

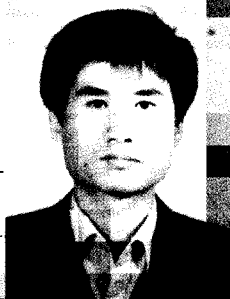
자기부상열차의 부상제어기 개발



김 국 현

(한국전기연구소 발전제어사업팀)

- '79. 2 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업
- '83. 8 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (석사)
- '87. 2 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사)
- '87. 8~'88.12 영국 Univ. of Oxford Self-Tuning Lab. Post-Doctor
- '89. 4~현재 한국전기연구소 발전제어사업팀장 책임연구원



김 춘 경

(한국전기연구소 발전제어사업팀)

- '85. 2 연세대학교 공과대학 전기공학과 졸업
- '87. 2 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업 (석사)
- '87. 6~'90.10 삼성종합기술원 전자기기부 근무
- '91. 2~현재 한국전기연구소 발전제어사업팀, 선임연구원

제1장 개요

자기부상열차는 부상 및 추진방식에 따라 EMS (electromagnetic suspension), EDS (electrodyn-amic suspension) 등으로 구분되며, 세분하면 상전도 흡인식 부상과 초전도 반발식 부상, 선형유도 전동기 추진과 선형 동기 전동기 추진방식으로 구분된다. 세계적인 개발추세는 초전도 반발식 부상-선형 유도 전동기 결합을 제외한 3가지의 부상-추진 결합형태가 연구·개발되고 있다.

표 1. 부상 및 추진 결합방식

부상 방식	추진 방식	대표적 모델	비 고
상전도 흡인식	LIM 추진	UTM, KOMAG, HSST, HML	중·저속(40 ~110Km)
	LSM 추진	TRANSRAP ID	Vehicle단위/ 시속 400Km
초전도 반발식	LIM 추진	없음	
	LSM 추진	MLU	소형/시속 400Km

현재 국내에서는 상전도 흡인식 + LIM 추진 방식이 개발되고 있으며, 이 분야에서의 개발경험과 성능개선 및 실용화를 위하여 필요한 계속 연구분야를 요약한다.

- 부상시스템의 개요
- 부상제어기의 설계
- 통합 제어 및 진단 모니터링 시스템
- 실험 및 주행시험 결과

- 실용화를 위한 방안 등의 순서로 기술한다.

제 2장 부상시스템의 개요

자기부상열차의 주행시 부상특성은 선로의 횡구배, 종구배 조건, 좌우경사도(cant) 및 차량의 기계적 구조, guideway의 기계 강도적 특성등과도 밀접한 관계를 갖게 되며 이러한 종합 성능의 관점에서 부상시스템을 이해하기 위하여 차량의 구조등에 대하여 간단히 설명한다.

2.1 차량의 구조

- 3개의 대차(bogie)가 차체를 지지하는 구조임

- 대차는 좌·우에 각각 4개의 전자석이 편심(stagger) 배치되고, 강제 모듈에 부착되어 있는 구조임
 - 차체는 대차로부터 2차 suspension (air spring)에 의해 지지되며, 차량의 축방향, 횡방향 작용력에 이기기 위한 thrust bar에 의해 고정되는 구조임
 - 대차를 구성하는 좌·우 모듈은 각각의 rolling 또는 momentum inertia에 의한 회전을 방지하기 위하여 tie-bar로 고정되어 있는 구조임
 - 3개의 대차는 상판과 일정범위의 수직/수평 방향 자유도를 갖도록 설계되며, 3대의 대차를 각각 독립적으로 운용된다.
- 아래 그림 1)은 대차의 구조를 보여준다.

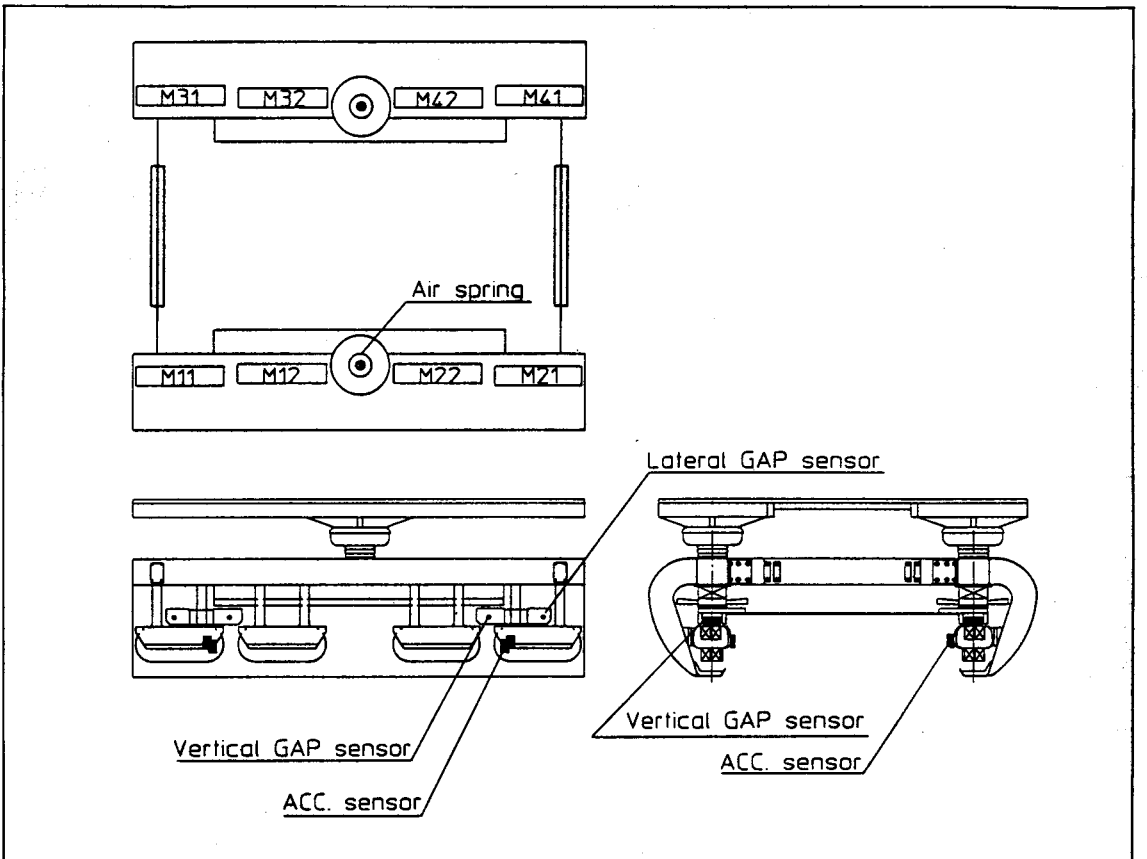


그림 1. 대차의 구조

2.2 부상/안내력 발생원리

수직방향의 부상력과 원심력·풍력 등의 횡방향 외란에 대하여 안정된 부상을 유지하기 위한 안내력 발생을 위한 구조로 그림 2)와 같다. 대차 1대의 4코너(corner) 중 한 코너에는 편심배치된 2개의 전자석이 내는 부상력과 안내력의 합이 대차의 거동을 결정짓는 중요한 요소가 되

며, 편심배치 2개의 전자석에 의해서 부상력과 안내력이 발생하는 원리는 그림 3)의 벡터도로 설명할 수 있다.

2.2.1 일자형 배치구조

일자형 배치구조는 2개의 전자석과 guideway 간의 상대적 위치가 같아지며 같은 크기의 전류

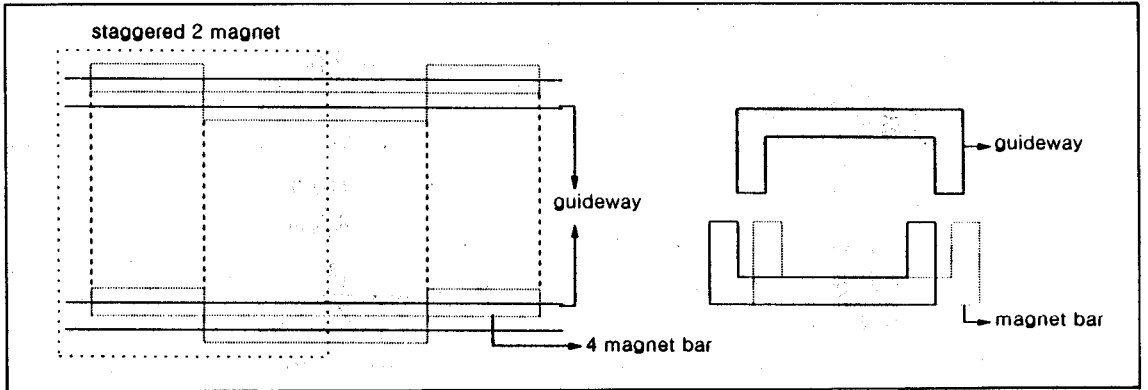


그림 2. Guideway와 편심 전자석의 평면도 (한쪽면)

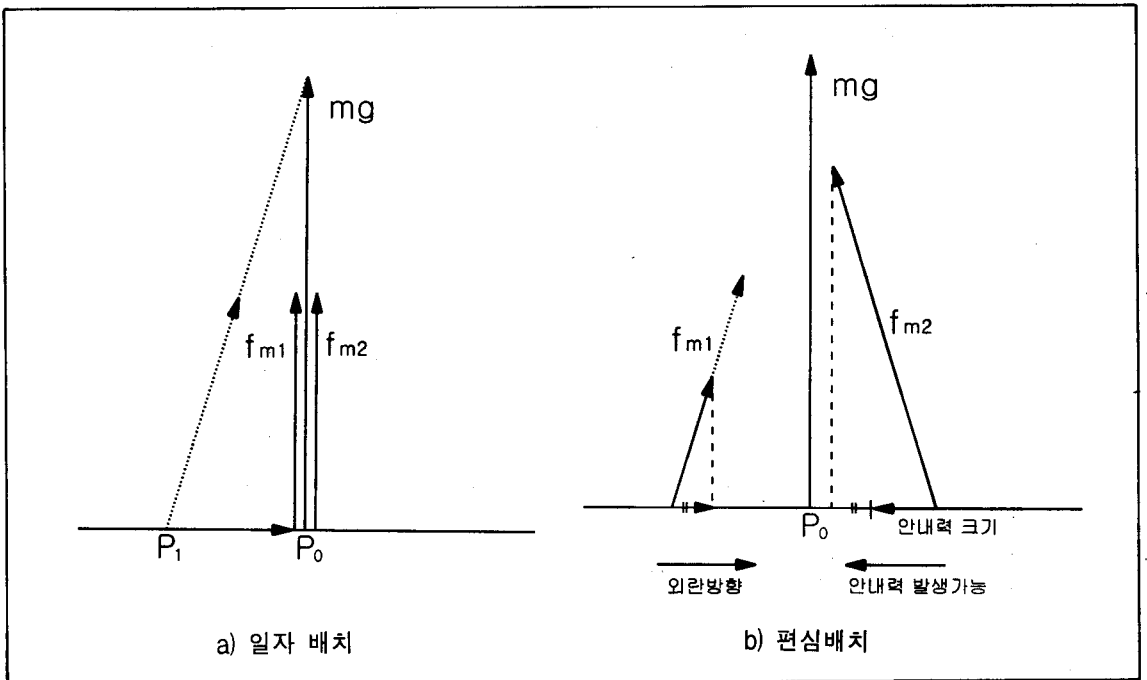


그림 3. a) 일자배치, b) 편심배치시의 힘 벡터도

가 흐름으로서 흡인력의 벡터는 그림 3) a)와 같아진다. 이 경우 중력에 의한 mg의 부상력을 낼 때 안내력의 크기는 위치에 따라서 결정되며, 이 크기는 상대적 평위각도와 상관관계가 큰 값으로 존재하고 독립적인 수직 부상력과 수평 안내력의 크기를 결정할 수 없어진다. 특히 수평안내력은 횡방향 편위량에 거의 비례하는 spring force 형태로 나타나므로 횡방향 외란에 대하여 좌우로 스프링 진동형태가 되며, 대차 단위에서는 yawing mode 로 동작하게 된다.

2.2.2 편심형 배치구조

편심형 배치구조에서는 2개의 전자석이 서로 다른 크기의 수직력과 수평력을 발생시킬 수 있어서 수직력의 합이 중력 mg와 같게 유지되는 가운데 일정 범위내에서 두 개의 수평력의 벡터 합을 임의로 바꾸어 풀 수 있으므로 일정 범위내의 횡방향 외란에 대한 복원력 또는 일정위치 제어등이 가능한 장점이 있다. 이러한 모드는 대차단위에서의 yawing mode를 억제하는데 매우 효과적이며 그림 3) 의 b)와 같이 해석된다.

2.3 부상시스템 구성

부상시스템은 전자석에 흐르는 직류전류를 제어함으로써 지지용 선로와 일정간격(11mm)을 유지하도록 하는 기능을 수행한다.

이와 관련된 구성은 아래 그림과 같다.

제 3장 부상제어기 설계

3.1 전자석의 제어원리

전자석과 guideway간의 흡인력(F)와 전자석에 가해지는 전류(i)의 관계, 전류와 전압(V)의 관계를 요약하면 다음과 같다.

$$F = K \cdot \frac{i^2}{Z^2} \quad (1)$$

$$V = Ri + \frac{d}{dt} \phi \quad (2)$$

$$= Ri + L \cdot \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}$$

$$F - mg = m \cdot a \quad (3)$$

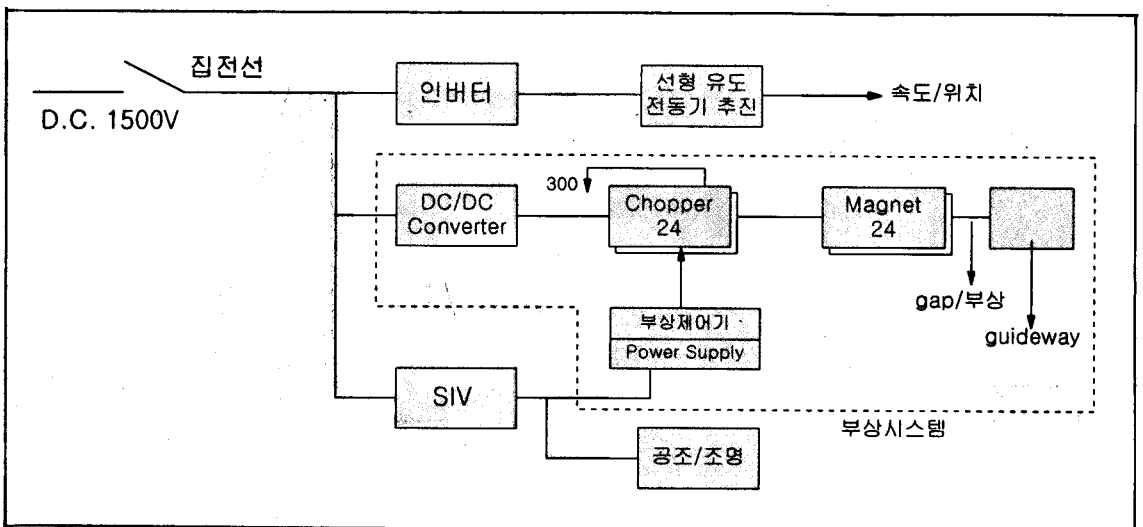


그림 4. UTM-01 전력구성도

여기서 Z 는 공극, R 은 전자석의 저항, ϕ 는 flux, L 은 인덕턴스, m 은 전자석이 지지해야 할 무게, g 는 중력가속도, a 는 가속도를 나타낸다.

위의 식(1)은 비선형 관계식이며 일반적으로 잘 알려진 선형제어기법을 적용하기 위해서는 선형화의 과정을 거치고 이 결과는 흡인식 자기 부상 방식이 open-loop unstable 시스템임을 보여주게 된다.

이러한 부상의 원리에서 제어기를 구현하는 방법은 다음과 같은 다양한 방법들이 있을 수 있다.

3.1.1 갭 센서만 사용하는 방식

갭 센서만 사용하여 공극을 측정하여 공극과 이의 미분값으로서의 전자석 구조의 속도, 가속도 등을 추출할 수 있고, 전자석의 전류 또는 플럭스를 보조 신호로 하여 공극 일정제어의 목표를 달성할 수 있다. 이것은 마그네트 베어링과 같이 회전체 또는 구동체에 센서를 부착할 수 없는 경우에 효과적으로 사용될 수 있으나 자기부상열차와 같이 종구배가 있어서 guideway의 기준면이 바뀌는 경우에는 효과적이지 못하다.

3.1.2 갭 센서와 가속도계를 사용하는 방식

자기부상열차의 경우에 가장 많이 쓰이는 방식으로 전자석에 갭 센서와 가속도계를 부착하여 guideway와 무관한 전자석의 가속도, 속도 정보, 그리고 guideway 기준면의 변화 또는 진동과 관련된 상대적인 공극의 크기 및 전자석의 절대적 위치 등의 정보를 추출하여 제어기를 구

성하는 방식으로 가장 많이 쓰이는 방식이다.

3.1.3 종합적 방식

앞의 갭 센서와 가속도계 이외에 전자석에 흐르는 전류 또는 전자석의 플럭스 등을 측정하거나 추정하여 제어정보로 활용하는 방식들이 있으나 현 단계에서는 크게 효과적으로 활용되지 못하고 있다.

3.2 UTM-01의 부상제어기

3.2.1 센서

UTM-01에서는 대차 좌·우측 중 한쪽의 앞·뒤에 각각 두 개의 갭센서와 한 개의 가속도계가 취부되어 guideway와 대차의 횡방향 정보 추출을 하고 있으며, 수직방향의 정보 추출을 위해서는 대차의 네 코너에 각각 두 개의 갭센서와 한 개의 가속도계가 설치되어 있다. Guideway는 열적 팽창/수축될 때에도 문제없도록 충분한 이격거리(예 : 5mm~35mm)만큼 불연속 처리되어 있으므로 이 구간에서의 갭 측정을 정확히 하기 위하여 한 코너마다 두 개의 갭센서가 설치되어 있다.

3.2.2 부상제어기 H/W

부상제어기는 아날로그와 디지털이 혼합된 형태로 제작되어 있으며 대차 1대의 좌·우 모듈 별로 각각 다음의 제어기 구조를 갖는다.

차량 전체는 다음 그림의 구조를 갖는다.

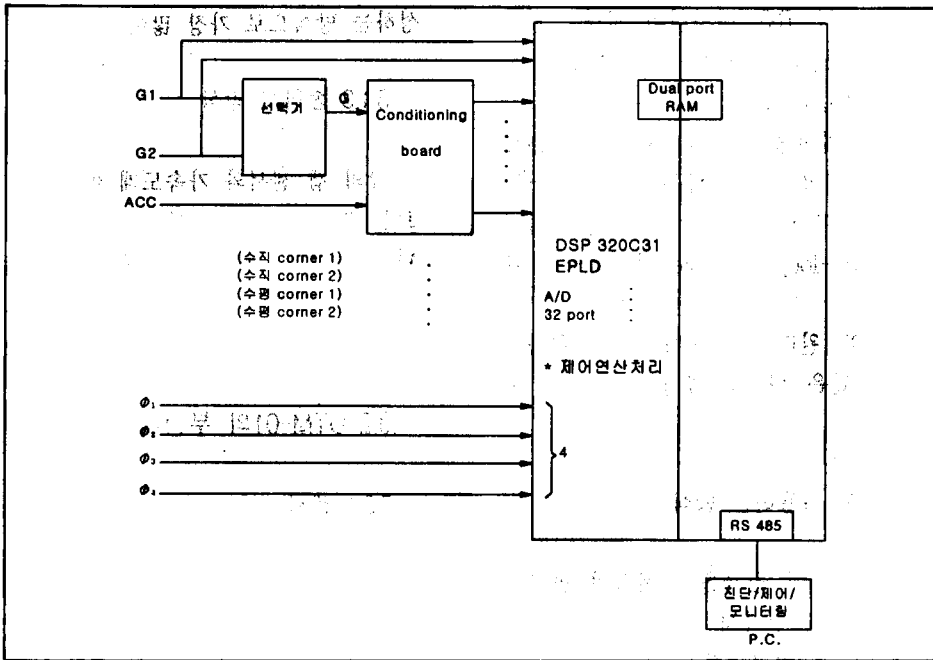


그림 5. 부상제어기의 하드웨어 구조

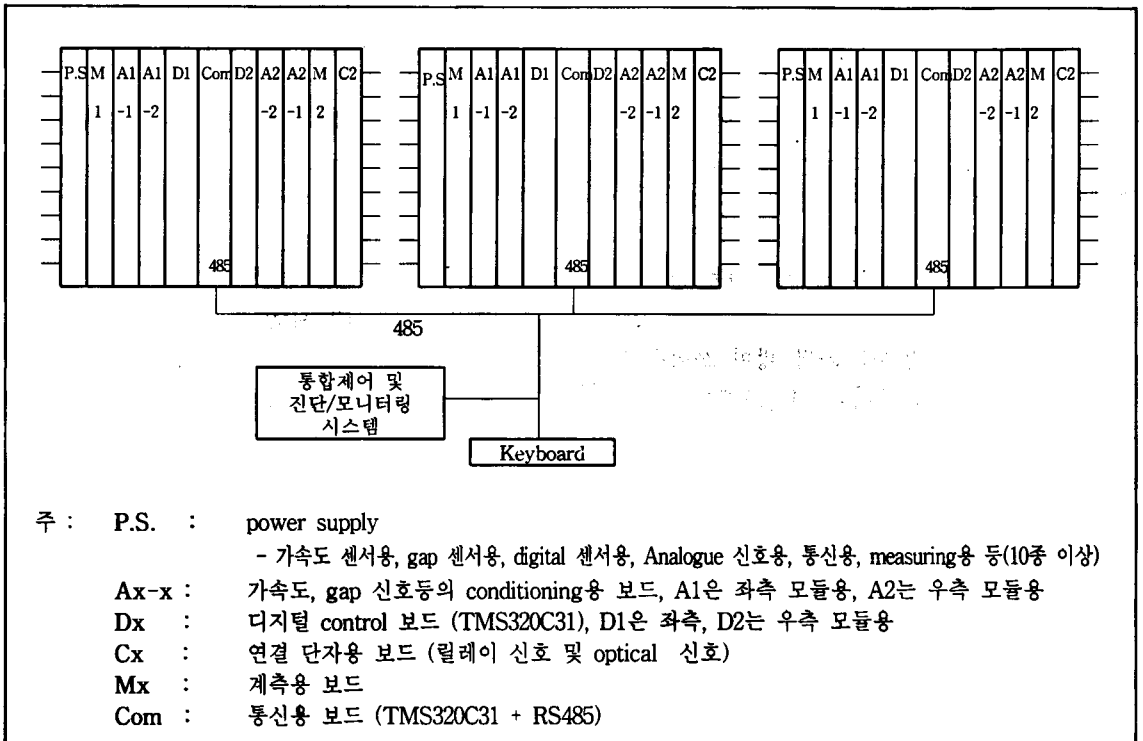


그림 6. 차량용 부상 제어시스템 구조

제 4 장 통합제어 및 진단모니터링 시스템

4.1 목적

앞의 그림에서 표시된 통합제어 및 진단 모니터링 시스템은 다음과 같은 목적으로 사용된다.

- 부상/추진전의 기본상태 감시·진단
- 부상/추진중의 각종 상태 감시
- 추진 속도에 따른 gain-scheduling 제어
- 부상/추진중의 data 기록
- 사고 및 이상 동작시 원인 규명

4.2 구성 및 진단 항목

통합제어 및 진단 모니터링 시스템은 산업용 PC와 MMI를 위한 graphic tool로 구성되고, 대차단위 제어기와 RS 485를 통하여 1:3 통신으로 연결된다. 모니터링 항목은

- chopper 상태 및 전류 (24개)
 - 공극 (수직 12개, 수평 6개)
 - 차량 속도
- 등이며, 진단 및 조치 항목은
- 단순 경고 발생
 - 차량 trip 조치
 - 고장 원인 분석
 - 속도별 부상 gain scheduling

등이며 이와 관련된 사항을 그림으로 표시하고, 터치 스크린으로 조작이 가능하다.

제 5장 실험 및 시험주행 결과

5.1 모의플랜트 실험 및 시뮬레이션

모의플랜트에서의 실험 및 시뮬레이션은 편심 배치된 2개의 전자석에서 수행한 것과 편심배치된 4개의 전자석 즉 대차의 한쪽 모듈에 대하여

수행한 것으로 구분하여 설명한다.

5.1.1 2개의 전자석 장치

2개의 편심 배치된 전자석은 수직방향과 수평방향만 움직일 수 있도록 강제 조정된 구조이다. 시뮬레이션상에서 그림 7)은 좌·우 방향이 바뀌면서 사다리꼴 형태의 힘 외란이 가해질 때 두 개의 전자석에 같은 전류가 흐르면서 외란의 방향으로 편위되는 모습을 보여주고 있으며, 그림 8)은 안내제어시에 횡방향 편위량이 작아지는 모습과 이때 두 개의 전자석에 흐르는 전류의 차이를 보여주고 있다.

그림 9)는 축소형 실험장치에서 일정크기의 외란을 가하고 있다가 순간적으로 제어할 때 부상제어시에는 횡방향 동요가 계속되고 있으나 안내제어시에는 빠르게 일정위치로 복귀되는 모습을 보여주고 있다.

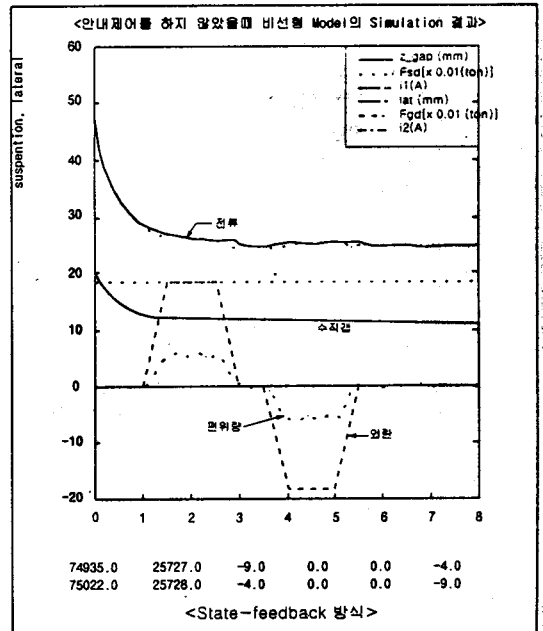


그림 7. 부상제어시 편위 (시뮬레이션)

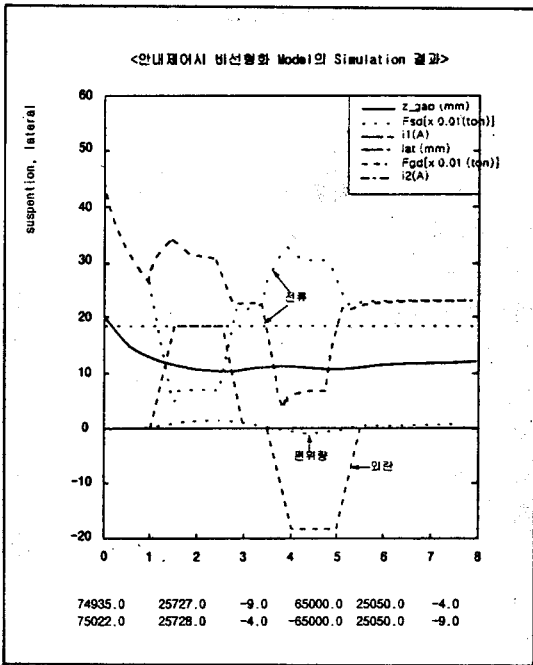


그림 8. 안내제어시 편위 (시뮬레이션)

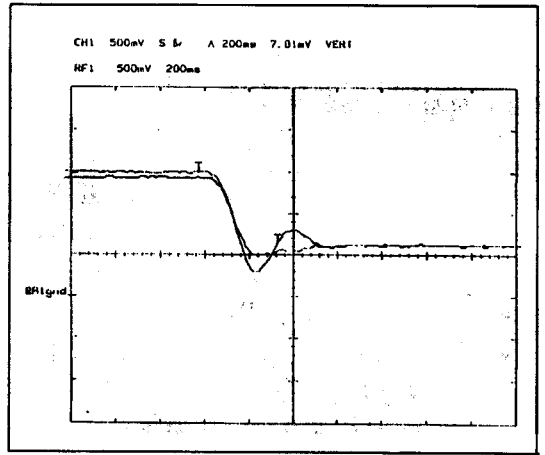


그림 9. 편심 2 전자석계의 부상/안내제어 신호

5.1.2 4개의 전자석 모의장치

편심된 4개의 전자석을 4자유도 즉 heave, sway, yaw, pitch만 가능하도록 하고 roll은 발생하지 않도록 강제구속시킨 구조에서 실험을

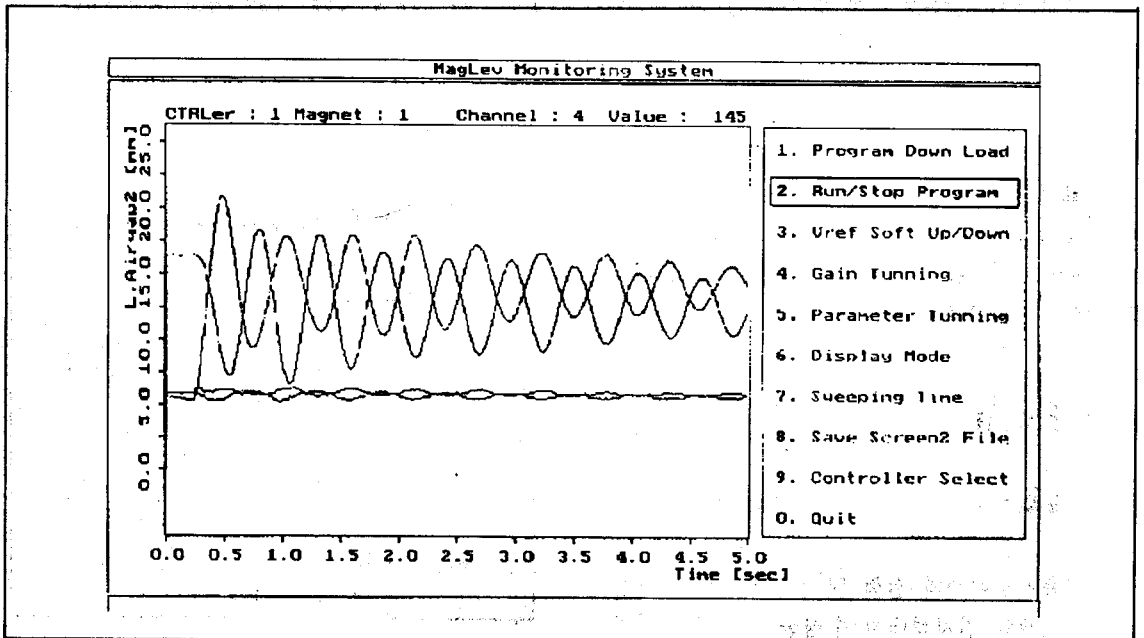


그림 10. 부상제어시 실험 파형

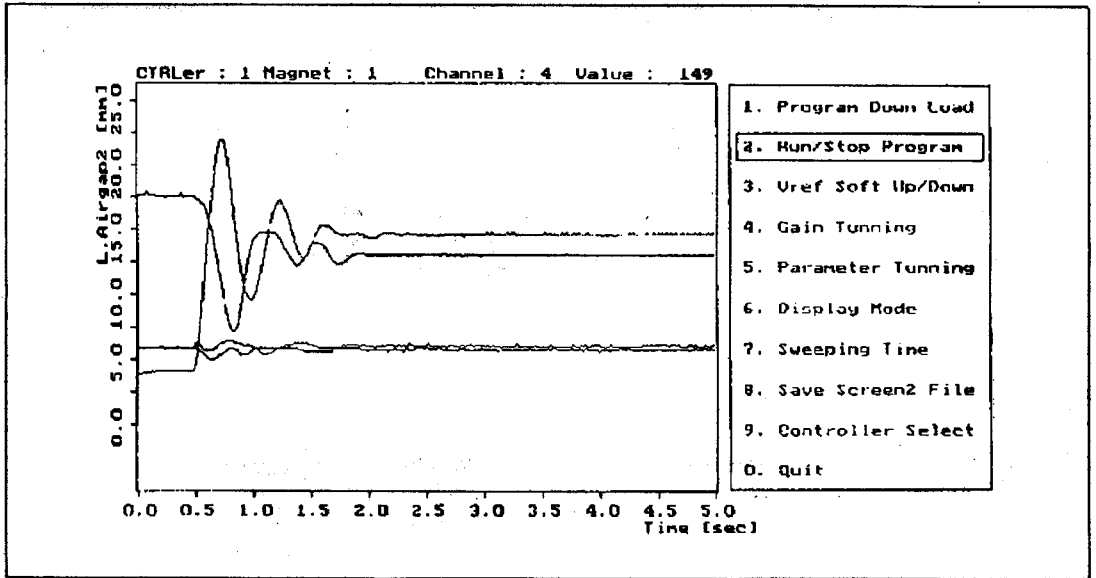


그림 11. 안내제어시 실험파형

수행하였다.

그림 10)은 앞·뒤의 2개씩의 전자석의 부상 제어만 독립적으로 수행하면서 횡방향의 외란을 인가하였을 때 위의 두 곡선은 앞·뒤의 전자석이 기준값에서 교차적으로 흔들리는 모습 즉 yawing이 큰 것을 보여주고 있으며, 아래의 두 곡선은 수직방향의 갭이 서로 교차하는 즉 pitching 모습을 보여주고 있다. 그림 11)은 4자유도 제어를 수행할 경우 똑같은 외란조건에서 yawing 모드가 1초 이내에 제어되며, 수직방향의 갭도 서로 교차하지 않으므로 pitching 모드가 발생하지 않는 것을 보여주고 있다.

5.2 대차의 주행 성능시험

UTM-01용 (a)대차를 부상 및 주행실험한 결과는 다음과 같다.

5.2.1 횡방향 특성

그림 12)와 13)의 위의 4개 신호는 주행중 수

직방향이 갭 신호변화이며, 아래의 2개 신호는 수평방향의 편위를 나타내는 갭 신호이다.

그림 12)은 앞절의 그림 10)과 같은 경우로서 부상제어만 하는 경우, a) 직선에서 곡선선로로 진입할때와 b) 곡선에서 직선선로로 진입할 때 대차의 횡방향 편위의 모습을 보여주고 있다.

그림 13)은 안내제어를 수행할 때, a) 직선에서 곡선 b) 곡선에서 직선 진입시 횡방향 편위 모습을 보여주고 있다. 그림 13)의 a)에서 횡방향 갭의 변화가 크게 변화하는 것은 수직방향에서의 큰 외란을 억제하지 못하여 수직방향의 외란이 수평방향으로 전파되어서 나타나는 현상이다.

5.2.2 주행 특성

대차가 1km 시험 선로에서 주행시의 특성은 그림 14)과 같다. 맨위와 맨아래의 신호는 수직방향 갭의 변화를 나타내며, 가운데의 신호는 guideway와 전자석간의 거리변화의 가속도 성분이다. 시속 15 km 정도에서 갭의 변화는 침

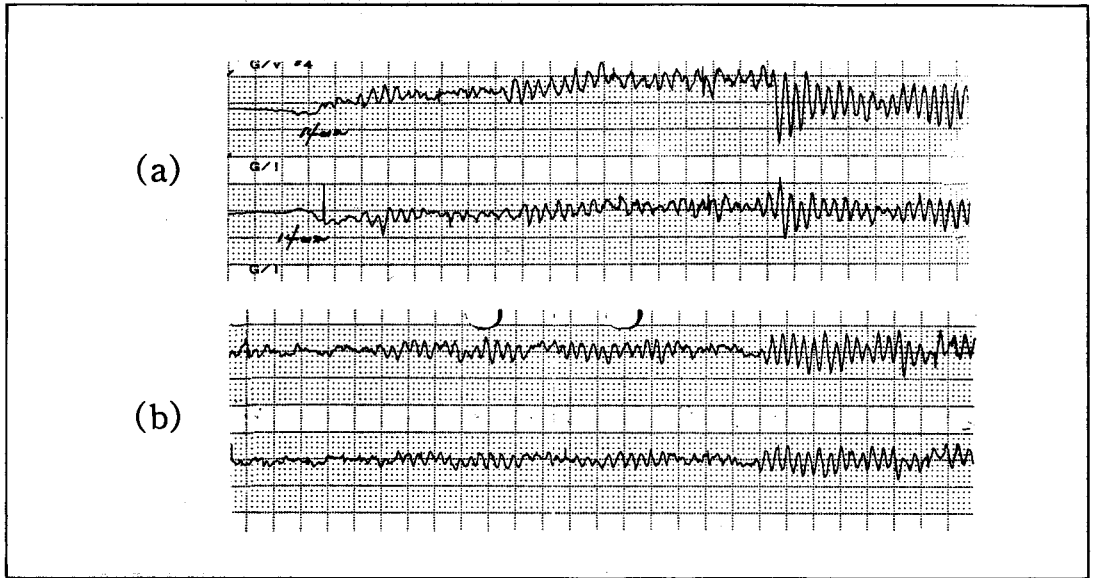


그림 12. 부상제어시 대차 수평외란 특성

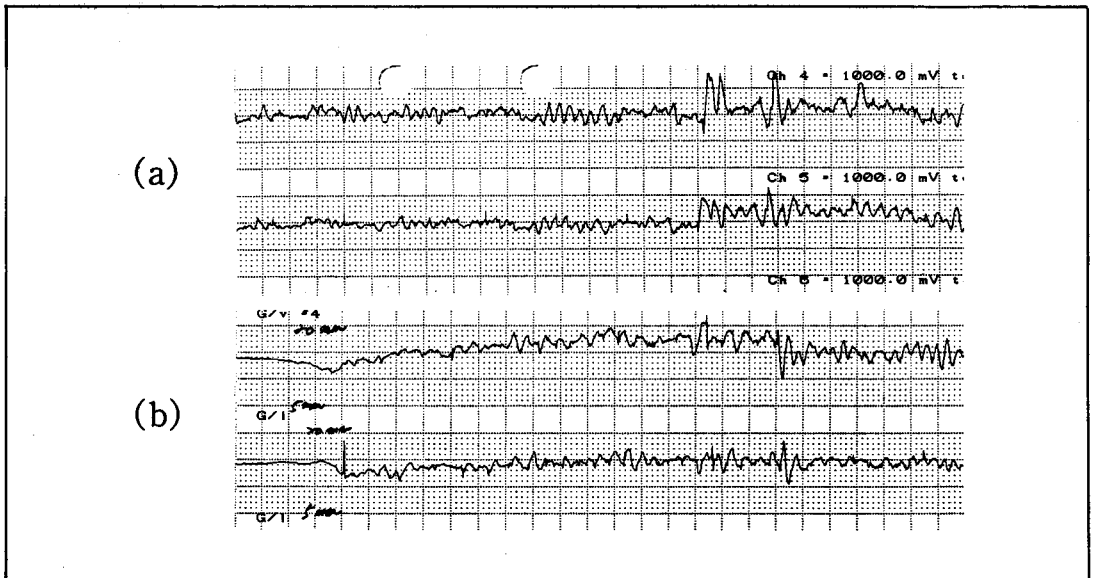


그림 13. 안내제어시 대차 수평외란 특성

두값 2mm 정도이며 안정된 부상 상태를 유지하고 있다. 시속 40km 에서는 4mm의 침두값 변화가 관측되는데 갭의 변화가 침두값으로 뒤

는 것은 guideway의 이음매를 지날 때 갭 정보의 변화에 의한 것으로 EXPO 운행차량의 특성보다 개선된 것으로 평가되고 있다.

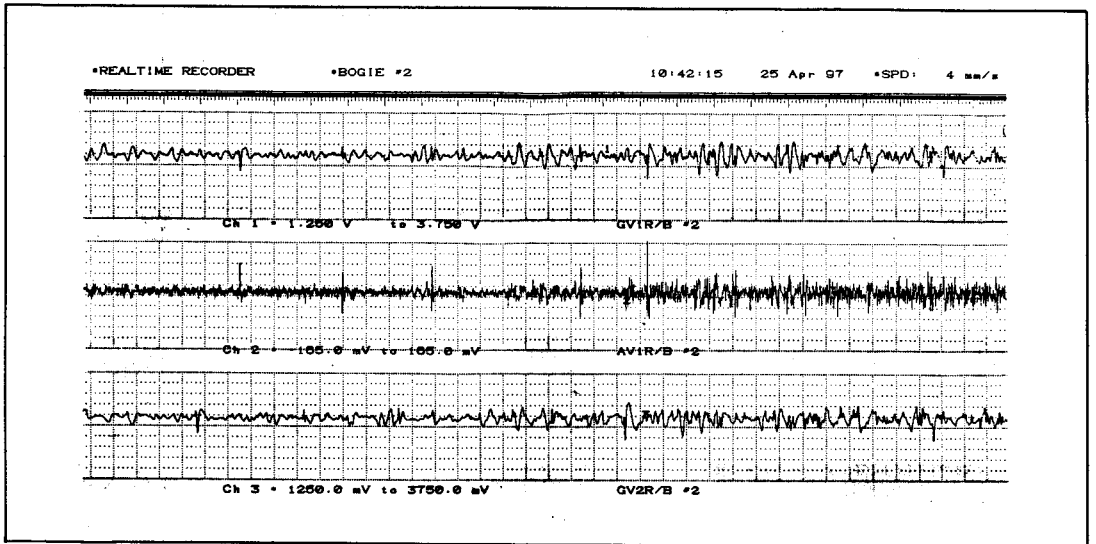


그림 14. 주행시의 갭변화

제 6장 실용화를 위한 방안

97년 4월 현재 대차단위 및 2개의 대차 연계 주행시험을 실시하였고, 6월부터 3개의 대차가 구성하는 한 대의 완성차량 시운전이 가능할 것이다. 지금까지의 연구·개발 및 시험결과를 토대로 실용화를 전제로 한 부상시스템의 보관·연구분야에 관하여 기술한다.

6.1 실용시스템의 개념

교통시스템으로서의 실용화는 성능도 중요하지만 성능 이전에 신뢰성과 안전성이 선결 과제이다. 안전성은 fail-safe의 개념으로 설명되고, 신뢰성은 fault-tolerant 기술로 제고될 수 있다. 바퀴식 교통기관의 안전성은 외부정보 불량 또는 취득불가시 정지시킴으로써 사고의 파급을 막는 것이며, 신뢰성은 고장이 나지 않는 개념 또는 고장 발생 빈도에서의 MTBF(Mean Time

Between Failure) 등을 거론하며 초기 설계단계부터 부분적 고장이 있더라도 성능을 낼 수 있도록 하는 개념으로 경부선 고속전철의 경우 6개의 모타블럭 즉 12대의 추진전동기 중 1개의 모타블럭이 이상이 있어도 5개의 모타 블럭으로 정상운전이 가능하도록 설계하는 개념이다.

UTM-01에 고려되어야 할 실용화 문제를 간단히 기술한다.

6.2 시스템 구성안

그림 4)의 전력구성도에서 보듯이 한 개의 DC/DC 컨버터가 부상용 D.C. 전력을 모두 공급하고 있으며, 대차 제어장치의 power supply는 단일 SIV로부터 전력을 공급받으며, power supply 또한 단일시스템으로 구성되어 있다.

이 경우 단위 시스템의 고장이 부상계에 미치는 영향을 분석하면 표 2)과 같다.

표 2. 단위 시스템 고장과 파급영향

기기명	고장 형태	파급 형태
DC 공급장치	정전	부상·추진실패 / 운행 타격
DC/DC	단위기기	부상 실패 / 운행 타격
SIV	단위기기	부상 실패 / 운행 타격
P/S	단위기기	부상 실패 / 운행 타격
제어기	단위기기	부상 실패 / 운행 타격
Chopper	단위기기	부상 유지 / 운행 가능
	pair고장	부상 실패 / 운행 타격

- 그림 4)와 표 2)를 검토하면
- DC 공급전력의 신뢰성 제고
 - DC/DC의 신뢰성 제고 또는 fault-tolerant 구조 채택
 - SIV의 이중화 또는 power supply 전원 공급의 이중화 구조
 - 제어기용 power supply의 입력 신뢰성 제고 및 power supply의 신뢰성 제고 또는 fault-tolerant 구조 채택
 - 부상제어기의 신뢰성 제고 또는 fault-tolerant

구조 채택등의 결론을 얻을 수 있다. 이로부터 구성 가능한 시스템은 그림 15)와 같다.

6.3 제어시스템 구성안

현재의 시스템은 차량 1대 또는 최대 2대까지의 운전시에 부상제어 및 감시 진단을 할 수 있는 구조이다. 그러나 충분한 신뢰성과 운전편의성, 제어 알고리즘의 변경등에는 한계가 있는 시스템이다. 특히 자기부상열차는 기존의 고속전철 시스템과 비교하면 철저하게 동력이 분산된 시스템이면서도 open-loop unstable 특성상 제어의 신뢰성과 함께 통신기능의 보장이 절실하다. 이런 목적으로는 현존하는 디지털 시스템중에서

- 개방형 시스템
- 표준형 시스템
- 실시간 처리시스템
- 분산형 시스템 구축 용이
- 다양한 지원시스템

등의 장점이 있는 VME 시스템의 채택이 바람직하며, 제어기 actuator에 해당하는 초과와 오프셋등의 편차를 제거하기 위하여는 디지털 제어기에 의한 PWM 직접구동형이 바람직하다. 제어시스템의 구성안을 그림 16)에 나타내었다.

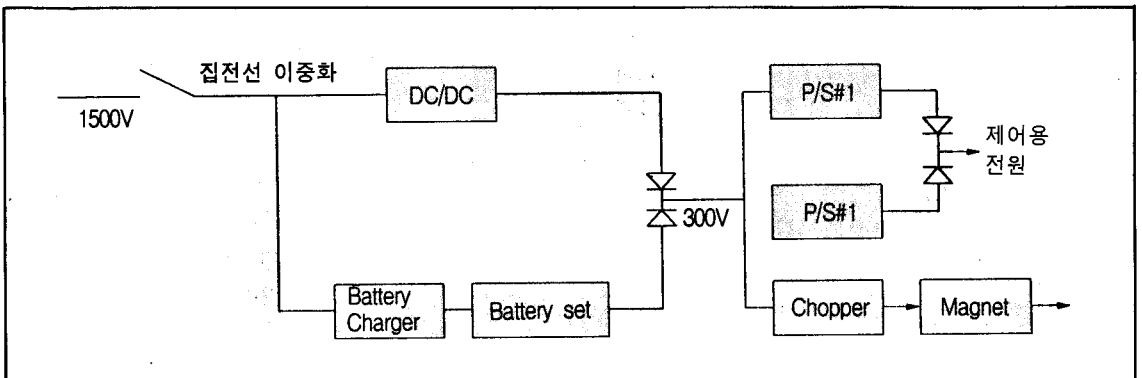


그림 15. 전원구성도

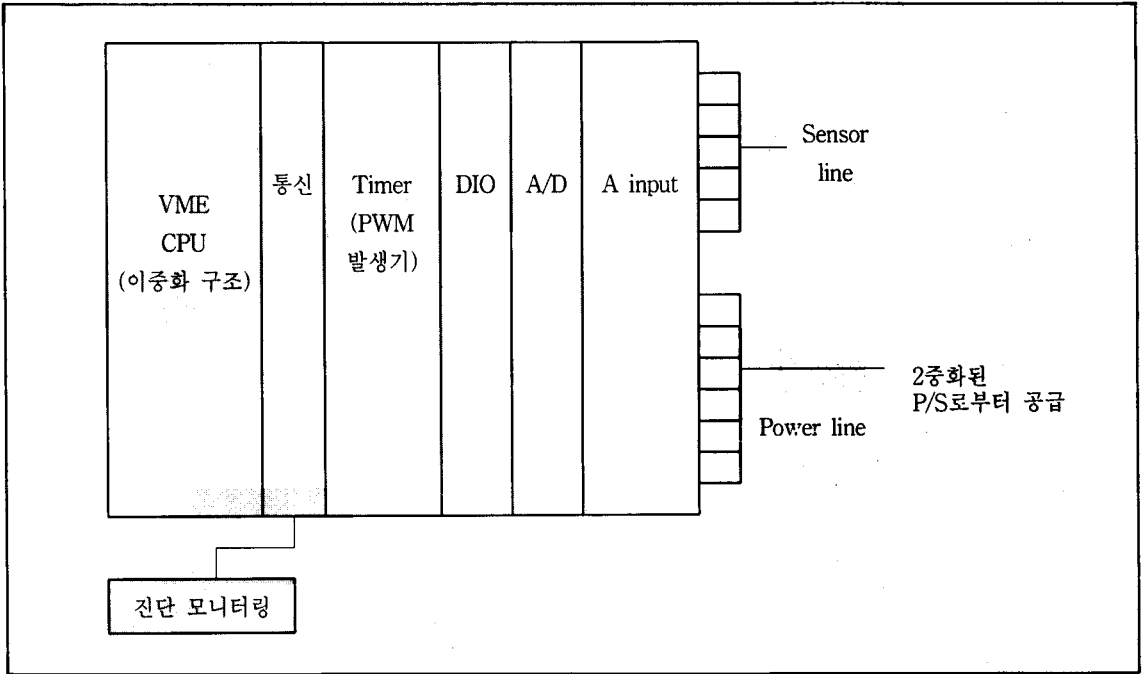


그림 16. VME 부상제어시스템(안)

이 경우 아날로그 보드는 센서신호의 집합체 및 단순 필터링 기능만을 수행하고 디지털 시스템에서 갭 신호 선택·처리 기능 및 제어 알고리즘 연산을 모두 수행하고, timer 카드는 IGBT chopper에 동기된 게이트 신호를 PWM 파형으로 직접 발생시킨다. DIO 카드는 chopper의 상태 등 관련 릴레이 접점등의 정보를 받고 내보낸다.

제어기의 이중화는 VME system 전체의 이중화도 가능하지만 여기서는 CPU의 이중화만 고려하기로 한다.

진단 모니터링 시스템은 PC 또는 워크스테이

션으로 구성할 수 있고 통신은 RS485보다 빠른 통신수단으로서 TCP/IP 통신등을 고려할 수 있다.

시스템 구성 개념에서 다수대 차량 편성·운행의 경우는 차량단위의 통합제어기를 설치하거나 차량단위에는 부상제어기와 통신 중계기만 설치되고, 운전실에서 편성단위의 진단 모니터링 시스템 구성이 가능하다. 단 이 경우에는 케이블 접속방식이 쉬우면서도 신뢰성이 높고 통신속도가 빠른 통신방식을 채택함으로써 차량 연결 대수의 변경에 쉽도록 하여야 한다.