

자기부상열차의 대차동적설계 고려사항의 이해

한형석 · 김영중 · 신병천 | 한국기계연구원 자기부상열차실용화사업단
Hyung-Suk Han · Yong-Jung Kim · Byung-Chun Shin

1. 서론

미래의 궤도 교통수단으로 자기부상열차가 국내외에서 연구개발되고 있으며 중국 상하이와 일본 나고야에서는 이미 상용 운행하고 있다.[1,2] 국내에서도 도시형자기부상열차에 대한 실용화사업이 추진 중에 있다. 이러한 국내의 현황을 볼 때 향후 자기부상열차의 연구 및 상용화가 활발하게 추진 될 것으로 예상된다. 자기부상열차의 상용화를 위하여 요구되는 핵심 기술 중의 하나로 현가장치로서 대차가 있다. 대차는 일반대차와 동일하게 차량의 지지, 안내 및 추진 기능을 갖기 때문에 자기부상열차의 성능을 확보하기 위해서는 동특성 측면에서의 대차에 대한 연구가 필수적이라 할 수 있다.

본 고에서는 자기부상열차 대차의 설계에 있어서 동특성 측면에서의 설계 고려사항들을 소개하고자 한다. 이를 위하여 일반적 동적 설계 고려사항들을 살펴보고 국내외 사례들을 통하여 동적 설계 고려사항들을 어떻게 반영하는지 소개하고자 한다.

2. 대차 일반

2.1 기능

대차 축 현가장치는 3가지의 기능을 수행한다. 첫째로, 차량을 지지한다. 차량 지지는 자기부상 방식에 따라 EMS(electromagnet suspension)방식과 EDS(electrodynamic suspension)으로 나누어진다. 둘째로, 차량이 정해진 궤도를 따라가도록 안내하는 기능을 갖는다. 셋째로는 궤도불규칙에 의한 진동으로부터 차체와 승객을 진동으로부터 절연시켜 안락함을 유지시키는 것이다. 이러한 3가지 기능을 수행하기 위하여 자기부상방식과 노선에 따라 다양한 대차가 개발되고 있다.

2.2 부상, 추진 방식에 따른 동특성

대차의 동적 설계 고려사항을 소개하기 전에 대차의 일반적인 기능을 수행하기 위한 부상, 추진 방식을 이해할 필요가 있다. Fig.1은 상용화된 자기부상열차를 중심으로 한 부

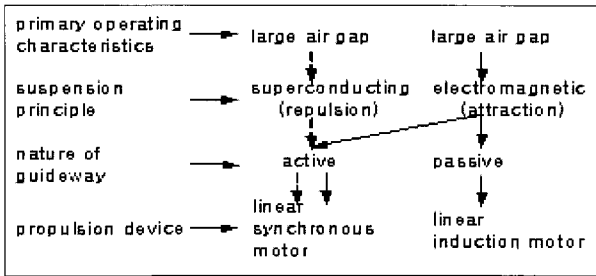


Fig. 1. Possible combinations of suspension and propulsion methods

상, 추진 방식의 조합을 보여주고 있다. Fig. 1에서 분류한 부상, 추진 조합에 따라 고유한 동적 특성이 나타나기 때문에 부상, 추진방식에 적합한 대차를 개발해야 한다.

2. 3 주행성능

대차의 기능은 구체적으로 주행성능으로 평가할 수 있다. 일반적으로 주행성능을 평가하기 위하여 측정되는 항목들은 차체와 대차의 가속도, 대차와 궤도의 수직, 수평 공극(gap), 차체와 대차의 상대 변위, 견인바 하중, 궤도의 처짐, 궤도의 진동들이다. 이러한 항목을 이용하여 주행성능인 승차감, 곡선 추종성, 안정성을 평가하게 된다. 진동에 의한 승차감은 주로 저주파수인 2차 현가장치에 의하여 제어하며 UIC 513에 의하여 평가할 수 있다. 그러나 2차 현가장치만으로는 승차감 확보에 한계가 있어 1차 현가장치의 감쇠력을 제어하기도 한다.[3] 곡선추종성은 대차의 자기부상모듈이 레일과의 횡방향 공극이 허용치를 만족여부로 평가할 수 있다. 적은 곡률반경을 가능한 한 고속으로 공극 이탈 없이 주행할 수 있도록 하기 위하여 대차의 메커니즘을 유연하게 설계하거나 횡방향 감쇠력을 제어하기도 한다. 안정성은 임계속도로 대차와 궤도의 공진현상이 발생하는 속도이다. 궤도는 유연하기 때문에 차량 주행 시 진동을 일으킨다. 이 진동과 대차의 진동이 공진을 일으키지 않도록 제어기 및 대차를 이루는 현가요소의 설계가 요구되는 것이다.

3. 동적 설계 고려 사항

다음은 자기부상열차의 대차 설계 시 고려해야 할 사항들과 대안들을 소개한다.

2. 1 동적 특성

자기부상열차는 다음과 같은 동적 특성을 갖는다.

- 초전도 반발식은 부상력의 제어가 필요 없으나 동시에 1차 현가(부상력)의 감쇠력이 부족하다.
- 상전도흡인식 역시 1차현가의 감쇠력이 부족하다.
- 전형적으로 자기부상차량은 요 감쇠가 부족하다.
- 궤도(guideway)의 형상에 불규칙이 존재한다.
- 초전도 반발식의 경우 궤도에 설치된 코일의 위치에 오차가 있어 이로 인하여 부상력, 안내력에 불규칙이 존재하고 이로 인하여 진동이 유발된다.
- 고속 운행 시 공기에 의한 진동이 발생한다.
- 궤도의 유연성에 의하여 궤도와 대차와의 동적 상호작용으로 인한 불안정성이 존재 한다
- 레일의 유연성으로 인하여 레일이 진동한다.
- 차체의 유연성이 승차감에 영향을 미칠 수 있다.

2. 2 대차 메커니즘

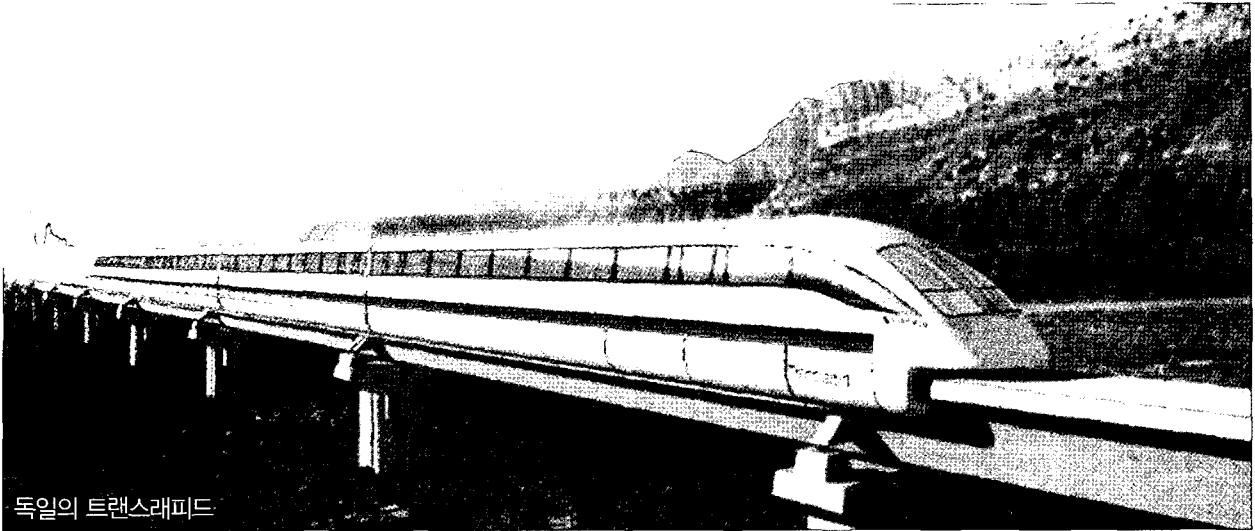
곡선 주행 시 원활한 추종을 위해서는 모든 자기부상 모듈이 가능한 한 독립적으로 운동하여 궤도를 추종하도록 해야 한다. 이를 위해서는 자기부상 모듈이 설치된 프레임이 링크 시스템이 되도록 설계한다. 또한 프레임간의 연결이 유연하도록 할 필요가 있다. 특히, 도심을 주행하는 경전철 자기부상 열차는 해당 선로의 곡률이 적을 가능성이 높기 때문에 효과적인 대차 메커니즘에 대한 연구가 필요하다.

2. 3 수직, 횡방향 공극 제한

대차와 궤도와의 수직방향, 횡방향 공극의 변화 크기 제한은 매우 중요하다. 이 두 공극이 제한치를 초과하면 대차의 자기부상 모듈과 궤도가 물리적으로 접촉하게 된다. 물론, 제어가 주로 공극을 제어할 수 있으나 능동 또는 수동의 현가요소를 부가하여 제어한다. 공극의 초과가 발생했을 경우를 대비하여 수직방향, 횡방향으로 대차에 보조 휠을 설치해야 한다.

2. 4 승차감 확보

2.1절에서 언급한 동적 특성을 고려하여 진동에 의한 승차감을 확보해야한다. 이를 위하여 대차와 궤도와의 진동과 대차와 차체와의 진동 절연이 요구된다. 이를 위하여 2단계 또는 3단계의 진동절연 장치 즉 현가장치가 이용된다.[3] 1차 현가는 2차 현가에 비하여 상대적으로 고주파수이며 2차 현가는 1~2 Hz의 범위를 갖도록 한다. 현실적으로 1차 현가의 감쇠력을 제어하기는 어렵기 때문에 2차 현가에서 주



독일의 트랜스라피드

로 승차감을 확보하게 된다.

2. 4 안정성 확보

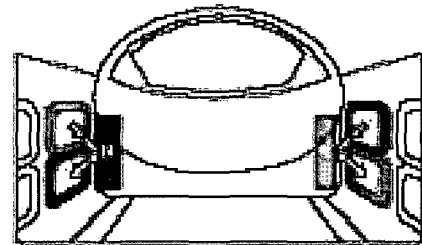
궤도와 대차가 전 운전속도 영역에서 공진을 일으키지 않도록 설계해야 한다. 물론, 부상제어기에서 근본적으로 이를 방지해야 하나 부수적으로 현가요소에 의한 시스템은 진동 특성을 고려할 필요가 있다.

4. 사례

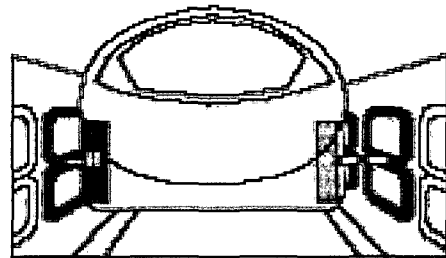
본 장에서는 3장에서 서술한 설계 고려사항들을 어떻게 반영하는지 이미 개발된 대차들의 사례를 통하여 검토하고자 한다.

4. 1 MLX

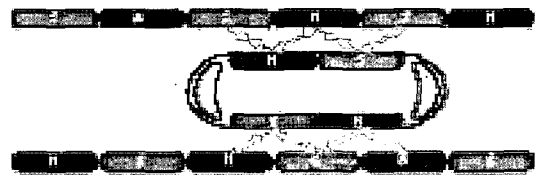
MLX는 대표적인 고속형 초전도 반발식 자기부상열차로 최고 속도 561 km/h를 기록하였다.[4] MLX의 부상, 안내 및 추진 원리를 Fig. 2에서 보여주고 있다. Fig.2에서와 같이 부상, 안내 및 추진력이 궤도의 측면에 설치된 코일과 차량에 설치된 초전도 자석에 의하여 이루어진다. 이러한 초전도 반발식은 EDS 방식으로 기본적으로 1차 현가 즉 부상, 안내력에 감쇠가 부족한 특성을 갖는다.[4] 또한 궤도에 설치된 코일의 위치에 오차가 있어 이로 인하여 진동이 유발된다. 또한 선형동기모터, 공기 저항력에 의하여 진동이 발생한다. 이러한 특성을 반영한 MLX의 대차 구조를 Fig. 3에서 보여주고 있다. MLX의 대차는 승차감 향상을 위하여 초전도자석(SCM)이 탄성 지지된 대차인 것이 특징이다. 자기



(a) Principle of magnetic levitation



(b) Principle of lateral guidance



(c) Principle of propulsion

Fig. 2. Principles of levitation, guidance and propulsion of MLX

부상력의 등가 강성은 상대적으로 크기 때문에 이로 인한 대차의 진동 모드에 대한 차체의 가속도 크기를 줄이는 것은 어렵다. 이 경우 차체의 진동은 대차의 진동과 역 위상을 갖

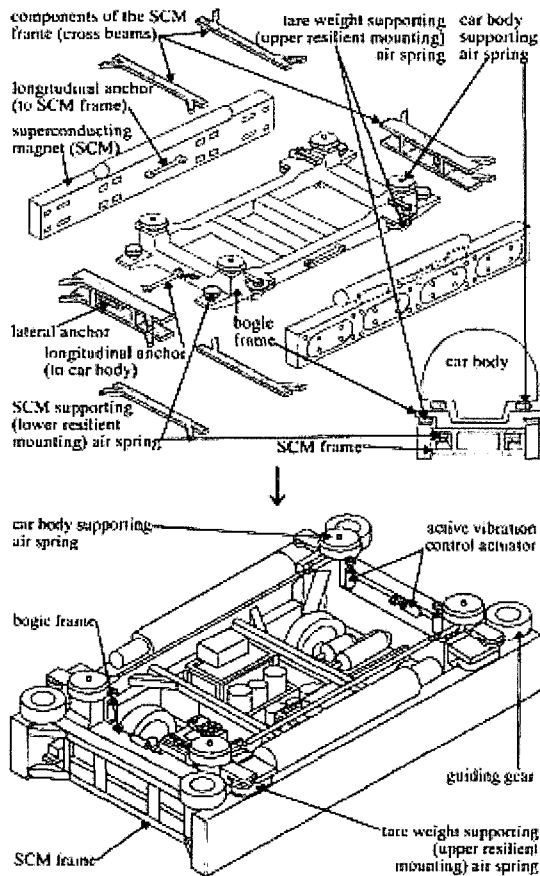


Fig. 3. Resiliently-mounted SCM bogie

는다. 그래서 대차 프레임을 초전도자석이 설치된 프레임과 다른 부품이 설치된 대차 프레임으로 나누었다. 그런 후 대차 프레임이 초전도 프레임에 탄성 지지되는 구조이다. 이러한 구조로 궤도 불규칙으로 인한 진동을 줄이기 위하여 초전도자석을 포함한 SCM 프레임의 질량과 다른 부품이 설치된 대차 프레임의 질량비가 작아야한다. 예로, 1 또는 1보다 작은 비로 설계하여 차체의 진동을 줄이는 효과를 얻었다.[3] 또한 2차 현가 및 1차 현가의 감쇠력을 제어하기도 한다.[4]

4. 2 HSST

Fig. 4는 2005년에 상용화된 LINIMO의 원형인 HSST대차 구조를 보여주고 있다.[5] HSST는 도시형으로 경전철이다. 때문에 곡선선로에 대한 고려가 많은 것을 알 수 있다. 2차 현가는 각 대차의 모서리부에 4개가 슬라이드 테이블에 부착되어 있다. 슬라이드 테이블에는 전후 대차의 공기스프링이 연결되어 있다. 이 슬라이드 테이블은 곡선 주행 시 차

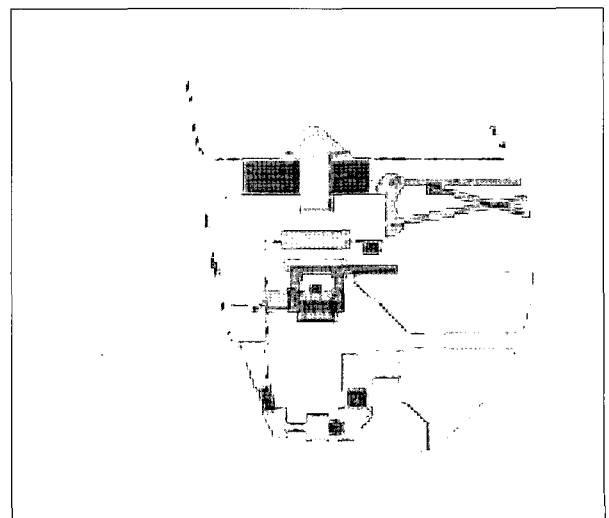
체와 상대적으로 횡방향으로 이동이 가능하고 기계적으로 슬라이드 테이블이 연결되어 있어 횡하중을 서로 분담하는 것이 특징이다. 또한 엔티롤빔(anti-roll beam)이 전후에 설치되어 있어 롤 방향에 대한 탄성이 존재한다.

4. 3 TRANSRAPID

Fig. 5는 독일에서 개발하여 중국 상하이에서 운행 중인 TRANSRAPID의 대차로 이 열차는 고속형이면서 EMS 상전도 흡인식이 것이 특징이다.[6] 이 열차는 Fig. 5에서와 같이 부상력을 위한 전자석과 안내를 위한 전자석이 분리되어 있는 것이 특징이다. TRANSRAPID는 상대적으로 장기간에 걸쳐 다음과 같은 내용으로 최적화되었다.

- 개별 부품의 수를 줄이고 모듈화
- 유지보수 비용 저감
- 승차감 향상
- 낮은 공기저항 및 공기역학적 소음 저감
- 차량 무게 감소

모든 자석은 유지보수가 필요 없는 조인트를 이용하여 Fig. 6과 같은 부상 샤프스에 고정된다. 그런 후 필요한 운동은 진동감쇠탄성베어링으로 부상 샤프스를 프레임에 연결하여 얻어진다. 즉, 부상 샤프스와 프레임의 연결부에 유연성이 존재하도록 하여 작은 범위에서 상대운동이 가능하게 된다. 모든 부상, 추진, 제동, 안내력 자석을 부상 샤프스에 설치하여 결과적으로 Fig. 6의 부상 샤프스에 모든 힘이 전달되게 된다. 이 부상 샤프스로 구성된 부상샤프스 유닛은 주행방향으로 차체와 차동링크에 의하여 고정된다. 나머지 모든 자유도는 구속되지 않는다. 각 부상 샤프스 유닛은 차량의 각 측면에 쌍으로



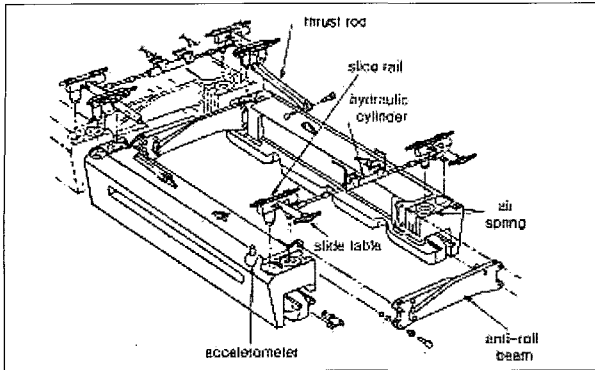


Fig. 4. Bogie of HSST

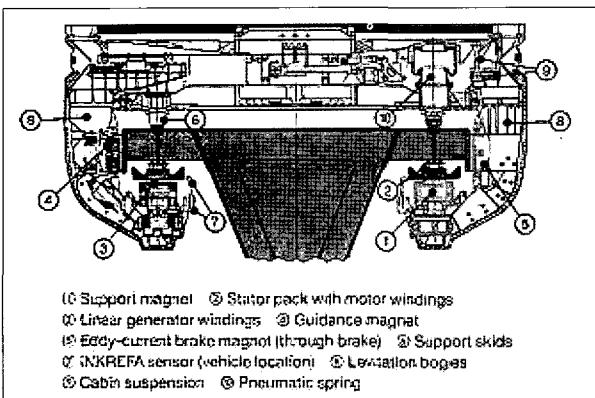


Fig. 5. Vehicle structure of TRANSPRAPID

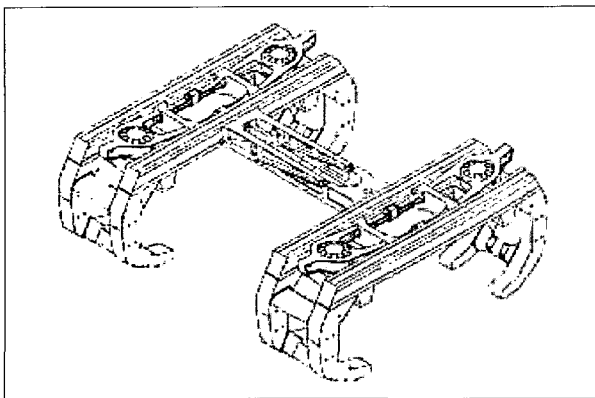


Fig. 6. Levitation chassis unit

연결되는 4개의 프레임으로 구성되는데 이 프레임은 차량에 연결되고 횡단 빔에 의하여 연결되어 궤도를 감싸는 형상을 만든다. 각 하단 끝 부분에 자석을 부착한 부상 프레임은 추진, 제동, 안내를 독립적으로 수행한다. 차량을 지지하기 위한 공기 현가장치는 부상 사시의 횡단 빔에 설치된다. 기계적 안정화바가 있어서 차체의 롤 운동을 감쇠시키도록 하였

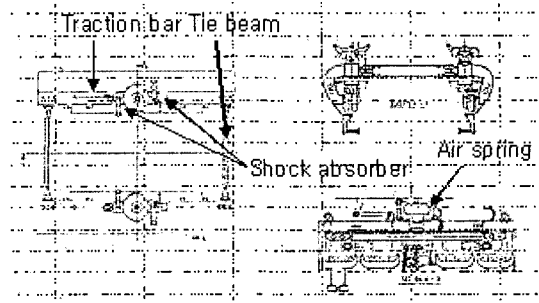


Fig. 6. Bogie of UTM

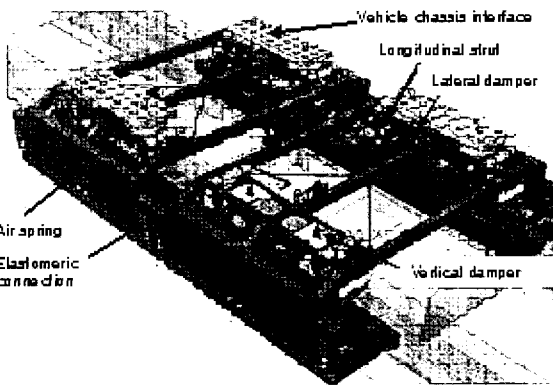


Fig. 7. Bogie of General Atomics Maglev vehicle

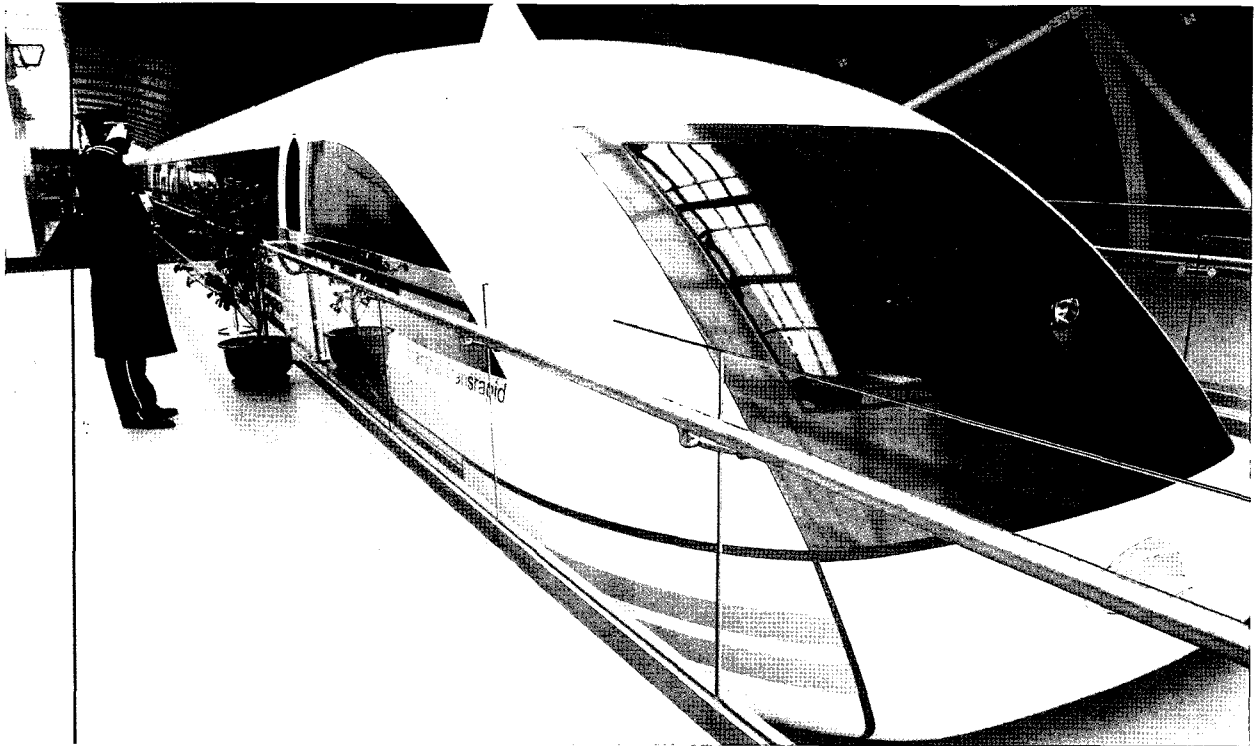
다. 정지 상태를 위한 지지 스키드가 횡단 빔에 설치된다. 대차의 프레임들 간 진동을 절연시키기 위하여 강하고 유지보수가 필요 없는 탄성(금속-고무) 베어링이 연결부에 이용된다. 궤도 중심 횡제어 시스템의 도입과 안내자석과 제동자석이 동일한 인터페이스로 인하여 제동자석을 위한 프레임이 필요 없어 전체적으로 질량을 줄일 수 있었다고 한다.

4. 4 UTM

Fig. 6는 국내에서 개발하여 시운전 중인 UTM-01의 대차로 2차 현가장치는 2개의 공기스프링과 수직, 횡 감쇠기로 구성된다. 좌우 대차 프레임은 타이빔(tie beam)이 조인트에 의하여 연결된다. 이 조인트에 의하여 좌우 대차 프레임이 상대 운동이 가능하여 곡선 주행 시 곡선 추종성을 향상시키는 장점이 있다.

4. 5 General Atomics

General Atomics사는 전술한 자기부상열차들과 다르게



영구자석을 이용하여 부상하는 개념을 적용하고 있으며, Fig. 8은 그러한 시스템의 대차를 보여주고 있다.[7] 동특성 측면에서 자기부상 모듈이 설치된 프레임에 관절 조인트로 분리시켜 곡선주행 시 공극 이탈이 최소가 되도록 한 것이 특징이다. 관절조인트를 약 1°회전이 가능하도록 하여 곡선주행 시 공극 침투를 2 mm 이하로 줄였다. 이를 통하여 목표로 하는 최소 곡률반경은 18.3 m으로 매우 작다고 할 수 있다. 2차 현가장치에는 대차 당 8개의 공기 스프링과 8개의 공기 감쇠기, 4개의 횡 공기 감쇠기가 설치되어 ISO 2631 승차감 조건을 만족하도록 하였다.

5. 맺는말

이상과 같이 자기부상열차의 대차 설계 시에 고려되어야 할 동특성 사항들을 소개하였다. 국내에서도 도시형 자기부상열차의 실용화가 추진되고 있으므로 이러한 사항들을 고려하여 설계 개선이 이루어지길 기대한다. 더 나아가 고속형 자기부상열차의 연구에 활용되어 독창적인 대차 개발이 이루어질 필요가 있다고 할 수 있다. ☞

참고 문헌

1. Hoffmann, D.(2004). "Transrapid project Shanghai," Maglev 2004, pp.129-138.
2. Yasuda, Y., Fujino, M., Tanaka, M and Ishimoto, S.(2004) "The first HSST commercial train in Japan," Maglev 2004, pp.76-85.
3. Watanabe, K., Yoshioka, H. and Suzuki, E.(2004). "Combined control of primary and secondary suspension of Maglev vehicles," QR of RTRI, Vol. 45, No. 1, pp.26-32.
4. Watanabe, K., Suzuki, E., Yoshioka, H., Murai, T., Kashiwagi, T. and Tanaka, M.(2004). "Vibration control of Maglev vehicles utilizing a linear generator," Maglev 2004, pp.539-549.
5. Paddison, J.E. and Goodall, R.M.(1998). "EMS Maglev suspension control system comparison and trends," Maglev 1998, pp.324-329.
6. Ebmeyer, J., Kunz, S., Dean, R.J. and Wieschermann, J.(1998), "Mechanical structure of the vehicle TRANSRAPID 08," Maglev 1998, pp.209-213.
7. Gurol, S., Baldi, R. and Bever, R.(2004). "Status of the General Atomics low speed urban Maglev technology development program," Maglev 2004, Vol. I, pp. 269-274.