

도시형 자기부상열차의 대차 설계기술



박 계 서
(현대정공(주) 기술연구소)

'78.2 고려대학교 기계공학과(학사)
'78.2-'80.2 현대자동차(주) 근무
'83.8 고려대학교 대학원 기계공학과(석사)
'83.10-현재 현대정공(주) 기술연구소 근무 수석연구원



배 흥 성
(현대정공(주) 기술연구소)

'79.2 부산대학교 기계공학과(학사)
'85.2 부산대학교 대학원 기계공학과(석사)
'85.3-현재 현대정공(주) 기술연구소 근무 책임연구원



김 국 진
(현대정공(주) 기술연구소)

'86.2 숭실대학교 전기공학과(학사)
'85.11-'86.7 두산건설(주) 근무
'88.8 숭실대학교 대학원 전기공학과(석사)
'96.8 숭실대학교 대학원 전기공학과(박사)
'88.7-현재 현대정공(주) 기술연구소 근무 선임연구원

1. 서론

급격한 경제성장과 산업발전으로 도시인구가 과밀화 되고, 승용차의 과도한 보급에 따라 교통문제가 심각한 과제로 대두되고 있다.

또한 각종 교통수단에 의하여 발생하는 소음, 매연 등은 환경공해를 야기하고 삶의 질을 저하시킨다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 미래 지향적 교통수단인 자기부상열차가 조속히 실용화 되어야 함을 인식하고, 현재 도시형 자기부상열차 개발사업이 진행중에 있다.

본 고에서는 도시형 자기부상열차 개발사업의 일환으로 자기부상열차의 차체를 지지(추진, 부상 및 제동 등)하는 대차(Bogie) 개발에 대한 내용을 서술하고자 한다.

자기부상열차는 레일과 바퀴간의 점착력으로 구동하는 종래의 바퀴식 열차와는 달리 자기력에 의해 부상(레일과 비접촉)하여 주행하므로 기본적으로 큰 구배 또는 작은 곡선에서의 통과 능력이 우수하다. 그러나 이러한 장점을 충분히 발휘하기 위해서는 대차의 구조가 무엇보다 중요하다.

부상 및 추진방식에 있어서 도시형 자기부상열차와 가장 유사한 시스템은 일본의 HSST 자기부상열차이다.

HSST는 몇차례의 시제차 개발을 통하여 대차의 구조를 수정·보안하여 현재는 대차의 한쪽 모듈 frame 과 반대쪽 모듈 frame을 anti-roll beam으로 연결하고 대차와 대차는 slide table로 연결하는 구조이다.

우리나라의 도시형 자기부상열차는 HSST보다 대차의 구조가 단순하면서도 비슷한 성능을 발휘하도록 되어있다.

- 주행시험 구간 : 직선 - 415m, 60m 곡선 - 175m, 직선 - 510m
- 최소 곡선반경(60mR)에서의 속도한계 : 30km/h

2. 대차 설계조건

2.1 운행개요

2.1.1 운행조건

- 시험선로 : 단선 고가궤도 약 1.3km(현재 1.1km 공사 완료)
- 최소 곡선반경 : 60mR
- 최대 구배 : 6%

2.1.2 속도 profile

상기 운행조건에 따라 본 시험선로에서 운행 가능한 속도 profile은 그림 2-1)과 같다.

2.2 차량제원

본 시험선로에서의 주행시험을 위한 차량의 제원은 표 2-1)과 같다.

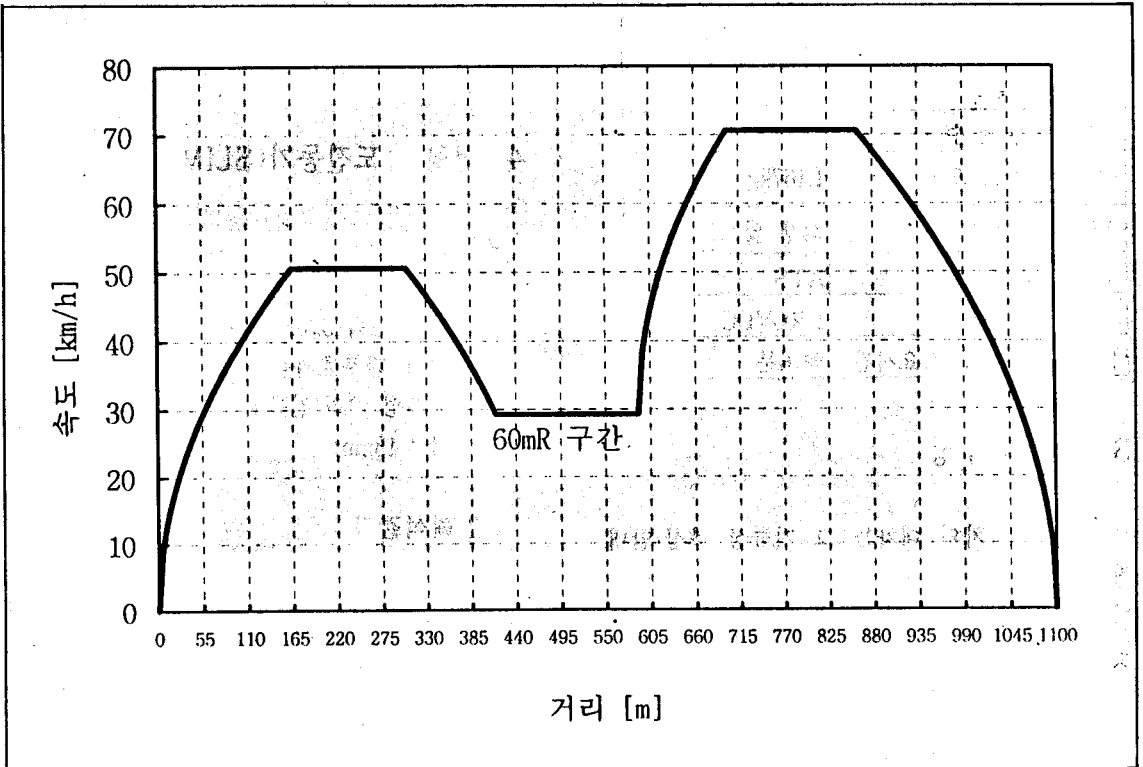


그림 2-1. 속도 Profile

표2-1. 차량제원

	항 목	제 원
1	편성 차량수	2량
2	량당 최대 승차인원	110명(좌석40)
3	차량 치수	L13m×W3m×H4m
4	량당 자중	21톤
5	설계 최대 하중	28톤
6	설계 최대 속도	110km/h
7	운행 최고 속도	70km/h
8	설계 최대 가속도	0.8m/s ²
9	량당 최대 요구 추진력	16.8kN 이상
10	추진 전동기	SLIM
11	SLIM 수	6대/량
12	SLIM 추진력	3.3kN
13	부상방식	상전도흡인식
14	부상공극	11mm
15	Magnet 수	24대/량
16	Magnet 요구 부상력	1,167kg
17	제동방식	회생 및 공기제동
18	열차제어방식	ATS
19	공급전원	1,500VDC
20	1왕복 운행소요시간	약 6분

3. 대차의 구성

자기부상열차의 대차는 그 기능상 부상/안내 장치, 추진장치, 공기 제동장치, 착지 및 안내용 바퀴, 집전장치, 2차 현수장치 등과 이들의 장착 및 차체를 지지하는 프레임으로 구성된다.

3.1 전기장치

- 추진용 선형유도전동기(SLIM) 2대

- 부상용 전자석(magnet) 8대
- 수직 및 횡방향 gap sensor 6대
- 수직 및 횡방향 가속도 sensor 6대
- 집전장치 2대

3.2 기계장치

- 대차 frame 2조
- tie beam 2조
- 2차 현수장치(air spring, traction rod, damper 및 buffer) 2조
- landing wheel 4개
- guidance wheel 4개
- brake rigging(brake cylinder, lining, lever) 1조
- 공기 배관 1조
- levelling valve 1조

4. 선형 유도전동기(SLIM)의 설계

4.1 설계조건

- 대당 추진력 3.3kN
- 수직력, 단부효과를 최소화
- 온도특성 고려(전류밀도)
- 공극 : 13mm

4.2 해석결과

설계조건을 만족하기 위해 각 parameter를 변수로 simulation을 수행한 결과는 그림 4-1)과 같다.

4.3 설계결과

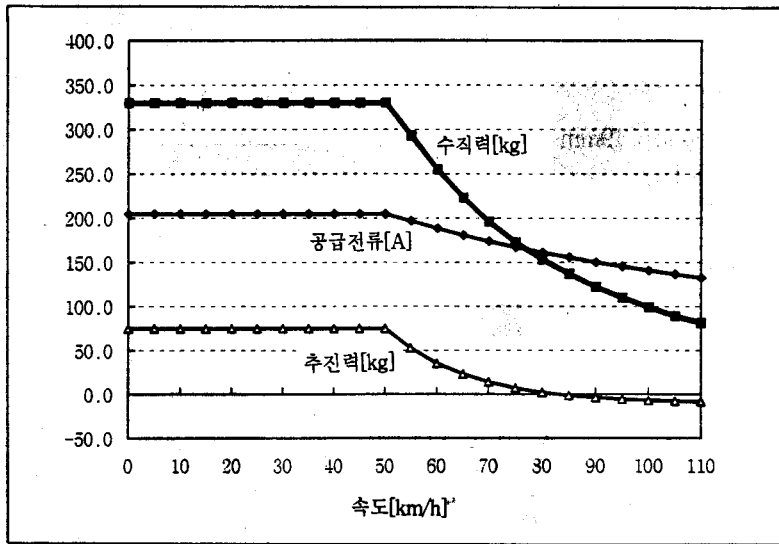


그림 4-1. 속도 대 추진력, 수직력 및 전류 특성

표4-1. SLIM의 설계결과치

순번	항 목	단 위	사 양	비 고
1	량당 SLIM 수	대	6	
2	최대 추진력/SLIM	kN	3.3	
3	Coil 결선	결선	Y	
4	상수	상	3	
5	최대 선간전압	V	373	1120V/3S
6	최대 입력전류	A	205	410A/2P
7	슬립주파수	Hz	10~15	50km/h까지
8	1차축 길이	mm	2300	
9	극수	극	8	
10	극 피치	mm	261	
11	1차축 철심 폭	mm	220	
12	1차축 철심 높이	mm	60	
13	슬롯/극/상		3	
14	슬롯 피치	mm	29	
15	치 폭	mm	9	
16	슬롯 깊이	mm	40	
17	슬롯 수	개	79	
18	Coil 피치		7/9	
19	Coil 단면적	mm ²	50	
20	Winding Factor		0.902	
21	1차축 전체폭	mm	540	
22	Mechanical Gap	mm	13	
23	Reaction plate 재질		AL	
24	Reaction plate 두께	mm	6	
25	Reaction plate 폭	mm	250	
26	Reaction plate 저항률	Ω.m	3.5 x 10 ⁻⁸	

5. 전자석(Magnet) 설계

5.1 설계조건

- 초기(착지상태) air-gap : 19mm
- 정상상태 Air-gap : 11mm
- 스택그랑 : 2.5mm

- 차량의 순수 중량에 따른 전자석당 부상력 1,167kg 이상
- 설계 최대 속도 : 110km/h
- SLIM의 수직력에 의한 영향 고려

5.2 해석결과

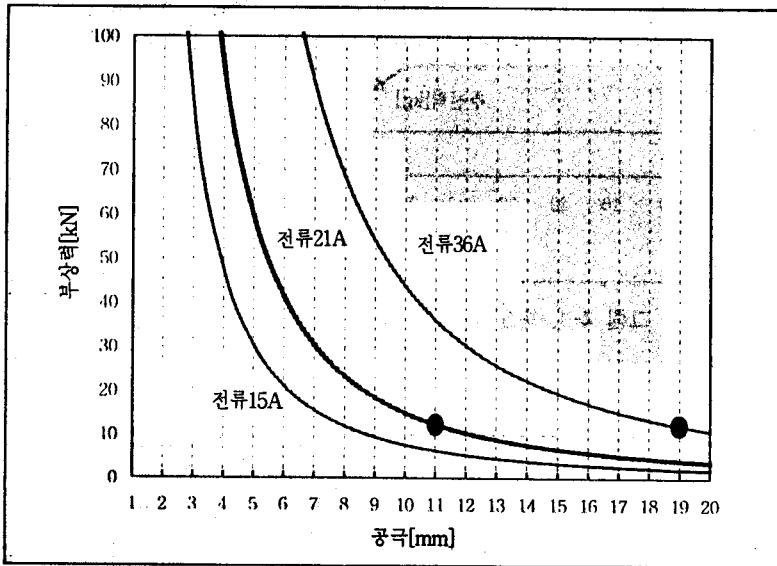


그림 5-1. 공극 & 부상력 특성

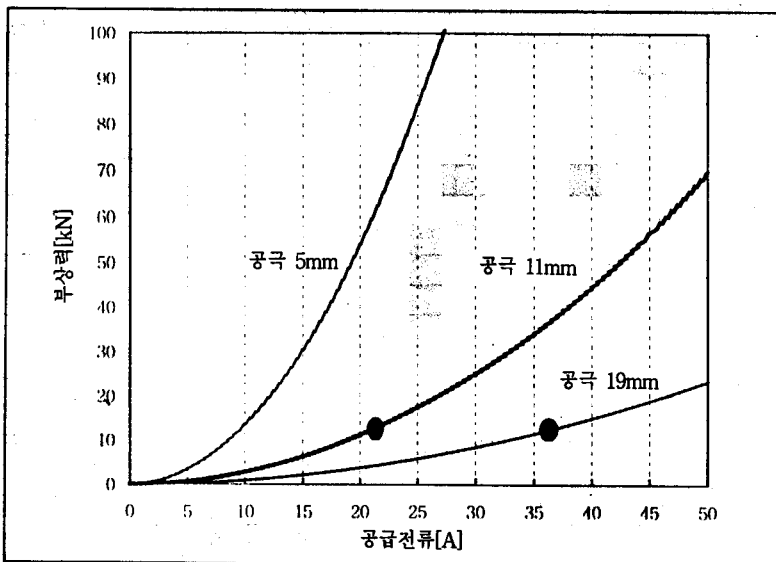


그림 5-2. 전류 & 부상력 특성

5.3 설계결과

표5-1. 전자석 설계결과치

순번	항 목	단 위	사 양	비 고
1	Pole 길이	mm	680	
2	Pole 폭	mm	32	
3	Pole 높이	mm	193	
4	Yoke 폭	mm	168	
5	Yoke 두께	mm	70	
6	Coil 단면적	mm ²	21	
7	도체 저항률	$\Omega \cdot m$	2.826×10^{-8}	
8	Coil 권수	회	660	
9	Coil 저항	Ω	1.2	
10	최대 전류	A	36	
11	정격 전류	A	21	
12	정격 부상력	kN	12	
13	총중량	kg	170	

6. 대차 프레임 설계

6.1 설계조건

- 차량 최대 하중 : 28톤
- 차량치수 : 길이 13m x 폭 3m x 높이 4m
- 량당 대차수 : 3대
- SLIM 공극 : 5 → 13mm
- SLIM 길이 : 2300mm
- SLIM 높이 : 147mm
- SLIM 전체폭 : 540mm
- SLIM 최대 추진력 : 3.3kN
- SLIM 최대 수직력 : 150kg
- magnet의 공극 : 19 → 11mm
- magnet pole의 길이 : 680mm
- magnet pole의 높이 : 193mm
- magnet의 최대 부상력 : 1,167kg

- 최소 곡선반경 : 60mR
- 곡선궤도에서 대차간 간섭이 없을 것
- 곡선궤도에서 차체에 대한 대차의 횡방향 변위 고려
- 대차 side frame의 중심간 거리 : 2000mm
- 대차 side frame 각 부재의 두께 고려
- 대차 side frame의 재질 고려
- 부상/안내시 대차 프레임의 비틀림강성을 고려해서 tie beam 설계
- 대차 side frame간 상대변위가 가능하도록 tie beam 설계
- tie beam의 강도 고려

6.2 대차 프레임의 설계결과

상기의 조건에 따라 그림 6-1), 6-2) 및 6-3) 과 같이 대차 프레임의 형상과 치수가 결정되었다.

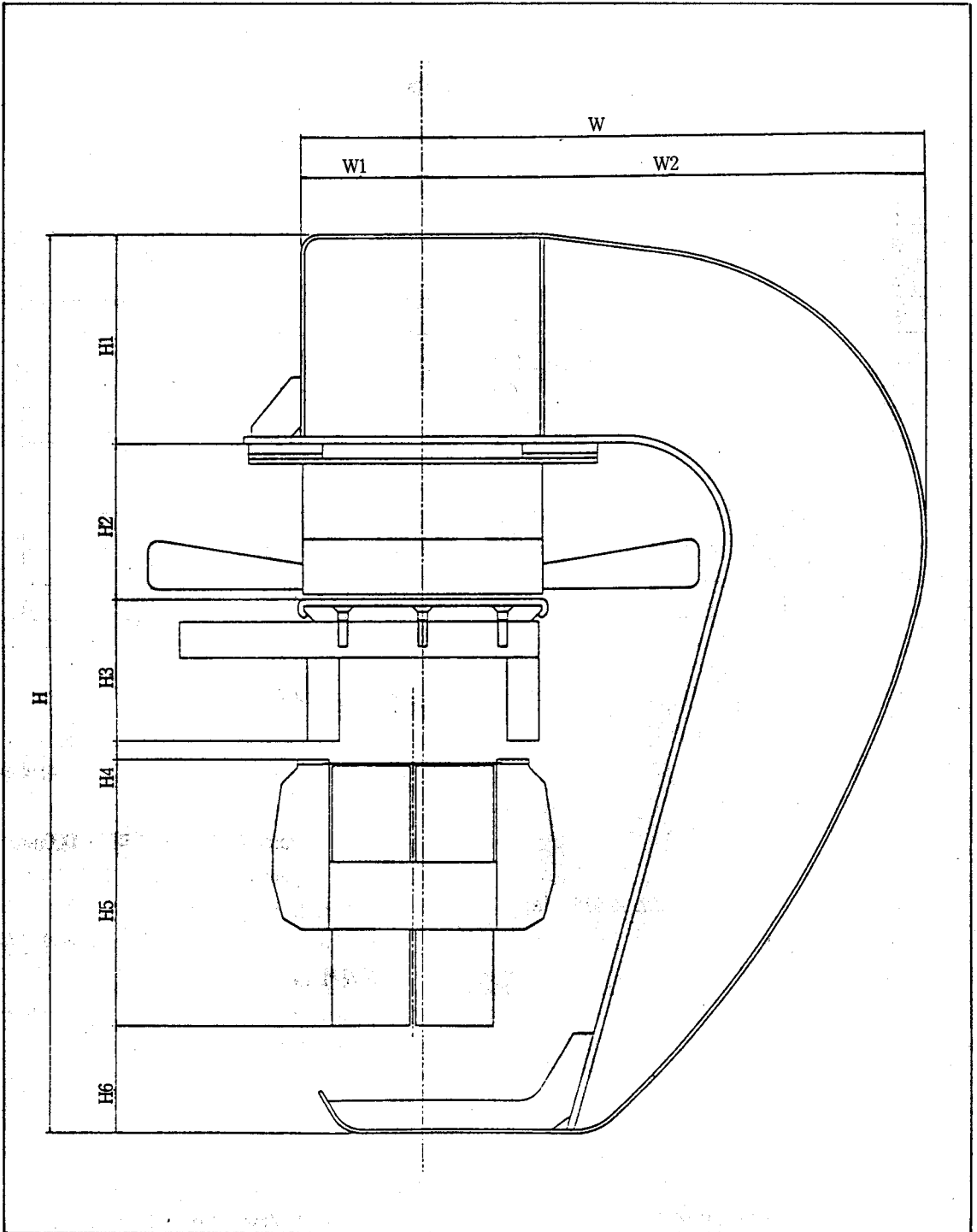


그림 6-1. 대차내 장치간 고려할 치수

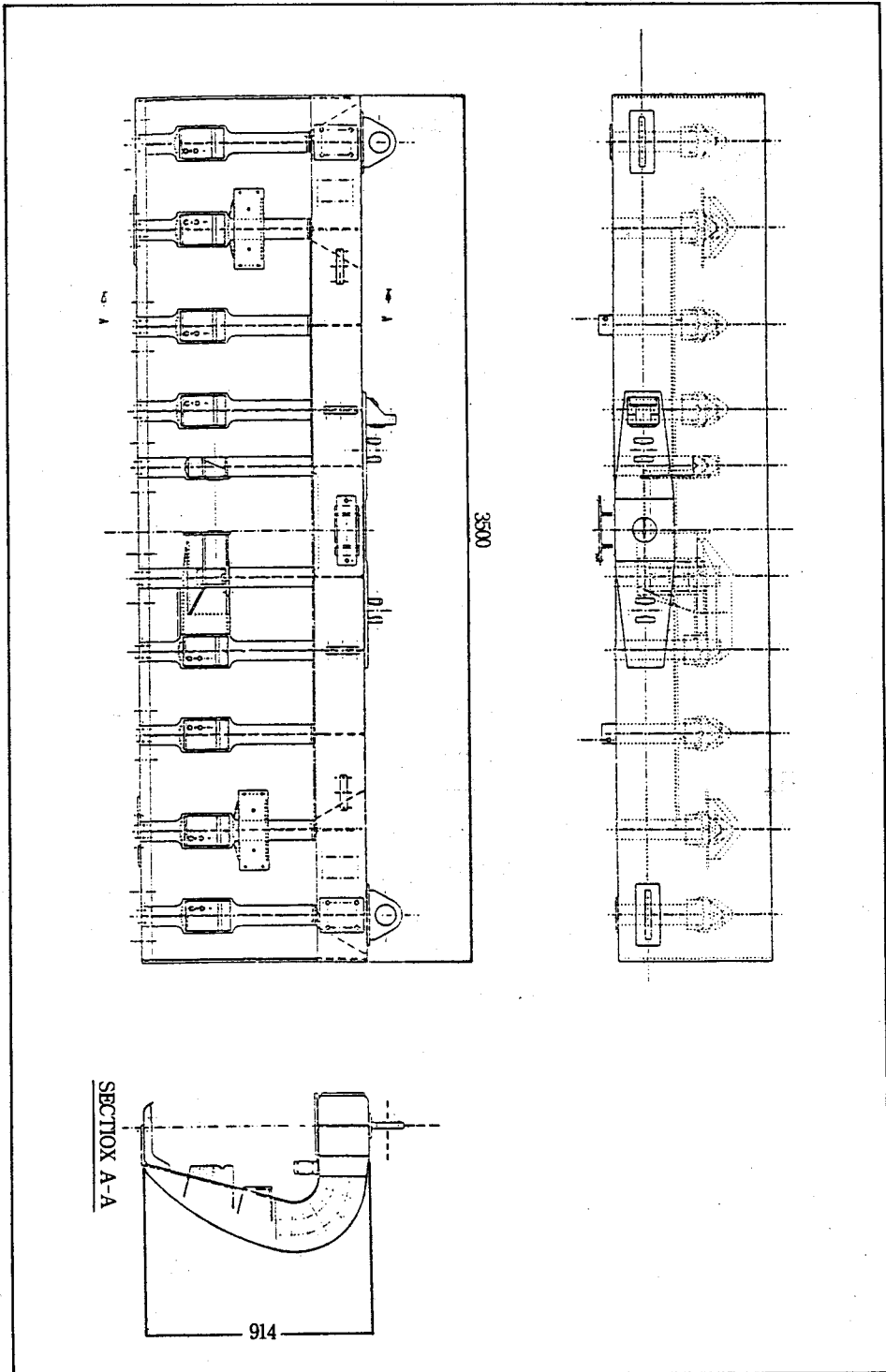


그림 6-2. Side Frame의 형상 및 치수

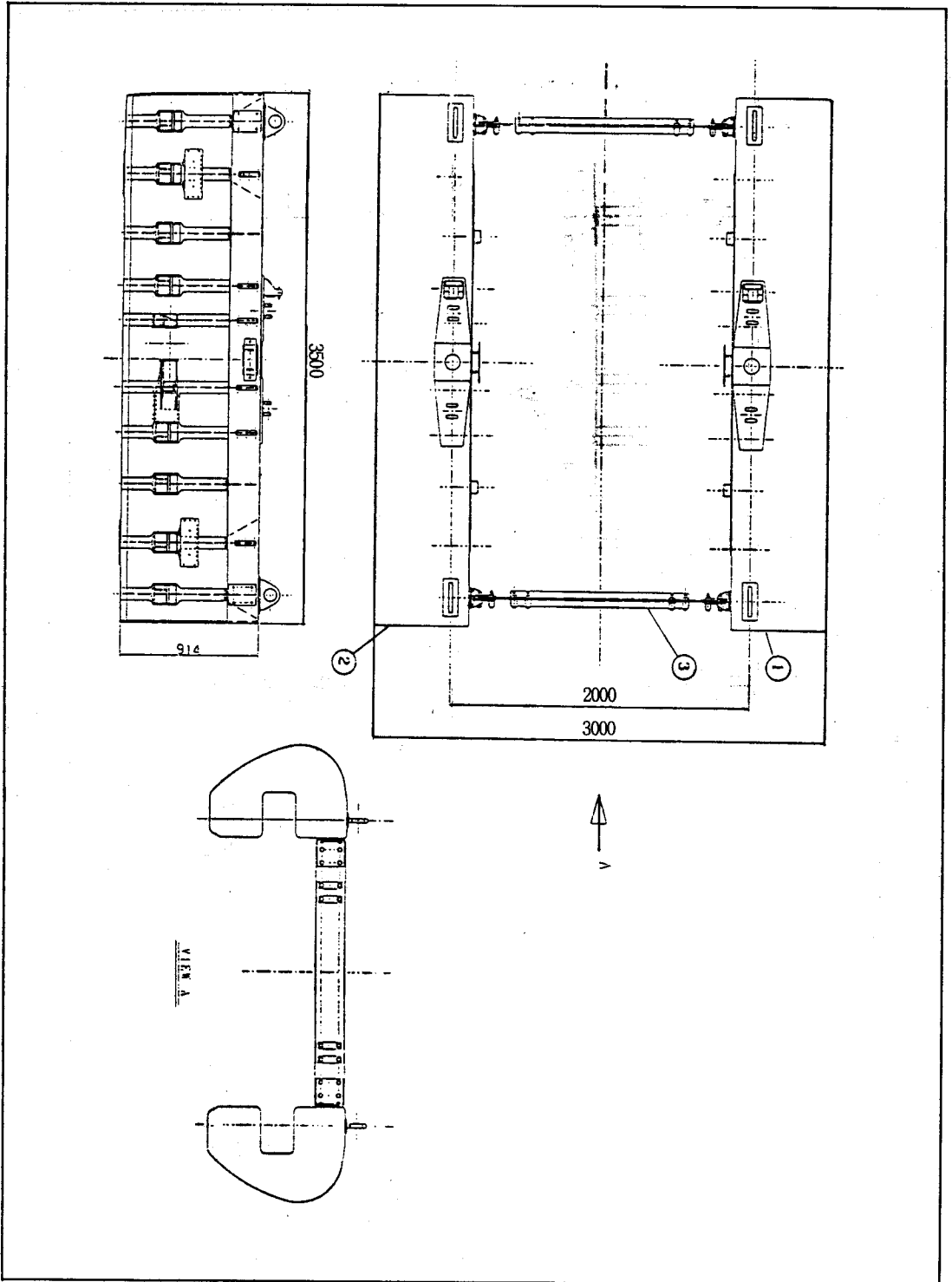


그림 6-3. 대차의 형상 및 치수

7. 대차 프레임의 구조해석

7.1 구조해석의 종류

1) 해석 1(부상상태)

- 모델링 : half model(1920개의 plate/shell)
- 하중조건 : 전자석 및 선형 유도전동기는 집중하중
- 경계조건 : 공기스프링의 상하변위 구속

2) 해석 2(자유낙하)

- 모델링 : half model(1920개의 plate/shell)
- 하중조건 : 전자석 및 선형 유도전동기는 집중하중, 자체중량은 공기스프링 위치에 분포하중
- 경계조건 : landing wheel의 상하방향 변위 구속

3) 해석 3(비틀림상태)

- 모델링 : full model(3840개의 plate/shell)
- 하중조건 : 선형 유도전동기는 집중하중 자체중량은 공기스프링 위치에 분포하중
- 경계조건 : 3곳의 수직 gap sensor 위치 상하방향 변위 구속

7.2 판정기준

- 응력 1 : 재질별 항복강도의 60%이하(해석 1)
- 응력 2 : 재질별 항복강도의 80%이하(해석 2)
- 처짐량 : 대차 중앙에서 레일과의 간격이 5mm 이하
- 비틀림 강성 : 20 ~ 70 kg/mm(해석 3)

7.3 구조해석의 결과

그림 7-1)~그림 7-5)는 각 해석별 응력분포 및 변형도를 나타낸다.

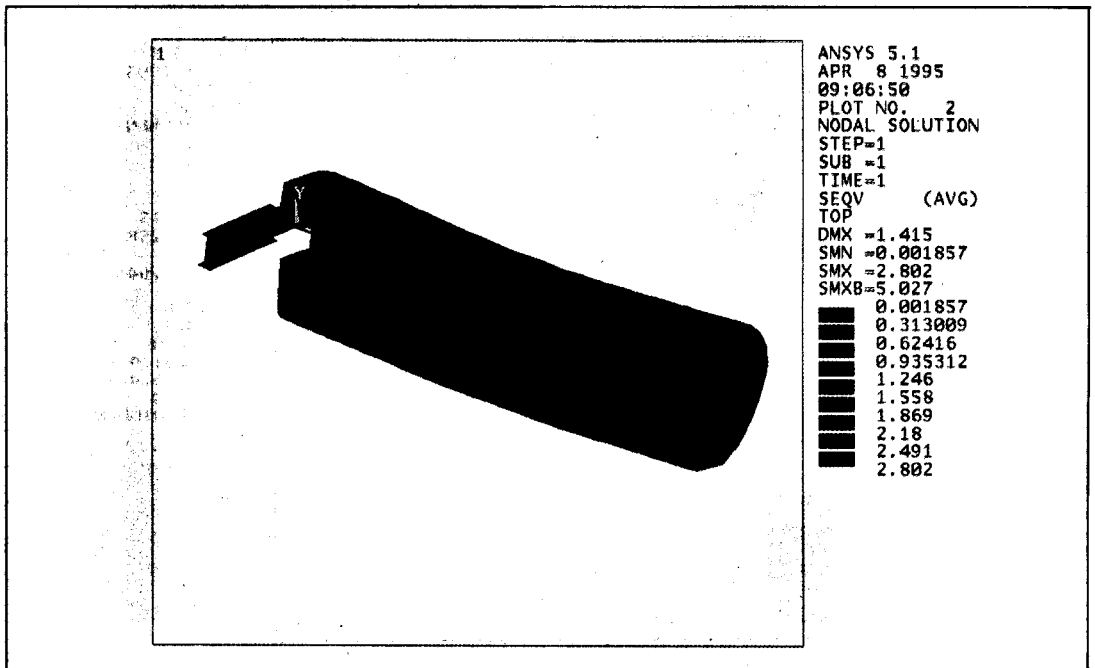


그림 7-1. 해석 1의 응력분포도

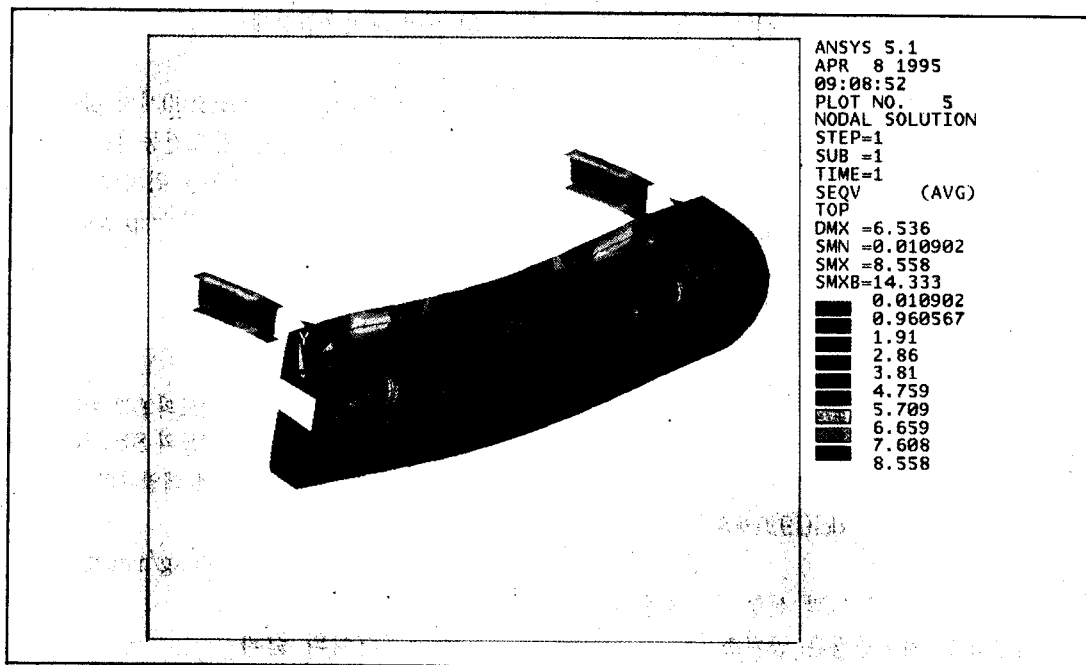


그림 7-2. 해석 2의 응력분포도

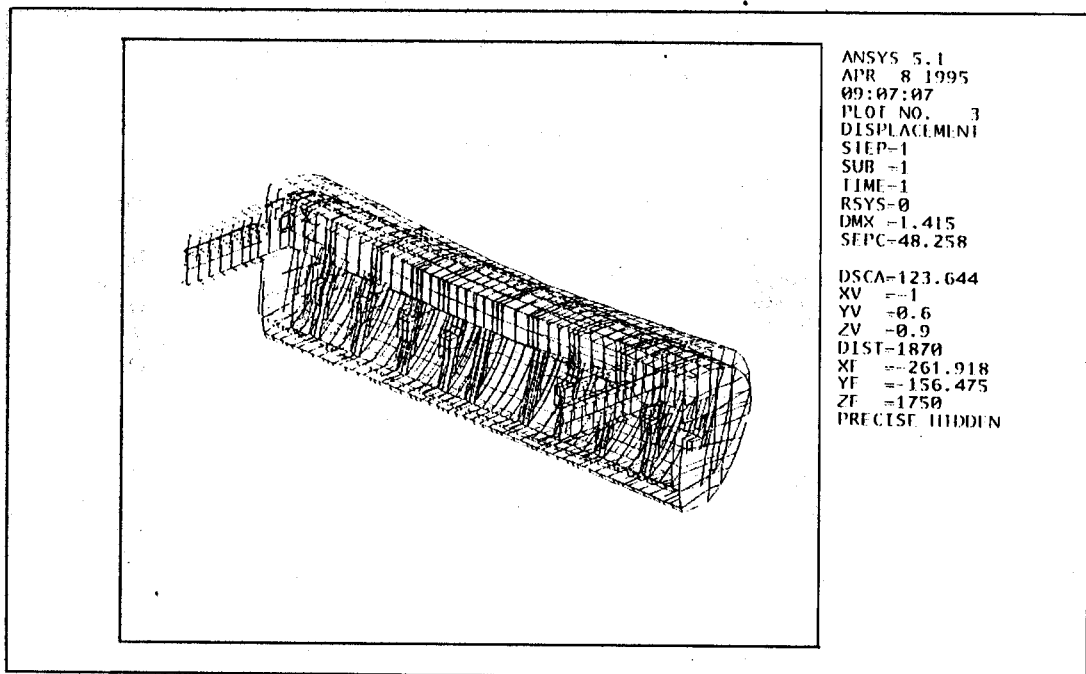


그림 7-3. 해석 1의 변형도

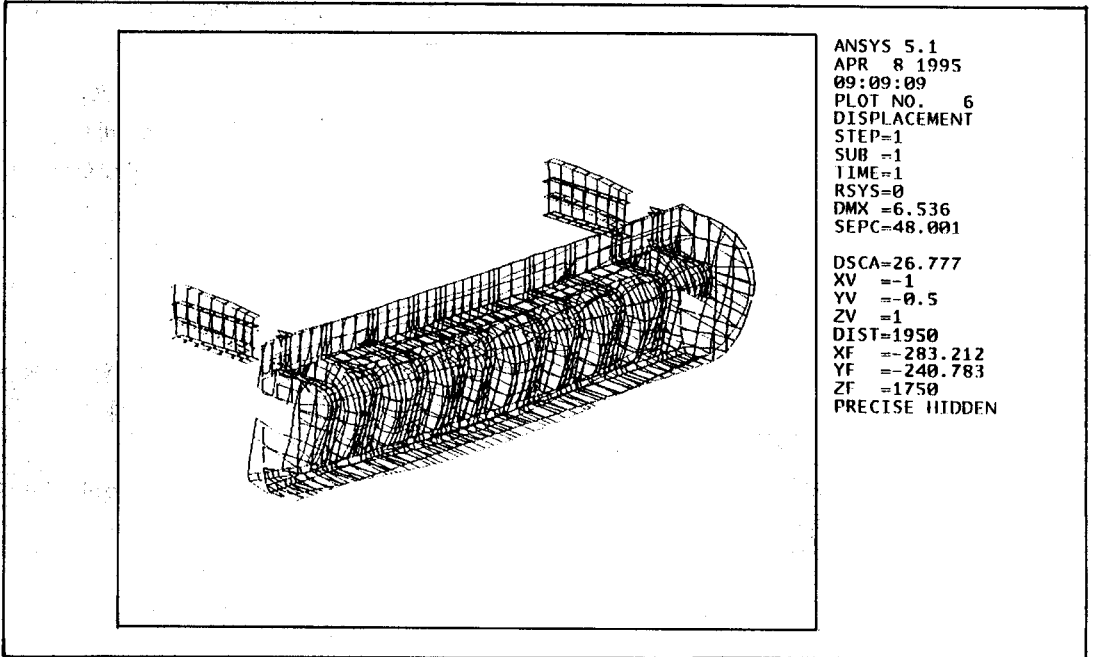


그림 7-4. 해석 2의 변형도

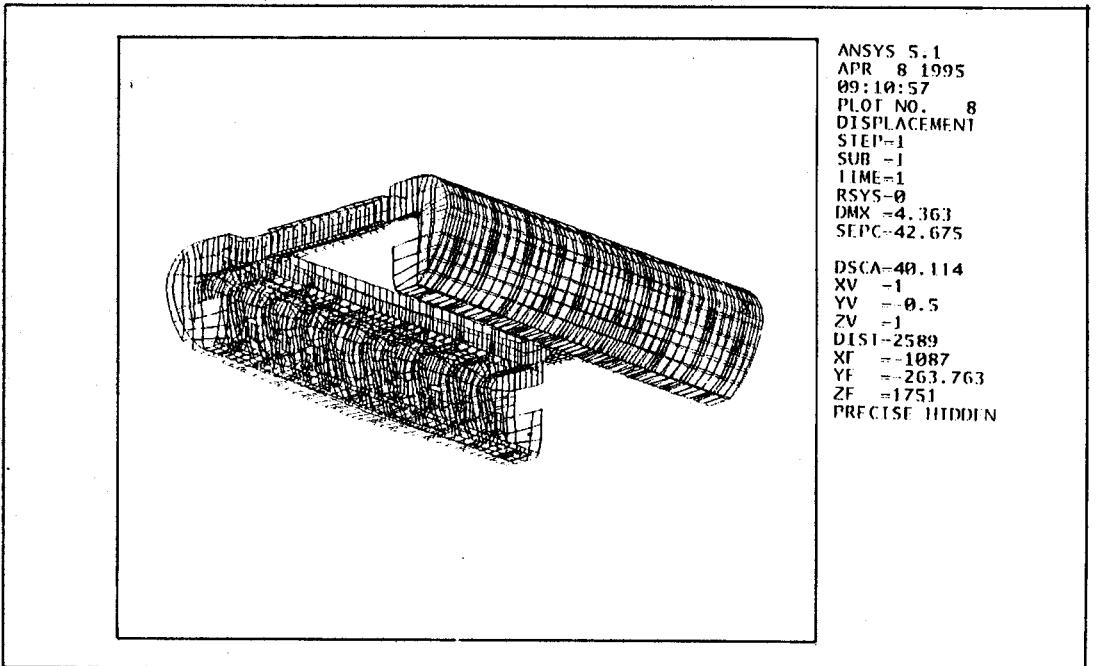


그림 7-5. 해석 3의 변형도

7.4 해석결과 검토

1) 해석 1

- 최대응력 : 2.8 kg/mm^2 (공기스프링의 조립 위치) - 양호
- 대차 중앙에서의 처짐량 : 0.43mm - 양호

2) 해석 2

- 최대응력 : 8.56kg/mm^2 (Rib 굴곡부)-양호
- 대차 중앙에서의 처짐량 : 2.65mm -양호

3) 해석 3

- 비틀림 강성 K_t : 29.7kg/mm - 양호

8. 결 론

본 연구과제의 수행결과 대차 프레임의 크기

는 시험선로의 최소 곡선반경 60mR 를 30km/h 의 속도로 원활히 통과할 수 있도록 길이 3.5m , 폭 3m , 높이 0.914m 로 설계되었고 프레임의 재질은 중량을 감소시키기 위하여 비중량이 작은 경합금인 알루미늄합금을 선택하였다. 대차가 분담하는 하중조건에 대한 강도 및 강성을 충족시키기 위해서 프레임을 판재로하여, 구조 해석을 통하여 허용 강도치 및 강성치가 만족함을 입증하였다.

제작후 현재까지의 시험을 통해 앞으로의 수정·보완사항을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 각 단품들의 중량 감소
- 2) 단품의 착탈이 용이하도록 대차의 구조 구조변경
- 3) 급구배, 급곡선에서의 통과능력이 더욱 우수하도록 설계·제어

