

# 한국형 고속전철용 판토틀라프 구조설계 검증 및 설계 최적화

## Structural Design Verification and Design Optimization of Pantograph for Korean Very High Speed Train

정경렬\* · 김휘준\* · 백진성\* · 박수홍\*\*

Kyung-Ryul Chung, Hwi-Jun Kim, Jin-Seong Baek, Soo-Hong Park

**Key Words** : pantograph(판토틀라프), structural design(구조설계), design optimization(설계최적화), single arm type pantograph(싱글암형 판토틀라프), kinematic design(기구설계), finite element analysis(유한요소해석)

### ABSTRACT

There are three items, which are panhead displacement, tilting angle of panhead, required moment of main shaft, which representing kinematic performance of pantograph. Kinematic variables effective on kinematic performance are length of each components and installation angle. In this study, cost function is defined with 3 items. By this cost function, length of thrust rod was optimized.

Finite element analysis was used to consider structural soundness. Finite element model was qualified by comparison between analysis result with experiment result. By qualified F.E. model various severe condition was simulated to consider structural soundness.

### 1. 서론

가선과 판토틀라프로 구성된 고속전철의 집전(current collecting)시스템은 고속전철의 동력원 공급계통으로서 고속전철의 운행 중에 항상 안정적이며 연속적으로 동력을 공급하는 역할을 한다. 따라서, 판토틀라프도 고속전철 차량의 부분품의 일부로서 구조적인 건전성을 기본적으로 가져야 하며 돌발적인 가혹환경 (터널 진 출입, 교행, 폭풍 및 돌풍 등)에서도 그 구조적 건전성을 잃지 말아야 한다. 또한 집전성능은 열차의 속도향상과 직접 관련되며, 고속 집전시에 발생하는 가장 중요한 기술적 문제는 가선에서 판토틀라프가 분리되는 이선(loss of contact)현상이다.

집전은 판토틀라프의 주스프링에 의해 밀어주는 압상

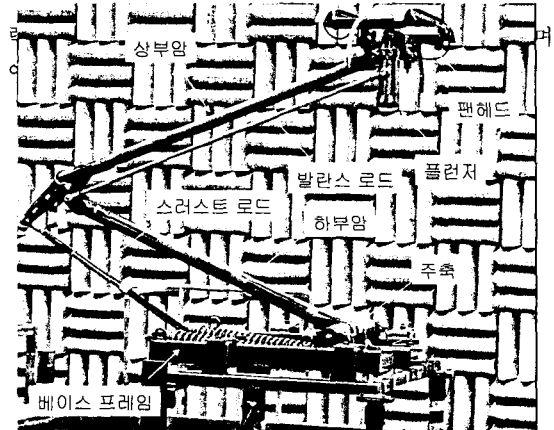


그림 1.1 한국형 고속용 판토틀라프의 구조

따라서 판토틀라프는 이선 현상이 생기지 않게 하기 위해 지속적으로 집전판에 일정한 압상력을 가해야 한다.

\* 한국생산기술연구원 수송기기연구원  
E-mail : chungkr@kitech.re.kr  
Tel : (041) 5898-251, Fax : (041) 5898-230  
\*\* 산업기술시험원 산업설비팀  
E-mail : psh@ktl.re.kr  
Tel : (02) 8601-383, Fax : (02) 8601-554

즉, 정적압상력은 판토품하 하단부의 주스프링이 담당한다. 일정한 정적 압상력을 내기 위해 주스프링의 복원력이 캠을 통해 주축에 회전력 형태로 전달된다.

판토품하의 기구학적 성능을 나타낼 수 있는 항목은 팬헤드의 열차진행 방향의 변위, 팬헤드의 틸팅각 그리고 주축회전 모멘트 등이다<sup>(1)</sup>. 판토품하의 기구학적 성능에 영향을 미치는 기구학적 변수에는 각 부재의 길이 및 설치 각도 등이다. 따라서 본 연구에서는 위의 3가지 항목으로 성능함수를 정의하고, 주요부재의 길이를 변수로 하여 성능함수를 최소화하는 최적화된 부재의 길이를 정하였다.

또한 가혹환경에서의 구조적 건전성을 검토하기 위하여 유한요소해석을 사용하였다. 유한요소해석에 사용될 유한요소모델의 타당성을 검증하기 위해 유한요소해석결과와 풍동시험결과와 비교하여 유한요소모델의 타당성을 검증하였다. 가혹환경조건에서의 공력을 계산한 뒤 유한요소해석을 통하여 각 부재에서의 응력분포를 구하여 부재의 항복강도와 비교하였다<sup>(2)</sup>. 유한요소해석결과로부터 부재의 취약부위에 대한 설계개선안을 도출하였다.

## 2. 기구설계 최적화

본 연구에서는 그림 2.1과 같이 스러스트 로드와 길이를 제외한 모든 기구변수를 정한 뒤 스러스트 로드와 길이를 최적화하기 위하여 성능함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$C = 0.2 * X + 0.5 * T + 0.3 * M \quad (1)$$

$$\text{여기서, } X = \text{RMS}_{x\text{변위}} / \text{MAX}(\text{RMS}_{x\text{변위}}) \quad (2)$$

$$T = \text{RMS}_{\text{틸팅각}} / \text{MAX}(\text{RMS}_{\text{틸팅각}}) \quad (3)$$

$$M = \text{RMS}_{\text{모멘트}} / \text{MAX}(\text{RMS}_{\text{모멘트}}) \quad (4)$$

정의된 성능함수를 최소화하면 스러스트로드의 길이가 최적화 되는 것이다. 스러스트로드의 길이를 1190mm ~ 1200mm까지 위의 성능함수를 구하여 스러스트 로드와 길이를 최적화하면 다음과 같다.

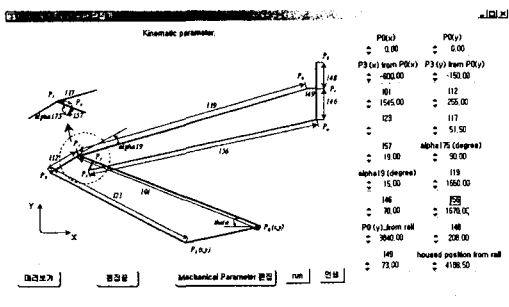


Fig. 2.1 Kinematic variables of pantograph

위의 최적화 결과로 스러스트 로드와 길이를 1194mm로 정하였다.

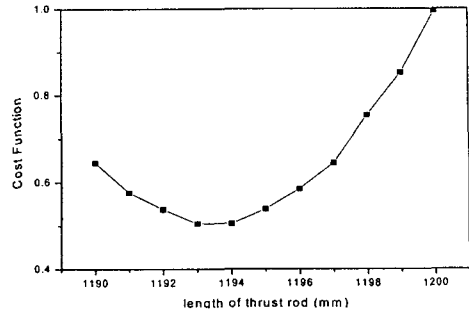


Fig. 2.2 Cost function according to length of thrust rod

## 3. 구조설계 검증

### 3.1 정상주행시 공력예측

판토품하에 작용하는 외력에는 중력, 정적인 압상력, 양력, 항력, 가선과 집전판 사이의 마찰력등이 있다. 탄소계 집전판을 사용하는 경우 마찰력은 무시할 수 있고, 중력, 압상력은 알 수 있으므로 양력 및 항력을 알면 판토품하에 미치는 모든 외력을 알 수 있다. 여기서 중력은 부재의 자중이고, 압상력은 7kgf이다. 그리고 양력 및 항력은 판토품하가 평균집전높이에서 정방향으로 설치되어있는 상태에서 열차가 350km/hr로 정상주행할 경우에 대하여 구하였다.

Table 3.1 Aerodynamic force on each component at train speed 350km/hr

(단위:kgf)

부재	$F_x$	$F_y$	$F_z$
하부암	5.3	0.0	12.5
스러스트 로드	4.2	0.0	7.2
상부암	3.2	0.0	-9.2
발란스 로드	0.8	0.0	-2.7
플런저	12.8	0.0	0.0
팬헤드	94.5	0.0	13.5

여기서  $F_x$ 는 열차의 길이방향 즉, 열차진행방향의

반대방향이며,  $F_y$ 는 침목방향이며,  $F_x$ 는 상하방향 즉, 중력반대방향이다. 또한 각 부재의 자중은 그림 3.1에 나타내었다.

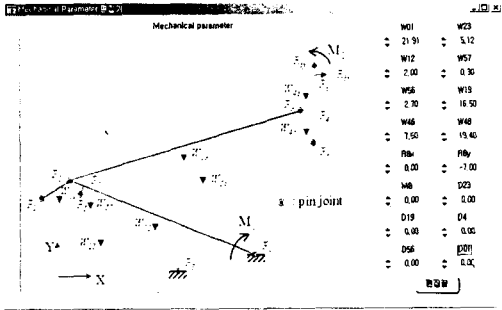


Fig. 3.1 Mass and load on each components

위의 자중과 압상력 및 공력을 가지고 평균집전높이에  
서 각 부재에 작용하는 반력들을 구하면 다음의 표 3.2와  
같다.

Table 3.2 Reaction force on each components (average  
current collecting height)

M0 (kgf*m)	111.2		
R0x (kgf)	-601.2	R5x (kgf)	228.0
R0y (kgf)	325.7	R5y (kgf)	75.7
R1x (kgf)	-824.3	R6x (kgf)	228.8
R1y (kgf)	241.6	R6y (kgf)	70.2
R2x (kgf)	-484.5	R9x (kgf)	336.2
R2y (kgf)	262.5	R9y (kgf)	49.8
R3x (kgf)	480.2	R8x (kgf)	94.6
R3y (kgf)	-264.6	R8y (kgf)	-7+13.5

### 3.2 구조해석 및 검증

#### (1) 유한요소해석에 의한 구조검토

실제 판토품 제작시 각 부재간의 조립 및 용접의  
용이성을 위하여 각 부재를 중공 steel 파이프(압력배관  
용 탄소강관, SP38)<sup>(3)</sup>로 하기로 하였고 이 부재의 외  
경치수 및 두께를 앞장의 기구해석에서 얻어진 각 부재  
에 걸리는 하중 및 회전력을 기초로 하여 다음과 같이  
결정하였다.

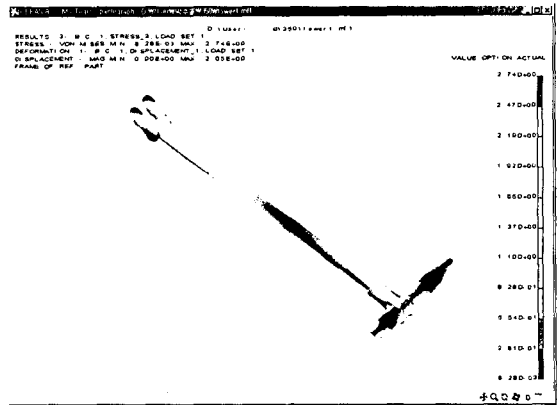
Table 3.3 Out-diameter and thickness of each  
components

부재	외경 (mm)	두께(mm)	소재
주축	89.1	5.5	SP38
하부암	73.0	5.5	
상부암	60.5	5.5	
스러스트 로드	34.0	3.25	
발란스 로드	21.7	2.65	

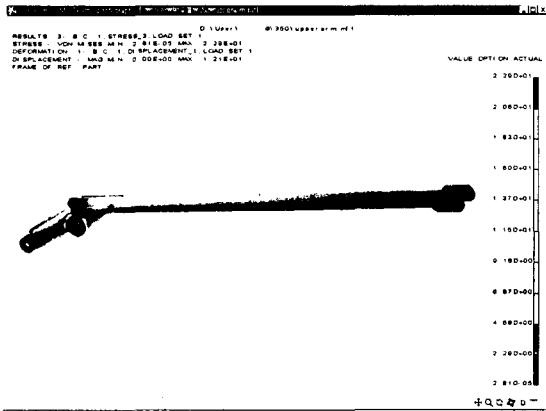
위와 같이 결정된 부재를 조립하여 만들어진 판토품  
프가 구동중 받을 수 있는 하중조건 하에서 구조적 안전  
성을 갖는지 확인하기 위하여 유한요소해석을 실시하였  
다.

위의 표 3.2의 하중을 각 부재의 유한요소모델에 적용  
한 결과 다음과 같은 응력분포를 얻을 수 있었다.

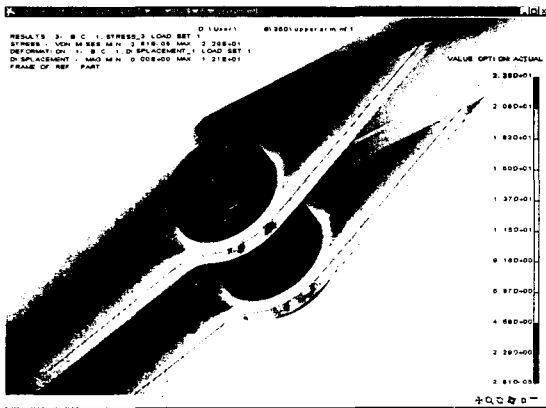
먼저 하부암과 주축을 보면 최대 Von Mises 주응력이  
2.7 kgf/mm<sup>2</sup>이고, 상부암에서는 22.9 kgf/mm<sup>2</sup>이 작용한  
다. 상부암에서는 그림 3.2의 (c)를 보면 브라켓의 형상  
에 따른 국부적인 응력집중으로 생각된다. 따라서 이 부  
분의 오목한 부분을 제거하여 해석하면 주응력의 크기가  
22.9 kgf/mm<sup>2</sup>에서 13.4 kgf/mm<sup>2</sup>으로 크게 줄었다. 이들  
응력치는 SP38의 항복강도인 33.5kgf/mm<sup>2</sup>에 비해 작  
은 수치이다<sup>(3)</sup>.



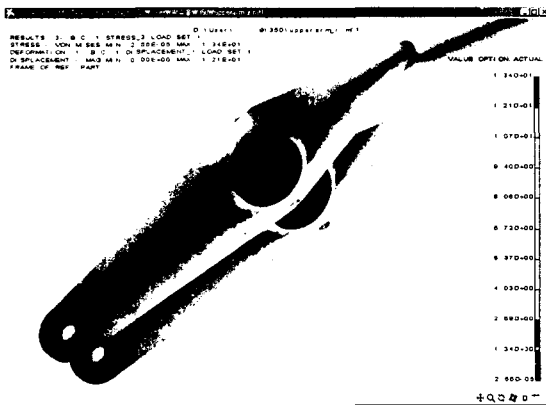
(a) main shaft and lower arm



(b) upper arm



(c) upper arm (detail)



(d) after modification

그림 3.2 Stress Distribution of each component at train speed 350km/hr

## (2) 풍동시험에 의한 검증

다음은 풍동시험을 하면서 구조의 건전성을 보기 위하여 그림 3.4와 같이 주요 응력집중이 예상되는 위치에 스트레인게이지를 부착하여 응력을 측정하였다. 그 결과는 그림 3.5와 같다.

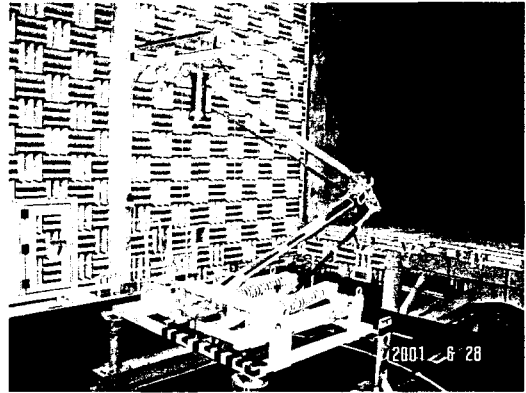


Fig. 3.3 Proto-type installed in low noise wind tunnel

다음의 그림 3.5는 열차가 350km/hr로 정상주행할 경우의 풍속의 변화에 대한 응력의 변화이다. 대체적으로 풍속의 증가와 함께 응력도 증가하며 제일 큰 응력이 걸리는 지점은 1번 지점이다. 풍속 350km/hr에서 1번지점에 5,432kgf/mm<sup>2</sup>의 응력이 걸린다. 이는 상부압 부재인 압력배관용탄소강관(SPPS 38)의 항복강도 33.5kgf/mm<sup>2</sup>의 16.2%에 해당되어 구조적으로 매우 안정적이다.

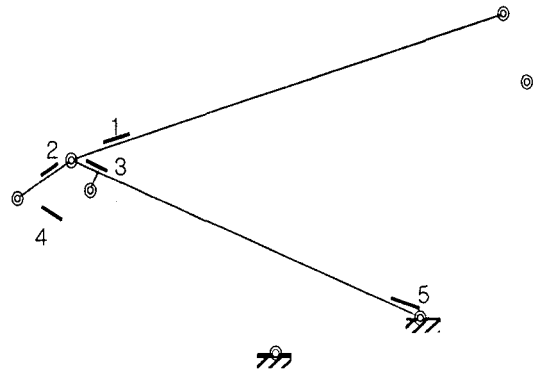


Fig. 3.4 Location of strain gauges

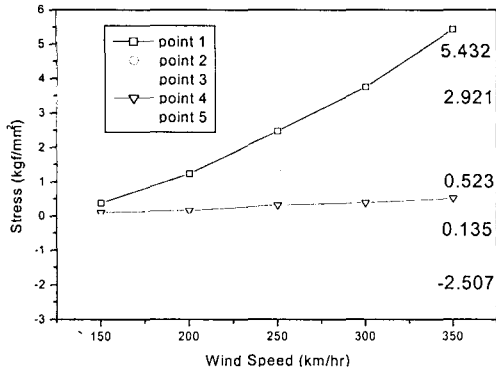


Fig. 3.5 Measured stress according to wind speed at train speed 350km/hr

또한 앞절에서 구조검토에 사용된 유한요소 모델의 타당성을 검증하기 위하여 풍동시험에서 측정된 응력값과 해석치를 주요부재인 상·하부암에 대하여 비교하여 보았다.

Table 3.4 Comparison between measured stress and calculated stress

위치	측정치 (kgf/mm <sup>2</sup> )	해석치 (kgf/mm <sup>2</sup> )	상대오차 (%)
1	5.432	6.1	12.3
2	2.921	3.0	2.7
3	-2.507	-2.2	12.2

표 3.3의 측정치와 해석치를 보면 2.7 ~ 12.3 %의 상대오차를 갖는 것을 알 수 있으며 따라서 유한요소모델의 타당성을 확보하였다고 볼 수 있다.

### 3.3 가혹환경 해석

판토그래프가 적용될 수 있는 가혹조건으로는 크게 보아 아래의 3가지로 볼 수 있다. 이때의 양력 및 항력은 판토그래프가 평균집전높이에서 정방향으로 설치되어있는 상태에서 구하였다.

- ① 열차가 385km/hr로 정상주행할 경우
- ② 열차가 태풍(180km/hr)을 안고 350km/hr로 주행할 경우
- ③ 두 열차가 각각 350km/hr로 교행할 경우

Table 3.5 Aerodynamic force on each component at train speed 385km/hr

(단위:kgf)

부재	$F_x$	$F_y$	$F_z$
하부암	6.4	0.0	15.2
스러스트 로드	5.1	0.0	8.7
상부암	3.9	0.0	-11.1
발란스 로드	1.0	0.0	-3.3
플런저	15.4	0.0	0.0
팬헤드	114.4	0.0	16.3

Table 3.6 Aerodynamic force on each components under typhoon condition

(단위:kgf)

부재	$F_x$	$F_y$	$F_z$
하부암	12.2	0.0	28.7
스러스트 로드	9.7	0.0	16.4
상부암	7.3	0.0	-21.0
발란스 로드	1.9	0.0	-6.2
플런저	29.3	0.0	0.0
팬헤드	216.8	0.0	30.8

Table 3.7 Aerodynamic force on each components under crossing condition

(단위:kgf)

부재	$F_x$	$F_y$	$F_z$
하부암	16.8	-4.0	18.3
스러스트 로드	1.9	-1.5	10.3
상부암	10.9	-3.6	-11.8
발란스 로드	3.3	-1.3	-3.5
플런저	22.2	-0.9	0.0
팬헤드	150.6	-0.5	20.1

위의 자중과 압상력 및 공력을 가지고 평균집전높이에서 각부재에 작용하는 반력들을 구하면 다음의 표 3.8과 같다.

Table 3.8 Reaction force of each component

	정상주행 (385km/hr)	태풍 (350km/hr + 50m/s)	교행 (350km/hr + 350km/hr)
M0 (kgf*m)	102.1	53.9	79.6
R0x (kgf)	-672.8	-1037.9	-827.0
R0y (kgf)	347.6	458.2	390.3
R1x (kgf)	-936.0	-1511.3	-1155.7
R1y (kgf)	251.5	303.8	274.8
R2x (kgf)	-531.6	-770.4	-623.2
R2y (kgf)	287.3	413.3	336.2
R3x (kgf)	526.5	760.7	621.4
R3y (kgf)	-290.9	-424.6	-341.3
R5x (kgf)	269.8	486.3	345.3
R5y (kgf)	89.3	159.7	113.7
R6x (kgf)	270.9	488.3	348.6
R6y (kgf)	83.3	150.8	107.8
R9x (kgf)	400.7	734.3	521.3
R9y (kgf)	65.7	147.8	93.8
R8x (kgf)	114.4	216.8	150.563
R8y (kgf)	-7+16.275	-7+30.843	-7+20.134

위의 표 3.8의 하중을 각 부재의 유한요소모델에 적용하여 각각의 가혹조건에 대해서 주요부재의 최대 주응력의 크기를 구하면 다음과 같다. 최대 크기가 상부암에서 발생하며 그 크기가 태풍조건에서 20.8 kgf/mm<sup>2</sup>이며 이 크기는 부재의 항복강도 33.5 kgf/mm<sup>2</sup>의 63%에 해당된다. 또한 다른 부재는 최대 10.1 kgf/mm<sup>2</sup>로써 항복강도에 비해 작은 수준이다.

Table 3.9 Maximum Von Mises stress of each component

(단위:kgf/mm<sup>2</sup>)

조건 부재	정상주행 (385km/hr)	태풍 (350km/hr + 50m/s)	교행 (350km/hr + 350km/hr)
주축+하부암	3.2	5.4	4.0
슬러스트로드	4.2	7.1	4.7
상부암	14.8	20.8	17.3
발란스로드	5.40	10.1	7.6
플런저	4.6	8.6	6.0

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 판토품의 기구성능을 나타낼 수 있는 성능함수를 팬헤드의 열차진행방향변위, 팬헤드의 틸팅각 및 주축의 회전력의 함수로 정의하였다.
2. 주요부재의 길이를 변수로 하여 성능함수를 최소화하는 최적화된 부재의 길이를 정하였다.
3. 유한요소해석결과와 풍동시험결과와 비교함으로써 가혹환경에서의 구조적 건전성을 검토하기 위하여 유한요소해석에 사용될 유한요소모델의 타당성을 검증하였다.
4. 가혹환경조건에서의 공력을 계산한 뒤 유한요소해석을 통하여 각 부재에서의 응력분포를 구하여 부재의 항복강도와 비교하였다.
5. 유한요소해석결과로부터 부재의 취약부위에 대한 설계개선안을 도출하였다.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

- (1) 정경렬, 박수홍, 김휘준, 배정찬, 2001, "싱글암형 팬터그래프 구조설계를 위한 기구해석기법 개발", 대한기계학회논문집, 제25권, 제4호, 대한기계학회, pp. 610~618
- (2) 배정찬 외, 2000, "팬터그래프 개발", 한국생산기술연구원
- (3) 小栗富士雄 등, 1999, "표준 기계설계도표편람(개정증보3판)", 대광서림