

차세대 고속전철 대차기술

이 글에서는 차세대 고속전철(HEMU-400X: Highspeed Electrical Multiple Unit-400km/h eXperiment)에 적용되는 대차기술과 관련하여 기존의 KTX 대비 어떠한 기술이 적용되고 있는지에 대해 살펴보고자 한다.

이원상 현대로템(주) 기술연구소, 수석연구원

e-mail : wonsang@hyundai-rottem.co.kr

차세대 고속전철은 현 KTX보다 운행속도가 50km/h 증가된 350km/h인 차량으로 최근 철도차량의 트렌드인 고속화, 경량화, 안전성 및 안락성 향상, 유지보수 간소화 등이 모두 고려되어야 한다. 대차는 이러한 철도차량의 성능과 안전에 절대적인 영향을 미치는 핵심장치로서 차량기술의 수준을 판단하는 척도로 고려된다.

철도차량의 고속화를 위한 대차기술에는 구동 파워 증대, 부품의 경량/콤팩트화, 이중의 안전성, 보다 정밀한 밸런스 조절, 안락성 향상뿐만 아니라 선로에 미치는 영향의 최소화 및 차량 운영에 필요한 유지보수의 간소화와 부품 교환/폐기의 용이성 및 환경 영향까지 모두 고려된다.

자동차의 예를 들면, 차량의 속도를 증가시키려면 기본적으로 엔진의 출력을 높여야 하지만, 엔진의 용량이 커진다는 것은 엔진 무게가 더 늘어나고 크기도 커지는 결과를 초래하게 되어 늘어난 무게는 속도를 증가시키는 데 방해가 되며 크기는 제한된 공간 내에서의 부품 간의 인터페이스에 문제를 발생시킨다. 따라서 고출력 엔진 개발과 무게와 크기를 줄이는 노력이 반드시 함께 적용되어야 속도 증가가 가능하다고 볼 수 있다.

철도차량의 경우 고속화에 따라 차량이 선로에 가하는 동적 하중을 줄일 수 있는 방안과 속도가 증가됨에 따라 제동 요구성능을 만족시킬 수 있는 방안을 찾는 것도 커다란 고려사항이다.

아울러, 제한된 개발 기간과 가상의 공간, 그리고 사용 환경을 고려해서 어떻게 성공적으로 개발을 완료할 수 있는가 하는 것은 기본적으로 고려되어야 할 사항이라 할 수 있겠다.

고출력을 위한 대차기술

국내에 운행되고 있는 KTX와 KTX-II는 차량 양측에 동력차(일종의 기관차로서 승객이 탑승하지 않는 구동차량)가 있어 앞의 동력차가 끌어주고 뒤의 동력차가 밀어주는 Push-Pull 형태로 300km/h 속도로 운행하며, 이를 동력 집중식 방식이라고 부른다.

이 차량보다 더 속도를 높이려면 어떻게 하면 될까? 단순히 기존 KTX보다 고출력의 동력차를 적용하면 간단히 해결할 수 있을 것 같지만, 그것은 그렇게 간단하지 않다.

고출력을 위한 동력차에는 차량의 동력원으로 써 차륜을 회전시키는 모터가 설치되고, 이 모터를 구동시키는 전기/전자장치(이하 전장품)가 줄줄이 커지게 된다. 즉, 중량과 크기가 증가하게 된다. 자동차에서 과적차량이 고속도로 파손의 원인인 것과 마찬가지로 증가된 중량은 선로를 파손시켜 수명을 짧게 만들며, 더구나 고속화가 되면 더더욱 그렇다.

차량의 하중이 증가되면 선로에 가해지는 수직 정하중이 증가되게 되는데, 여기에 주행속도가 증가하

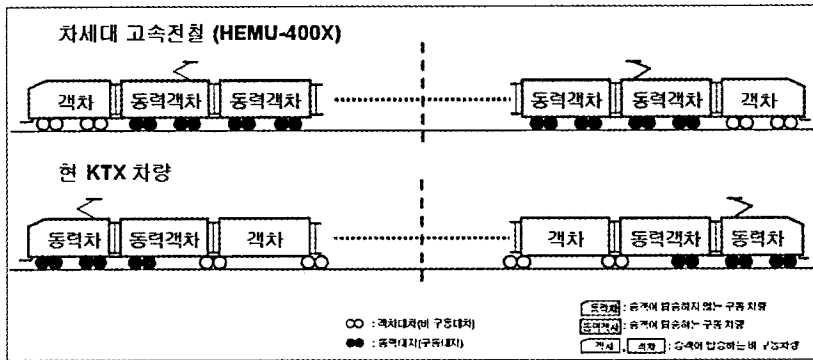


그림 1 동력대차 적용 상태 비교

게 되면 동적 수직하중이 급격하게 증가하며 선로에 대한 파손 정도 또한 증가하게 된다.

일반적으로 선로의 부담하중을 제한하기 위하여 한 차축의 정적 하중인 축중(차량의 무게를 차축당 부담하는 하중)으로 규제를 하는데 국내의 경부고속전철은 17톤으로 한정되어 있다.

현재 KTX와 KTX-II의 경우 이 제한 축중을 최대한 이용하면서 차량 전체의 중량을 최소화하고 효율성을 높이기 위해 관절대차(객차와 객차 사이에 놓인 대차)를 이용하고 윤중 분포를 고려한 최적설계가 되어 있는 상태이며, 속도 증가를 위해 고출력을 위한 큰 동력차를 적용한다는 것은 매우 제한적일 수밖에 없음을 알 수 있다.

이에 부가하여 선로와 차륜 사이에는 금속간(Metal-to-Metal)의 접촉이 이루어지며 이 사이에 발생하는 점착력의 사용에는 한계가 있게 되는데, 이로 인해 단순히 출력을 높인다고 해서 제한된 차축으로 출력을 얻을 수는 없게 된다.

그럼, 어떻게 하면 위의 문제를 해결하면서 차량의 동력을 증가시킬 수 있을까? 그것은 바로 동력을 분산시키고, 축중을 대폭적으로 줄이는 것이다.

현재 KTX는 차량 양단의 동력차로 차량을 운행하기 때문에 차륜을 구동할 수 있는 대차(이하 동력대차)가 동력차에 집중되어 있다. 이 동력대차를 객차(동력 없이 승객이 탑승하는 차량)에도 적용할 수 있다면 문제는 달라진다. 즉, 동력대차가 동력차가 아닌 객차에 적용되기 때문에 차량의 구동력은 증가될 것이다. 일반적으로 객차에 적용되는 대차는 차륜이 끌려 다니는 비 구동 대차(이하 객차대차)가 적용되므로 이 객차

대차가 동력대차로 바뀌어진 차량(동력객차 : 동력이 있는 승객이 탑승차량)의 중량은 거의 증가되지 않으면서 동력이 많아지는 결과를 가져오게 된다.

여기에 매우 적절하며 이해하기 쉬운 비유가 있다. 10명이 타는 두 가지 종류의 자전거가 있는데, 동력집중식의 경우中间的 8자리에 어린이들이 편안히 앉아만 있고,

어른 2명이 맨 앞과 뒤에서만 페달을 돌리는 것이고, 동력 분산식의 경우에는 어른이 중간 중간에 위치해서 함께 페달을 돌리는 것이다.

그림 1과 같이 현 KTX는 동력대차가 동력차에 한정된 동력집중식 차량이라고 하면, 차세대 고속전철(HEMU-400X)은 모터가 탑재된 동력대차가 차량 전반에 퍼져있는 동력분산식 차량이라 할 수 있다.

속도를 증가시키기 위해서는 동력을 분산하여야 한다는 것은 앞에서 설명하였지만, 분산만한다고 속도 증가를 위한 모든 것이 해결되는 것은 아니다. 줄다리기처럼 여러 사람이 각자의 작은 힘을 합하면 더욱 큰 힘을 내는 원리를 이용하여 동력집중식 동력대차에 적용된 모터보다 작은 모터를 갖는 동력대차를 차량 전체에 분포시켜 구동 축수를 증가시켜야 된다.

기존의 KTX와 KTX-II는 그림 1에서와 같이 객차와 객차 사이에 대차(관절대차)가 있는 타입으로 차량당 1개의 대차가 적용되는 형태가 되어 차량당 구동 축수는 2개가 된다. 하지만, 일반 차량과 같이 차량 하부에 2개의 대차가 있는 타입(그림 1의 HEMU-400X 참조)을 적용하면 차량 당 구동 축수는 4개가 됨으로써 기존 KTX보다 구동축수 능력이 2배가 된다. 한편, 기존 KTX에서 구동축수를 일반차량과 같이 하려면 2개의 차량이 필요하게 되는 단점이 있다.

또한, 동일한 승객 하중 조건이라면 차량당 2개 대차를 사용하는 타입이 1개 대차를 사용하는 KTX보다 축수가 많으므로 축중이 더 적게 된다는 것을 쉽게 알 수 있다. 이는 선로 부담력을 줄여 줌으로 인하여 선로 파손 영향이 적어져 상대적으로 선로의 유지보수 비용이 줄어드는 효과를 가져 오게 되며 특히 속도의 제

곱으로 동적 수직하중이 커진다는 사실을 고려하면 이는 필연적이다.

따라서 기존 운행 속도 300km/h에서 50km/h 증속을 위해서는 구동 축수를 늘려야 하고 선로 부담력도 줄이는 방법을 사용해야 한다.

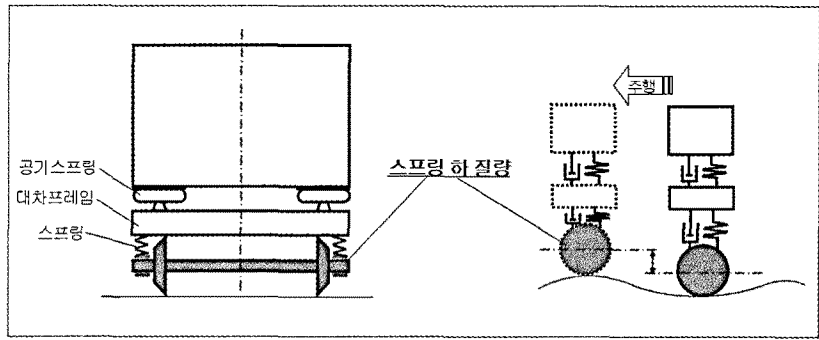


그림 2 스프링하 질량 및 상하방향 움직임

현가장치 기술

대차는 하중을 지지하기 위한 주요 골조인 대차프레임이 있고, 대차프레임 상부에는 공기스프링에 의해 차체를 지지하며 하부에는 차륜, 차축 및 축상(베어링이 포함된 하우징)이 그림 2처럼 스프링에 연결되어 있다. 이들 차륜, 차축 및 축상 들은 스프링 아래에 연결된 질량이라 하여 스프링하 질량이라고 부른다.

이를 측면에서 보면, 그림 2와 같이 차륜이 굴곡이 있는 선로에 놓여 있는 형태가 될 것이다.

차량이 움직이면 차륜은 베어링을 중심으로 회전을 하면서 굴곡이 있는 선로에 의해 상하방향으로 움직이게 될 것이고, 곧 속도가 증가되면 차륜은 더욱 더 빨리 상하방향으로 움직이게 될 것이다.

만약, 스프링하 질량이 크다면 선로의 굴곡에 의해 한 번 상 방향으로 움직인 스프링하 질량은 관성력 때문에 하 방향으로 복귀하려는 데 어려워 선로에 항상 접촉되지 않을 수 있다. 이는 농구에서 손바닥으로 공을 드리블 할 때 가벼운 공은 쉽게 드리블이 가능하지만, 무거운 공은 드리블이 어려운 것과 마찬가지로 현상이다. 따라서 스프링하 질량을 작게 가볍게 해야 속도를 증가하는 데 유리하다.

특히 철도차량의 경우 이는 더 더욱 큰 영향을 미치게 되는데, 선로와 철제차륜의 금속간 의 접촉 특성 때문이라고 할 수 있다. 스프링하 질량에 발생하는 중력가속도는 실로 엄청나서 일반적으로 50g~100g, 심한 경우 200g까지도 나타난다. 이것은 위에서 언급한 동적 수직하중에 직접적인 영향을 미치는 주요 인자로 스프링 하 질량의 절감이야말로 최우선적인 고려 대상이다.

스프링하 질량을 작게 하기 위하여 차세대 고속

전철용 대차에 적용되는 기술들은 다음과 같다.

- 1) 차축을 가볍게 하기 위하여 차축 내부가 빈 중공축을 사용한다.(기존 KTX도 중공축을 적용하고 있다.)
- 2) 차축에 조립되어 있는 감속장치의 하우징을 알루미늄 합금 재질로 제작하여 무게를 가볍게 한다.
- 3) 차륜의 직경을 작게 한다. 현 KTX의 차륜의 직경은 920mm이지만 차세대 고속전철용 대차의 차륜 직경은 860mm로서 직경 60mm가 작기 때문에 질량을 많이 줄일 수 있다.
- 4) 차축 양단에서 베어링을 싸고 있는 축상의 재질을 일반 주강 재질에서 알루미늄 합금 재질의 단조방식으로 변경하여 스프링하 질량을 줄이도록 한다.

한편, 하중의 감소도 중요하지만, 400km/h를 주행하면서 고려해야 할 사항이 또 있다. 이것은 고속 회전 및 주행에 따른 질량 불균형을 최소화하기 위한 최적 설계이다. 대차에는 회전체가 많이 있는데 구동모터, 감속기어, 기어커플링, 차륜, 차축, 베어링, 제동디스크 등이 모두 고속의 회전체이다. 고속주행에 따른 레일과 윤축 사이 및 대차와 차체에서 발생하는 관성모멘트의 영향 또한 주요한 고려사항이다.

안전 관련 및 기타 대차기술

차세대 고속전철 대차에는 다른 열차들과 마찬가지로 제동장치가 적용되어 있으며, 이 제동장치는 차량의 안전에 큰 영향을 주고 있으나, 본 절에서는 제동장치를 제외하고 대차와 관련된 안전에 관한 기술들과 기타 대차 관련 기술에 대해 기술하고자 한다.

차량 속도가 증가하면 어느 속도 이상에서 대차

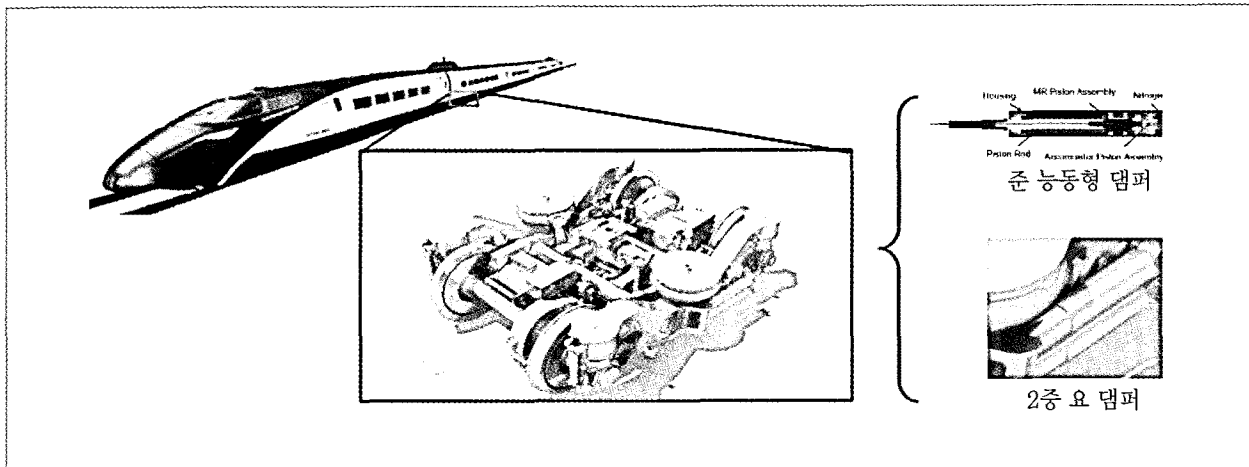


그림 3 차세대 고속전철용 동력대차

사행동(뱀이 움직이는 것처럼 대차가 좌우로 흔들리는 현상)이 발생되는데, 이 현상을 제거하기 위하여 많은 기술들이 적용되지만 그중에 가장 큰 영향을 미치는 것은 대차와 차체의 양 측면에 설치되는 요 댐퍼(Yaw damper)이다.

만약, 주행 중에 이 부품이 작동하지 않거나 성능이 저하되면 대차는 고속에서 대차 사행동이 발생되어 더 이상 고속 상태를 유지하지 못하고 속도를 낮추어야 할 것이다. 일반적으로 차량 운행 전에 정비기지에서 이러한 주요 부품을 예방점검을 실시하여 운행 중에 사행동과 같은 문제가 발생되지 않도록 하지만, 더 높은 안전성을 확보하기 위해서 차세대 고속전철용 대차에는 2중 요 댐퍼가 적용된다.

만약, 운행 중 하나가 성능을 발휘하지 못해도 나머지 하나가 성능을 유지하고 있기 때문에 차량의 속도를 정상적으로 유지하면서 운행할 수 있을 것이다.

한편, 철도차량에 있어서 차륜과 대차 사이에는 1차 현가장치, 그리고 대차와 차량 사이에 2차 현가장치를 설치하며 윤축 사이의 거리 등을 조절하여 직선에서의 주행안전성, 곡선에서의 추종성, 상하/좌우/길이/롤/피치/요 방향의 진동가속도 최소화 및 승차감 향상, 차륜의 마모 저감 등이 고려된다. 이 중 차량 주행 시 발생하는 좌우 방향의 승차감은 외부 환경 변화에 대해 민감하게 반응하게 되는데 외부 환경이라는 것이 일정하지 않고 선로의 불규칙 정도, 터널의 진/출입, 반대차량과의 교행, 선로 상태의 차이, 차량 편성에서의 위치 등으로 인하여 매우 다양하게 변화하기 때문에 이로 인하

여 승객의 좌우방향 승차감이 저해된다. 대차의 현가장치는 이러한 흔들림을 빨리 제거하여 승객이 불편한 승차감을 갖지 않도록 해줘야 하며, 이를 위해 댐퍼가 적용된다. 기존 차량에는 댐핑계수가 고정되어 있는 수동형 댐퍼가 적용되어 있어 다양한 환경변화에 따른 차체의 좌우 흔들림에 대응할 수 없는 상황인 반면, 차세대 고속전철용 대차에는 차체의 좌우 흔들림 정도 변화에 따라 감쇠량이 자동으로 조정되는 준 능동형 댐퍼(Semi-Active Damper)가 적용되어 고속주행 시에는 물론 위에서 언급한 여러 가지 외부 환경의 변화에도 승객의 승차감을 최적으로 유지될 수 있도록 할 예정이다.

대차는 100% 3D 모델링을 통해 이루어지며, 개발/설계/구매/제작/조립/시험/운영/유지보수/폐기에 이르는 모든 정보를 일괄 관리하는 PLM(Product Lifecycle Management)의 기술이 적용된다. 대차의 모든 물리적 정보는 제작 이전에 확보하여 동특성 해석 시뮬레이션, 대차프레임 정하중/피로하중 해석 및 주파수 해석 등에 이용된다.

대차의 2차 현가장치에는 승객의 승차감 향상을 위해 강성이 작은 공기스프링이 적용되어 차량의 롤모션이 크게 되므로 이를 저감하기 위한 안티롤 시스템이 적용된다.

차륜 마모 및 소음 저감을 위한 도유 시스템이 적용된다.

400km/h 주행에 이상이 없는 경량화된 차축 베어링이 적용되며, 윤축 끝단에는 접지 장치, 속도 감지 장치, 진동 감지 장치 등이 부착된다.