

| 융합카페 |

진공 열차(Vacuum Tube Train)

주장헌

내용들

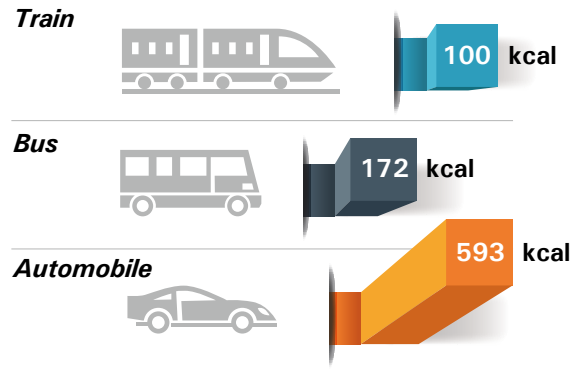
- 서론
- 진공튜브 열차의 역사
- 초고속 진공 열차의 기술적 문제들
- 문학작품 속의 진공 튜브 열차
- 참고문헌

서론

아주 오래 전 TV에서 방영되던 은하철도 999라는 만화 영화가 있었는데 엄마를 찾아 철로도 놓여 있지 않은 우주 공간을 움직이는 기차를 타고 여행하는 철이가 생각난다. 철로 위를 달리는 기차는 여러 가지 이유로 약 500 km/h 정도의 속도가 지상에서 구현할 수 있는 한 계인데 그 이유는 실질적으로 500 km/h 이상의 속도를 구현하는데 있어서는 다음과 같은 몇 가지 중요한 기술적 제약들이 존재하기 때문이다.

- 열차 속도의 여섯 제곱에 비례하는 공력 소음이 발생하며 500 km/h 이상에서는 자기 부상식 철도의 공력 소음이 기존 고속철도보다 더 크다.
- 열차 속도의 제곱에 비례하는 공기 저항으로 인하여 시속 300 km/h 이상에서는 공기저항이 주행저항의 80% 이상을 차지한다
- 열차 속도의 세제곱에 비례하는 에너지 또는 전력이 필요하다.

- 공기저항, 터널 내 압력 변동 및 미기압파(micro-pressure wave) 저감을 위해 운행 속도가 증가될수록 터널 단면적이 증가되어야 한다.



[Fig. 1] 한 사람을 1km 이송하는 데 소요되는 운송 수단별 에너지 필요량



<저자 약력>

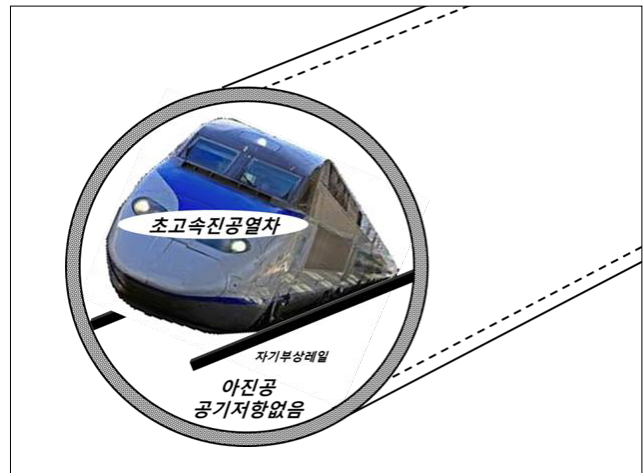
주장헌 박사는 1996년 연세대학교에서 물리학 박사학위를 받고 에드워드 코리아주식회사에 입사하여 현재까지 근무하고 있으며 2005년 제 1회 반도체 기술 대상 산업자원부 장관상을 수상하였고 저서로 <진공기술 실무>와 <진공 이해하기>가 있다. (jh.joo@edwardsvacuum.com)

그러나 어릴 때 TV에서 보았던 은하철도 999처럼 공기가 없는(진공 상태인) 우주 같은 환경을 만들 수 있다면 이런 기술적인 문제들을 해결하고 빠른 속도로 대륙에서 대륙으로 이동하는 것이 가능해진다. 여기서는 이처럼 진공 환경 속에서 이동 가능한 초고속 열차를 지상에서 구현하기 위해 필요한 진공 기술들을 간략하게 살펴 보도록 하자.

진공 튜브 열차의 역사

배기된 튜브와 자기 부상 기술을 이용한 Vactrain의 현대식 개념은 미국 엔지니어인 Robert Goddard - 대학생들과 함께 상세하게 설계한 시작품 - 에 의해 1910년대에 연구되었다. 그는 보스톤에서 뉴욕 간을 평균 속도 1000mph(1600km/h)로 12분에 갈 수 있게 설계하였는데 생전에는 발표되지 않았고 1945년 Goddard가 사망한 직후에 발견되어 그의 부인이 특허를 등록하였다.

진공열차(vactrain)가 언론의 조명을 받기 시작한 것은 RAND사 Robert M. Salter가 1972년과 1978년에 많은 노력을 쏟아 부은 엔지니어링 논문들을 시리즈로 출간한 시점부터이다. LA Times에 Robert Salter의 인터뷰 기사가 1972년 6월 11일에 실렸는데 그 당시 가용한 기술들을 이용하여 미국 정부가 tube shuttle system을 건설할 수 있다는 것을 상세히 설명하였지만 자기 부상 기술이 충분히 개발되어 있지 않아서 그는 강철 바퀴를 제안하였다. 튜브로 연결되는 chamber의 문(door)을 열 수 있고 튜브 내에서 열차를 가속시킬 수 있는 충분한 공기가 유입될 수 있게 설계되었으며 출발하는 열차를 중력(gravity)을 이용하여 순항 속도까지 가속시킬 수 있다. 순항 속력으로 출발한 후 도착하는 열차는 열차 앞쪽에서 희박 공기(rarefied air)를 압축하여 감속하게 되고, 역(station)에서 펌프들이 열차 끝단 주변에서 공기가 빠져 나가거나 마찰에 의해 생기는 손실을 보충함으로 열차 자체는 모터가 필요하지 않다. 개조된 중력 열차와 대기압 철도 추진을 조합하여 에너지 소비가 적어지지만 해당 시스템이 음속이라는 한계에 처하게 됨으로 대륙간(transcontinental) 거리보다는 수 백에서 수 천 마일 또는 킬로미터의 경로가 제안되었다.



[Fig. 2] 초고속 진공 열차 개념도

열차는 연결자가 필요없어 각 객차는 직접적으로 용접, 볼트 체결하거나 다른 방식으로 단단하게 연결될 수 있어 강철의 연성 한계 이상으로 더 많이 굽혀지지 않아도 되는 경로를 쉽게 건설할 수 있다. 철로의 끝에서 열차는 귀환 튜브(return tube)로 연결되는 공간을 통해 다시 철로에 진입하게 되며 철로는 내부 배기된 튜브와 외부 터널로 구성된다.

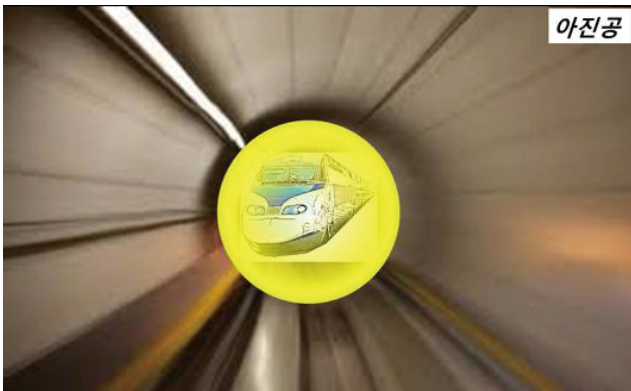
Salter는 이 시스템이 비행(aviation)과 표면 운송에 의해 환경에 가해지는 문제를 어떻게 줄여 주는지 지적하였다. 그는 지하 고속 운반(tube shuttle)을 자국의 "다음 단계의 논리적 접근"이라고 불렀다. 그러나 이 계획은 다음 단계로 넘어가지는 못 했다.

이런 보고서들이 출판될 시기에는 일본이 몇 년 동안 탄환 열차(bullet train) 전시관을 운영하고 있었고 자기 부상 열차 연구가 큰 관심을 끌고 있는 기술이었기 때문에 국가의 위신이 문제가 되었다. 미국의 Planetran은 미국 내에 대륙간 지하철 설비를 만들어 Los Angeles에서 New York까지 한 시간에 통근할 수 있게 하였다. 이 터널은 단단한 암석층에 수 백 피트 깊이에 건설되었으며 건설은 레이저를 이용하여 정렬하고 점화가 되는 암석층을 텅스텐 탐침으로 녹여 진행되었다. 터널은 걸림(drag)을 최소화하기 위해 부분 진공 상태를 유지하였기 때문에 한 번 여행하는데 평균 3000 mph(4,800 km/h)의 속력으로 진행되었으면 승객들은 중력의 1.4배 정도의 힘을 감당할 수 있도록 특수 제작된 객실이 필요했다. 그러나 엄청난 건설 비용(1조 달

리)이 Salter의 제안이 구현되지 못 한 첫 번째 이유이다.

1970년대 후반과 1980년 대 초에 실험적인 독일 Transrapid 자기 부상 열차 발명에 차입 자본이 투자되고 Concorde SST가 비행할 수 있는 것으로 검증된 68,000 feet(21,000 m) 고도 압력으로 대규모 지하 터널을 감압하여 운영하기 위해 Swissmetro가 제안되었다.

1980년대, Channel Tunnel 프로젝트의 설립자이자 회장인 Frank P. Davidon과 일본 엔지니어 Yoshihiro Kyotani는 대양 바닥 위해 케이블로 고정된 튜브를 띄우는 방식으로 대양 횡단 문제에 접근하였다. 이송 튜브(transit tube)는 난류 문제(water turbulence)를 피하기 위해 최소한 해양 표면 아래 1000 feet(300 m)에 설치된다.



[Fig. 3] 초고속 진공 열차가 진공 터널을 운행하는 상상도

1960년대 초전도 자기 부상의 공동 발명자인 James Powell 박사는 2001년부터 우주 발진(space launch) - 이론적으로 현재의 로켓 기술에 비해 두 지수 정도 적은 비용으로 - 을 위해 자기 부상 Vactrain 개념을 연구하여 왔는데, StarTram의 제안에 의하면 운반기구를 가속 터널 내부에서 8,900 mph(14,300 km/h)에서 19,600 mph(31,500 km/h)까지 속력을 올릴 수 있어 암석을 관통하는 것보다 더 적은 비용으로 남극 대륙(Antarctica)의 얼음 판을 관통할 수 있을 것으로 생각되었다.

중국의 Southwest Jiaotong 대학의 연구자들을 1000 km/h(620 mph)의 속력을 갖는 Vactrain을 개발하고 있다. 그들은 이 기술이 10년 내에 실제 구현될 수 있다고 말하고 있다.

초고속 진공 열차의 기술적 문제들

초고속 진공 열차를 구현하기 위해서는 다음과 같은 것들이 필요하다. 특히 초고속 진공 열차를 구현하고자 하는 목적이 원유 등의 화석 에너지 고갈에 대비하고 운송 비용을 최소화하고자 하는 것이므로 운송 비용의 최소화와 함께 공기 저항 최소화를 위한 진공 형성(0.1 ~ 0.5 기압)에 필요한 에너지 사용량을 최소화한다는 관점에서 고려되어야 한다.

1. 진공 터널(vacuum tube 또는 tunnel)

- 진공 터널은 초고속 진공 열차가 지날 수 있을 정도의 직경을 가져야 하며 동시에 막대한 비용이 소요될 것으로 예상되는 진공 터널 공사 비용을 줄이기 위해 최적화되어야 하는데 기존의 철도 터널 기술에 근거하면 현재 최대 5 m, 터널의 길이는 1000 ~ 1500 km 정도가 고려되고 있다.
- 진공 터널 재질은 두께가 20 mm 정도인 순수한 강철 재질, 강철과 콘크리트를 같이 사용하는 혼합 재질, 강철 뼈대(rib)가 포함된 콘크리트 재질이 고려되고 있다.

2. 진공 터널의 배기

진공 터널을 만든 후 그 속을 운행하는 열차의 속도가 초고속이 되기 위해서는 공기 저항을 줄일 수 있는 환경, 즉 진공 상태를 만들어야 한다. 터널 내부를 진공 상태로 만들기 위해서는 (1) 대략 1 km 또는 2 km마다 진공 펌프가 설치되어야 하며, (2) 만일의 사태에 대비하기 위해서 약 5 ~ 10 km 마다 각 구간을 차단할 수 있는 진공 차단 밸브가 설치되어야 하며, (3) 일부 연구자들은 12,000 l/s(=720,000 l/min \approx 43,200 m³/h) 정도 용량의 진공 펌프가 필요할 것이라고 이야기되고 있다. 그러나 진공 펌프 배기 용량 문제는 진공 기술을 충분히 이해하지 못 한 이들이 제시한 것이고 실제로는 이보다 더 큰 용량이 필요로 하게 될 것이다.

3. 진공 터널 내부를 진공 상태로 유지하기 위한 어려움

초고속 진공 열차를 구현하기 위해서는 크고 긴 진공

터널을 만들어야 하지만, 이것이 현실적으로 쉬운 일은 아니다. 그 이유는 기계, 토목 측면에서 생각하는 진공 터널과 진공 기술 측면에서 고려되어야 할 진공 터널은 매우 다르기 때문인데 여기서 몇 가지 진공 기술 측면에서의 어려움을 살펴 보면 다음과 같다.

- 진공 터널은 직경과 길이가 매우 크기 때문에 구간-구간으로 나누어 건설할 필요가 있고, 일정한 길이마다 차단 밸브가 장착되어 있어야 하기 때문에 많은 연결부위가 생기게 되는데 이 연결 부위를 통해 터널 외부 공기가 터널 내부로 유입되게 되며 아진공 상태를 유지할 수가 없다. 따라서 진공 터널 자체에 밀봉(air-tightness) 상태 유지가 매우 중요하다.
- 진공 터널 내부에서 발생하는 열의 배출과 온도 유지 문제로서 초고속 열차를 운행하기 위해 필요한 전기 장치, 공력에 의한 열 발생, 자기 부상 열차에서의 열, 지상 설치 구간에서 태양빛에 의한 가열 등으로 인하여 진공 터널 내부의 온도는 계속 상승하게 된다. 이런 이유로 인한 온도 상승을 억제하기 위한 냉각 시스템이 필요하다. 아울러 이러한 온도 상승은 진공 터널 내부의 압력을 상승(진공도를 나쁘게)시키는 문제가 있다.
- 진공 기술에 의하면 진공 상태가 되면(압력이 낮아지면) 진공 터널 내부에 사용된 물질들, 진공 터널 재질 등에서 물질이 기화되는 문제, 즉 탈가스(outgassing) 문제가 발생하게 된다. 이는 진공 터널 내부의 압력을 상승시키는 요인이 된다.
- 초고속 진공 열차는 아진공 상태를 유지하는 터널 속으로 열차가 운행되게 되며 이 열차 내부에는 승객이 탑승하게 된다. 따라서 열차 내부의 승객의 안전을 확보하기 위해 열차 내부에서 진공 상태(압력이 낮은 상태)인 진공 터널 간에 기체의 흐름이 발생하지 않도록 밀봉(air tightness, sealing)이 완벽하게 이루어져야 한다. 열차에 비해 직경이 크고 길이가 훨씬 큰 진공 터널과 열차 내부 체적을 비교하면 열차 내부 체적은 거의 무시할 정도이기 때문에 만일에 열차 밀봉 기능에 문제가 생기면 승객들이 질식사할 수 있다.
- 초고속 진공 자기 부상 열차 내부의 탑승객들의 안전을 위해 진공 터널 내부의 청결 유지가 매우 중요하며 이를 위해서는 진공 터널을 진공 상태로 만들

고 유지하는데 사용될 기계식 진공 펌프는 건식 진공 펌프(dry vacuum pump)를 사용하여야 한다.

4. 공력학적 저항(aerodynamic drag)이 진공 튜브 열차에 미치는 영향

- 진공 튜브 내부에서 운행되는 열차는 공기 압력, 열차 속도와 모양, blockage ratio의 함수인 공력학적 저항을 받게 된다.
- 진공 튜브 직경이 커지면 터널 건설비의 증가와 함께 진공 형성/유지에 필요한 비용에도 관계된다. 따라서 직경이 5 m 이상으로 증가되는 것은 바람직하지 않다.
- Blockage ratio가 0.25보다 작은 경우에는 진공 튜브 내부의 공기 압력이 0.1 atm까지 낮아져야만 진공 튜브 열차의 운행 속도가 아음속(subsonic), 즉 1120 ~ 1200 km/h이 된다.

Vactrain(또는 Vacuum Tube Train)은 미래의 고속 철도 운송을 위한 아직 만들어지지 않은 설계로 제안되고 있다. 이것은 배기된(공기가 없는) 또는 부분적으로 배기된 튜브나 터널을 통해 자기 부상 철길이다. 공기 저항이 없으면 Vactrain은 적은 전력을 사용하면서도 해수면과 표준조건에서 음속의 5~6배 정도, 즉 4000~5000 mph(6400 ~ 8000 km/h)의 매우 빠른 속력으로 움직일 수 있다. 이 기술은 지역적인 네트워크의 개발을 위해 현재 조사되고 있음에도 불구하고, 옹호자(지지자)들은 전세계적 네트워크를 만들 수 있는 대륙간 경로용 vactrain을 설치할 것은 제안하여 왔다.



[Fig. 4] 여객수송용 모듈 상상도

이론적으로, Vactrain 터널들은 대양 아래를 지날 수 있을 정도로 깊게 건설할 수 있기 때문에 매우 빠른 대륙간 여행이 가능하다. Vactrain은 중력을 이용하여 가속을 촉진할 수 있다. 만일 이러한 기차가 예측하는 것

만큼 빠르게 간다면, 런던과 뉴욕 사이 간의 여행이 1 시간이 걸리지 않고 세상에서 가장 빠른 대중 교통 수단인 비행기를 능가하게 된다. 배기된 튜브를 관통하는 여행은 초음속 비행기로 인해 생기는 음속 폭음(sonic boom)을 발생시키지 않고도 초음속이 가능해진다. 이 기차들은 소음 발생없이 해수면에서 음속보다 더 빠르게 움직일 수 있다.

그러나, 터널을 뚫는 것과 다른 기술들에서의 주요 진전없이 Vactrain은 매우 비용이 많이 드는 것이다. 부분적인 진공 상태인 높은 위치의 콘크리트 튜브 같은 대안이 비용 절감을 위해 제안되어 왔다.

문학 작품 속의 진공 튜브 열차

Vactrain은 Arthur C. Clarke(Rescue party, 1946), Ray Bradbury(Fahrenheit 451, 1950), Peter F. Haminton(The Night's Dawn Trilogy), Joe Haldeman(그의 소설 Buying Time), Larry Niven(A World Out of Time), Robert A. Heinlein(Friday), Jerry Yulsman(Elleander Moring) 그리고 Jasper Fforde(the Thursday Next 소설) 등의 공상 과학 소설에서 자주 나온다. Flash Gordon(1947)과 영화 Logan's Run(1976)는 비슷한 개념의 운반 열차를 묘사하고 있다. Space : 1999 TV 시리즈는 달진공열차(Lunar Vactrain)를 묘사하고 있다. 23세기 샌프란시스코는 Golden Gate Bridge를 넘어 Star Trek으로 확장될 것이다(The Motion Picture 1979). 초창기 Gene Roddenberry 텔레비전은 Genesis II 와 Planet Earth를 통해 이런 이송 시스템을 묘사하였다.

앞에 설명된 Vactrain과 일치하는 가상 열차가 미국 가수 및 작가인 Donald Fagen이 1982년에 발표된 노래 "I.G.Y(What a Beautiful World)"에서 언급되고 있다. 이 노래에는 다음과 같은 서정시가 담겨 있다. "열차 위에 다이아몬드와 보석이 있고 열차로 해저를 지나/뉴욕에서 파리까지 90분에 간다."

- 술연구원 초소속열차연구실, (주)넥스키이엔에스, 한국철도학회 논문집 제13권 제1호 2010년, pp. 44-50
- [3] 남성원, 튜브열차 구조물의 진공 펌프 용량에 관한 파라메타 연구 (Parametric study on the capacity of vacuum pump for tube structure), 한국철도기술연구원, 한국철도학회논문집, 제13권 제5호 2010년, pp. 516-520
 - [4] 박주남, 김이현, 남성원, 초고속 열차 시스템을 위한 튜브 구조물의 기밀성 평가 : II. 시스템 실험 및 파라미터 해석(Air-tightness evaluation of tube structures for super-speed tube railway systems : II. System test and parametric analysis), 한국철도기술연구원, 한국철도학회논문집, 제14권 제2호, 2011, pp. 151-159
 - [5] Daryl Oster, Masayuki Kumdat, and Yaoping Zhang, Evacuated tube transport technologies(ET3)TM : a maximum value global transportation network for passengers and cargo, Journal of Modern Transportation, Vol. 19, No. 1, March 2011, pp. 42-50
 - [6] Yaoping Zhang, Daryl Oster, Masayuki Kumada, Jianye Yu, and Shengshan Li, Key vacuum technology issues to be solved in evacuated tube transportation, Journal of Modern Transportation, Vol. 19, No. 2, June 2011, pp. 110-113
 - [7] Yaoping Zhang, Numerical simulation and analysis of aerodynamic drag on a subsonic train in evacuated tube transportation, Journal of Modern Transportation, Vol. 20, No. 1, March 2012, pp. 44-48
 - [8] Xuyong Chen, Lifeng Zhao, Jiaqing Ma, and Yuansen Liu, Aerodynamic simulation of evacuated tube maglev trains with different streamlined designs, Journal of Modern Transportation, Vol. 20, No. 2, June 2012, pp. 115-120

References

- [1] 박주남, 여인호, 초고속 진공 튜브 시스템의 기밀성 연구(Air tightness of vacuum tube high-speed railway system), 한국철도기술연구원
- [2] 권혁빈, 강부병, 김병운, 이두환, 정현주, 진공 튜브 내 초고속 열차의 공기저항 파라미터 연구 I(Parametric study on the aerodynamic drag of ultra high-speed train in evacuated tube Part I), 한국철도기