

상전도식 도시형자기부상열차(UTM-01) 개발현황



조 흥 제

(KIMM 신교통기술연구부)

- '77 연세대학교 기계공학과(학사)
- '82 연세대학교 기계공학과(석사)
- '90 Rensselaer Polytechnic Institute(박사)
- '91 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



유 문 환

(KIMM 신교통기술연구부)

- '78 연세대학교 전기공학과(학사)
- '80 - '84 원자력연구소 연구원
- '85 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



김 봉 섭

(KIMM 신교통기술연구부)

- '81 동국대학교 전기공학과(학사)
- '83 동국대학교 전기공학과(석사)
- '91 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

Development of EMS Type Urban Transit Maglev System

Abstract

Test Results and Status of development of the urban transit maglev system(UTM-01) are reported. Maglev Project Team in KIMM, in cooperation with Hyundai Precision Company and the Korea Electrotechnology Research Institute(KERI), has successfully finished the second stage development project(1995. 5 - 1998. 8) and demonstrated a prototype two vehicle consisted urban maglev train operating in the speed range of 50km/h.

In this paper, we report various test results of the UTM-01 system, present status of quo and future prospect, and what have been done so far to improve the performance of the maglev system overall.

1. 서 론

본 기계연구원내 자기부상열차개발그룹에서는 열차와 선로와의 비접촉주행으로 인하여 바퀴식 열차에 비하여 우수한 승차감, 낮은 소음/진동 등으로 인하여 차세대 대중교통수단으로 등장할 것이 확실히 되고있는 자기부상열차를 1990년부터 국책연구사업으로 개발해오고 있다. 본 그룹

에서 개발중인 자기부상열차는 도시내 또는 대도시와 대도시 주변 위성도시간의 승객수송을 목적으로 하고 있는 경전철용으로서 최고운행속도가 110km/h 인 중저속용이다.

본 그룹에서는 국책연구 1 단계(1989. 12~1993. 4), 1994. 5월부터 1998. 8월까지 4년간 지속된 자기부상열차개발 2단계 사업에 이어 현재 도시형자기부상열차 3단계사업을 수행중이다. 표 1 에 1, 2, 3단계에서 수행된 연구개발현황의 개략적인 내용을 보이고 있다.

표 1. 기술개발현황

1단계 (1989 - 1993)	- 자기부상열차 국책연구개발시작 - 요소기술개발, 소형 model 개발 - 대차중심의 부상제어에 대한기본연구 - 대전 Expo 93 전시차량개발(현재)
2단계 (1994 - 1998)	- 도시형자기부상열차(UTM-01) 개발 - 현대정공, 기계연구원 협동연구 - 1 Km 시험선로 건설 - 부상제어기 digital 화 - prototype 차량개발 및 주행성능시험 - 2량 1편성 열차 주행성능시험실시
3단계 (1998 - 2000)	- 도시형자기부상열차개발 - 실용화에 대비한 주변기술확충 - 자동운전, 신호통신시스템 중점개발 - 굴절식 분기기 개발 - fault tolerant 한 제어연구개발

현대정공(주)와 공동으로 수행된 2단계 SOC 국책연구사업에서는 prototype 차량개발을 목표로 하였는 바, 실용화전단계의 2량 1편성 도시형 자기부상열차를 성공적으로 개발하였다. 1994. 5~1998. 8까지 지속된 2단계사업의 도시형자기부상열차개발경과 및 단계별 개발목표는 아래와 같다.

- 1994. 5 : 연구개발시작
- 1995. 12 : 1Km 시험선로 완공
- 1995. 11~1997. 5 : 1호차량용 bogie 시험
- 1997. 6 : 1호차량조립
- 1997. 8~현재 : 1호차량 주행시험

- 1997. 11 : 1호차량 공개시승회
- 1998. 4 ~ 1998. 5 : 2호차량 bogie 시험
- 1998. 6 ~ 현재 : 2호차량 주행시험
- 1998. 7 : 1, 2호차량 연계
- 1998. 7 ~ 현재 : 1, 2호차량 연계주행 시험

위 개발일정에 따른 주행시험은 크게 단위 bogie 주행시험, 차량단위 주행시험, 2차량연계주행시험으로 대별할 수 있다. 단위 bogie 및 UTM-01 제1호차량의 주행시험결과는 96, 97 년 기계연소보에서 보고한 바 있다.^[1,2,3] '98년 6월 이후 현재까지 UTM-01 제1, 2차량 연계주행시험을 실시해오고 있는 바, 이하에서 주요시험결과 및 실용화전망 등에 대하여 기술하기로 한다.

2. 주행시험결과 및 고찰

주행시험중인 2량 1편성 자기부상열차를 그림 1에 보이고 있다. 그림 1에 보이는 기계연구원내 시험선로의 길이는 1Km이며 순간최고속도 50Km/h 정도를 시험할 수 있는 직선구간이 400m 정도이다. 시험선로의 최소곡률반경은 60m 이며 4%, 6% 구배를 갖고 있다.

98년 6월에 제작되어 시험중인 UTM-01 제2호차량의 기본적인 기계구조 및 전장품 설계 및 주요 성능은 제1호차량과 대동소이하다. UTM-01 제1, 2호차량의 기본적인 사양은 표 2에 보이고 있다. UTM-01 제2호차량에서 1호차량에 비하여 개선된 점들은 표 3에 보이고 있다.



그림 1. 연계주행시험중인 UTM -01

표 2. UTM-01 주요 Specification

Type	상전도출입식, 편측선형전동기 추진
최고운행속도	110 Km/h
최고가/감속도	0,8 m/s ²
차량치수	L13m x w3,5m x h 3,96m
차량중량	1호 차량 : 23t, 2호 차량 : 22t
열차편성	2량 1편성
승차정원	60인승(최대 120인승)
지지방식	1량당 3대차에 의한 지지
부상방식	상전도흡인식/전자석 24/car
정격부상공극	11mm
안내방식	1호 차량 : 전자석 Stagger
추진방식	편측식 선형유도전동기(SLIM 부상시 Gap : 5mm)
제동방식	회생(발전)제동 + 역상제동 + 기계제동
전원공급방식	궤도양측에 Power Rail 설치
공급전압	DC 1500V

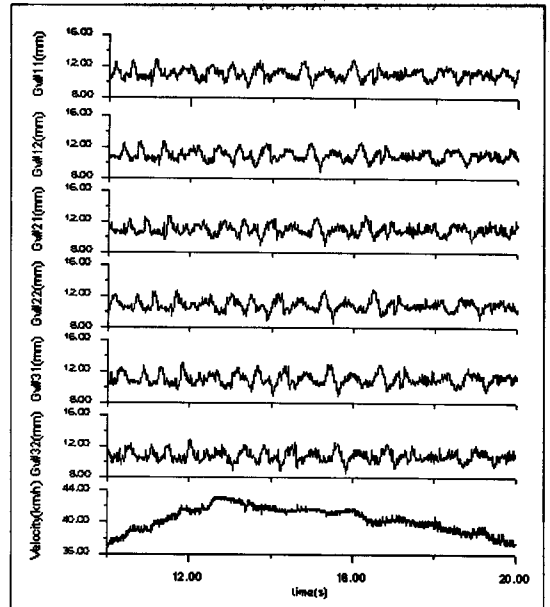


그림 2. 직선궤도 주행중 대표적인 gap 파형. UTM-01 제 2호차량 위에서 아래로 : 진행방향 좌측 6코너 gap 파형 및 주행속도

표 3. UTM-01 제2호차량에서 개선된 점

개선대상 Item	1호차량	2호차량
부상제어기	Analog Filter	VME Bus 사용 Digital Filter
Chopper Inverter S/W 소자	Magnet 당 1개 GTO	2개/2Magnets IGBT
Gap Sensor/가속도 센서	따로따로 설치	Gap S. 와 가속도센서 한몸체 구성
Bogie 구조	Maintenance 불편	Maintenance 편리하도록 개조
Magnet 배치	Stagger 배치	Stagger 없음
부상상태 Monitoring	Monitoring 불편	Gap, 가속도, magnet전류 등 Monitoring 용이

2.1 Module 레일추종성능

그림 2는 직선궤도상에서 주행중 2호 차량의 좌측 코너의 대표적인 부상 gap 파형이다. 40Km/h의 주행속도에서 gap peak to peak은 4mm 이내이다. 2호차량은 1호차량에 비하여 부

상제어기, VVVF inverter, DC/DC converter, chopper 등의 전장품의 신뢰도면에서 상당부분 향상되었으며 결과로서 1호 차량에 비하여 상대적으로 훨씬 안정된 부상상태를 유지하고 있다. 특히 2호 차량에서는 정지부상 또는 주행시 레일의 잔진동을 거의 유발하지 않는다. 이는 부상제어기 hardware의 신뢰성을 높인 것 외에 제어 알고리즘의 phase 특성을 개선한 것이 크게 기여하고 있다.

2.2 소음 및 누설자속측정결과

정지부상시 소음 level 은 62dB, 4notch로 최대 가속중 차내 소음은 70dB로 지하철이나 전동차에 비해서는 상대적으로 소음 level이 훨씬 낮다. 지하철의 소음 level은 90dB 이상이다. 현재의 UTM-01은 시험차량으로 부상제어기, chopper, VVVF, DC/DC converter 등 전장품이 주 소음원이다. 특히 가/감속시 발생하는 큰 소음은 inverter

switching에 의하여 발생하는 VVVF inverter 내, reaction plate, LIM coil, 또는 module의 진동에 의한 것이다. 조사결과 reaction plate 진동에 의한 소음 level은 2 - 3dB(A) 정도이며 가/감속시 발생하는 대부분의 소음은 module 또는 LIM coil의 진동에 의한 것임이 밝혀졌다. inverter switching 주파수를 380hz에서 500 hz로 높힌 결과 소음 level이 현저히 감소하였다. 결과는 그림 3, 4에 보이고 있다. 그림 3에서 inverter Switching 주파수가 380hz 인 경우에는 정지부상시 소음 level이 67dB, 3N 가속시에는 82dB 정도였으나, inverter switching 주파수를 500hz로 변경한 경우에는 정지부상시 62dB, 3N 가속시 68dB 정도로 switching 주파수가 380hz 일 때 보다 무려 14dB나 소음 level을 낮출 수 있었다(그림 4 참조).

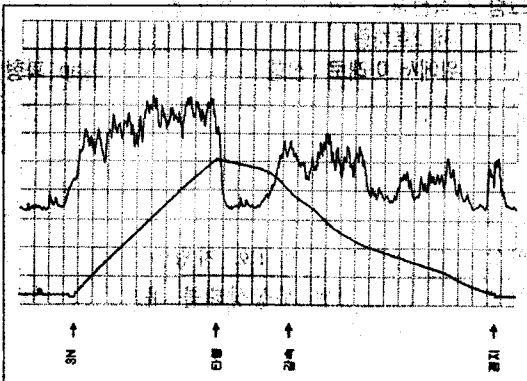


그림 3. 정지부상상태에서 3N 가속시 차내 소음 level. 2호차량. inverter switching 주파수 = 380hz. 위파형 : 소음 level, 종축범위 : 50dB - 100dB, 그림아래파형 : 주행속도, 종축범위 : 0 - 50km/h

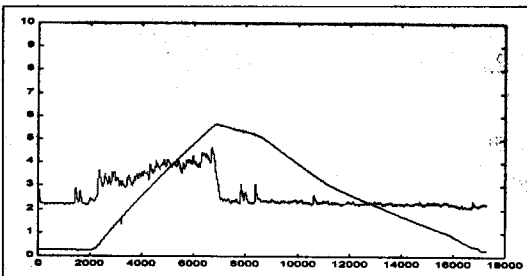


그림 4. 정지부상에서 3N 가속시 차내 소음 Level. 2호차량. inverter switching 주파수 = 500hz. 위파형 : 소음 level, 종축범위 : 50dB - 100dB, 그림아래파형 : 주행속도, 종축범위 : 0 - 50km/h

그림 5 및 표 4는 정지부상시 및 가속시 차내의 누설자속의 측정 데이터이다. 그림 5은 측정 위치를 표시한다. 표 3에서 차내에서는 reactor 위와 module 바로 옆에서 자장이 가장 크며 30 gauss 정도이다. 이외의 곳은 3gauss 미만이다. 정지부상시와 가속시, 착지시와 부상시, reactor 근처이외에는 자장이 크게 변화하지 않는다. reactor 위는 특별한 차폐가 필요하나 기타의 곳은 지자계 정도로 염려할 필요가 없음을 알 수 있다. 참고로 일반 NHK 2000 형 일반철도차량의 누설자속은 차내바닥에서는 6gauss 정도이며 기타의 곳은 0.2gauss 정도이다.

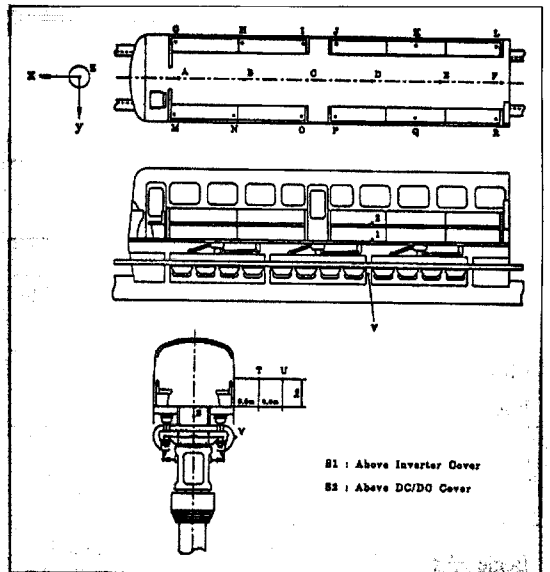


그림 5. 누설자속 측정위치

2.3 주행중 차량과 고가궤도와의 상호운동

주행중 차량과 고가궤도와의 상호운동을 예측하기 위하여 bogie 와 차량으로 구성된 가장 기본적인 2 자유도 모델을 이용하여 수직방향에 한하여 해석하였다. 궤도와 차량계의 모델은 그림 6에 보이는 바와 같다. 그림 6에서 홉인형차기부상차량의 수직방향운동방정식은 아래와 같이 나타내진다.

표 4. 자기부상열차 누설자속 측정 데이터

장소	착지시				정지부상시				가속시				비 고
	Bx	By	Bz	B	Bx	By	Bz	B	Bx	By	Bz	B	
A1					0.018	0.021	-2.02	2.01	0.94	0.21	2.87	2.97	
B1					0.55	-0.18	-1.95	2.04	0.32	0.25	2.6	2.63	
C1					0.33	-0.16	-1.21	1.26	21.3	0.27	20.1	30.3	Reactor 위
D1					0.4	-0.5	-1.59	1.71	0.39	0.49	1.86	1.92	
E1					0.53	-0.75	-2.16	2.32	0.43	0.81	2.87	2.97	
F1					0.23	-0.28	-0.75	0.84	0.23	0.33	0.71	0.78	
A2	0.569	-0.22	0.52	0.8	0.3	-0.07	-0.05	0.88					
B2	0.4	-0.29	0.65	0.81	0.7	-0.18	-0.7	1.0					
C2	0.33	-0.33	0.77	0.9	0.24	-0.14	-0.63	0.7					
D2	0.25	-0.31	0.53	0.66	0.34	-0.24	-0.95	1.03					
E2	0.27	-0.24	0.46	0.59	0.27	-0.31	-1.0	1.1					
F2	0.18	-0.3	0.32	0.476	0.25	-0.23	-0.4	0.53					
G2	0.11	-0.41	0.44	0.66	0.23	0.77	0.38	0.89					
H2	-0.1	-0.67	0.51	0.84	0.1	0.95	0.43	1.1					
I2	-0.1	-0.68	0.12	0.7	0.01	0.56	0.12	0.56					
J2	-0.16	-0.64	0.27	0.71	-0.16	0.76	0.19	0.80					
K2	-0.1	-0.57	0.31	0.65	-0.19	0.67	0.13	0.72	0.0		0.0		
L2	-0.21	-0.42	0.14	0.49	-0.4	0.17	-0.1	0.43			0.0		
M2	0.52	0.14	0.38	0.66	0.58	-0.94	0.19	1.12			0.0		
N2	0.26	0.25	0.47	0.59	0.39	-1.1	-0.1	1.15			0.0		
O2	-0.41	0.29	1.03	1.15	-0.8	-0.82	0.48	1.25			0.0		
P2	0.13	0.36	0.3	0.49	0.21	-1.2	0.34	1.26					
Q2	0.19	0.37	0.17	0.45	0.04	-0.97	0.21	1.0					
R2	0.12	0.3	0.13	0.35	-0.19	-0.19	-0.02	0.27					
S2					-1.2	-0.19	-0.02	0.27					
S1					0.73	-0.23	-2.12	2.24					
T					0.45	-0.73	1.6	1.81					
U					0.27	-0.16	0.92	0.98					
V					0.02	27.08	10.45	29.26					

Notes : S1 : Above Inverter Cover
 S2 : Above DC/DC Converter
 V : Between Modules

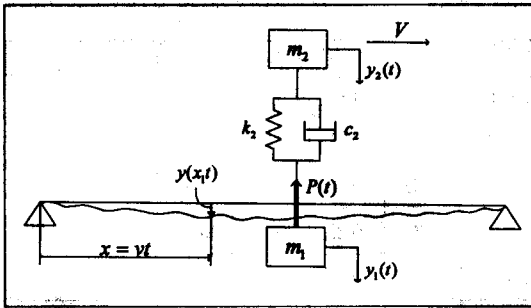


그림 6. 차량 - 궤도계의 개략도

$$\begin{aligned}
 & m_1 \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} + P(t) \\
 & = k_2(y_2(t) - y_1(t)) + c_2 \left(\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dy_1(t)}{dt} \right) \\
 & m_2 \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} \\
 & = -k_2(y_2(t) - y_1(t)) - c_2 \left(\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dy_1(t)}{dt} \right)
 \end{aligned}$$

전자석의 흡인력은 공극 및 대차의 상하진동 가속도를 입력으로 하여 제어되는 바, 복원력과

점성력이 얻어진다.^[4, 5] 대차에 가해지는 흡인력은 각 전자석에 가해지는 흡인력의 합으로 주어진다고 생각할 수 있으며 각 전자석에서의 공극으로부터 결정된다고 가정할 때 흡인력은 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(t) + \gamma \frac{dP(t)}{dt} &= \alpha_1 c(t) + \beta_1 \frac{dc(t)}{dt} \\
 &+ \delta_1 y_1(t) + \delta_2 \frac{dy_1(t)}{dt} \\
 &+ \delta_3 \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2}
 \end{aligned}$$

여기서 $P(t)$: 전자석 흡인력, $c(t)$: 전자석과 레일사이의 gap, $\alpha_1, \beta_1, \gamma, \delta_1, \delta_2$ 은 각각 제어 gain 과 전자석의 저항 R, inductance L의 함수로 주어지는 자기기상수이다.

고가궤도는 Euler 방정식으로 하기와 같이 주어진다.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho a \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c_b \frac{\partial y}{\partial t}$$

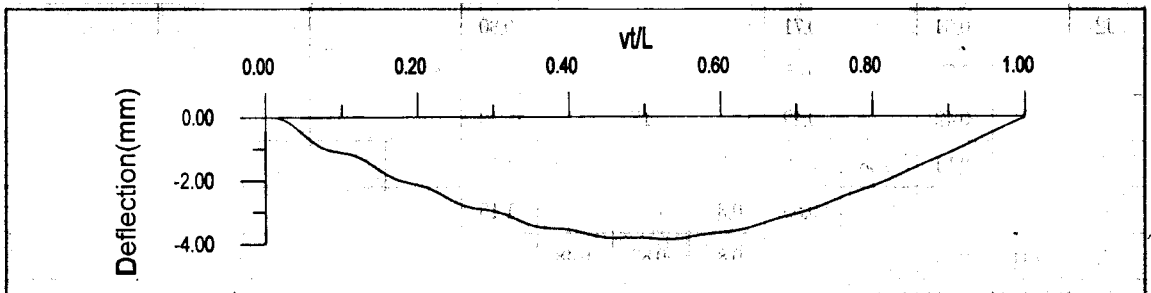


그림 7. 차량이 주행함에 의한 beam의 처짐. $v=50\text{km/h}$

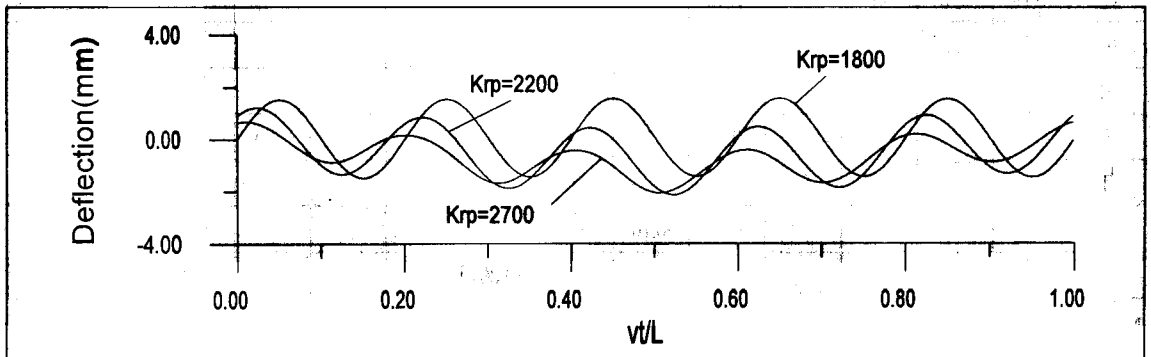


그림 8. 차량이 고가궤도를 주행할 때의 상대 gap 파형. $v=50\text{km/h}$ Krp(상대 gap gain 값)의 값을 parameter로 하였음.

$$= \left\{ \sum_{i=1}^2 m_i g + P(t) \right\} \delta(x-vt)$$

주행속도 50km/h에서 beam의 처짐과 상대 gap을 계산하였다. 계산결과는 그림 7, 8에 보이고 있다. 계산에 사용된 데이터는 하기와 같다.

$$m_1 = 9000kg, \quad m_2 = 13000kg, \quad L = 25m,$$

$$C_2 = 45738N/m/s, \quad K_2 = 444000N/m$$

$$R = 1.2 \text{ ohm}, \quad L = 0.04 \text{ Henry},$$

$$K_i = 20400N/A, \quad K_2 = 30811200N/m$$

전자석제어에 사용되는 자기지지상수들의 값은,

$$\beta_1 = 0, \quad \delta_1 = 500, \quad \delta_2 = 25, \quad \delta_3 = 1.3, \quad v = L/R$$

계산은 레일이 $y_o(x) = dsin(2\pi x/L_o)$, $d = 1.5mm$, $L_o = 5m$ 의 irregularity를 경우에 대하여 수행하였다. 차량이 주행중 차량과 궤도로 이루어진 계의 안정성에 상대속도 gain이 큰 영향을 미친다. 위에 열거된 gain의 조합에서는 상대속도 gain이 0이어야만 계가 안정하였다. 그림 8에서 상대 gap gain의 값이 증가할수록 - 전자석과 레일사이의 stiffness가 크면 클수록 - gap 파형진폭이 작아짐을 알 수 있다.

3. 결론

98년 8월로 도시형자기부상열차개발 2단계 사업이 종료되었다. 2단계 사업의 결과로 2량 1편

성 자기부상열차를 개발하였으며 1km 시험선로에서의 주행시험을 통하여 50Km/h 이내의 주행속도에서 비교적 안정적인 부상/추진 성능을 확인하였다. 그러나 2단계 사업이 종료된 현재에도 절대적으로 신뢰성이 보장되는 부상/추진이 확보된 상태는 아니며, 승객을 수송하는 대중교통 수단으로서 부상신뢰성이 99.99% 보장되는 자기부상열차를 개발하기에는 시간이 좀 더 필요하다. 이웃나라 일본은 1974년 이후 25년간 지속적으로 UTM-01과 유사한 시스템인 HSST 모델을 개발해오고 있다. 98년 4월 일본에서 개최된 Maglev Conference에 참석하여 HSST-100L을 시승하였는 바, UTM-01에 비하여 시스템 전반에 걸쳐 우수해 보였다. 자기부상시스템은 차량, 궤도, 전원공급설비, 부상안내제어기, VVVF Inverter, Chopper 등의 각종 Power Electronics, 신호통신 및 TCMS(Train Control and Monitoring) 등 Sub System의 결합체이며 각각 Sub - System들의 최적설계가 이루어 질 때 우수한 자기부상시스템이 개발될 수 있을 것이다.

3 단계사업과 실용화노선

국책연구사업의 실용화 촉진을 위하여 정부부처에서(과기부/전교부/인천신공항사업단/국무조정실) 인천 연종도 신공항내에 본 그룹/현대정공에서 개발한 자기부상열차시스템을 설치할 것

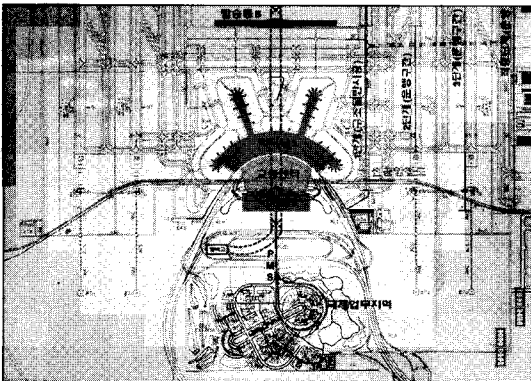


그림 9. 인천신공항 평면도

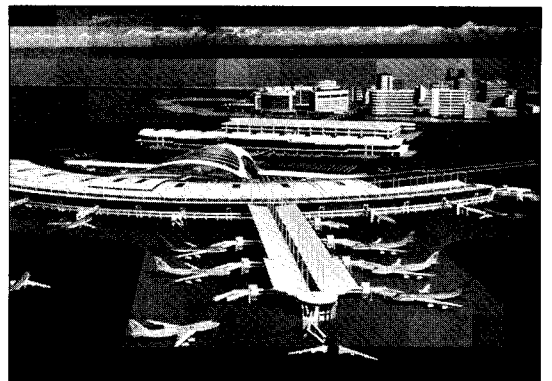


그림 10. 인천신공항 평면도

이 적극적으로 검토되고 있다. 국책시범노선은 청사 및 4개 탑승동을 연결하는 왕복노선(6.4 Km)인 IAT(Intra Airport Transit), 청사와 국제업무지역을 연결하는 왕복노선(2.7Km) PMS (People Mover System) 이다. 현재까지의 조정안은 2005 년에 개통예정인 PMS 선을 우선적으로 설치할 것이 검토되고 있다. PMS 시범노선 설치가 적극 검토됨에 따라 자기부상열차 3단계 개발사업은 무인자동운전, 신호통신, 전장품 신뢰성향상 등 실제 운행에 수반되는 시스템 interface 관련 기술개발이 본 그룹/현대정공(주)에 의하여 증점적으로 수행될 예정이다. 현재 추진중인 인천국제공항의 PMS 노선(그림 9)은 신공항의 교통센터와 국제업무지역(그림 10)을 연결하는 약 2km의 shuttle 노선으로서 국제적으로 우리의 기술을 선보이는 계기가 될 것이다. 현재의 사업계획은 표 4와 같다.

노선으로서 국제적으로 우리의 기술을 선보이는 계기가 될 것이다. 현재의 사업계획은 표 4와 같다.

표 5. PMS 노선 사업일정계획 (안)

토목공사	: 2000. 12
건축 및 궤도공사	: 2001. 6.
차량제작	: 2001. 1 - 2001. 12.
시운전	: 2002.1 - 2002. 6
시범운행/교육	: 2002. 6. - 2003. 12
신공항측에 시스템인도	: 2004. 1

참 고 문 헌

- [1] 조홍제 외, “상전도자기부상식 도시형자기 부상열차의 주행성능시험 및 평가 (I)”, 기계연구원논문집, 1996. 12.
- [2] 조홍제 외, “상전도자기부상식 도시형자기 부상열차의 주행성능시험 및 평가 (II)”, 기계연구원논문집, 1997. 12.
- [3] 조홍제 외, “상전도자기부상식 도시형자기 부상열차의 주행성능시험 및 평가(III)”, 기계연구원논문집, 1998. 12.
- [4] 山村 외 2명, 일본전기학회지, 94B-5(소화 39-5)
- [5] 山村 외 2명, 일본시스템제어연구회지, SC-75-1, (소화 49-10)