

도시형 자기부상열차 UTM-01 요소기술 개선 및 최적화 연구

조흥제, 김봉섭 | 한국기계연구원

1. 서론

본 자기부상열차개발팀은 심각한 대도시 교통문제를 미래지향적/환경친화적인 새로운 궤도교통수단의 개발, 실용화를 통하여 해결하고자 1990년 이래로 중저속용 도시형자기부상열차를 개발해오고 있으며, 과학기술부 국책연구개발의 결과로서 기업(구현대정공) 과 공동으로 2 량 1 편성 자기부상열차 (UTM-01)을 1998년에 성공적으로 개발하였다. 그러나, 개발된 자기부상열차는 실용화 전단계모델로서 기본적인 성능구현에는 문제가 없으나 대중을 실어 나르는 대중교통수단 역할을 하기에는 시스템의 신뢰성이 전반적으로 부족하고 자기부상시스템을 구성하는 각 Sub. System 기술의 최적화가 이루어지지 못한 상태이다. 실용화 수준의 자기부상열차를 100 % 라 할 때 기 개발된 자기부상열차 UTM-01의 기술적 완성도는 80 % 정도로 추정된다. 자기부상열차는 선로 위를 떠서 일정한 간격을 유지하며 주행하는 특성상, 실내외 소음이 현저히 낮으며, 짧은 곡선 및 급구배 운행이 가능하므로 지극히 환경친화적이다. 그러므로 자기부상열차는 특히 소음, 진동을 최소한으로 억제해야 할 필요성이 있으며 지상 (고가궤도위)에서 운행되어야 하는 곳에 적합한 시스템으로 현대 다양한 교통수요의 일부분을 담당할 수 있다. 자기부상열차는 곡률반경 40m 이내의 짧은 곡선운행이 가능하고 7 % 이상의 언덕등판 능력이 있어 노선기획에 자유로움이 있다. 비접촉식 이므로 차내외 소음 Level을 현저히 낮출 수 있으며 차량의 지지, 추진을 위한 기계적인 구동 부품이 없어 차량 유지보수비용이 상대적으로 적게 든다. 또한 차체가 레일을 감싸고 있는 형태이므로 탈선의 염려가 없다. 본 기고에서는 기 개발된 UTM-01 의 현황과 실용화를 위해 기술적으로 해결되어야 하는 문제점 및 해결방안에 대하여 기술한다.

2. 도시형 자기부상열차 UTM-01

개발 경과

- 1986년 : 2000년대를 향한 과학기술발전 장기계획 수립
 - 과학기술부에서 수립
 - 육상교통분야에 자기부상열차개발 사업반영

- 1988년 : 기계연구원 중장기 발전계획
 - 자기부상열차 개발계획 반영
 - 1989년 1월 : 기계연구원의 21세기 교통수단 현대화방안 (자체자료)
 - 자기부상열차 개발계획 입안
 - 1989년 4월 : 국책연구개발사업 신설작업 (과학기술부)
 - 1989년 8월 : 10 대 국책연구사업결정 (과학기술부)
 - “21세기 교통기술개발사업” : 10 대 분야에 편성
 - * 중점추진과제
 1. 자기부상열차개발사업 : 1989년중 시행
 2. 쌍동형 초고속선 개발사업 : 추후시행
 3. 도시형헬리콥터 개발사업 : 추후시행
 - 1989년 12월 : 자기부상열차 개발사업 착수
 - 총괄주관기관 : 한국기계연구원
 - 참 여 기 관 : 한국전기연구원
- 과학기술부 국책연구개발사업 “도시형 자기부상열차 개발사업”
- 1989 ~ 1999 , 총 10 년, 149 억원
 - 1단계는 한국기계연구원 독자개발, 2단계, 3단계는 현대정공이 공동참여
 - 1997년 : UTM-01 (Urban Transit Maglev) 제 1 차량
 - 1998년 : UTM-01 (Urban Transit Maglev) 제 2 차량
 - 1999년 : 인천국제공항 주청사와 국제업무지역을 연결하는 1.8 km PMS (People Mover System) 노선 설치 검토
- 도시형 자기부상열차 시험선로 건설 (한국기계연구원 내)
- 1996년 1단계 1.1 km 건설완료 (73억원)

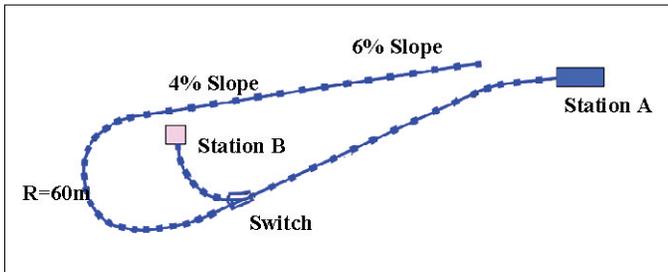


그림 1. 한국기계연구원 자기부상열차 시험선로 평면도.
 최소곡선반경 : 60 m, 최대구배 : 6 % , 분기기구동방식 : 평행이동식

- 2002년 2단계 0.2 km 증설완료 (28 억원) : 70 km/h 까지 주행가능

□ 출연연 소관부처 이전 (과기부 --> 총리실)

- 2000년 1 월부터 산업기술연구회 지원 연구원 기본연구사업으로 전환
- UTM-01 주행성능시험, 요소기술 개선 및 최적화 연구

□ 산업자원부 지원 실용화모델 개발사업

- 2003.10 ~ 2008년 9월 , 총 5 년, 1, 2 단계
- 총괄주관기관 : 주식회사 로템, 세부주관1 : 로템 (차량개발), 세부주관 2 : 한국기계연구원 (시험평가)
- 자기부상열차 실용화모델 개발, 국내적용 및 수출산업화를 목표.

□ UTM-01 실용화사업추진

대전 엑스포 <=> 국립중앙과학관 실용화사업



그림 2. 대전 엑스포 <--> 국립중앙과학관 1 km 실용화사업노선 평면도

- 1993년 대전엑스포 관람용으로 개발된 엑스포과학공원 내 560m 구간을 국립 중앙과학관까지 총 1 km 로 추가연장 운행 예정
- 과학기술진흥기금 98억원, 2006년 4월 착공, 2007년 10월 운행예정
- 차량 및 시스템은 산업자원부 중기거점사업에서 개발된 시스템을 사용한다.

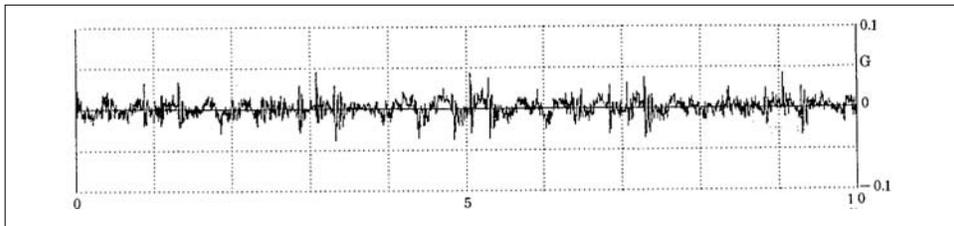
자기부상열차 실용화사업

- 기 개발된 자기부상열차 실용화모델 (UTM-01) 의 시범 사업화로 자기부상열차 실용화를 앞당긴다.
- 사업기간 : 2006년 6월 ~ 2012년 6월 (6 년)
- 추정사업비 : 4500 억원

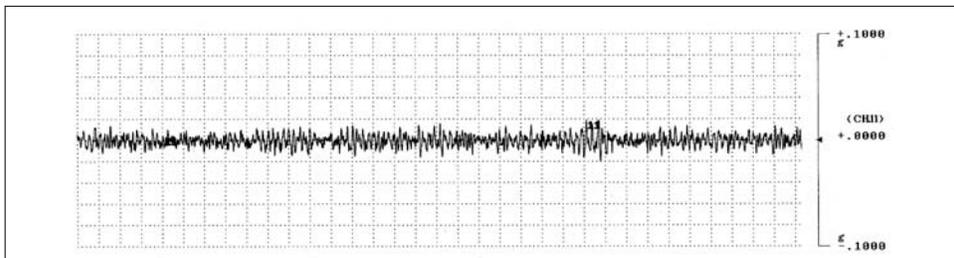
- 2005.12 - 2006.8 : Detailed Feasibility Study
- 사업주도 : 건설교통부
- 사업협조 : 산업자원부 / 과학기술부



그림 3. 기계연구원 시험선로에서 주행성능시험중인 UTM-01



UTM-01



HSST

그림 4. 대표적인 차체상하방향 진동가속도^[2]

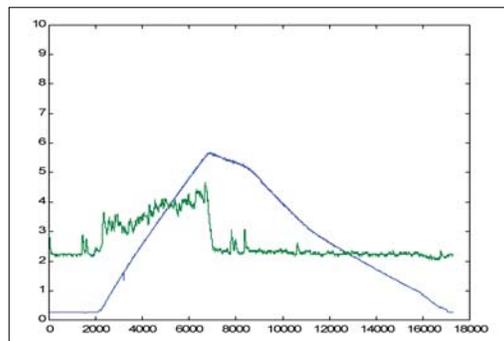


그림 5. 주행중 차내소음 Level. 종축 50dBA-100dBA 주행속도 : 0 - 50 km/h

그림 3에 2단계 과기부 국책연구사업의 결과로 1998년 구 현대정공(주)와 공동으로 개발한 UTM-01 (Urban Transit Maglev-01)을 보이고 있다. 그림 4는 주행중 대표적인 가속도 파형을 보이고 있다. 부상 Gap 은 40 Km/h 의 주행속도에서 최대 ± 2.5 mm 의 변동폭 범위내에 있다. UTM-01 은 1998 년 9 월이후 현재까지 약 30,000 km 운행되었다. 그림 5 ¹⁾는 주행중 차내 소음 Level 파형을 보여주고 있다. 정지상태에서 출발하여 3 Notch 로 가속시 차내 소음 Level은 최대 70 dB(A)를 보이고 있다.

3. UTM-01의 문제점 및 성능개선 방안

1998년에 과기부 국책연구사업에 의하여 개발된 자기부상열차 UTM-01 은 실용화전단계모델로서 기본적인 성능구현에는 문제가 없으나 대중을 실어 나르는 대중교통수단 역할을 하기에는 시스템의 신뢰성이 전반적으로 부족하고 자기부상시스템을 구성하는 각 Sub. System 기술의 최적화가 이루어지지 못한 상태이다. 주행성능시험결과 드러난 문제점 및 이들의 해결방안은 표 1에 보이고 있다.

부상/안내 제어기

선로위를 일정한 Gap으로 떠서 주행하는 특성상 자기부상열차 실용화는 부상/안내제어기의 신뢰성 확보 여부에 달려 있다고 해도 과언이 아니다. 자기부상 제어는 근본적으로 Unstable 한 시스템이므로 절대적인 신뢰성 확보는 - 어떠한 경우에도 항상 일정한 Gap을 유지하는 일은 - 있을 수 없다. 커다란 외란이 순간적으로 작용할 때, 예를 들면 7% 하향구배에서 70 Km/h 주행중 급 비상브레이크를 잡을 경우 차전체에 큰 Pitching 이 작용한다, 는 순간적으로 큰 Gap 변동폭으로 인하여 Module이 레일에 닿는 경우는 있을 수 있다. 단 레일을 친 후 제어가 발산하지 않고 곧 정상 Gap을 유지하면 되는 것이다.

- 큰 외란에도 불구하고 허용 Gap 변동폭 범위내 (± 6 mm) 내에서 전구간 Stability가 보장되는 강인제어 구현 및 안정성을 확보하는 방법으로는,

- (1) 상태관측기의 감쇄상수와 자연주파수 범위 조정
- (2) Feedback 제어기형태를 개선하여 강인*안정성 영역을 증대
- (3) Feedback gain을 조정하여 안정영역의 이득과 범위를 확대
- (4) 비선형모델 사용을 적극 검토한다.

- 제어에 사용되는 Gap/가속도 Sensor, Magnet Driver 의 일부가 고장이 나도 부상상태를 유지토록 하는 고장에 견디는 제어 (Fault Tolerant Control) 도입
- 레일단차 통과시 Dual Gap 신호처리 개선
- 부상계를 구성하는 기기들(제어기, magnet driver, dc/dc converter) 의 핵심 Component 2중화
- 승차감 향상을 위하여 Flexible 한 고가 궤도와 차량 Dynamics를 제어에 input.

표 1. UTM-01의 문제점 및 해결방안

개선 및 최적화 대상	문 제 점	해결 방안
부상/안내제어기	<ul style="list-style-type: none"> - Robustness가 부족하다 - 레일단차에서 Gap 변동폭이 크다 - 소음유발 	<ul style="list-style-type: none"> - 현재의 제어알고리즘을 개선 Robustness 높인다. - Duel Gap Sensor 신호처리를 개선하여 레일 단차 통과시 gap 변동이 최소화 하도록 한다. - 자연냉각식 설계. 소음 제거 - Fault Tolerant control 사용하여 센서고장시에도 정상 작동하도록 한다.
대차	<ul style="list-style-type: none"> - 너무 무겁다(9 ton/차량) - 유지보수가 어렵다. - 곡선에서 문제 발생시 회황이 안된다. - 대차길이, 높이를 줄여 주행성능이 요구된다. 	<ul style="list-style-type: none"> - 경량화 설계 (6 ton/차량) - 유지보수가 용이하도록 simple화 - 비상착지 roller 개선설계하여 곡선에서 부상이 실패해도 회황할 수 있도록 한다. - 길이, 높이를 줄여 곡선/구배 주행성능 향상 - 곡선주행이 용이하도록 sliding table/linear bearing 설치
VWF Inverter	<ul style="list-style-type: none"> - 경량화 요구됨(현재 1 ton) - 가/감속시 시끄럽다. - 신뢰성 제고의 필요성 	<ul style="list-style-type: none"> - Switching 주파수 최적화 설계. 저소음화 2000Hz 이상 - 경량화 설계 (목표 : 600Kg) - 자연냉각식 cooling - 고신뢰화
DC/DC converter	<ul style="list-style-type: none"> - 무겁다 (현재 1 ton) - Switching에 따른 소음이 너무 크다. - 신뢰성 제고의 필요성 	<ul style="list-style-type: none"> - 새로운 개념에 의한 경량화 설계하여 700kg 정도로 경량화 한다. - 변압기 및 AC Reactor 재설계에 의하여 소음 저감. - 자연냉각식 cooling
고속 분기기	<ul style="list-style-type: none"> - 현재의 분기기는 작동시간이 1분 30초로 고속 분기기 개발이 필요하다. 	<ul style="list-style-type: none"> - 20초 이내의 분기시간을 갖는 굴절식 분기기 재설계가 요구됨. - 주행중인 차량과 연계. Feedback 제어개념 도입이 요구됨.
Magnet Driver	<ul style="list-style-type: none"> - 차량당 소요 개수를 줄일 필요가 있다. (현재 12개/차량) 	<ul style="list-style-type: none"> - 재설계를 통하여 (6개/차량) compact화, 경량화, 제작비 감소 - 자연냉각방식 선택
속도/위치 검지장치	<ul style="list-style-type: none"> - 현재는 속도검지를 위하여 Encoder 방식을 사용하고 있음. 비접촉식 속도/위치 검지장치를 개발해야 함. 	<ul style="list-style-type: none"> - 비접촉식 속도위치 검지장치 개발
차체	<ul style="list-style-type: none"> - 경전철로서 너무 무겁다. (현재 14 ton/차량) - 무게중심이 너무 높다. - 비상탈출구가 없다. - 미관상 안 좋다. 	<ul style="list-style-type: none"> - 알루미늄 압출재 사용. 경량화 설계 - 무게중심을 200mm 정도 낮춘다. - 미관상 좋게 한다.

선형유도전동기 (Linear Induction Motor)

자기부상열차는 일반 바퀴식 열차에 비하여 가감속 성능이 우수하고 7 % 이상의 언덕을 운행할 수 있다. 이는 회전모타 대신에 선형유도모타 (LIM)를 사용하기 때문이다. 선형유도전동기는 이러한 장점이 있는 반면 이에 상응하는 단점이 있는데 이는 차상에 설치된 모타 바닥면과 2차측 Reaction plate 상면간의 Gap 이 커서 - 13mm 이상 - 회전형 모타에 비하여 모타의 효율이 현저하게 낮은 것이다. 자기부상열차하면 사람들은 20 ~ 30 톤의 차량을 부상하는데 소비전력의 대부분이 필요하다고 생각하나 실제로는 차량이 소비하는 전력 중 부상에 소요되는 전력은 30 % 정도이며, 추진에 60 % 정도의 전력을 소모한다. 나머지 10 % 는 차내의 보조기기 (조명, 냉난방, 공기압축기 등) 구동에 소비된다. 회전형모타의 간극은 1 mm 이내이며 효율은 98 % 이상인 반면, 선형유도전동기의 효율은 50 % 가 되지 않는다. 현재로서는 이 문제를 해결할 획기적인 방안은 없다. 한가지 idea 는 착지상태로부터 차량이 부상되어 부상상태를 유지하는 동안에 모종의 유압장치를 사용하여 대차에 설치된 LIM 의 설치높이를 6~7 mm 낮추는 것이다. 이렇게 할 경우 부상상태에서 LIM 공극이 13 mm 보다 6 ~ 7 mm 작은 6 ~ 7 mm 가 되어 추력이 큰 폭으로 증가할 것이다. 부상상태에서 다시 착지할 때에는 LIM 설치높이를 낮춘 것 만큼 다시 높은 후에 착지한다. 이렇게 하기 위해서는 부상 제어기의 신뢰도를 절대적인 정도로 높여야 할 것이다. 또한 비상착지할 경우에도 신속히 감지하여 LIM 설치높이를 순간적으로 낮추는 방안이 강구되어야 할 것이다.

대차

자기부상열차 대차는 차량의 지지, 추진, 제동 역할을 최종적으로 수행하는 기계적인 구조물이다. 자기부상열차 대차는 부상/추진/제동 기본적인 역할을 효율적으로 수행할 수 있어야 하며 유지보수가 용이할 것, 경량화 될 것, 대차높이가 가능한 한 낮을 것, 짧은 곡선운행이 용이하도록 설계될 것 등이 요구된다. 전술한 바, 자기부상 시스템의 성공여부는 부상제어의 신뢰성 확보에 달려있다. 부상제어기의 신뢰성 확보를 위해서는 부상계를 형성하는 부상제어기, 센서, 전원공급장치 등 각각의 hardware/software 적 신뢰성 확보가 중요하나, 부상이 실질적으로 이루어 지는 기계적인 구조물-대차 - 이 부상계를 도와 주어야 한다. 대차는 전자석 8 set, LIM 2 개, 기계 브레이크장치, 좌우 공기스프링, Traction Rod, 탬퍼로 구성된다. 이중 자주 교체가 요구되는 부품은 전자석 및 기계 브레이크 장치의 브레이크 shoe 이다. 그림 6은 전자석 및 기계브레이크 shoe 의 교체가 쉽도록 설계된 경량 자기부상열차 대차를 보이고 있다.

표 2 에서 기존 UTM-01 대차, 그림 6에 보이는 Pole 일체식 대차, 그리고 일본 LINIMO 차량 대차의 크기와 무게를 비교하였다.

표 2에서 Linimo 대차의 지지하중/대차무게는 3.15 로서 UTM-01 의 1.4 배이며, Pole 일체식 대차에 비해서는 2.2 배이다. 일본 Linimo 시스템의 정격 부상공극은 8 mm 로 UTM-01 의 10 mm 에 비하여 2 mm 가 작다. 이를 감안하더라도 Linimo 대차의 무게가 1.3 톤 밖에 안된다는 것은 이해하기 어렵다. 무게 및 높이 외에 자기부상열차 대차 설계에서 중요한 점은 60 m 이하의 짧은 곡률반경을 갖는 곡선운행이 용이하도록 대차와



그림 6. 전자석, 브레이크 shoe 의 교체가 용이한 pole 일체식 대차

표 2. 자기부상열차 대차제원 비교

개선 및 최적화 대상	UTM-01 대차	Pole 일체식 대차	일본 Linimo 대차
대차길이(m)	3.5	3.0	2.5
대차높이(m) Reaction plate 상	0.365	0.31	0.25
무게 (톤)	3.2	2.5	1.3
대차당 지지하중 (톤)	7.3	3.5	4.1
지지하중/대차무게	2.28	1.4	3.15

2차 suspension 간의 연결장치를 설계해야 하는 것이다. UTM-01 의 경우 차량 1량을 3개의 대차가 지지하므로 짧은 곡선운행이 가능하기 위해서는 가운데 대차의 2차 suspension 인 공기스프링과 차체와의 연결부위에 Linear Bearing을 설치하여 차체와 대차와의 상대운동이 자유롭도록 해야 한다.

차량 경량화

현 UTM-01 공차무게는 23 톤으로 비슷한 승객수송 능력을 갖는 일본 Linimo 차량의 공차무게 17 톤에 비하여 대폭 경량화가 요구된다. 그림 7에서 UTM-01의 각 장치별 무게분담을 보이고 있다.

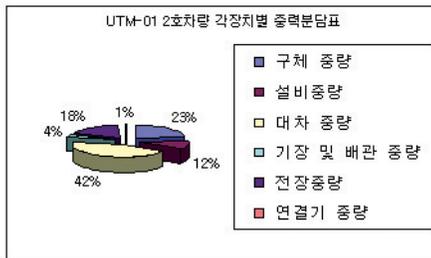


그림 7. UTM-01 의 각 장치별 무게분담표

그림 7에서 보면 차량을 경량화 하기 위해서는 대차, 주요 전장품 (dc/dc converter, vvvf inverter, magnet driver, 제어기), 구체, 설비의 중량을 함께 줄이도록 노력해야 함을 알 수 있다. 대차의 무게를 줄이는 방안은 전술한 바, 정격 gap을 8 mm 로 함으로써 큰 효과를 볼 수 있다. UTM-01 차체를 조사해 보면 차체구조물에서 상당부분 경량화 할 수 있음을 알 수 있다. 자기부상열차는 바퀴식 열차와 달리 다점지지 이므로 차체 뼈대의 많은 부분에서 불필요한 살을 뺄 수 있다. 주요 전장품 (특히 dc/dc converter, magnet driver , vvvf inverter) 을 경량화 하기 위해서는 전장품 무게를 매개변수로 한 전장품 최적설계가 요구된다.

주요전장품 (vvvf inverter, dc/dc converter, magnet driver) 소음 최소화

기계적인 구동부가 전혀 없는 자기부상열차 장점중의 하나는 주행중 외부환경 미치는 영향 (소음, 진동) 을 기존 바퀴식에 비하여 극소화 할 수 있다는 것이다. 현 자기부상열차의 실외 소음은 예상보다 큰데 주된 소음원은

전원공급장치 (vvvf inverter, dc/dc converter, magnet driver) 다. 파악된 소음의 종류로는 PWM switching 및 AC 전압조절 (Transformer 및 AC Reactor) 에 의한 Core 및 Coil의 진동소음과 Switching 소자 냉각을 위한 Fan 소음이다. 전장품 성능개선 목표중의 하나는 위에 언급된 전원공급장치 소음을 최소화하는 것이다.

< vvvf inverter >

vvvf inverter 소음은 PWM switching carrier 주파수를 상향 조정함에 의하여 해결하였다. 현재 운행중인 inverter 의 carrier 주파수는 500 Hz 인 바, 이는 귀에 민감한 범위 (1500 Hz 이하) 안에 있다. 새로 개발된 vvvf inverter 에서는 carrier 주파수를 2 KHz 이상으로 상향조정하여 소음레벨을 대폭 줄였다. 그림 8은 각각의 switching 주파수 (sf) 에서 측정된 소음 Level (spL)의 주파수 분석 결과를 보여주고 있다. 500 Hz switching 주파수에서는 67 dBA 였는 바, switching 주파수를 2 kHz 이상으로 상향함에 의하여 9 dbA 정도를 낮출 수 있을 을 알 수 있다. 또한 자연냉각식 설계에 의하여 Fan 소음은 없다.

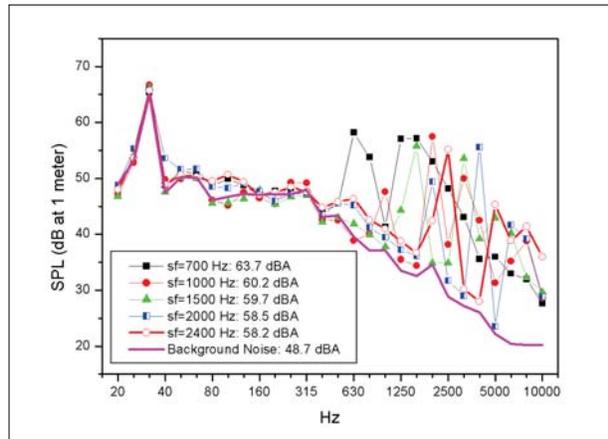


그림 8. Switching 주파수 변화에 따른 VVVF Inverter 소음 Level

< dc/dc converter >

dc/dc converter 의 경우 주소음원은 변압기와 AC Reactor 이며 carrier 주파수의 크기는 큰 영향이 없는 것으로 조사되었다. 변압기에서 발생하는 소음을 줄이기 위해서는 (i) core를 분말소결로 제작하거나 (ii) core 에서의 자속밀도 크기를 가능한한 작게 해야 한다. 현재 운행중인 dc/dc converter 변압기 core 에서의 자속밀도가 5000 gauss 인 바, 새로 제작된 변압기에서는 core 단면적을 크게 하여 자속밀도를 1900 gauss 가 되도록 하여 소음을 7~8 dbA 정도 낮출 수 있었다. core 단면적을 크게 함에 따라 dc/dc converter 전체의 부피와 무게가 증가함을 피할 수 없다. vvvf inverter 와 마찬가지로 자연냉각식으로 fan 은 없다.

< magnet driver >

현재 사용중인 magnet driver 는 자연냉각식으로 소음이 전혀 없으며 신뢰성에도 문제가 없다. 현재는 차량당

12개의 magnet driver (1 개 /corner)를 사용하고 있는데 차량 각종 기기취부를 위한 공간을 확보하기 위하여 2개의 magnet driver를 한데 묶어 한 magnet driver 가 한개의 module 전자석을 담당하도록 설계할 수도 있다.

궤도

자기부상열차는 차체가 레일을 감싸고 있는 구조로서 주로 고기궤도 위에서 운행된다.

2002년 6월에 기 설치된 1.1 km 시험선로를 200 m 연장하여 현재는 시험선로 총 길이가 1.3 km 로서 직선궤도에서 70 km/h 까지 시험이 가능하다 (200 m 연장 전에는 최고주행속도는 50 km/h 였음). 궤도는 main girder beam 과 부상/추진을 위한 상부 기계적인 구조 (guideway) 로 구성되며 직선에서는 단순 2 점지지, 곡선에서는 3점 지지가 보통이다.

현 궤도의 경우 거더의 고유진동수는 6 ~ 7 Hz 내에 있다. 상부 Guideway 의 고유진동수는 Impact Hammer 실험에 의하여 44, 55, 63, 77 Hz 임을 알 수 있다. 제어기의 1차 고유진동수는 13 Hz 근처에 있다. 부상은 Guideway 와 차량 전자석과의 상호 작용력에 의하여 이루어 지며 이 힘은 Guideway를 통하여 beam 에 전달된다. 제어기의 고유진동수가 guideway 고유진동수, beam 의 고유진동수와 격리되어 있으므로 Guideway가 beam 에 견고하게 설치되어 있는 한 주행중 선로의 진동은 염려하지 않아도 되며 beam 단면적을 작게 설계해도 제어에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 실제로 차량운행에 의한 200m 연장선로의 최대처짐은 10 mm 로서 (기존 선로는 5 mm) 기존 선로보다 훨씬 slender 하게 - 경제적으로 - 제작되었다. 현재 산자부 중기거점사업에서 개발된 실용화모델 (그림 9) 의 주행성능시험이 수행중인 바, 새로 설치된 200 m 시험선로위에서 정지부상시 Guideway 의 고주파 진동이 발생하고 있다. 고주파진동을 억제하기 위하여 제어기 주파수 응답의 cut off 주파수 이상의 주파수 범위에서 주파수응답의 기울기를 급하게 하여 고주파성분을 filtering 하면 고주파진동은 억제할 수 있으나 속도증가에 따른 부상상태가 불안해진다.



그림 9. 중기거점사업에서 개발된 자기부상열차 실용화모델

부상제어와 거더의 무게 및 강성간의 관계를 밝히기 위한 해석이 절실히 요구된다. 부상제어 알고리즘에 궤도 parameter를 어떻게 반영하여야 할 것인가. 자기부상열차제어 알고리즘에 레일을 고려한 예는 - 레일의 무게, stiffness, damping - 많지 않다. Nakagawa 교수가 레일을 단위 길이당 질량, stiffness, damping 으로 간주하여 제어알고리즘에 도입하여 해석한 예가 있으나^[3,4] 실험결과가 없으므로 해석의 타당성을 검증할 수 없으며 레일

진동과 관련된 변수들 - 레일의 무게, damping, 강성, 제어 파라미터 (예를 들면 여러 상태 feedback gain 들의 값) - 과의 상관관계는 시도하지 못하였다.

궤도분기기

자기부상시스템의 최대 단점중의 하나는 열차 분기를 위한 분기기가 복잡하고 건설비가 많이 든다는 것이다. 현재 기계연구원내에 설치되어 있는 분기기는 평행이동식으로 분기에 90 초가 걸린다. 실용화를 위해서는 20 초 이내에 정확하고 신속하게 작동되는 고속분기기 개발이 필수적이다. 본 자기부상열차개발팀에서는 실용화 시에 적용 가능한 굴절형 분기장치 개발의 사전연구개발로서 1/7 scale 모델의 굴절형 분기기를 개발하였다 (그림 10 참조). 본 scale 모델 분기기의 특징은 다음과 같다.

- 이동구간은 3개의 이동 거더 빔으로 구성하였으며 이동 시 각 거더 빔마다 3° 씩 굴절되고 거더 빔과 거더 빔 사이에 회전 각도를 1.5° 로 경감시킬 수 있는 각도 완화조절장치 도입하였다.
- 3개의 이동 거더 빔을 이동시킬 때 유압실린더를 적용하여 이동거리가 짧은 구간 2개에 대해서는 유압실린더를 직결하였고 이동거리가 긴 구간 1개에 대해서는 회전형 링크장치 적용하였다.
- 이동 시 이송대차는 이송레일 위에서 직선운동을 수행하고 이송대차의 상부에 선형운동베어링(LM Bearing)을 적용하여 회전에 대한 거더의 길이방향 변위를 감당토록 고안하였다.
- 이동 동작 완료시 이동단 및 고정단 끝단부에 이동단과 고정단의 궤도 높이를 일치시키기 위한 궤도 높이 조절장치 적용하였다.
- 이동시 이동 궤도와 고정 궤도 사이의 간섭방지를 위하여 고정단 끝단에 상부궤도 전후진장치, 이동단 끝단에는 Power Rail 절체장치를 설치하였다



그림 10. 1/7 scale 모델 굴절형 자기부상열차 분기기

Vehicle Dynamics

자기부상열차는 일정한 gap을 유지하며 떠서 운행되므로 철차륜식 시스템에서 레일과 철차륜 사이에 면접촉으

로 인한 복잡한 creep force 를 고려하지 않아도 되므로 vehicle dynamics 는 철차륜의 경우보다 간단하다고 할 수 있다. 그림 11은 주행중 차량과 고가궤도와의 상호운동을 예측하기 위하여 bogie 와 차량을 집중하중으로 단순화 하여 구성된 가장 기본적인 2 자유도 모델을 보이고 있다. 운동방정식은 아래와 같다.

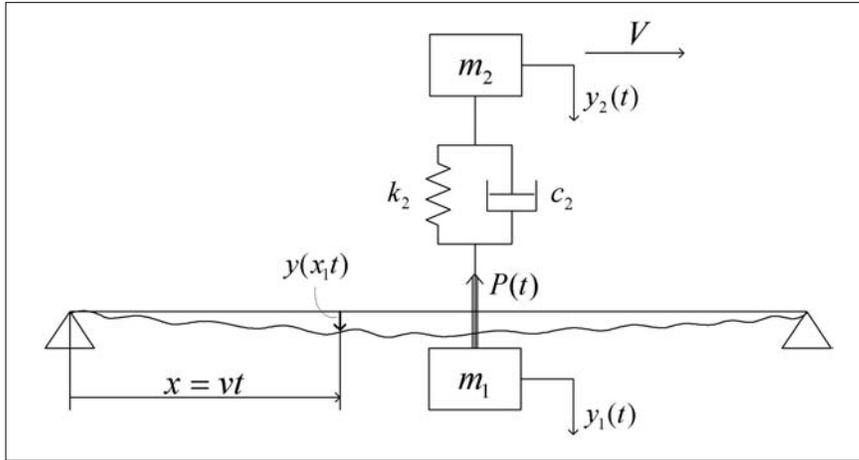


그림 11. 단순화된 2 자유도 자기부상열차/궤도 model

$$\begin{aligned}
 m_1 \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2} &= \kappa_2 (y_2(t) - y_1(t)) + c_2 \left(\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dy_1(t)}{dt} \right) - P(t) \\
 m_2 \frac{d^2 y_2(t)}{dt^2} &= -\kappa_2 (y_2(t) - y_1(t)) - c_2 \left(\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dy_1(t)}{dt} \right)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

전자석의 흡인력 P(t) 는 공극 및 대차의 상하진동기속도를 입력으로 하여 제어되는 바, 복원력과 점성력이 얻어진다. 대차에 가해지는 흡인력은 각 전자석에 가해지는 흡인력의 합으로 주어지며 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$P(t) + v \frac{dP(t)}{dt} = a_1 c(t) + \beta_1 \frac{dc(t)}{dt} + \delta_1 y_1(t) + \delta_2 \frac{dy_1(t)}{dt} + \delta_3 \frac{d^2 y_1(t)}{dt^2}
 \tag{2}$$

여기서 P(t) : 전자석 흡인력, c(t) : 전자석과 레일사이의 gap, $a_1, \beta_1, v, \delta_1, \delta_2, \delta_3$ 는 각각 제어 gain 과 전자석의 저항 R, inductance L 의 함수로 주어지는 상수이다.

고가궤도는 Euler 방정식으로 하기와 같이 주어진다.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho a \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c_b \frac{\partial y}{\partial t} = \left\{ \sum_{i=1}^2 m_i g + P(t) \right\} \delta(x - vt)
 \tag{3}$$

주행속도 50 km/h에서 beam 의 처짐과 레일과 전자석과의 상대 gap을 윗식에 의하여 계산하였다. 계산결과는 그림 12, 13 에 보이고 있다. 계산에 사용된 데이터는 하기와 같다.

$$m_1=9000kg, m_2=13000kg, L=25m, C_2=45738N/m/s, K_2=444000N/m$$

$$R=1.2ohm, L=0.04Henery, K_1=20400N/A, K_z=30811200N/m$$

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

그림 14는 50 km/h 로 주행중 차상에서의 Rms 진동가속도를 damping coefficient 의 함수로 계산한 것이다. 레일 Model은 FRA class 4 를 사용하였다. 그림 14에서 2 차 suspension damping coeff. 는 9000 N/(m/s) 근처 일 때 최상의 승차감을 주고 있음을 알 수 있다.

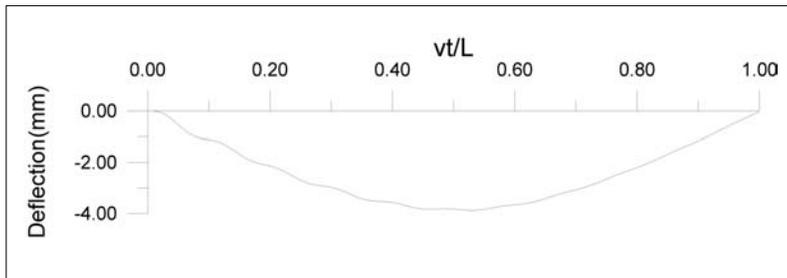


그림 12. 차량주행에 의한 Beam 의 처짐. v = 50 km/h

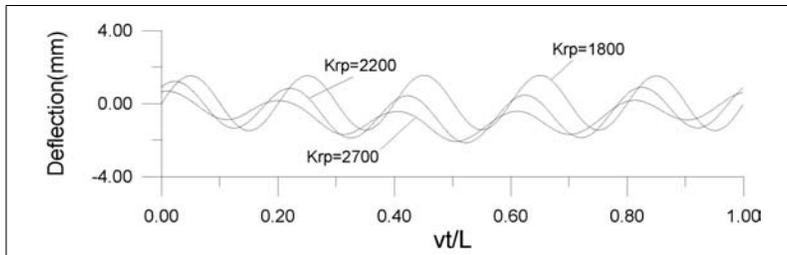


그림 13. 차량이 고가궤도를 주행할 때의 상대 gap 파형. v = 50 km/h
Krp = (상대 gap gain 값) 의 값을 parameter 로 하였음.

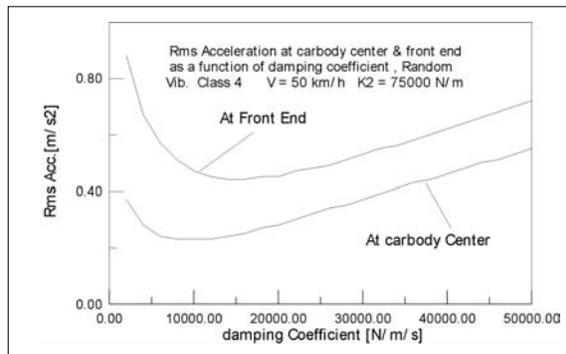


그림 14. 50 km/h 주행중 damping 계수의 변화에 따른 RMS 차상진동가속도.

4. 결 론

1989년 국책연구사업으로 시작된 국내 자기부상열차 개발사업은 우여곡절이 있었음에도 불구하고 정부의 지원하에 지속적으로 추진되어 왔다. 2000 년대에 들어서 중국 상하이에서 Transrapid 시스템이, 일본 나고야에서 HSST 시스템이 실용화 되었으며 이에 부응하여 국내에서도 실용화 시범사업을 위한 Feasibility Study 가 건교부 주관 하에 진행되고 있다. 금년 8 월에 자기부상열차 실용화 사업을 위한 Feasibility Study 결과가 긍정적으로 나올 경우 향후 6 년간 전액 국고지원에 의하여 자기부상열차 실용화노선 (노선길이 약 7 km, 복선)을 건설하여 자기부상열차를 실용화 한다는 것이 정부의 안이다.

자기부상열차가 실용화 되려면 무엇보다도 시스템이 안전하고 신뢰성이 있어야 할 것이다. 상전도 흡인식 자기부상열차는 운행 중에 증력에 반하여 떠있기 위하여 운행중 지속적인 적극제어 (Active Control) 가 필요하다. 그러므로 흡인식 자기부상열차의 경우 부상제어의 신뢰성이 절대적으로 필요하다. 중국 상하이에서 실용화가 진행중인 400 km/h 급 Transrapid 의 경우 부상제어 시스템이 최소한 2중 이상의 fail and safe mode 가 구비되었으리라 생각된다. 일단 부상제어의 신뢰성이 바퀴식 열차에 근접한다고 가정할 때 실용화를 위한 전제조건은 시스템 건설비, 다음으로 운영비가 될 것이다. 경제가 모든 것을 쥐고 있다. 실제 이용자 및 시스템 건설자의 입장에서 볼 때 자기부상열차의 차별성으로 강조되는 소음, 승차감은 우선순위에서 처지는 것이 현실일 것이다.

❁ 참고 문헌

- [1] 김인근 외, “도시형 자기부상열차 실용화에 대비한 성능시험.평가 기술개발”, 건설기술연구개발사업 최종보고서, R & D/95-0052, 1999
- [2] 정석명 외, “자기부상열차 실용화 모델 개발을 위한 산업분석”, 산업자원부 중기거점 사업 분석보고서, 2002
- [3] 나가가와 외, “궤도방진을 고려한 흡인식 자기부상열차의 제어이론에 관한 연구”, 일본전기학회지 B, 105, 559 (소화 60-1)
- [4] 나가가와 외, “궤도방진제어를 이용한 자기부상열차의 다량연결주행 Simulation”, 일본 전기학회지 D, 106, 87 (소화 61-2)



조 흥 제

· 한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터 선임연구원
· 관심분야 : 자기부상열차개발, 반발식자기부상시스템 전자장 해석
· E-mail : cho_hj@kimm.re.kr



김 봉 섭

· 한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터 선임연구원
· 관심분야 : 자기부상열차개발, 흡인식자기부상 전
자석 해석 및 설계
· E-mail : bskim@kimm.re.kr