

한국형 고속전철 시제차량용 판토품라프의 기본설계

Basic Design of Pantograph for Prototype Train of Korean Very High Speed Rail

김휘준* 박수홍** 오창진* 정경렬* 배정찬*
Kim, Hwi-Jun Park, Soo-Hong Oh, Chang-Jin Chung, Kyung-Ryul Bae, Jung-Chan

ABSTRACT

According to the current trend of single arm type pantograph for high speed train, korean pantograph designed to single arm type will be installed on each power car roof of prototype train of korean very high speed rail configured to 7 cars and have the characteristics of maximum 1% contact loss at 350 km/h speed. This study is devoted to design basically element components of pantograph for korean very high speed train on the basis of kinematic analysis, static analysis and dynamic analysis, followed by making the basic drawings of korean pantograph. This drawings will be complemented through certification tests of prototype pantograph and verification of analysis software.

1. 서론

고속전철에서 판토품라프는 동력차 지붕에 탑재되어 가선과 안정적인 추종성을 확보하여 동력차에 안정적인 전력을 공급해 주는 장치로서 고속전철의 속도가 증가할수록 안정적인 고속주행을 위한 판토품라프의 중요성은 높아지고 있다. 종래에는 다이아몬드 및 크로스 암 판토품라프가 주로 사용되었으나, 설치 면적에 대해 집전높이가 높고 약간의 변형만으로도 추종성능 향상을 기대할 수 있는 장점 때문에 최근 싱글 암 판토품라프가 고속전철용으로 주로 사용되고 있으며, 저속용 판토품라프에도 그 적용범위를 넓혀가고 있다. 일본 JR의 경우, 재래선에 사용되는 판토품라프 중 절반이 싱글암 판토품라프이며, 신간선에도 500계의 V형 판토품라프를 시작으로 기존의 크로스 암 판토품라프에서 싱글 암 판토품라프로 점차 바뀌어 가고 있다.

싱글 암 판토품라프는 부재의 일부 변화에도 특성이 크게 달라지므로 우수한 추종특성의 판토품라프 설계를 위해서는 기구해석, 강도해석, 동특성 해석 및 공력소음 해석 등과 같은 해석결과를 토대로 설계하고 시작품을 제작한 다음 성능시험을 통해 미비점을 보완하는 일을 반복적으로 수행하면서 최종 목표성능에 도달해야 한다. *

한국형 고속전철 시제차량은 7량 편성으로 2대의 판토품라프를 동력차 지붕에 탑재하여 1개의 판토품라프를 이용해 집전하면서 최고 350km/h의 주행속도에서 이선율 1%이하의

* 한국생산기술연구원 ** 산업기술시험원

고집전성을 목표로 하고 있다. 이에, 본 연구에서는 한국형 고속전철 시제차량의 요구사양 및 KNR 가선계에 적합한 판토품의 기본설계를 위해 싱글 암 판토품의 사양을 결정한 다음 기구해석, 강도해석 및 동특성 해석 결과를 바탕으로 요소 부품의 설계를 수행하였다. 본 연구를 통해 결정된 한국형 고속전철 시제차량용 판토품의 기본설계는 상세설계, 시제품 제작 및 성능시험을 통해 보완해 나갈 계획이다.

2. 한국형 고속전철용 판토품의 설계사양

판토품의 형상 및 제원은 차량편성과 가선의 조건에 따라 결정되므로 한국형 고속전철 시제차량용 판토품은 KNR 가선계와 차량의 요구특성에 적합하도록 최적 설계되어야 한다. 일반적으로 유럽형 고속용 판토품은 집전높이가 100mm 에서 2800mm 로 넓은 범위의 집전이 가능하나 일본 신칸센용 판토품은 100mm 에서 1350mm 로 집전폭이 좁다. 이와 같은 이유는 유럽의 경우 가선 조건이 다른 지역을 운행해야 하기 때문에 집전범위가 커야 하지만 일본의 경우 가선의 변화폭이 300mm 내외로 한정되어 있어 좁은 집전범위를 갖고 있다. 집전폭이 좁을 경우, 구조가 작고 가벼운 판토품의 설계 및 제작이 가능하여 추중성 및 저소음에 유리한 것으로 알려져 있다. KNR 가선계의 경우 그림 1 에서 보는 바와 같이 가선의 설치 높이 차이가 기존구간과 고속구간을 통틀어 최고 300mm 이므로 판토품의 집전높이는 100mm 에서 1500mm

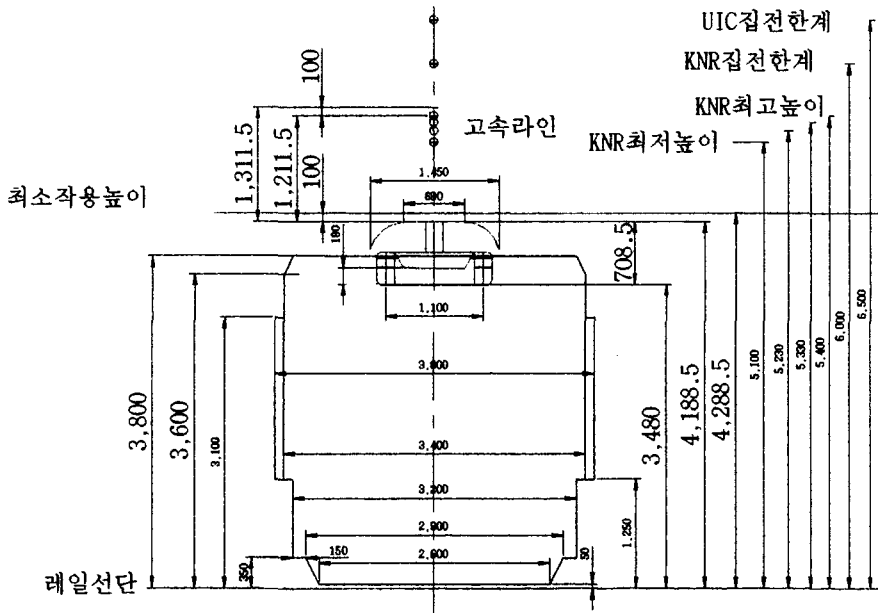


그림 1 KNR 차량한계에 대한 한국형 고속용 판토품의 집전높이

이면 충분할 것으로 판단된다. 표 1의 한국형 판토품의 설계사양은 경부고속전철의 것과의 동일하고 집전전류만 1000A로 높다. 이들 사양 중 가선조건을 검토해 보면 일반적으로 유럽이나 일본 등과 같은 선진국에서는 차량의 최고속도가 파동전파속도의 70%이내에서 운행하고 있는 것에 비해, 350 km/h로 주행시 차량 속도는 KNR 가선계의 2000daN 가선 장력하에서 파동전파속도의 79%에 해당하는 매우 높은 속도이다. 차량의 운행속도가 가선의 파동전파속도의 70%를 넘었을 때, 이선율이 급격히 증가하고, 가선이 심한 응력을 받는 것으로 알려져 있으므로, 350km/h의 속도에서 안정적인 집전 및 가선의 수명연장을 위해서 가선의 장력을 높이거나 또는 선밀도를 낮춘 가선계로의 변경을 검토할 필요가 있다고 사료된다. 참고로 일본의 경우 기존의 Hard drawn Cu 가선보다 선밀도가 낮은 CS 가선이나 TA 가선을 개발하여 일부 사용하고 있다.

3. 한국형 고속용 판토품의 구동원리 및 부품 구성

1988년 독일의 DSA 350 S 판토품이 408.5km/h를 돌파한 이래 표 2에서 보는 바와 같이

표 1 한국형 고속전철 시제차량용 판토품의 설계사양

항 목		설계치		비고	
개발, 설계 목표		이선율 < 1%			
차량편성	(1)차량편성		20량, 집중식		
	(2)판토품설치/운행대수		2대 / 1대		
	(3)움직임 ①상하최대변위량	mm	±50(판토품)		
	②좌우 최대변위량	mm	±10(판토품)		
	(4)속도 ①최대속도	km/h	385		
	②평균속도	km/h	258		
(6)판토품제어 방식		Air Cylinder / Spring			
운영 환경	(1)기온	℃	-25 ~ +40		
	(2)소음	dB	91	개괄적	
	(3)습도	%	5 ~ 100		
	(4)강우량	Mm	1250 ~ 1360		
	(5)풍속 (순간, 연속)	M/s	50, 45		
전차선 제원	(1)방식		방식	Heavysimple	
	(2)전압	KV	25	조	Ts 1400
	(3)재질(밀도), $\rho t(\rho s)$	kg/m		가	As 65
	(4)좌우편차	mm		선	ρs 0.605
	(5)단면적 At(As)	mm ²		가	Tt 2000
	(6)장력 Tt(Ts)	daN		선	At 150
	(7)span 거리 S	m	63		ρt 1.334
	(8)hanger 거리 a	m	6.75		
	(9)파동전파속도	km/h		440	308(70%)
전차선과 차량관계	(1)전차선 최고 높이	mm	5400		레일선단부터
	(2)전차선 표준 높이	mm	5280		
	(3)전차선 최저 높이	mm	5100		
	(4)판토품 설치 높이	mm	3480		
	(5)판토품 접은 높이	mm	4188.5		
	(6)동력차 지붕 높이	mm	3800		
	(7)판토품 집전 시작 높이	mm	5100(911.5)		(접은위치부터)

유럽에서는 에어 벨로우즈에 의한 구동시스템의 단순화를 통해 110kg 이하의 경량화 및 속도에 따른 압상력의 변화를 통해 고추중성 확보를 꾀하고 있으나, 일본에서는 에어 벨로우즈의 높은 가격 및 실링(sealing)부의 짧은 수명에 따른 빠른 교환 주기 등의 단점을 이유로 V형 판토티그래프의 경우 주스프링에 의한 상승 및 공압 실린더에 의한 하강 방식을 채택하고 있다.

한국형 판토티그래프에서는 주스프링의 복원력에 의한 상승 및 공압 실린더에 의한 하강 방식을 채택하였는데, 판토티그래프의 상승 및 하강이 공압 실린더의 공기 공급 및 제거에 의해 제어되기 때문에 공기압에 의해 판토티그래프를 구동하는 기존의 선진 판토티그래프의 구동방식과 제어원리는 유사하다고 할 수 있다. 주요부품에 대한 공압 시스템의 동작원리를 살펴보면 공기압이 공급되면 공압 실린더가 후퇴하여 주스프링의 인장력에 의해 판토티그래프가 상승하고, 공기압이 제거되면 공압 실린더가 전진하여 판토티그래프가 하강하게 된다. 또한 판토티그래프가 하강하여 접하게 되면 잠금장치의 공압실린더는 후퇴하여 걸쇠 잠금이 가능하고 판토티그래프가 상승하는 공기압 공급시 잠금장치 공압실린더는 전진하여 걸쇠잠금을 해지하게 되어, 전체 구동에 무리가 없다. 이밖에 집전

표 2 선진 각국 고속용 판토티그래프 공압시스템의 특징

판토티종류 특성항목		GPU - 25K	DSA 350 S, SEK	V type (500 系)	SMC Schunk BL - series
작동 방식	상승	압력공급 → 실린더압축 → 상승스프링력작용	압력공급 → 에어 벨로우즈팽창	압력제거 → 실린더압축 → 메인스프링 복원	압력공급 → 에어 벨로우즈 팽창
	하강	압력제거 → 실린더스프링력작용	압력제거 → 에어 벨로우즈수축	압력공급 → 실린더팽창 → 메인스프링 신장	압력제거 → 에어 벨로우즈 수축
공압특성		밸브의 구조에 있어 유량조절 및 압력제한 기능을 동시에 갖고 있음	에어 벨로우즈를 사용하여 변위생성과 강성변화가 동시에 가능	에어 실린더 내부에 스프링이 없어 공압 이상시 상승 상태 유지	에어 벨로우즈를 사용하여 변위생성과 강성변화가 동시에 가능

표 3 한국형 판토티그래프 주요부품에 대한 공압시스템 동작 원리

주요부품 및 동작		동작원리
판토티그래프 프레임	상승	압력공급 → 에어실린더 후퇴 → 메인스프링 인장력 작용(인장-복원) → 판토티그래프 상승
	하강	압력제거 → 에어실린더 전진 → 메인 스프링 인장력 상쇠(복원-인장) → 판토티그래프 하강
잠금장치	잠금	압력해제 → 에어실린더 후퇴 → 걸쇠잠금
	해제	압력공급 → 에어실린더 전진 → 걸쇠후퇴 → 걸쇠해제
A.D.D.시스템	파손발생시	집전판 파손 → 압력제한 밸브 개방 → 라인압력 대기압 에어 실린더 전진 → 판토티그래프 하강
공압이상 감지시스템	이상발생	공압상승 → 압력제한 밸브 개방 → 라인압력 대기압 에어실린더 전진 → 판토티그래프 하강

판의 파손의 공기 공급라인의 문제가 발생하는 비상사태시 압력이 떨어지므로 판토티그래프는 자동으로 하강하게 된다.

그림 2는 표3의 구동시스템을 구현할 수 있도록 구성한 한국형 판토티그래프의 부품 구성도인데, 팬헤드는 일체형을 선택하였으며, 판토티그래프이 상승 및 하강시 인정한 모멘트 유지를 위해 주축과 주 스프링 사이에 캠과 체인을 채택하였다.

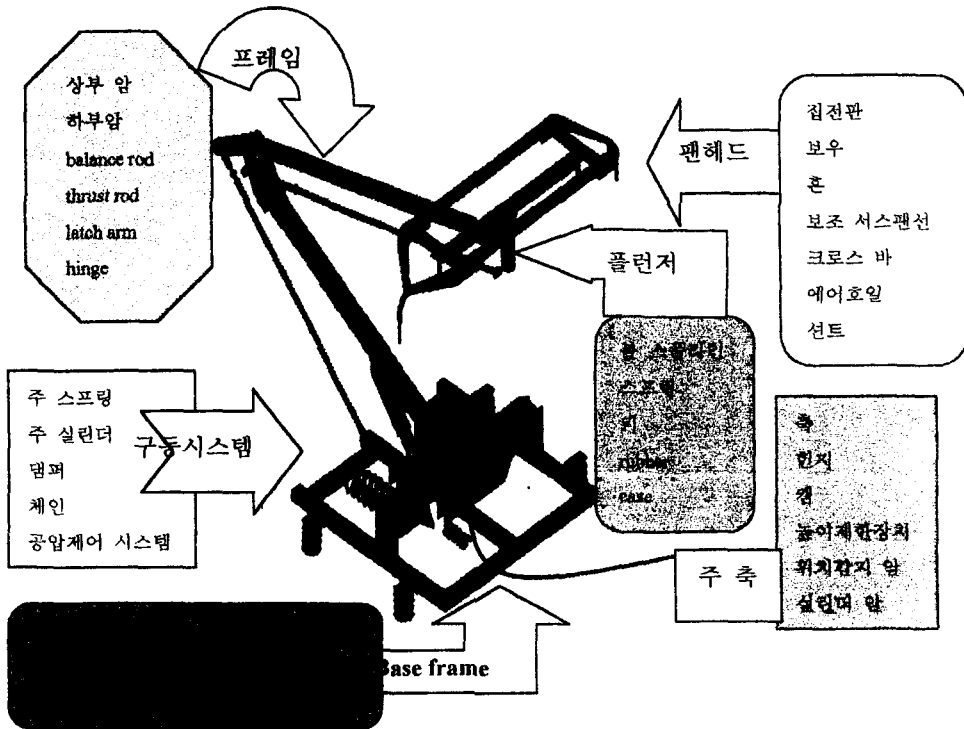


그림 2 한국형 고속전철 시제차량용 판토티그래프의 부품 구성도

4. 요소부품의 기본설계

판토티그래프의 기본설계는 그림 3에서와 같이 기구해석, 강도해석 및 동특성 해석을 바탕으로 요소부품인 캠, 주 스프링, 공압 실린더, 서스펜션 등을 설계한 후 전체적인 기본설계도를 완성하는 순서로 진행된다.

표 1의 설계사양에 따라 집전높이, 판토티그래프 상승 및 하강시 집전판의 x 방향 (차량진행 방향)의 변위, 플런저 titling 각, 모멘트 및 압상력의 변화폭에 대한 기준이 결정되면, 기구해석을 통해 이들 기준을 만족시키는 부재의 길이 및 부재간 연결 위치가 결정되고, 이들 자료를 입력자료로 한 강도해석의 결과로 부재의 형상, 외경, 두께, 무게 등의 자료가 얻어진다.

이들 구조해석 자료를 기초로 요소부품의 설계를 수행하는데, 캠설계의 가능 여부 및 동특성을 통한 추종성 여부에 따라 피드백 되어 불합리한 설계 조건을 수정하므로써 기본설계를 최적화할 수 있다.

4.1 기구학적 해석

판토그래프의 상승 및 하강시 구조적 변위 및 압상력의 변화를 최소화하고, 사용환경에서 충분한 강성을 지닌 구조물을 설계하기 위해 기구학적 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 그림 4 및 5에서 보는 바와 같이 싱글 암 판토그래프를 수학적으로 표현한 후 궤적 및 작용력을 구하기 위해 C 언어를 이용하여 GUI (graphical user interface)환경 하에서 실행할 수 있는 소프트웨어를 개발하여 그림 6 및 7에서와 같이 각 질점의 궤적 및 각 부재에 걸리는 하중 등에 관한 결과를 통해 판토그래프의 기구학적 성능을 평가하는데 활용하였다. 판토그래프 구동에 필요한 주축의 회전력이 판토그래프의 상승에 따라 감소하고, 집전판의 열차진행방향의 변위 및 플런저의 tilting 각도가 최소가 되는 부재의 길이 및 연결점을 선택하여 판토그래프의 제원 및 형상에 대한

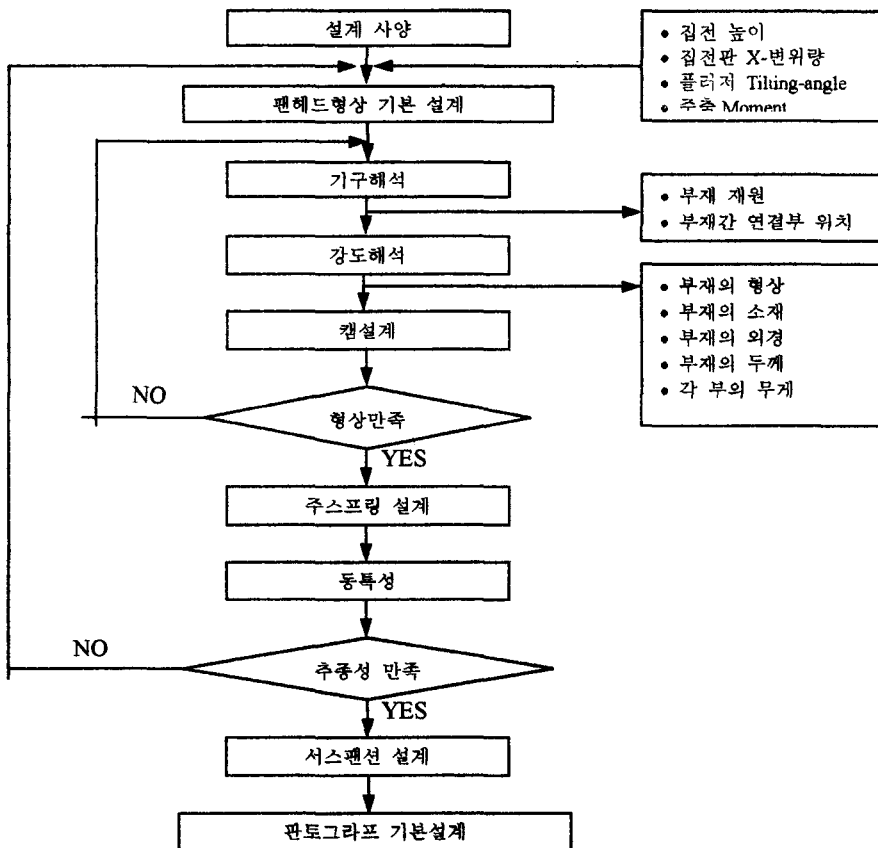


그림 3 한국형 고속전철 시제차량용 판토그래프의 기본설계 공정도

기본설계 자료로 활용했다.

부재의 외경, 두께, 재질 및 형상을 결정하여 판토그래프가 구동중 구조적 안전성을 갖는지 확인하기 위하여 그림 8 및 9 에서와 같이 평균집전높이 및 접은위치에 대해 *I-deas Master Series Ver. 4.0 (SDRC, USA)*를 사용하여 유한요소해석을 표 4 와 같은 결과를 얻었다. 주축의 외경과 두께를 100 mm, 5.0 mm, 하부 암의 외경 및 두께를 90mm, 두께 5.0 mm, 상부 암의 외경 및 두께를 70 mm, 두께 3.5 mm, 그리고 balance rod 와 trust rod 의 외경 및 두께를 30 mm, 3.0 mm 로 했을 때 최대 주응력이 주축과 하부 암의 접합부에 평균집전높이와 접은위치에서 각각 6.16 과 5.41 kgf/mm^2 이 걸리는 것으로 나와 구조용 강재의 인장강도를 40 kgf/mm^2 로 보았을 때 안전율이 7 이상 정도 확보되어 구조적으로 충분하다고 판단된다.

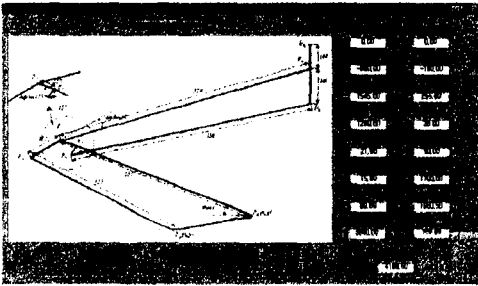


그림 4 판토그래프의 기구해석 입력변수

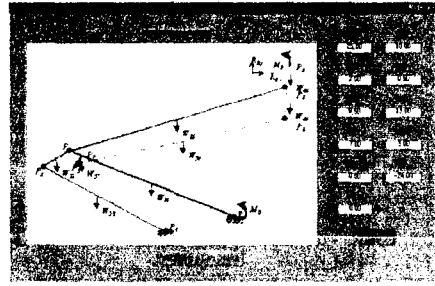


그림 5 판토그래프 역학 입력변수

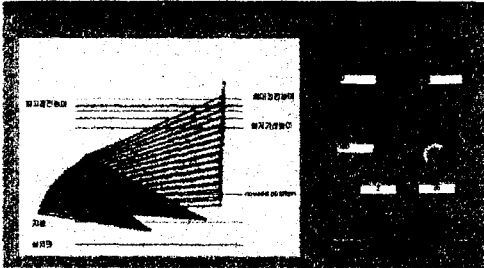


그림 6 판토그래프 기구해석 결과 (케적)



그림 7 한국형 고속용 판토그래프의 케적, 회전력 및 반력

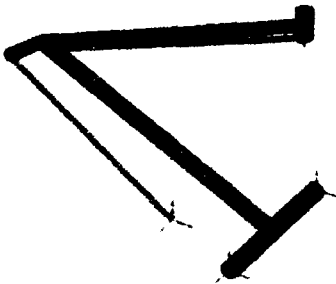


그림 8 평균집전높이에서의 하중 및 경계조건

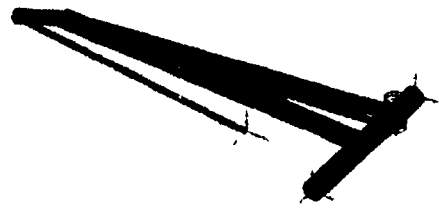


그림 9 접은높이에서의 하중 및 경계조건

프링 상수 k 를 $2\text{kgf/mm} \sim 4\text{kgf/mm}$, 주 스프링의 연결위치 및 하중을 변화시켜 가면서 캠 형상을 최적화 하여 그림 12와 같이 계산된 캠 표면 좌표를 기준으로 그림 13과 같은 캠 형상을 설계할 수 있었다.

4.3 주 스프링

캠형상 계산시 판토티그래프를 상승시키기 위해 높이에 따라 주 스프링에 요구되는 힘이 결정되는데, 요구되는 스프링력은 접힌 위치에 있을 때 가장 큰 950kgf , 접힌 위치로부터 집전높이가 1500mm 일 때 가장 작은 772kgf 였다. 따라서, 한국형 판토티그래프 주 스프링에 요구되는 최대 하중을 안전을 고려하여 $1,000\text{kgf}$, 스프링 상수를 3kgf/mm , 스프링 재질을 SUP 9로 결정하여 그림 14의 순서대로 계산을 수행한 결과, 주스프링의 선경(d)은 20mm , 직경(D)은 140mm , 감은 수(N)는 19회, 스프링 길이(L)는 410mm 로 결정되었으며, 허용용력 범위 및 L/D 의 기준에 모두 적합했고 피로한계 또한 설계조건에서는 10^5 이상으로 안전하다고 판단된다.

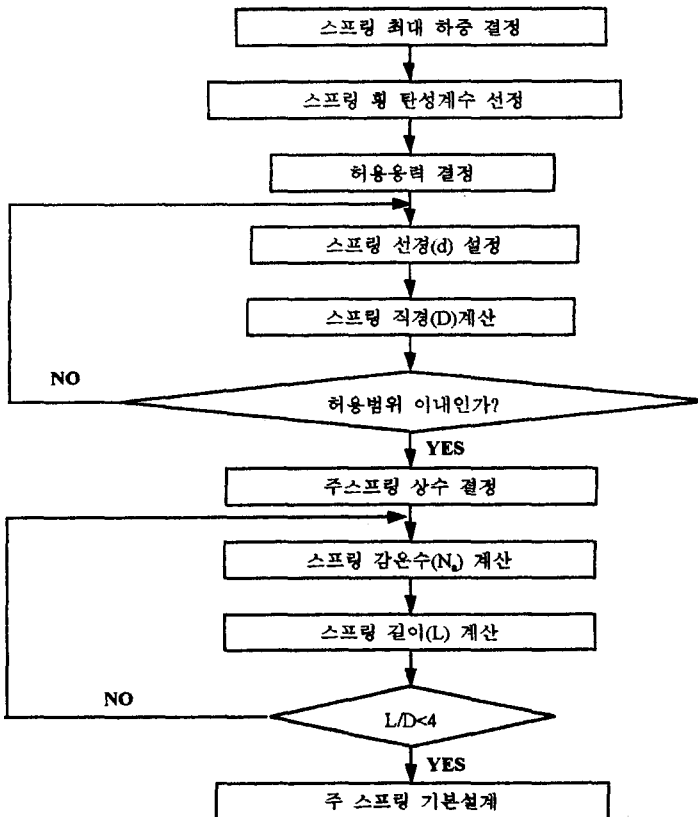


그림 14 싱글 암 판토티그래프 주 스프링의 계산 순서

표 4 한국형 고속용 판토틀라프의 강도해석 결과

평균집전높이	+방향	-방향
X방향 변위	1.6mm	1.98mm
Y방향 변위	0mm	10.9mm
Z 방향 변위	10.3mm	0mm
주 응력	6.16kgf/mm ²	
접은높이	+방향	-방향
X 방향 변위	0.27mm	0.937mm
Y 방향 변위	0mm	18.1mm
주 응력	5.41kgf/mm ²	

4.2 캠

싱글 암 판토틀라프에 있어 가장 중요한 부품은 판토틀라프의 상승 및 하강시 구동 모멘트를 일정하게 유지시켜 주는 캠(Cam)이며, 캠의 설계기술은 판토틀라프 제조회사마다 고유의 know how로서 판토틀라프의 성능을 좌우하는 매우 중요한 기술 중의 하나이다.

본 연구에서는 구조해석 자료를 기초로 그림 10 과 같은 모델을 설정하여, 상용 계산 S/W 를 이용하여 캠 형상을 계산했는데, 주축의 중심을 기준으로 캠의 반경 R 을 120mm ~ 160mm, 주 스

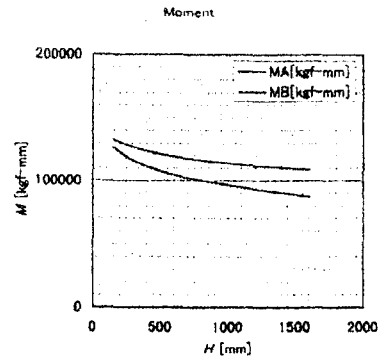
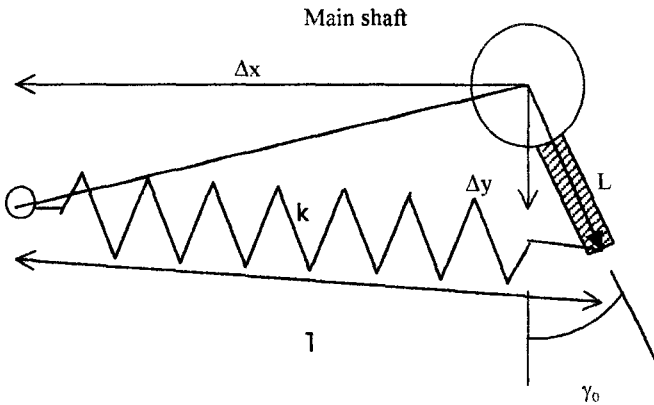


그림 10 캠 형상 설계 모델 및 입력 변수들의 정의

그림 11 집전높이에 따른 모멘트 변화

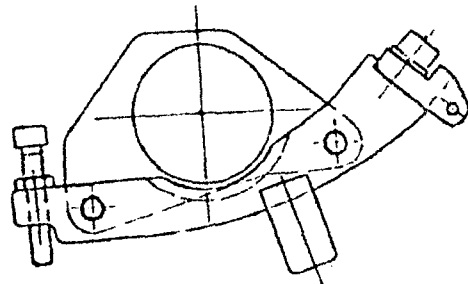
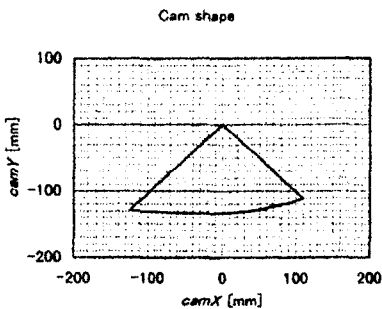


그림 12 S/W 에 의해 계산된 캠 형상

그림 13 계산된 자료를 통한 설계된 캠 형상

4.4 공압 실린더

한국형 판토타그래프에서 공압 실린더는 주 스프링의 복원력을 극복하여 판토타그래프를 하강시키는 역할을 하는데, 평균 집전높이에서 판토타그래프를 하강시키기 위한 힘은 415kgf 이고, 접은위치 바로 직전에는 405kgf 이다. 그림 15 에서와 같이 주축의 중심으로부터 공압 실린더용 암의 길이를 150mm, 접은 위치에서 최고 집전높이까지 주축의 회전각을 30°로 하여 계산하면 공압 실린더의 행정거리(stroke)는 75mm 이다. 여유를 주어 실린더 행정거리를 85mm, 공기압력을 6bar, 안전율을 0.8 로 하여 공압 실린더 직경을 계산하면 160mm ~ 200mm 사이의 직경이면 충분한데, 규격으로 나와 있는 직경은 160mm 와 200mm 가 있다. 계산에 의하면 직경이 200mm 일 경우, 공압 실린더 내 스프링의 상수는 6kgf/mm, 160mm 일 때는 4kgf/mm 이 적당했다.

이상의 자료를 주 스프링 계산과 같은 S/W 에 입력하여 공압실린더 내 스프링을 계산하면 선경(d)은 22mm, 직경(D)은 158mm, 감은 수(N)는 10 회, 스프링 길이(L)는 253mm 로 결정되었으며, 허용응력 범위 및 L/D 의 기준에 모두 적합했고 피로한계는 주 스프링과 동일한 10^5 이상으로 안전한 조건으로 나타났다.

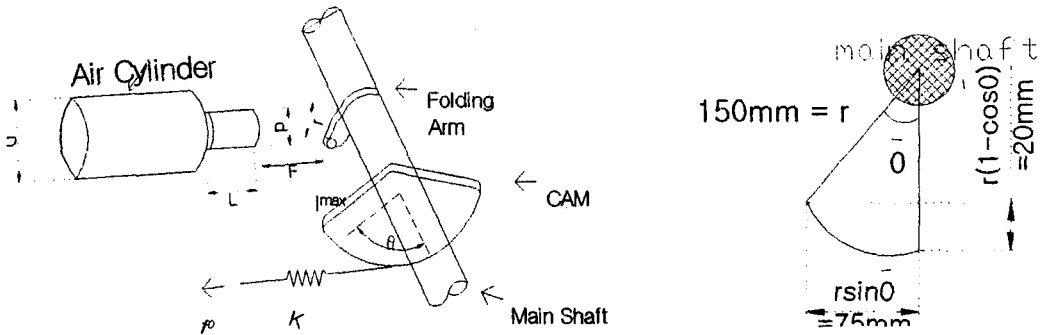


그림 15 공압 실린더 설계를 위한 모델 및 주축과의 관계

4.5 서스펜션

고속용 판토타그래프의 서스펜션은 가선의 스패 주파수(span frequency)에 대응하기 위한 플런저 1 개와 행거 주파수(hanger frequency)에 대응하기 위한 보조 서스펜션 2 개가 있다. 이들 서스펜션에서 가장 중요한 요소는 스프링 상수값인데, 이들 값을 최적화하기 위해 그림 16 과 같은 3 자유도 모델을 이용한 동특성 모델을 수행하여 그림 17 과 같은 추종특성을 구했다.

그림 16 에서 m_3 는 집전판에서부터 2 차 서스펜션의 스프링 이전까지의 부품이 해당되며 m_2 는 2 차 서스펜션의 스프링 이후부터 주플런저의 스프링 이전까지의 부품이 해당된다. 그리고 m_1 은 주플런저의 스프링 이후부터 이전까지의 부품이 해당된다. 따라서 $m_1 = 21.9 \text{ kg}$, $m_2 = 4.3 \text{ kg}$, 그리고

$m_3 = 8.6 \text{ kg}$ 이다. 감쇠상수는 $c_1 = 140\text{Ns/m}$, $c_2 = 10\text{Ns/m}$, $c_3 = 6\text{Ns/m}$ 으로 하였다. 그리고 k_1 은 집전상태에서 범용 유한요소해석 S/W 인 Ideas Master Series 로 정적치짐을 해석한 결과 압상력 70N 에 대하여 팬헤드부분에서 7.51 mm 가 처짐을 알 수 있다. 따라서 등가강성 k_1 은 $70 \text{ N} / 7.51\text{mm} = 9321\text{N/m}$ 으로 하였다. 가선의 가진주파수에는 2 가지 주파수 성분 즉 스패주파수(span frequency)와 행거주파수 (hanger frequency)가 이다. 경부고속철도의 스패 간격이 63 m 이며 행거 간격은 6.75 m 이므로 그림 17 에서 저주파 영역의 띠구역은 250km/h~350km/h 의 KNR 가선계의 스패주파수이고, 고주파 영역은 띠구역은 행거주파수 영역인데, $k_2=7500\text{N/m}$ 로 고정하고 k_3 에 따른 추종 특성을 구하여 최적의 k_3 값을 15kN/m 로 결정했다.

이들 값을 기초로 서스펜션 스프링 상수값을 계산하면, 플런저의 경우 선경(d)은 5mm, 직경(D)은 50mm, 감은 수(N)는 7 회, 스프링 길이(L)는 42.5mm 로 결정되었으며, 보조 서스펜션의 경우 선경(d)은 3mm, 직경(D)은 17mm, 감은 수(N)는 10 회, 스프링 길이(L)는 34.5mm 로 결정되었다..

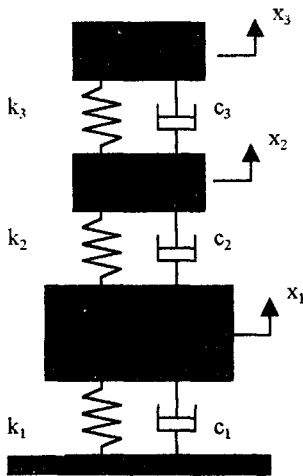


그림 16 한국형 고속용 판토품의 3 자유도(3DOF) 모델

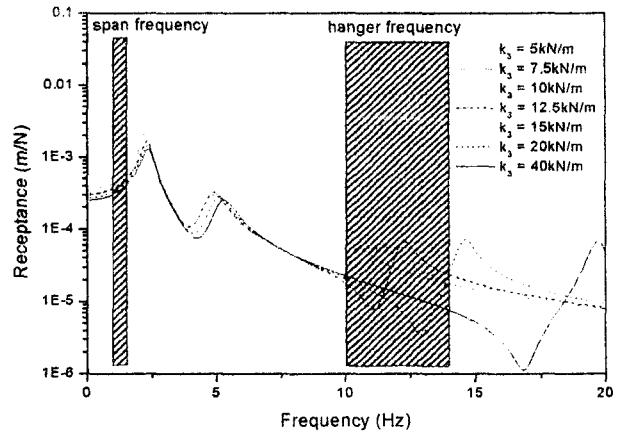


그림 17 k_3 의 변화에 따른 판토품의 추종특성

5. 한국형 고속용 판토품의 기본설계 (결론)

350km/h 의 주행속도에서 이선율 1%이하의 고집전성을 목표로 하고 있는 7 량 편성의 한국형 고속전철 시제차량용 판토품에 대한 기본설계를 수행하기 위해 기구해석, 강도해석 및 동특성

해석을 바탕으로 캠, 주 스프링, 공압 실린더, 서스펜션 등의 요소 부품을 기본설계하고 이들 요소 부품의 그림 18 과 같이 배치하였다. 동력차 지붕위에서의 판토품라프 설치 위치 및 공압 라인은 공력차 개발과제에서 제시한 사양을 기준으로 하여 요소부품을 배치했는데, 절연을 위해 동력차 지붕에서부터 판토품라프 가장 아래부분까지의 높이는 190mm 이상을 유지해야 하고 절연애자의 높이는 320mm, 접었을 경우 지붕에서부터 판토품라프 집전판 표면까지의 높이는 708.5mm 가 되도록 했으며, 이는 폴런저 및 보조서스펜션에 의한 변위를 고려한 높이이다.

본 연구에서는 한국형 고속전철 시제차량의 요구사양 및 KNR 가선계에 적합한 판토품라프의 기본설계를 위해 싱글 암 판토품라프에 대해 수행하였으며, 본 연구를 통해 결정된 한국형 고속전철 시제차량용 판토품라프의 기본설계는 상세설계, 시제품 제작, 성능시험 및 해석 S/W 의 검증을 통해 보완해 나갈 계획이다.

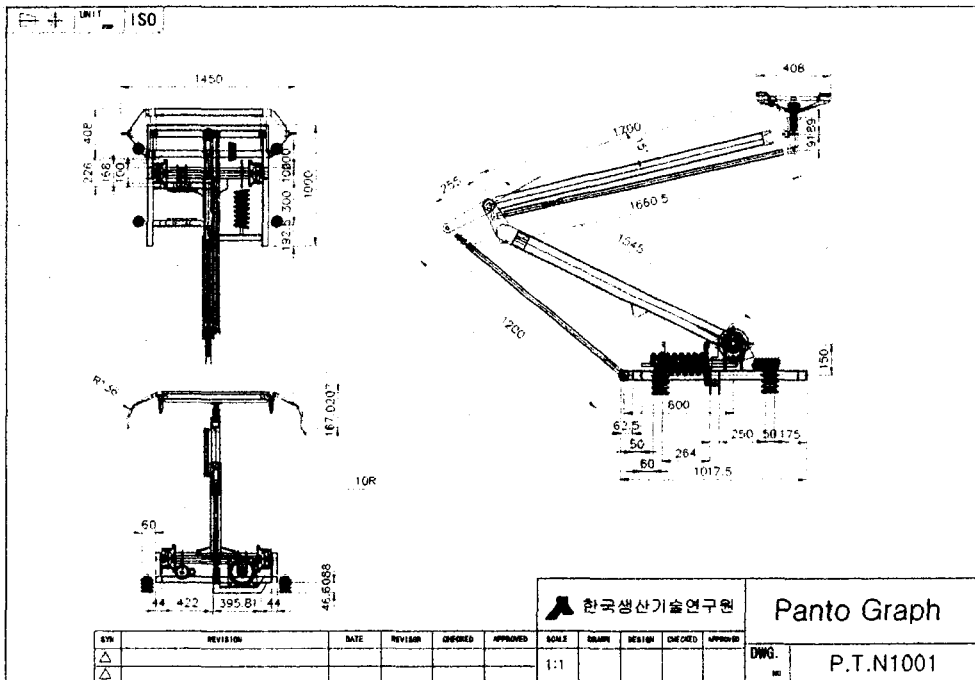


그림 18 한국형 고속전철 시제차량용 판토품라프의 기본설계

참고문헌

1. 편집부(1998), "기계시스템 설계편람", 도서출판 새화

2. 태성길외 2인 (1995년), “공압제어 기술”, 성안당
3. National Instruments (1998년), “LabWindows/CVI 5.0 Users Manuals”
4. 배정찬 (1999년), “판토폴라프 개발”, 한국생산기술연구원