그리고 각 부재의 자중 및 팬헤드 부분의 작용력 등을 수정하기 위해서는 그림 6의 mechanical parameter 편집기를 이용하여 역학 입력변수들을 수정할 수 있다. 이와 같이 모든 입력변수를 입력 및 수정한 뒤 초기화면의 “시작” 단추를 누르면 입력된 변수들에 의한 판토품의 궤적을 그림 7과 같이 볼 수 있으며 각부재에 걸리는 작용력 및 필요구동 회전력을 주축의 회전각도 및 팬헤드의 높이별로 구할 수 있다.

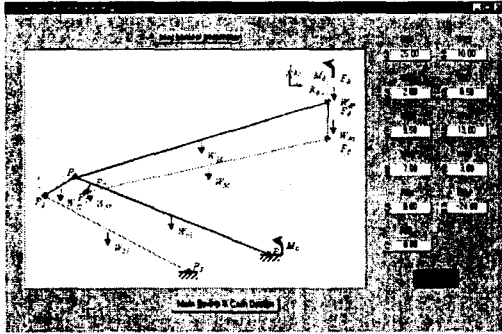


그림 6 판토품기구해석 S/W 의 역학 입력변수 편집기 화면

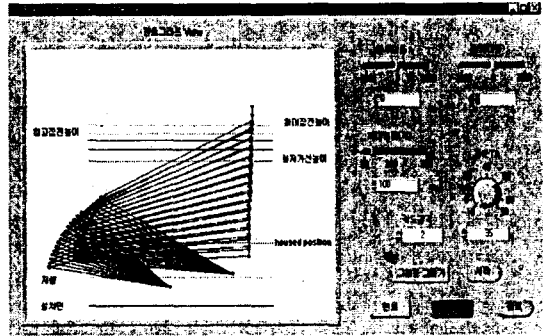


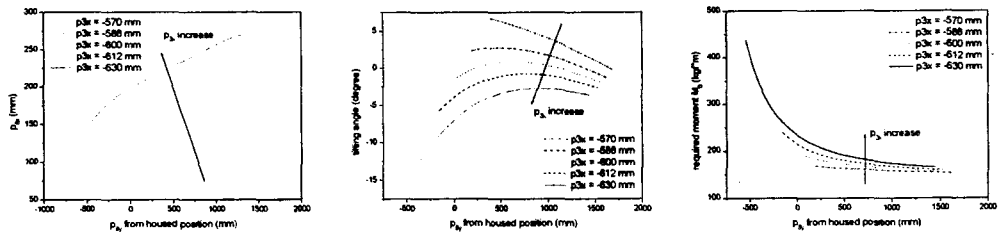
그림 7 판토품기구해석 결과 (궤적)

#### 4. 기구 입력변수의 변화가 기구학적 성능에 미치는 영향

Single arm type 판토품의 기구학적 성능을 평가하는 항목은 크게 나누어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- ① 판토품구동에 필요한 주축의 회전력
  - ✓ 회전력이 팬헤드 상승에 따라 감소하여야 cam 설계가 가능하다
  - ✓ 작을수록 좋다.
- ② 팬헤드의 열차진행방향의 변위
  - ✓ 작을수록 좋다
- ③ 팬헤드의 tilting 각도
  - ✓ 작을수록 좋다, (일본 V type 기준  $\pm 0.5^\circ$  이내)

따라서 아래의 기구입력변수들의 변화에 따른 위의 3가지 항목의 변화를 그림 8-14에 나타내었다.

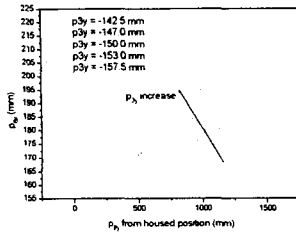


(a)  $P_{8x}$ 의 변화

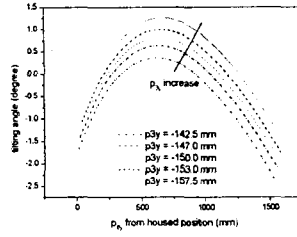
(b) 팬헤드의 tilting 각의 변화

(c) 필요 회전력

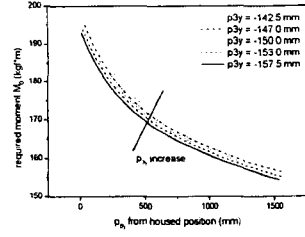
그림 8  $P_{3x}$ 의 변화가 판토품의 기구학적 성능에 미치는 영향



(a)  $p_{8x}$ 의 변화

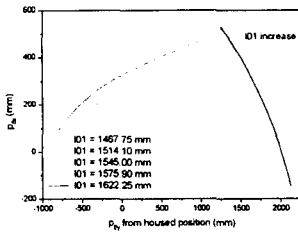


(b) 팬헤드의 tilting 각의 변화

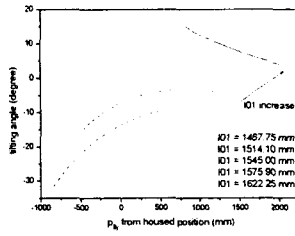


(c) 필요 회전력

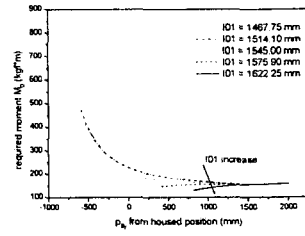
그림 9  $p_{3y}$ 의 변화가 판토품의 기구학적 성능에 미치는 영향



(a)  $p_{8x}$ 의 변화

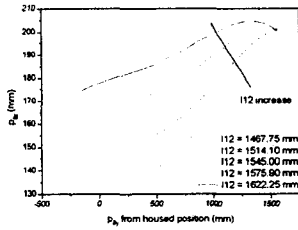


(b) 팬헤드의 tilting 각의 변화

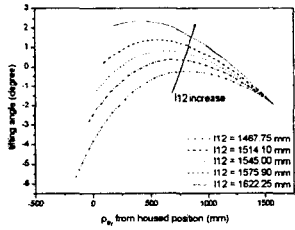


(c) 필요 회전력

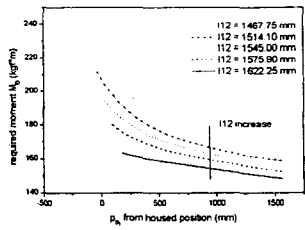
그림 10  $I_{01}$ 의 변화가 판토품의 기구학적 성능에 미치는 영향



(a)  $p_{8x}$ 의 변화

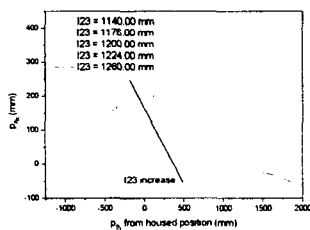


(b) 팬헤드의 tilting 각의 변화

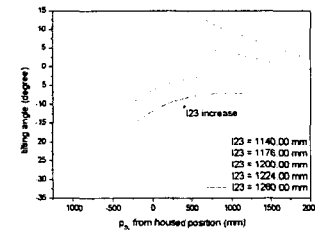


(c) 필요 회전력

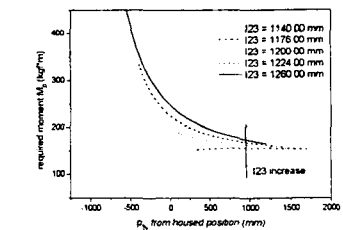
그림 11  $I_{12}$ 의 변화가 판토품의 기구학적 성능에 미치는 영향



(a)  $p_{8x}$ 의 변화

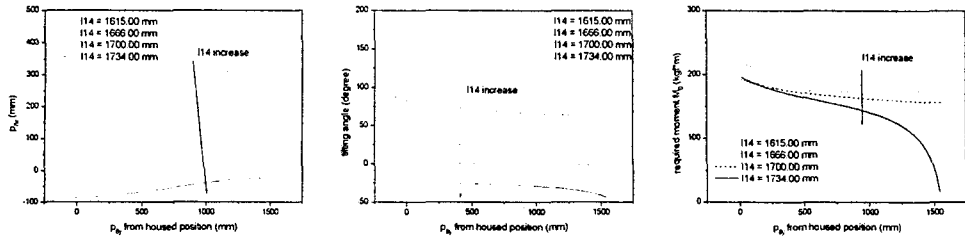


(b) 팬헤드의 tilting 각의 변화



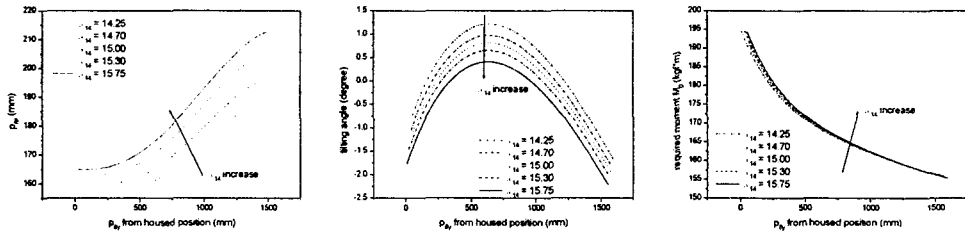
(c) 필요 회전력

그림 12  $I_{23}$ 의 변화가 판토품의 기구학적 성능에 미치는 영향



(a)  $P_{8x}$ 의 변화 (b) 팬헤드의 tilting 각의 변화 (c) 필요 회전력

그림 13 I14의 변화가 판토타그래프의 기구학적 성능에 미치는 영향



(a)  $P_{8x}$ 의 변화 (b) 팬헤드의 tilting 각의 변화 (c) 필요 회전력

그림 14  $I_{14}$ 의 변화가 판토타그래프의 기구학적 성능에 미치는 영향

위의 해석결과로부터 각각의 기구입력인자의 변화에 따라 기구학적 성능의 변화가 다음의 표 1과 같이 있음을 알 수 있다.

표 1 기구입력인자의 변화에 따른 기구학적 성능의 변화

기구입력인자	$P_{8x}$ 의 변화폭	팬헤드의 tilting 각의 변화폭	주축의 회전력의 변화
$P_{3x}$ 의 증가	영향이 크지 않음	변화폭이 작아짐	감소의 기울기가 점점 커짐
$P_{3y}$ 의 증가	변화폭이 커짐	영향이 크지 않음	기울기는 변함이 없고 회전력 자체가 감소함
101의 증가	변화폭이 커짐	변화폭이 커짐	기울기가 점점 작아짐
112의 증가	변화폭이 작아짐	변화폭이 커짐	영향이 크지 않음
123의 증가	변화폭이 작아짐	변화폭이 작아짐	기울기가 커짐
114의 증가	변화폭이 커짐	영향이 크지 않음	기울기가 커짐
$I_{14}$ 의 증가	변화폭이 조금 커짐	변화폭이 조금 작아짐	영향이 크지 않음

다음의 그림 15는 위의 결과를 이용하여 한국형 고속전철의 시작품설계에 적용된 판토품라프 기구인자이다.[4]

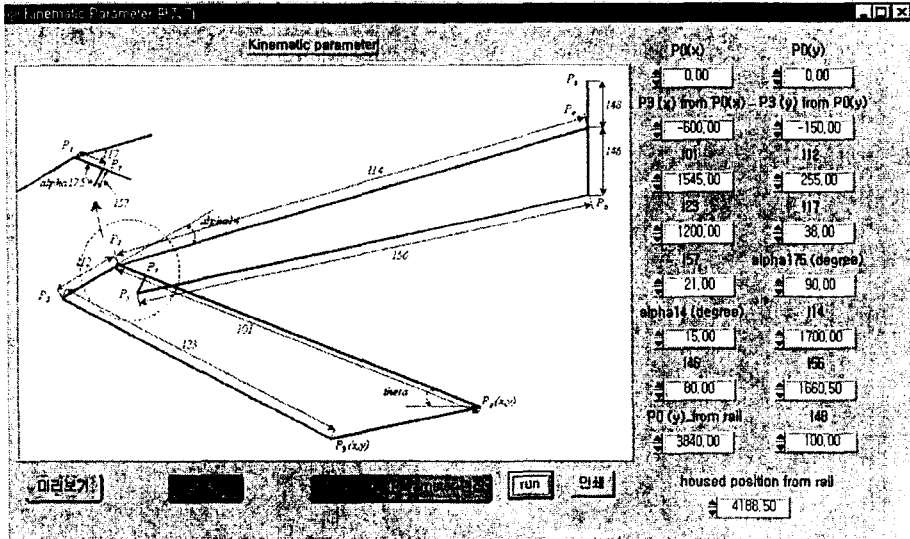
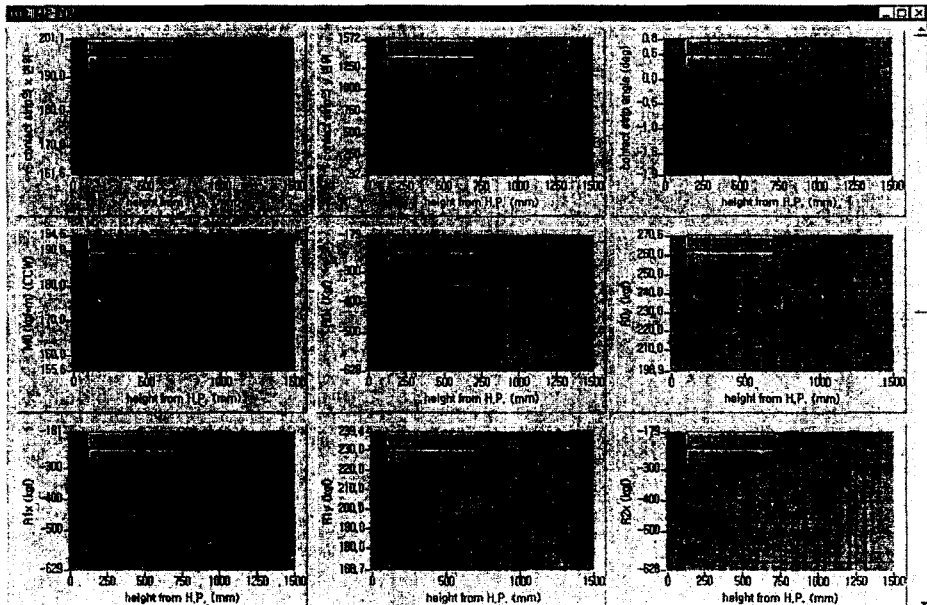
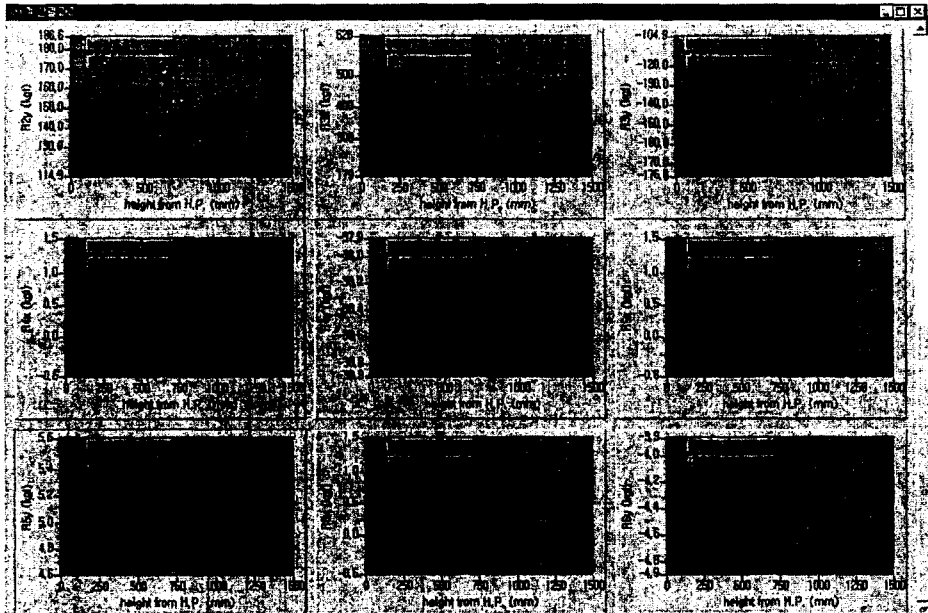


그림 15 한국형 고속용 판토품라프의 기구 입력변수

이때 각 절점의 궤적, 회전력 및 부재에 걸리는 하중은 아래 그래프와 같다.



(a)  $p_8, M_0, R_0, R_1, R_2$



(b)  $R_3, R_4, R_5, R_6$

그림 16 한국형 고속용 판토티그래프의 각 절점의 궤적, 회전력 및 반력

위의 그래프를 보면 팬헤드의 열차진행방향의 변위는 약 17 mm 정도이며, 팬헤드의 tilting 각은  $-0.8^\circ \sim 0.5^\circ$  사이이며 판토티그래프 구동에 필요한 회전력은  $158 \text{ kgf} \cdot \text{m} \sim 163 \text{ kgf} \cdot \text{m}$  이다. 또한 각 부재에 걸리는 x 방향 반력은  $\pm 630 \text{ kgf}$  이내이며 y 방향 반력은  $-172 \text{ kgf} \sim 262 \text{ kgf}$  이내이다.

## 5. 결론

위에서 본 바와 같이 single arm type 판토티그래프의 기구설계를 위해 판토티그래프의 수학적 모델링을 수립하여 각 지점의 궤적과 부재에 걸리는 하중 그리고 주축의 회전력을 구할 수 있었다. 또한 이를 컴퓨터로 계산하는 software를 작성하여 전산화된 기구해석기법을 개발하였다. 개발된 software를 통하여 각 기구입력인자와 기구학적 성능과의 상관관계를 알아보았다. 이상관계를 이용하면 single arm type의 판토티그래프를 설계시 기구입력인자를 결정할 때 많은 도움이 될 것이며 이 software를 통하여 그 궤적 및 기구학적 성능을 예측해 볼 수 있다. 향후에는 이러한 성능인자들로써 목적함수를 만들어 이 목적함수를 최대화 하는 최적의 기구입력인자를 구하는 최적설계가 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 김용운 (1982년), “수학용어 영한사전”, 우성문화사
2. 강상균외 2인 (1993년), “매스매티카 입문에서 활용까지”, 성안당
3. National Instruments (1998년), “LabWindows/CVI 5.0 Users Manuals”
4. 배정찬 (1999년), “판토티그래프 개발”, 한국생산기술연구원