

싱글암형 팬터그래프 구조설계를 위한 기구해석기법 개발

정경렬[†] · 박수홍* · 김휘준** · 배정찬***
(2000년 5월 24일 접수, 2001년 1월 13일 심사완료)

Development of Kinematic Analysis Technique for Structural Design of Single Arm type Pantograph

Kyung-Ryul Chung, Soo-Hong Park, Hwi-Jun Kim and Jung-Chan Bae

Key Words : Single Arm Type Pantograph(싱글암형 팬터그래프), Kinematic Design(기구설계), Current Collection(집전), Cartenary System(가선계), High Speed Train(고속전철), Kinematic Parameters(기구학적 변수), Pantograph Performance(팬터그래프 성능), Numerical Calculation(수치연산), Graphical User Interface(그래픽 사용자 인터페이스)

Abstract

Pantograph, which collects current from cartenary system, is one of the important parts of high-speed train. Kinematic analysis is one of the key technologies for pantograph design and includes joint trajectories, reaction forces, and the required moment of main shaft calculations. The kinematic analysis, however, is very complex and time-consuming process. In this study PC based pantograph kinematic analysis software using graphical user interface tool was developed for the easy evaluations of kinematic characteristics necessary in pantograph design process.

1. 서론

팬터그래프는 집전장치로 차량에 전력을 공급하는 고속전철의 주요부품 중의 하나이다. 한국생산기술연구원 등 국내관련연구팀은 한국형 고속전철(Korean High Speed Train, KHST)용 팬터그래프의 설계기술확보를 위해 선도기술개발사업의 일환으로 시작된 고속전철기술개발사업에서 350 km/hr의 고속용 팬터그래프를 개발하고 있다. 이러한 팬터그래프를 설계함에 있어 먼저 고려되어야 할 것으로 기구설계가 있으며, 그 후 역학, 공력 그리고 추종성을 위한 팬터그래프의 동특성 등이 고려되

어야 한다. 따라서 팬터그래프는 주어진 가선계의 집전높이에서 집전을 잘 할 수 있도록 기구설계가 이루어져야 한다.

그러나 싱글암형 팬터그래프의 기구학 계산은 매우 복잡한 수식을 가지며 계산량이 매우 많아 전산화된 기구해석기법이 필요하다. 이와 같은 이유로 독일의 Adtrantz사와 프랑스의 Faveley사는 CAD 시스템과 구조해석, 동역학해석 등의 소프트웨어에 의해 팬터그래프 신모델을 개발한 바 있으나 주요변수 및 설계치를 결정하는 과정 즉 자세한 해석기법은 알려져 있지 않다.⁽¹⁾ 일본의 동양전기제조(Toyo Denki Seizo)사는 밸런스 로드(balance rod)와 플런저(plunger)가 없는 단순모델을 대상으로 하여 기구해석 계산을 일부 수행하고 있다.⁽²⁾ 자세한 비교는 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 싱글암형 팬터그래프에 대한 기구학적 측면에서의 성능을 나타낼 수 있는 주요 항목을 선정했고 이를 예측하기 위하여 기구해석모델을 작성하여 기구해석을 수행하는 팬터그래

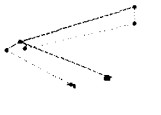
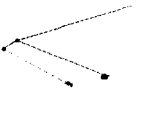
[†] 책임저자, 회원, 한국생산기술연구원 수송기기연구팀
E-mail : chungkr@kitech.re.kr
TEL : (041)5898-251 FAX : (041)5898-230

* 회원, 산업기술시험원 산업설비팀

** 한국생산기술연구원 수송기기연구팀

*** 한국생산기술연구원 연구기획본부

Table 1 Difference between Japanese (Toyo Denki Seizo) S/W and the developed Korean S/W in this study

ITEMS \ S/W	Developed S/W	Japan (Toyo Denki Seizo)
Considered Structure		
Computer Language	C language (Graphical User Interface)	MS Excel (Macro)
Output	1. Trajectories at every points 2. Reaction forces at every connecting points 3. Required moment at main shaft	1. Trajectories at every points 2. Reaction forces at major connecting points 3. Required moment at main shaft
Requirement	Windows 95/98/NT4.0/2000	Windows 95/98/NT4.0/2000, MS Excel

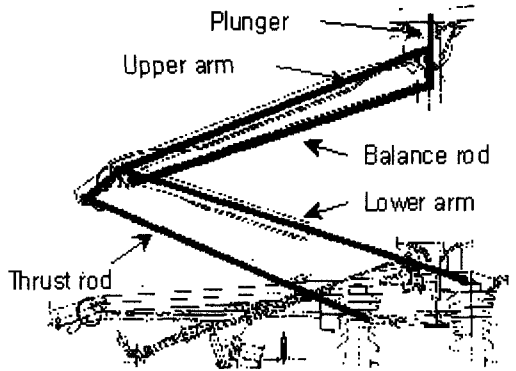


Fig. 1 Single arm type pantograph

- ③ 팬헤드의 틸팅(tilting) 각도 (집전판 길이방향)
 - 작을수록 좋다.

위의 특성을 분석하기 위하여 팬터그래프의 구조에 대한 기구해석을 먼저 수행하여야 한다. 기구해석을 위해 Fig. 1 과 같은 팬터그래프의 구조를 Fig. 2 와 같이 도식화하여 각 변수들의 상관관계를 나타내는 식을 유도하였다.

싱글암형 팬터그래프의 구조를 보면 아래의 Fig. 1 과 같이 대부분의 연결부가 핀 이음(pin joint)로 이루어진 구조를 갖는다. 이를 기구학적으로 표현하면 아래의 Fig. 2 와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $P_2 \sim P_1$ 구간과 $P_1 \sim P_4$ 구간은 핀 이음이 아니라 서로 고정되어 하나의 부재로 작용한다. 그리고 $P_2 \sim P_1 \sim P_4$ 부재와 $P_0 \sim P_1$ 부재는 Fig. 3 에서와 같이 핀 이음으로 이어져 있다. 그리고 $P_0 \sim P_1$ 부재와 $P_5 \sim P_7$ 부재사이에는 서로 고정되어 하나의 부재로 작용한다. Fig. 3 은 팬터그래프의 자유물체도를 나타낸다. 여기서 W_{ab} 는 P_a 와 P_b 사이의 부재의 자중을 의미하며 R_{8x} 는 팬헤드와 가선 사이의 마찰력 등을 포함하는 x 방향 작용력이며 R_{8y} 는 정적압상력 및 공기유동에 의한 공력 등을 포함하는 y 방향 작용력, M_8 은 팬헤드에 작용하는 회전력 그리고 M_0 은 팬터그래프를 구동하는데 필요한 회전력이다.

Fig. 2 의 기구학적 모델은 4 개의 삼각형으로 분해되어 표현될 수 있으며 그 각각의 삼각형으로부터 각 절점에서의 궤적을 구할 수 있다. 위의 결과들로부터 주축 P_0 의 각도가 θ 일 때 각 절점의 궤적은 다음과 같이 구해진다.⁽³⁾

프 기구해석 소프트웨어를 개발하였다. 또한 개발된 소프트웨어의 검증을 위하여 일본의 동양전기 제조사의 소프트웨어를 이용한 결과와 비교하여 해석결과의 타당성을 확인하였다.⁽²⁾ 그리고 개발된 소프트웨어를 이용하여 기구학적 설계변수가 팬터그래프의 성능에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 한국형 고속전철용 팬터그래프의 수학적 모델링

싱글암형 팬터그래프의 기계적 성능을 나타낼 수 있는 주요항목은 다음과 같다.

- ① 팬터그래프 구동에 필요한 주축의 회전력
 - 회전력이 팬헤드(pan head) 상승에 따라 감소하여야 캠(cam)의 설계가 가능하다
 - 작을수록 좋다.
- ② 팬헤드의 열차진행방향의 변위 (수직상승에 대한 상대적 변위)
 - 작을수록 좋다

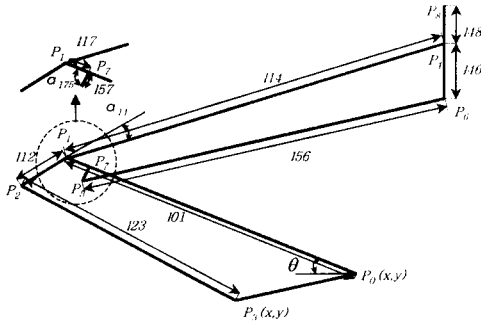


Fig. 2 Kinematic model of the pantograph

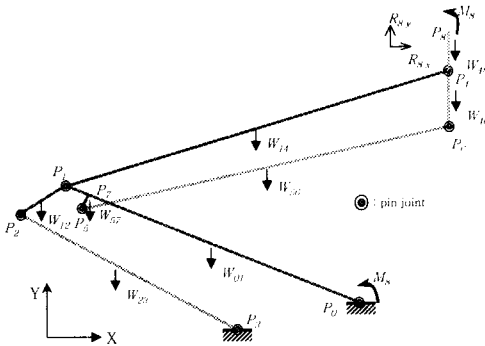


Fig. 3 Mechanical model of the pantograph

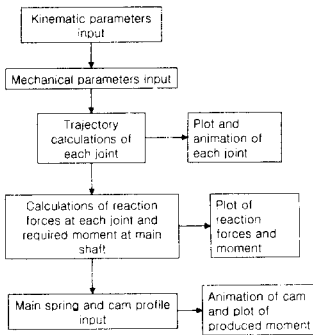


Fig. 4 Configuration of the developed S/W

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

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

$$p_{2x} = p_{1x} - l_{12} * \cos(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312}) \tag{3}$$

$$p_{2y} = p_{1y} - l_{12} * \sin(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312}) \tag{4}$$

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

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

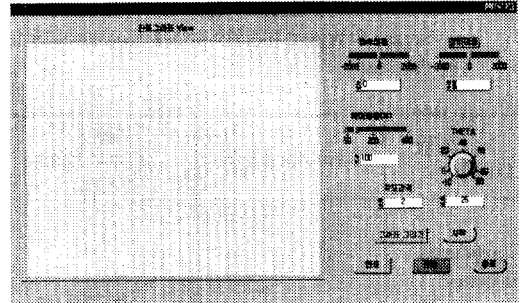


Fig. 5 Main menu of the pantograph kinematic analysis S/W

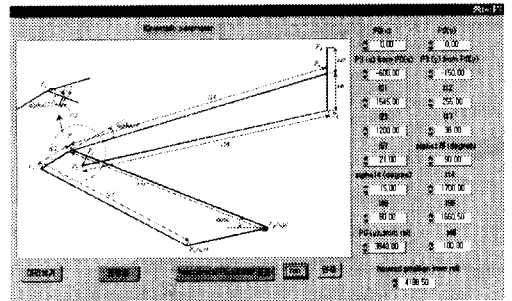


Fig. 6 Kinematic design parameter editor of the pantograph kinematic analysis S/W

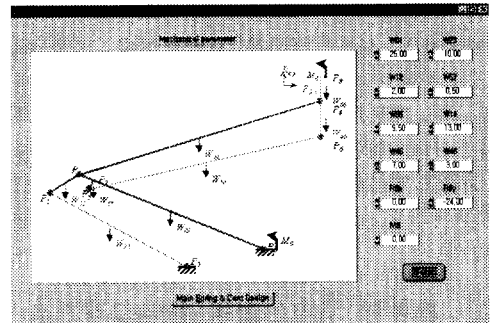


Fig. 7 Mechanical design parameter editor of the pantograph kinematic analysis S/W

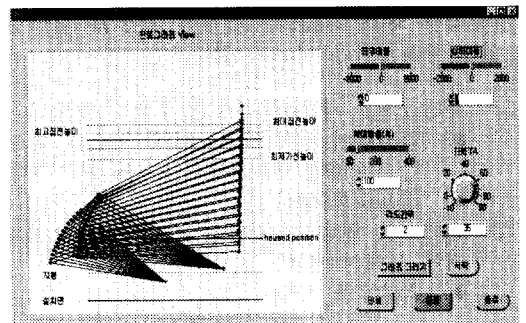
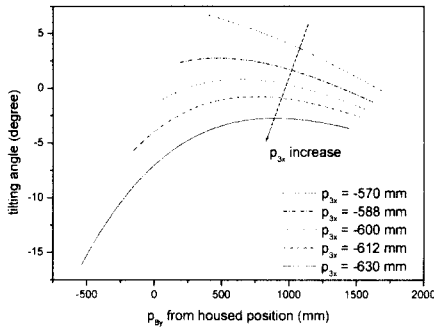
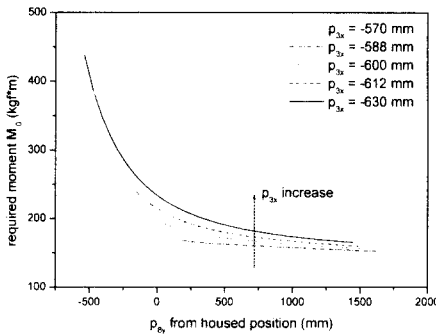


Fig. 8 Result of pantograph kinematic analysis



(a) Variation of pan head tilting angle



(b) Required moment of main shaft

Fig. 9 Effect of p_{3x} on pantograph kinematic performance

$$p_{7x} = (l_{01} - l_{17}) * \cos(\pi - \theta) \tag{7}$$

$$p_{7y} = (l_{01} - l_{17}) * \sin(\pi - \theta) \tag{8}$$

$$p_{5x} = p_{7x} + l_{57} * \cos(\pi - \theta + \alpha_{175}) \tag{9}$$

$$p_{5y} = p_{7y} + l_{57} * \sin(\pi - \theta + \alpha_{175}) \tag{10}$$

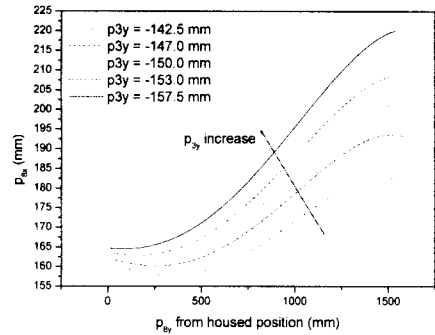
$$p_{6x} = p_{4x} + l_{46} * \cos(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312} - \alpha_{14} + \alpha_{145} + \alpha_{546} - \pi) \tag{11}$$

$$p_{6y} = p_{4y} + l_{46} * \sin(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312} - \alpha_{14} + \alpha_{145} + \alpha_{546} - \pi) \tag{12}$$

$$p_{8x} = p_{4x} + l_{48} * \cos(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312} - \alpha_{14} + \alpha_{145} + \alpha_{546}) \tag{13}$$

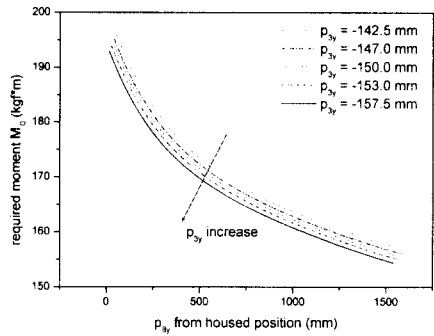
$$p_{8y} = p_{4y} + l_{48} * \sin(\pi - \theta - \alpha_{013} - \alpha_{312} - \alpha_{14} + \alpha_{145} + \alpha_{546}) \tag{14}$$

여기서 α_{abc} 는 절점 a, b, c 사이의 각도를 의미한다. 또한 각 부재에 걸리는 하중도 Fig. 3 으로부터 각 부재의 힘의 평형방정식을 얻은 뒤 이들을 연립하여 해를 구함으로써 주축에 필요한 회전모멘트 및 부재에 걸리는 하중을 구할 수



(a) Variation of p_{8x}

(p_{8x} : distance between main shaft and pan head in x direction)



(b) Required moment of main shaft

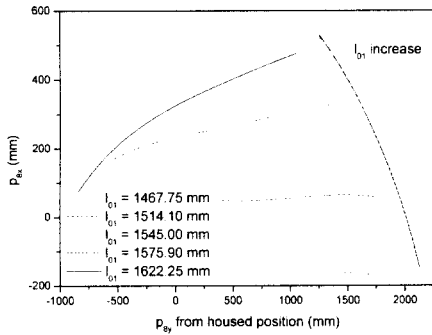
Fig. 10 Effect of p_{3y} on pantograph kinematic performance

있다. 또한 각 부재의 자유물체도(free body diagram)로부터 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.^(4,6)

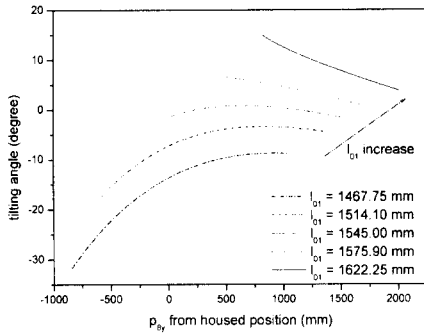
3. 싱글암형 팬터그래프 설계지원

S/W 개발

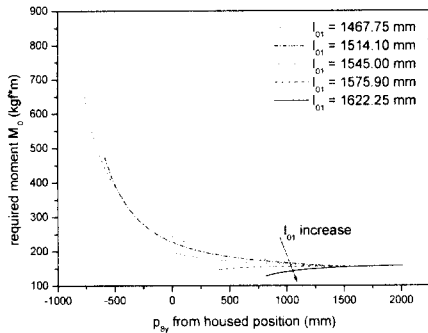
위에서 본 바와 같이 팬터그래프의 주요 부재의 제적 및 팬터그래프 구동에 필요한 주축의 회전력 그리고 각 부재에 걸리는 하중을 주축의 회전각별로 구하는 것은 매우 다양한 변수를 내재하고 있어 수식이 매우 복잡하므로 컴퓨터를 이용하여 수치 연산하는 것이 효과적이다.



(a) Variation of p_{8x}



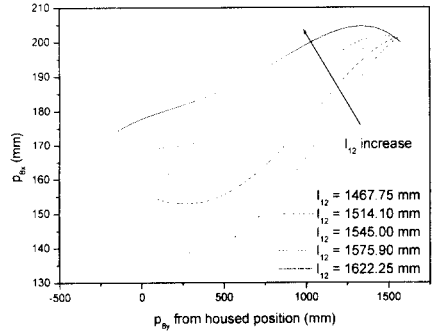
(b) Variation of pan head tilting angle



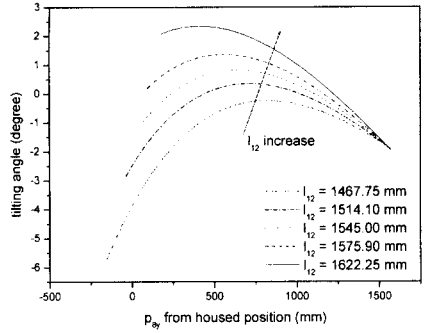
(c) Required moment of main shaft

Fig. 11 Effect of lower arm length (l_{01}) on pantograph kinematic performance

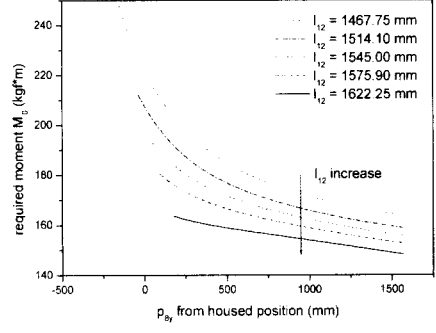
따라서 본 연구에서는 팬티그래프 설계에 반드시 필요한 위의 내용을 C 언어를 이용하여 그래픽 사용자 인터페이스 (graphical user interface, GUI) 환경 하에서 실행할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다.^(5,7) 본 소프트웨어는 위에서 기술한 각 절점의 궤적 및 각 부재에 걸리는 하중 등에 관한 수식을 근간으로 작성되었다.



(a) Variation of p_{8x}



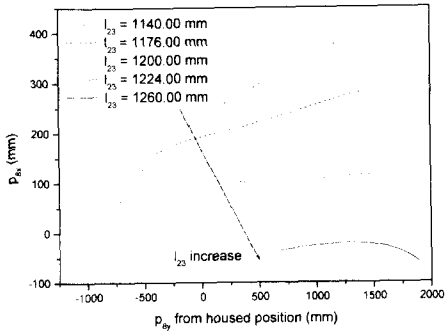
(b) Variation of pan head tilting angle



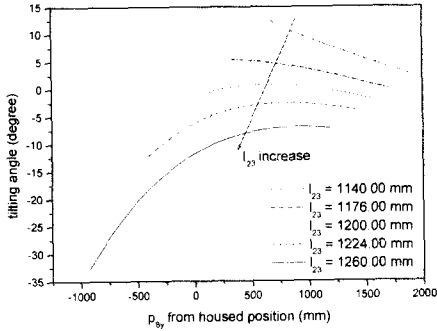
(c) Required moment of main shaft

Fig. 12 Effect of l_{12} on pantograph kinematic performance

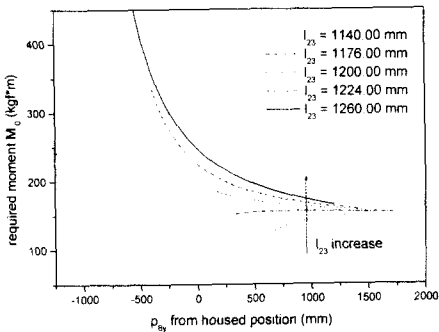
먼저 이 소프트웨어의 구성은 Fig. 4 와 같다. 소프트웨어를 실행시키면 Fig. 5 와 같은 초기화면이 나온다. Fig. 6 의 기구학적 설계변수 편집기에서 팬티그래프의 기구학적 설계변수 들을 수정할 수 있다. 그리고 각 부재의 자중 및 팬헤드 부분의 작용력 등을 수정하기 위해서는 Fig. 7 의 역학적 설계변수 편집기를 이용하여 역학적 설계변수 들을 수정할 수 있다.



(a) Variation of p_{8x}



(b) Variation of pan head tilting angle



(c) Required moment of main shaft

Fig. 13 Effect of thrust rod length (l_{23}) on pantograph kinematic performance

이와 같이 모든 설계변수를 입력 및 수정한 뒤 초기화면의 “시작” 단추를 누르면 입력된 변수들에 의한 팬터그래프의 궤적을 Fig. 8 과 같이 볼 수 있으며 각 부재에 걸리는 작용력 및 필요구동 회전력을 주축의 회전각도 및 팬헤드의 높이별로 구할 수 있다.

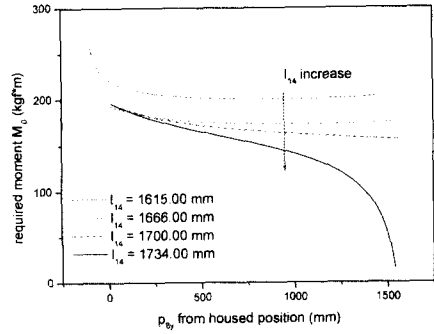


Fig. 14 Effect of upper arm length (l_{14}) variation on required moment of main shaft



Fig. 15 Proto-type of KHST pantograph

4. 기구학적 설계변수의 변화가 기구학적 성능에 미치는 영향분석

2 장에서 논한 바와 같이 싱글암형 팬터그래프의 기구학적 성능과 기구학적 설계변수와 상관관계를 알아 보기 위하여 아래의 기구학적 설계변수들의 변화에 따른 위의 세 가지 특성의 변화를 Fig. 9~14 에 나타내었다. 위의 Fig. 9 는 주축과 스러스트 로드(thrust rod)의 하단부 사이의

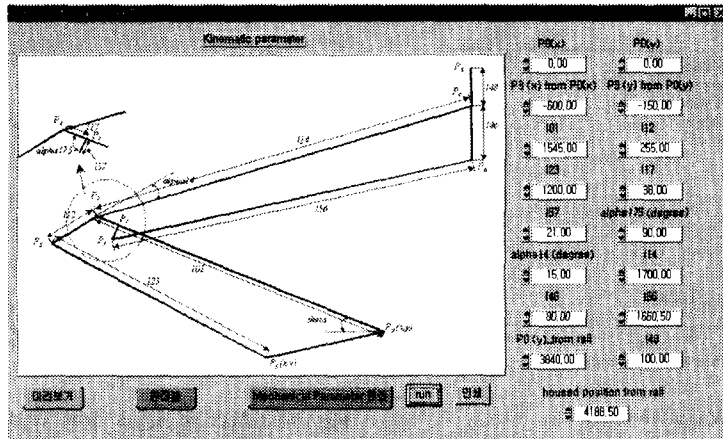
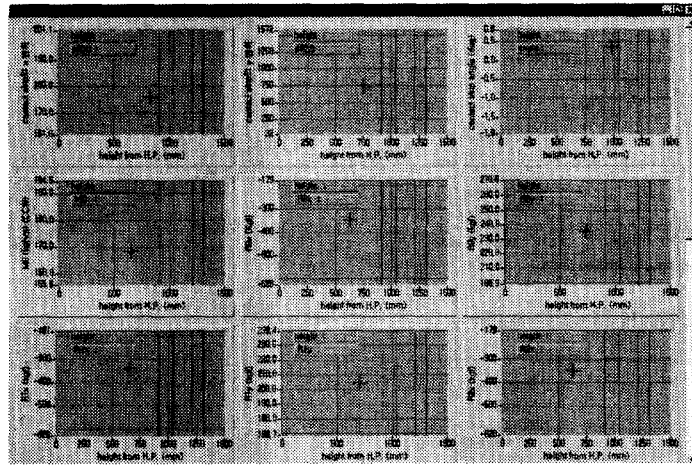
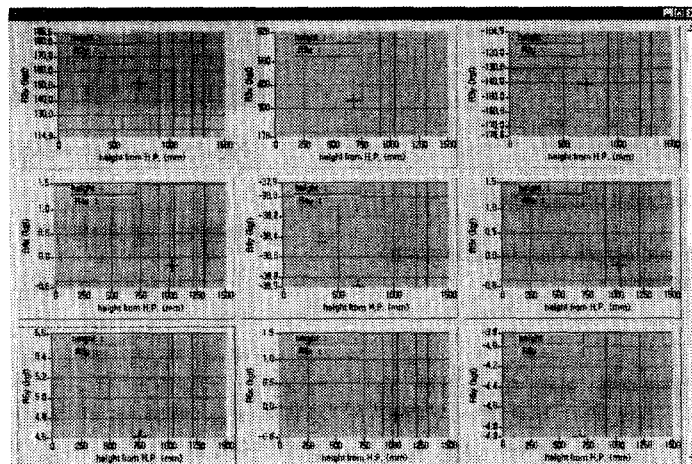


Fig. 16 Kinematic design parameters of KHST pantograph



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



(b) R_3, R_4, R_5, R_6

Fig. 17 Trajectories, required moment and reaction forces of each connecting points of KHST pantograph

Table 2 Kinematic performance variation according to the variation of kinematic design parameters

Kinematic design parameters	P_{8x} (distance between main shaft and pan head in x direction)	Pan head tilting angle	Required moment of main shaft
Increase in P_{3x}	Effect is trivial	Decrease in range	Increase in negative slope
Increase in P_{3y}	Increase in range	Effect is trivial	Decrease in magnitude
Increase in length of lower arm	Increase in range	Increase in range	Decrease in negative slope
Increase in l_{12}	Decrease in range	Increase in range	Effect is trivial
Increase in length of thrust rod	Decrease in range	Decrease in range	Increase in negative slope
Increase in length of upper arm	Increase in range	Effect is trivial	Increase in negative slope
Increase in a_{14}	A little bit increase in range	A little bit decrease in range	Effect is trivial

x 방향 거리변화에 대한 기구학적 특성변화를 나타낸다. 먼저 팬헤드의 틸팅각에 대해서는 두 지점 사이의 거리가 멀어질수록 전체적으로 음의 값을 가지게 되며 그 변화폭도 줄어든다. 주축의 회전력은 전체적으로 다소 증가하며 팬헤드 상승에 따라 감소하는 형태를 나타낸다.

Fig. 10 은 주축과 스러스트 로드 하단부의 y 방향 거리변화에 대한 기구학적 특성변화를 나타낸다. 먼저 팬헤드의 열차진행방향의 변위는 팬헤드 상승에 따라 전체적으로 증가하며 그 기울기도 커진다. 주축의 회전력은 전체적으로 감소한다.

Fig. 11 은 하부암(lower arm)의 길이변화에 대한 기구학적 특성변화를 나타낸다. 먼저 팬헤드의 열차진행방향의 변위는 팬헤드 상승에 따라 전체적으로 증가하며 그 기울기도 커진다. 팬헤드의 틸팅각에 대해서는 길이가 길어질수록 전체적으로 양의 값을 가지게 되며 팬헤드 상승에 따라 기울기가 점점 음의 값을 갖게 된다. 주축의 회전력은 전체적으로 다소 감소하며 그 기울기는 점차 양의 값을 갖게 된다.

Fig. 12 는 하부암의 상단과 스러스트 로드 상단 사이의 거리변화에 대한 기구학적 특성변화를 나타낸다.

먼저 팬헤드의 열차진행방향의 변위는 팬헤드 상승에 따라 전체적으로 증가하며 그 기울기는 작아진다. 팬헤드의 틸팅각에 대해서는 거리가 멀어질수록 팬헤드 상승에 따라 기울기가 점점 큰 음의 값을 갖게 된다. 주축의 회전력은 전체적으로 다소 감소하며 그 기울기는 점차 양의 값을 갖게 된다.

Fig. 13 은 스러스트 로드 길이변화에 대한

기구학적 특성변화를 나타낸다. 먼저 팬헤드의 열차진행방향의 변위는 팬헤드 상승에 따라 전체적으로 감소하며 그 기울기도 작아진다. 팬헤드의 틸팅각에 대해서는 길이가 길어질수록 전체적으로 음의 값을 갖게 되며 팬헤드 상승에 따라 기울기가 점점 양의 값을 갖게 된다. 주축의 회전력은 전체적으로 다소 증가하며 그 기울기는 점차 음의 값을 갖게 된다.

Fig. 14 는 상부암(upper arm)의 길이변화에 대한 주축의 필요 회전력 변화를 나타낸다. 주축의 회전력은 전체적으로 감소하며 그 기울기도 점차 음의 값을 갖게 된다.

위의 결과로부터 각각의 기구학적 설계변수의 변화에 따른 기구학적 성능의 변화를 다음의 Table 2 와 같이 정리할 수 있다. 즉 팬헤드 상승에 따른 팬헤드의 열차진행방향의 변위를 변경시키기 위해서는 주축과 스러스트 로드 하단부 사이의 y 방향 거리, 하부암의 길이, 하부암의 상단과 스러스트 로드 상단 사이의 거리 및 스러스트 로드 길이조정이 필요하며, 팬헤드의 틸팅각을 변경시키기 위해서는 주축과 스러스트 로드 하단부 사이의 x 방향 거리, 하부암의 길이, 하부암의 상단과 스러스트 로드 상단 사이의 거리 및 스러스트 로드 길이조정이 필요하고, 또한 주축의 필요 회전력을 변경시키기 위해서는 주축과 스러스트 로드 하단부 사이의 x,y 방향 거리, 하부암의 길이, 하부암의 상단과 스러스트 로드 상단 사이의 거리, 스러스트 로드 길이 및 상부암의 길이조정이 필요하다는 것을 알 수 있다.

위의 결과를 이용하여 Fig. 15 와 같은 한국형 고속전철의 시작품을 설계 및 제작하였고, 다음의

Fig. 16 은 시작품에 적용된 팬터그래프 기구학적 설계변수이다.⁽⁴⁾ 이때 각 절점의 궤적, 회전력 및 부재에 걸리는 하중을 본 연구를 통해 개발된 S/W를 통해 계산해보면 아래 Fig. 17 과 같다.

여기서 R_a 는 절점 a 에 발생하는 반력을 나타낸다.

아래의 Fig. 17 을 보면 팬헤드 상승에 따른 팬헤드의 열차진행방향의 변위는 약 17 mm 정도이며, 팬헤드의 틸팅각은 $-0.8^\circ \sim 0.5^\circ$ 사이이다. 팬헤드의 틸팅각은 일본의 V-type 의 경우 팬헤드와 플린저 사이가 회전의 여유가 없는 강결합이므로 $\pm 0.5^\circ$ 로 규정하고 있으나 한국형 고속전철의 시작품의 경우 팬헤드와 플린저 사이가 회전의 여유가 $\pm 3^\circ$ 있으므로 위의 계산결과는 만족할만한 수준이다.

또한 팬터그래프 구동에 필요한 회전력은 $158 \text{ kgf} \cdot \text{m} \sim 163 \text{ kgf} \cdot \text{m}$, 각 부재에 걸리는 x 방향 반력은 $\pm 630 \text{ kgf}$ 이내이며 y 방향 반력은 $-172 \text{ kgf} \sim 262 \text{ kgf}$ 이내인 것으로 계산되어지며 이 값들은 각 부재의 치수결정에 사용되어 진다.

5. 결 론

위에서 본 바와 같이 싱글암형 팬터그래프의 기구설계를 위하여 기구학적 측면에서의 성능을 나타낼 수 있는 주요 항목을 선정하였고 이를 예측하기 위하여 기구해석 모델을 작성하여 기구해석을 수행하는 팬터그래프 기구해석 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 소프트웨어를 통하여 각 기구학적 설계변수와 기구학적 성능과의 상관관계를 알아보았다. 이 상관관계를 이용하여 한국형 고속전철용 팬터그래프 시작품설계에 적용시켜 보았다.

즉, 각 기구학적 설계변수와 기구학적 성능과의 상관관계를 이용하여 기구학적 설계변수를 결정하였고 이 소프트웨어를 통하여 시작품 팬터그래프의 궤적 및 기구학적 성능을 예측해 보았다. 향후에는 이러한 성능인자들로써 목적함수를 만들어 이 목적함수를 최대로 하는 최적의 기구학적 설계변수값을 구하는 최적설계 및 일정한 압상력을 유지하기 위한 캠의 형상설계가 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 G7 고속전철기술개발사업의 “팬터그래프 개발”과제의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분의 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Poetsch, G., Evans, J., Meisinger, R., Kortum, W., Baldauf, W., Veitl, A. and Wallaschek, J., 1997, “Pantograph/Catenary Dynamics and Control”, *Vehicle System Dynamics*, 28, pp. 159 ~ 195.
- (2) 新井博之, 上野照雄, 1999, “VHSRパンタグラフの開発設計”, 東洋電機製造株式会社.
- (3) 김용운, 1982, “수학용어 영한사전”, 우성문화사.
- (4) 강상균, 남기원, 전규창, 1993, “메스매티카 입문에서 활용까지”, 성안당.
- (5) National Instruments, 1998, “LabWindows/CVI 5.0 Users Manuals.”
- (6) 배정찬, 정경렬, 김휘준, 김경택, 김영식, 박훈규, 윤재돈 외, 1999, “팬터그래프 개발,” 한국생산기술연구원.
- (7) 한국생산기술연구원, 1999, 5, KASSAP(Kinematic Analysis Software for Single Armed Pantograph), 99-01-12-1799, 한국소프트웨어진흥원.