

도시형자기부상열차(UTM-01) 요소기술 성능개선 및 최적화 연구

조흥재, 이종민, 성호경, 김봉섭, 유문환

한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부/기계시스템신뢰성연구센터

Performance Improvement and Optimization of Key Technologies of the Urban Transit Maglev UTM-01

Cho,Hungje, Lee,Jongmin, Sung,Hokyung, Kim,Bongsup, Yoo,Moonhwan

Korea Institute of Machinery and Materials ( KIMM )

**Abstract** - 한국기계연구원 자기부상열차개발팀은 98년 9월부터 현재까지 과기부 국책연구사업의 결과로 개발한 도시형자기부상열차(UTM-01)의 주행성능시험 및 평가를 수행하고 있다. 시험결과 많은 문제점이 노출되었다. 한국기계연구원은 2000년 1월부터 2002년 12월까지 연구소 기본연구사업으로 드러난 문제점에 대하여 요소기술 차원에서 성능개선 및 최적화연구를 수행하였다.

1. 서 론

본 자기부상열차개발팀은 심각한 대도시 교통문제를 미래지향적/환경친화적인 새로운 케도교통수단의 개발, 실용화를 통하여 해결하고자 1990년 이래로 중저속용 도시형자기부상열차를 개발해오고 있으며 과학기술부 국책연구개발의 결과로서 기업(구현대정공)과 공동으로 2량 1 편성 자기부상열차 (UTM-01)을 1998년에 성공적으로 개발하였다. 개발된 자기부상열차는, 그러나, 실용화전단계모델로서 대중을 실어 나르는 대중교통수단 역할을 하기에는 시스템의 신뢰성이 전반적으로 부족하고 자기부상시스템을 구성하는 각 Sub. System 기술의 최적화가 이루어지지 못한 상태이다. 한국기계연구원은 2000년 1월부터 2002년 12월까지 드러난 문제점들에 대하여 요소 기술 차원에서 성능개선 및 최적화연구를 수행하였는 바, 수행결과는 다음과 같다.

2. 본 론

2.1 UTM-01의 문제점

주행성능시험 결과 드러난 UTM-01의 주요 문제점/개선이 요구되는 점은 표 1과 같다.

표 1. UTM-01의 문제점

구분	문제점
부상/안내 제어기	-신뢰성부족 -레일단차통과시 gap 변동폭 큼 -Software/Hardware 적으로 2중화 필요 -Fan 소음
대차	-무겁다 ( 9 ton/차량) -유지보수가 어렵다 -곡선에서 부상실폐시 회향이 안된다. -짧은 반경의 곡선주행이 원활하도록 2차 suspension 계 재설계가 요구됨
차체	-경량화 요구됨 -전장품 유지보수가 어렵다 -무게중심이 높다 -전후부에 비상탈출구가 없다. -미관상 좋지않다.

VVVF Inverter	-소음문제 -경량화가 필요함
dc/dc converter	-소음문제 -너무 무겁다. -주변 온도차이에 대한 신뢰성이 부족하다.
magnet driver	-차량당 소요개수를 줄일 필요가 있다 -부상제어기를 내장할 필요가 있다
분기기	-고속 굴절식 분기기 개발이 필요하다.
속도위치 검지장치	-비접촉식 속도위치 검지장치를 개발해야 함.

2.2 부상/안내 제어기

선로위를 일정한 Gap으로 떠서 주행하는 특성상 자기부상열차 실용화는 부상/안내제어기의 신뢰성 확보 여부에 달려 있다고 해도 과언이 아니다. 자기부상제어는 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 급비상브레이크를 잡을 경우 차 전체에 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 유지할 수 있어야 한다. 본 연구기간 동안 개발된 고장방지제어(Fault Tolerant Control) 가 Test Bed에서 작동됨을 확인하였다. 자연연각방식을 채택하여 제어기의 Fan 소음을 제거하였다.

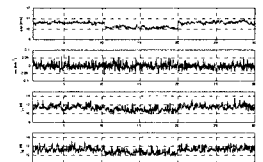


그림 1. 개발된 부상제어기    그림 2. FTC 제어결과

Hardware 2중화를 통한 신뢰성 확보 및 레일단차 통과시 과도한 Gap 변동폭을 줄이기 위한 연구개발은 아직 수행되고 있지 않는 바, 자기부상열차가 실용화되기 위해서는 빠른 시일 내에 수행되어야 할 것이다.

2.3 대차

개발된 대차와 현 UTM-01 대차를 그림 3,4에 보이고 있다. 개발된 대차는 (i) 유지보수가 용이하고 무게를 줄이기 위하여 Long pole 방식을 채택하였으며 기계

brake 시스템을 직접 Long pole에 설치하였다. (ii) 곡선에서 부상실패시 견인차에 의하여 회항이 가능하도록 비상착지 Roller를 조타식으로 개발하였다. (iii) 차량 중간 대차의 2차 suspension 장치를 Sliding Table/Linear Bearing 조합으로 설계하여 반경 50m 이내의 짧은 곡선 운행이 가능하도록 하였다.

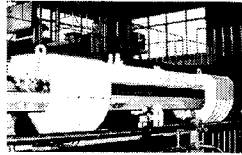
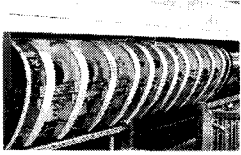


그림 3. 현 UTM-01 대차      그림 4. 개발된 신형대차

### 2.4 차체

그림 5에서 개발된 경량자기부상열차 차체를 보이고 있다. 개발된 차체는 공차중량 13.5 ton을 목표로 하였다 (현 UTM-01의 공차중량은 22 ton임).

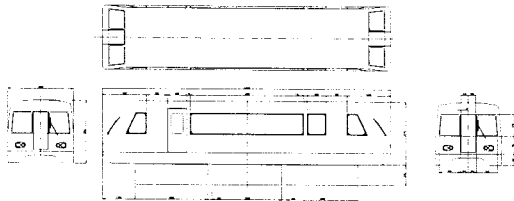


그림 5. 경량 자기부상열차 UTM-02

주행안정성을 높이기 위하여 무게중심을 최대한 낮추려고 노력한 결과 Reaction Plate 위床 높이는 900mm이다(UTM-01의 경우 1100mm). 전장품 유지보수를 기존 바퀴식 열차처럼 실외에서 편리하게 하려면 지상케도 및 전장품 module화 설계에 따른床下 전장품 재배치 등 시스템 전체에 대한 근본적인 설계변경이 요구된다.

### 2.5 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 6에 본 과제에서 개발된 inverter를, 그림 7에서 각각의

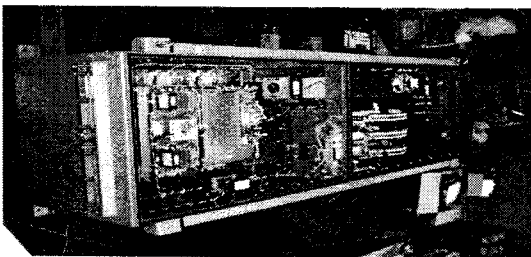


그림 6. 개발된 VVVF Inverter

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 있음을 알 수 있다. 또한 자연 냉각식 설계에 의하여 Fan 소음은 없다.

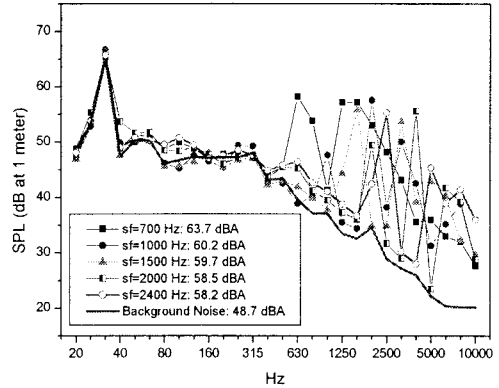


그림 7. Switching 주파수 변화에 따른 개발된 VVVF Inverter 소음 Level

### 2.6 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. 그러나 core 단면적을 크게함에 따라 dc/dc converter 전체의 부피와 무게가 증가함을 피할 수 없었다. vvvf inverter 와 마찬가지로 자연냉각식으로서 fan은 없다. 그림 8 은 개발된 dc/dc converter를 보이고 있다. 그림 9 는 스위칭 주파수 변화에 따른 dc/dc converter의 소음레벨을 보이고 있다.

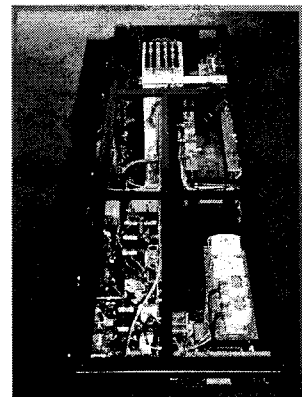


그림 8. DC/DC Converter

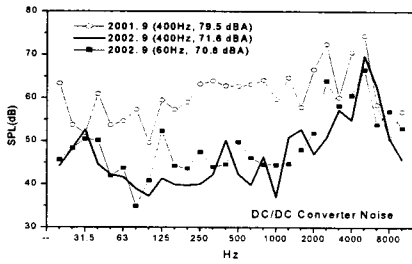


그림 9. 스위칭 주파수 변화에 따른 dc/dc converter의 소음레벨

## 2.7 Magnet Driver

현재 사용중인 magnet driver는 자연냉각식으로 소음이 전혀 없으며 신뢰성에도 문제가 없다. 현재는 차량당 12개의 magnet driver (1개 /corner)를 사용하고 있는데 차량 각종 기기취부를 위한 공간을 확보하기 위하여 2개의 magnet driver를 한데 묶어 차량당 6개를 새로 개발하였다. 그림 9는 개발된 magnet driver를 보이고 있다.

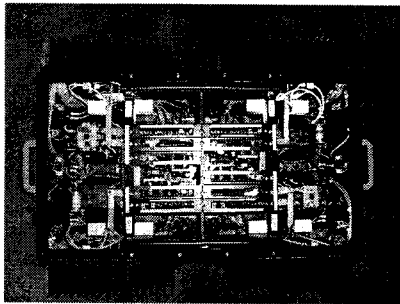


그림 10. Module 단위 전자식 전력공급장치 Magnet Driver

## 2.8 선형유도전동기 (LIM)

선형유도전동기를 열차의 추진에 사용할 때 문제가 되는 것은 1차, 2차축간의 간극이 커 (UTM-01의 경우 13mm. 회전용 전동기의 경우는 1mm 이내임) 효율이 낮다는 것이다. 공극을 줄이기 위해서는 부상 gap 변동폭을 최소화 할 것이 요구되나 한계가 있으며 부상시 LIM 공극은 최소한 12mm는 되어야 하는 것이 현실이다. 본 과제에서는 리니어모터의 낮은 효율 특성 향상 및 중량 최소화를 만족하는 개선된 리니어모터 설계 파라미터를 도출하고자 하였다. 즉, 최적화 기법을 도입하여 극수, 1차축 적중폭, 공극의 길이 등에 의한 효율 개선에 관한 검토를 수행하였으며, 1차축 권선(구리권선, 알루미늄권선)에 따른 1차축 중량 및 성능에 관한 특성을 검토하고, 또한 1차축 전류밀도에 따른 중량 및 온도 상승에 관한 검토를 수반하여, 본 연구의 목적에 부합되는 설계파라미터를 도출하고자 하였다. 그림 10은 최적화 기법에 의하여 설계된 LIM의 slip 주파수 변화의 함수로 나타난 추력 및 수직력을 보이고 있다. 해석결과 타당성을 검증하기 위하여 충남대학교 전기기기 연구실이 보유하고 있는 Arch형 LIM의 특성시험장치를 이용하여 속도에 따른 1차축 전류, 추력 및 수직력 특성 시험 결과와 해석결과를 각각 비교하였다.

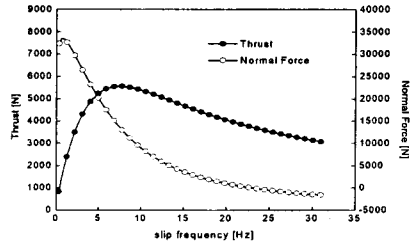


그림 11. Slip 주파수에 따른 LIM 추력, 수직력 특성

수직력의 특성시험 결과는 힘센서로 사용된 로드셀의 민감도 문제로 인하여 기동시에 힘 측정이 제대로 이루어지지 않아 해석결과와 많은 차이를 보이나, 속도가 증가함에 따라 해석결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다 (그림 11).

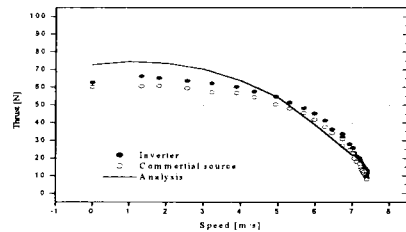


그림 11. 속도에 따른 LIM 추력 실험결과

표 2. LIM 개발결과 비교

Description	UTM-01	UTM-02
최대추력	3.3 KN	4.5 KN
길이	2.3 m	2.2 m
무게	250 kgf	180 kgf
운행 slip 주파수	12 Hz	10 Hz
최대 가/감속도	0.8 m/s <sup>2</sup>	1.0 m/s <sup>2</sup>
코일재질	AL	AL
최대전류밀도	4.1 A/mm <sup>2</sup>	5.5 A/mm <sup>2</sup>

## 3. 결 론

오명 과학기술부총리 취임이후 자기부상열차 실용화 사업이 실질적으로 추진될 가능성이 그 어느 때보다도 높아 보인다. 정부는 2004년 12월 21일 노무현 대통령 주재로 열린 제 16회 국가과학기술위원회에서 자기부상열차 실용화 방안을 논의하고 과기부/전교부/산자부 등 유관부처가 참여하는 범정부 사업으로 추진키로 하였다. 본 과제 개발결과와 일부는 기업으로 기술이전 되었으나 아직 할 일은 많다. 특히 부상제어의 2중화를 위한 연구개발은 시급히 수행되어야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 자기부상열차 요소기술 개선 및 최적화 연구 1차년도 보고서, 2000.1., 산업기술연구회
- [2] 자기부상열차 요소기술 개선 및 최적화 연구 2차년도 보고서, 2001. 1. 산업기술연구회
- [3] 자기부상열차 요소기술 개선 및 최적화 연구 3차년도 보고서, 2002. 1. 산업기술연구회