

하이퍼루프는 제5의 교통모드가 될 수 있을까?



권혁빈 한국교통대학교 교수
(hbkwon@ut.ac.kr)

1 서론

하이퍼루프(Hyperloop)는 2013년 발표된 초고속 운송기술로서 진공에 가깝게 기압을 낮춘 튜브 내부를 운송체가 음속에 가까운 속도로 이동하는 시스템이다. 운송체는 압축기를 장착함으로써 단순한 구조의 튜브 내에서 추진과 부상을 구현할 수 있으며, 운행 속도를 음속에 가깝게 높일 수 있다.

하이퍼루프가 발표된 지 3년이 지난 지금 많은 사람들이 하이퍼루프에 기대와 희망을 걸게 되었지만 한편으로는 의구심을 갖고 있으며, 이 중 일부는 적극적으로 우려를 표하기도 한다. 논란이 지속되며 쉽게 정리되지 않는 이유는 어느 누구도 다음 질문에 대한 명확한 대답을 갖고 있지 못하기 때문일 것이다; 하이퍼루프는 실현가능한 기술인가? 하이퍼루프는 현대교통의 일정부분을 담당할 만큼 경쟁력을 갖춘 기술이 될 수 있을까? 즉, 하이퍼루프는 과연 제 5의 교통모드가 될 수 있을까?

그 대답을 찾기 위해 본고에서는 하이퍼루프의 탄생 과정 및 하이퍼루프가 표방하는 기술적 목표와 주요 기술 개념을 살펴보았다. 또한, 하이퍼루프의 설계 시 도출된 기술적 어려움과 제시된 해결 방안의 타당성을 분석함으로써 하이퍼루프의 실현가능성을 가늠하고, 보다 경쟁력 있는 기술이 되기 위한 방안을 모색해 보았다.

2 하이퍼루프의 탄생

미국의 사업가이자 발명가인 일론 머스크(Elon Musk)는 2012년 7월 캘리포니아 산타모니카에서 개최된 한 행사에서 5번째 교통 모드에 대한 개념을 구상하고 있다고 밝혔고, 이듬해인 2013년 8월 하이퍼루프 알파(Hyperloop Alpha)[1]라고 명명

된 문서를 통하여 새로운 교통 모드인 하이퍼루프의 첫 번째 설계 결과물을 세상에 공개하였다.

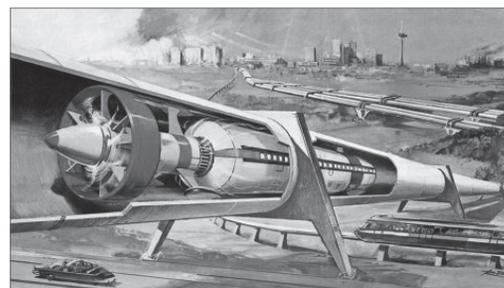
뒤이어 일론 머스크가 CEO로 있는 SpaceX는 2015년 하이퍼루프의 기술 개발을 촉진하기 위해 대학생과 일반인을 대상으로 공개 경진대회를 개최하겠다고 발표하였으며, 2016년 1월에 Texas A&M 대학에서 개최된 디자인 위크(Design week) 행사에서는 20개국에서 1000여명의 학생이 참가하여 각자 자신들의 운송체(Pod) 설계 아이디어를 선보였다. 이 중 선발될 몇몇 팀들은 2017년 1월에 있을 경쟁 위크(Competition week) 행사에 참가하여 주최 측이 마련한 1마일의 시험선로 위에서 자신들의 운송체를 실제로 주행시켜볼 수 있는 기회를 얻게 된다.

또한, 하이퍼루프의 개발을 목표로 하는 스타트업이 2015년에만 2개가 생겨났고, 그 중 하나인 Hyperloop one이 2016년 5월 11일에 공개한 추진체 실외 공개시험의 영상은 우리나라를 비롯한 전 세계에 방영되어 전문가들뿐만 아니라 광범위한 대중의 관심을 이끌어내기도 했다[2].

이처럼 하이퍼루프는 짧은 시간에 세계적인 관심을 이끄는 데 성공하였으며, 무엇보다 세계는 수상(선박), 철도, 도로, 항공에 이은 새로운 교통 모드의 탄생 가능성에 주목하게 되었다. 또한 일론 머스크는 자신의 아이디어를 오픈 소스로 공개하여 누구나 하이퍼루프의 개발에 참여할 수 있다고 공언함으로써 조지 스티븐슨(George Stephenson), 칼 벤츠(Karl Benz), 라이트 형제(Wright brothers) 등을 이어 인류문명사에 영원히 기록될 새로운 교통 모드의 발명자에 도전할 수 있는 기회를 세상의 모든 사람들에게 열어주었다.

하지만 일각에서는 우려와 비판의 목소리가 제기되고 있고 이들은 나름의 근거를 갖고 있다. 아

진공튜브를 이용한 초고속 교통시스템은 오래 전부터 구상되어 왔지만 공기밀도를 낮추어 운송체의 공기저항을 저감한다는 비교적 간단한 과학적 원리를 상업운영이 가능한 교통시스템으로 구현하기에는 그리 간단치 않은 수많은 기술적 난제들이 존재한다. 하이퍼루프 이전까지 발표된 수많은 아진공튜브를 이용한 새로운 교통시스템의 구상이나 실험적 성과들은 실은 앞서 말한 과학적 원리의 동어반복적 선언이나 단순한 재확인에 불과한 경우가 많았으며, 실현을 위한 문제점들이 해결되지 않은 불완전한 기술인 경우가 대부분이었다[3,4,5].



[그림 1] Turbine-Powered Train Tubes [5]

3 하이퍼루프 알파 컨셉

하이퍼루프는 과연 이전의 유사한 기술적 구상과 어떤 차이점을 가지며, 과연 얼마나 발전된 개념일까? 하이퍼루프 알파 문서[1]를 중심으로 최초의 하이퍼루프 설계물인 하이퍼루프 알파 컨셉에 대해 살펴보자.

3.1 배경

일론 머스크는 자신의 하이퍼루프에 대한 구상이 캘리포니아 고속철도 사업(California High-Speed Rail Project)에 대한 실망감에서 시작되

있다고 밝히고 있다. 캘리포니아 고속철도 사업은 미국 서부해안의 양대 도시인 샌프란시스코와 로스앤젤레스 등을 잇는 총 연장 1,300km, 최고속도 350km/h의 고속철도를 건설하는 사업으로서 2029년 1단계 개통을 목표로 진행 중이다.



[그림 2] Route of California High-speed Rail

과거 프랑스, 독일, 일본 등 고속철도 기술 선도국에 국한되었던 고속철도의 건설이 점차 전 유럽과 중국으로 확대되며 세계 고속철도 시장이 폭발적으로 성장하고 있는 가운데 유사한 국토 규모를 가진 미국의 고속철도 건설이 오히려 늦은 감이 있는 지금의 시점에서 일론 머스크는 왜 캘리포니아 고속철도 사업의 추진 과정을 보며 실망감을 느껴야 했을까?

사실 캘리포니아 지역은 미국 과학기술의 상징과 같은 곳이다. 1936년에 설립 이후 로켓기술 개발을 시작으로 최초의 인류 달탐사를 성공시켜 냉전시대의 우주개발 경쟁에서 미국에 승리를 안긴 주역인 제트추진연구소(JPL)가 로스앤젤레스 근교 패서디나에 있으며, 구글, 애플, 마이크로소프트, 인텔 등이 위치한 세계 정보통신기술의 중심인 실리콘벨리가 샌프란시스코 근교 산호세에 위치하고 있다. 또한, 일론 머스크 자신은 화성 탐사를 목표로 하고 있는 스페이스엑스(SpaceX)의

CEO이자 전기자동차 개발을 가장 공격적으로 추진하고 있는 테슬라(Tesla)의 CEO이기도 하다.

이처럼 세상의 기술혁신을 직접 주도하고 있는 그의 관점에서 최첨단 과학의 산실인 캘리포니아에서 추진되는 고속철도는 그의 표현에 따르면 '너무 비싸면서 너무 느린' 교통시스템인지도 모른다. 어쩌면 그에게만 국한된 생각이 아닐 수도 있다. 항공교통이 보편화된 미국의 대도시간 이동에 고속철도는 상대적으로 '고속'이 아닌 교통시스템이며, 비용 면에서는 자동차가 훨씬 좋은 대안일 수 있기 때문이다.

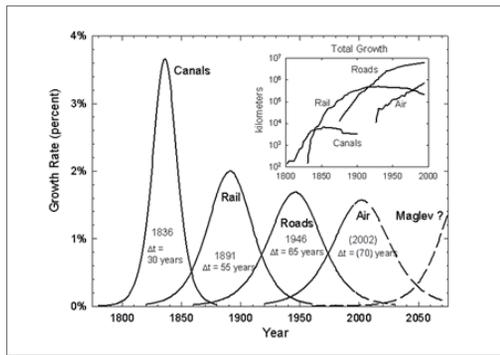
물론 캘리포니아 고속철도 사업을 추진하는 당사자들은 그의 실망감에 동의하지 않을지도 모르겠지만, 어쨌든 하이퍼루프는 항공기보다 느리면서 자동차보다 비싼 고속철도의 도입에 대한 실망감과 그에 대한 대안을 찾고자 하는 노력에서부터 시작되었다.

3.2 요구사항

항공기나 자동차를 대체하기 위한 추진되는 캘리포니아 고속철도. 그러나 이마저도 실망스럽다면 이를 대신할 교통시스템은 무엇이어야 할까? 보다 저렴한 항공기? 혹은 보다 빠른 자동차나 고속철도? 하이퍼루프는 이에 대해 새로운 교통모드로서 제시되는 대안이다.

교통모드란 운송체를 지지하여 이동을 실현할 수 있게 해주는 교통시스템의 본질적인 요소로서 현대의 주요 교통시스템들은 교통모드로 이용하는 매질에 따라 크게 수상교통(물), 항공교통(공기) 및 육상교통(도로, 철도)으로 나눌 수 있다. 현대의 교통모드는 산업혁명의 시기 운하를 이용한 수상교통이 가장 먼저 발전하였고, 이후 철도, 도로 및 항공 교통이 각각 일정한 시차를 두고 탄생,

발전하였으며[그림 3], 현재는 각각의 교통모드들이 때로는 경쟁하고 때로는 서로를 보완하며 사회가 요구하는 교통 수요를 담당하고 있다.



[그림 3] Smoothed historical rates of growth of the major components of the U.S. transport infrastructure.[6]

현대의 교통은 앞서 말한 4개의 교통모드로 크게 나뉘는 하지만 각각의 교통모드 내에서도 기술의 혁신에 의해 새로운 교통시스템이 탄생하기도 한다. 예를 들어 고속철도시스템은 운행속도의 비약적인 증대에 힘입어 종래의 철도교통에서 제공할 수 없는 새로운 효용을 창조함으로써 고속철도를 중심으로 하는 철도의 르네상스를 이끌고 있다. 또한, 항공교통에서는 지난 수십 년간 대륙 간 여행시간을 획기적으로 줄여줄 초음속 여객기 기술의 완성을 애타게 기대하고 있으며, 도로교통에서 활발히 개발 중인 자율주행기술은 전기모터를 이용하는 각종 형태의 전기자동차와 함께 기존의 도로교통을 크게 바꾸어 놓을 뿐만 아니라, 사회 전반에도 매우 큰 변화를 가져다줄 것으로 예상된다.

캘리포니아 고속철도에 대한 대안을 기존의 교통모드에서 찾을 수 있을지 아니면 완전히 새로운 교통모드만이 이를 가능하게 할 것인지를 판단하기 위해서는 먼저 대안이 만족하여야 할 요구사항을 설정하고 이를 기준으로 살펴보아야 할 것이다.

아래는 알파 문서에서 제시하는 대안 교통시스템의 요구사항이다.

- (고속철도에 비해) 더 안전할 것
- (고속철도에 비해) 더 빠를 것
- (고속철도에 비해) 더 저렴할 것
- (고속철도에 비해) 더 편리할 것
- 기상조건의 영향을 받지 않을 것
- 경로상의 물체에 지장을 주지 않을 것
- 지속가능한 자가충전
- 내진성

대안교통 모색의 배경이 고속철도에 대한 실망감이므로 이보다 빠르고 저렴한 것은 당연한 요구사항일 것이고, 이를 위해 교통시스템의 기본적인 요구사항인 안전성과 편리성이 저하되는 일은 없어야 할 것이다.

기상조건의 영향을 받지 않는 교통시스템은 승객의 편의나 경제성을 고려할 때 가장 이상적인 시스템이지만 기존의 교통모드들에서는 거의 만족하기 힘든 요구사항이며, 튜브(고가교처럼 설치되는 형식이든, 지하에 터널처럼 건설되는 형식이든)처럼 외부와 물리적으로 차단되어야 달성될 수 있다. 따라서, 하이퍼루프는 이를 만족시킬 수 있는 거의 유일한 대안일 것이다.

고가교 혹은 터널 형식의 튜브구조는 경로상의 물체에 지장을 주지 않도록 건설되기에 적합한 구조이다. 통상적으로 도로나 철도가 이러한 특성을 갖기 위해서는 지면에 건설되는 것에 비해 훨씬 더 많은 건설비를 필요로 한다. 반면, 하이퍼루프는 상대적으로 작은 운송체를 이용하기 때문에 비교적 저렴한 건설 비용으로 이러한 조건을 만족할 수 있다.

지속가능한 자가충전 역시 바람직한 요구사항이긴 하지만, 이것은 교통시스템에 내재되는 기술이

라기보다는 신재생 에너지 생산 및 대용량 에너지 저장 기술과의 결합을 통해 달성될 수 있는 요구사항으로 보인다. 그리고 이는 새롭게 제안되는 교통 시스템들에서 빈번하게 발견되는 요소이기도 하다.

내진성의 경우에는 일반적으로도 중요한 요구사항이지만 특히 캘리포니아 지역과 같이 불안정한 지질학적 조건 하에서는 특히 중요한 것으로 예상된다. 항공교통에서는 이착륙시 외에는 지진의 영향이 거의 없지만, 육상교통의 경우에는 이러한 요구사항을 만족하기 쉽지 않으며 내진설계를 구현하기 위해서는 비용의 증가도 수반된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 캘리포니아 고속철도의 대안 교통시스템에 대한 요구사항은 기존의 교통모드에서 달성하기 쉽지 않은 몇몇 항목들을 담고 있다. 물론, 몇몇 요구사항들을 제외하거나 근접하게 달성하는 것으로 요구사항을 수정한다면 현존하는 교통모드 내에서 이를 만족하는 교통시스템의 개발이 가능할 수도 있을지 모른다. 그러나, 현존하는 교통모드들이 이미 수십년의 기간 동안 발전을 거듭하여 기술적 성숙도가 큰 점을 감안할 때 새로운 교통모드를 모색하는 것이 더 가능성이 크다고 할 수 있겠다.

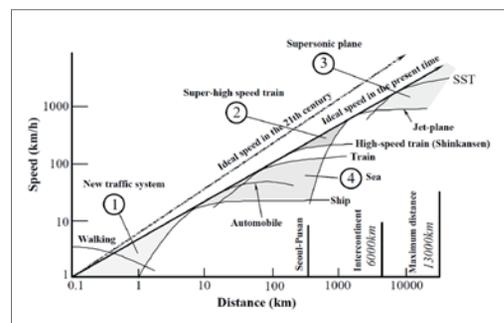
하이퍼루프는 새로운 교통모드의 관점에서 제시되는 고속철도의 대안이다. 튜브 내를 운행하기 때문에 기상조건의 영향을 받지 않고, 외부에 지장을 주지 않는다. 또한 고속철도보다 빠른 속도로 보다 안전하게 운행하여야 하며 건설과 운영에 소모되는 비용을 최소화하여야 기존의 항공기나 고속철도에 비해 저렴한 운임으로 제공할 수 있을 것이다.

3.3 제약 조건

그렇다면 하이퍼루프의 성공은 고속철도나 항

공기의 전면적인 대체를 의미하는가? 알파 문서는 하이퍼루프가 모든 상황에서 최적의 대안은 아니며, 1,500km 이내의 거리에 떨어진 두 도시 간의 대용량 교통에 가장 적절한 해답이며, 그 이상의 거리에서는 초음속 여객기가 최적의 대안이 될 것이라고 예상한다.

이해를 돕기 위해 Bouladon[7]이 분석한 교통수단별 운행속도와 운송거리의 관계를 [그림 4]에 나타내었다. 그림에서 각 교통수단의 운행속도는 일정하지 않고 특정 운송거리 이하에서는 급격히 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 운송거리가 짧아질수록 교통수단에 접근하는 시간과 가감속이 소요되는 시간 등으로 인하여 표정속도가 급격히 줄어들기 때문이다. 따라서, 각 교통수단은 최고속도, 가감속 성능, 접근성 등에 따라 고유의 거리-속도 곡선을 갖게 되는데, 이로 인해 도보, 자동차, 철도, 고속철도, (아음속) 제트여객기, 초음속 여객기(SST)의 순으로 운행속도와 운송거리가 증가하는 모양의 위계(hierarchy)를 이루는 것을 알 수 있다. 또한, 각 운송수단의 그래프에서 최고기울기를 가진 점들을 이으면 하나의 직선이 형성되는데, 이는 운송거리 별 이상적인 운행속도의 추세선으로 볼 수 있으며, 이는 운송거리가 늘어날수록 운행속도도 꾸준히 연속적으로 증가하는 것을 의미한다.



[그림 4] Relationship between speed and distance required for transportation vehicle[8]

이상적인 운행속도는 각 교통수단의 특성곡선과 추세선이 교차하는 특정 운송거리에서만 만족되며, 그림에서 빗금으로 표시된 영역에서는 현실의 교통수단이 이상적인 운행속도를 제공하지 못하는 것을 의미한다. 이중 특히 눈여겨 보아야 할 것은 고속철도와 제트 여객기 사이에 위치한 ②번의 영역으로서 대체로 하이퍼루프가 목표로 하는 운행속도와 운송거리가 이에 해당한다. 또한 ③번 영역은 향후 기술적으로 완성될 초음속 여객기가 담당해야 할 영역으로서 현재는 공백의 구간이다. 따라서, 1,500km의 운송거리를 기준으로 최적의 교통수단을 하이퍼루프와 초음속 여객기를 구분하여 제시하는 것은 Bouladon이 확립한 교통시스템의 위계에 대한 분석에 바탕을 둔 것으로 볼 수 있다.

사실 ③번의 영역은 초음속의 속도 영역으로서 음속돌파에 따른 충격파의 문제 때문에 지상교통으로는 달성이 매우 힘들다. 아진공 튜브를 이용하는 몇몇 구상[3,4]에서는 ②번 영역뿐 아니라 ③번 영역까지 확장이 가능할 것으로 전망했지만 이는 공기역학적인 문제를 간과한 결과로 보인다.

반면 ②번의 영역에서는 지금까지 여러 가지 새로운 교통시스템들이 제기되어 왔다. 그 중 대표적으로 초고속 자기부상열차를 들 수 있는데, 일부 상용화에 성공한 이 기술은 사실 제 5의 교통 모드에 가장 가까운 위치를 점하고 있다고 볼 수도 있다. 그러나, 운행속도의 제곱에 비례하는 공기저항과 이보다 더 급격히 증가하는 공력소음의 문제는 여전히 초고속 자기부상열차의 속도를 제약하는 요인이 되고 있으며, 이에 대한 대안으로 아진공튜브와 자기부상열차 기술을 결합하는 형태의 기술이 제안되기도 하였다[9,10,11,12].

중국에 어떤 교통시스템이 ②번의 영역을 채우

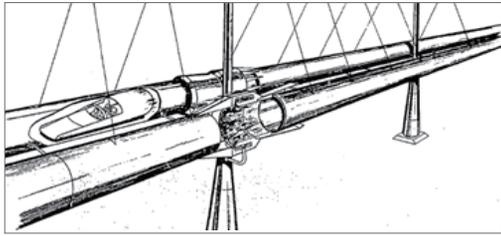
게 될 지는 아직 알 수 없지만, 이 영역에서 제 5의 교통모드가 탄생할 가능성은 매우 높다고 할 수 있다.

3.4 아진공 튜브

하이퍼루프의 운행속도를 고속철도 이상의, 가능하다면 훨씬 더 빠른 '초고속'으로 구현하는 방안을 살펴보자. 하이퍼루프처럼 튜브를 이용하는 교통시스템을 튜브운송시스템[13]이라고 부르며, 저속의 지하물류운송에서부터 초고속의 여객운송까지 다양한 교통수요에 대응하여 연구되고 있는데, 이러한 형태의 운송수단에서는 튜브 내의 공기저항을 고려하는 것이 특히 중요하다.

가장 먼저 생각해볼 수 있는 것은 기존의 캡슐-파이프라인 시스템(capsule-pipeline system)을 확대하는 것이다. 비교적 오래된 이 운송시스템은 파이프라인과 파이프라인의 내경에 근접하는 직경을 가지는 캡슐 형태의 운송체를 이용한다. 공압 펌프(Pneumatic pump)를 이용하여 캡슐 전후에 압력 차이를 발생시켜 추진력을 얻기 때문에 파이프라인과 캡슐은 매우 간단한 구조를 가지며, 제작 및 유지보수가 간편하므로 초기의 전보시스템에 이용되었으며, 현재에는 빌딩 내 현금, 서류 운송이나 아파트 등의 쓰레기 자동 집하 등 비교적 소량의 화물 운송에 이용된다.

이를 확대하여 초고속의 교통시스템으로 구현하기 위해서는 상대적으로 매우 강력한 팬을 이용해서 튜브 내부에 공기를 불어주어야 하는데, 이때 튜브 내의 모든 공기는 운송체의 속도로 이동하게 되며, 이는 흡사 튜브 내의 거대한 공기 기둥이 음속에 가까운 속도로 이동하며 튜브와 마찰을 일으키는 것과 같기 때문에 막대한 에너지가 소모되므로 현실적으로 불가능한 시스템이다.



[그림 5] Fluid-entrained Vehicle System[14]

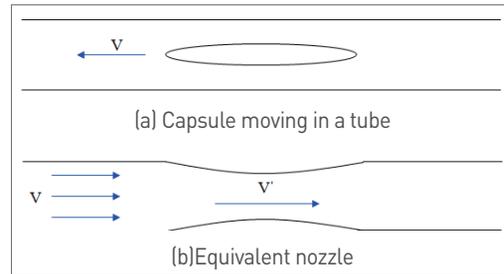
따라서, 튜브 내에서 초고속을 실현하는 방법은 튜브 내의 공기를 제거하여 매우 낮은 기압을 유지하는 방안으로 결국 귀결되는데 [3,4,9,10,11,12], 이러한 시스템에서는 튜브 전체 길이에 대하여 기밀을 유지하는 것이 매우 중요한 기술이 된다. 또한 튜브 내의 진공도는 경제성을 고려하여 통상적으로 쓰이는 상용 펌프가 유지할 수 있는 정도까지만 허용되는데, 이는 튜브 내의 공기를 전혀 무시할 수 없는 수준이며 다음 절에서 다룰 또 다른 문제를 야기한다.

3.5 Kantrowitz Limit

하이퍼루프와 같이 아진공 튜브를 이용하는 교통시스템은 공기저항을 획기적으로 낮출 수 있기 때문에 속도 증가에 따른 에너지 소모 증가의 부담이 상대적으로 적다. 만약 적절한 수준까지 공기저항을 낮출 수 있다면 속도의 제약 없이 운행할 수 있으며, 이는 아진공 튜브운송시스템이 초음속 여객기와도 경쟁이 가능할 수 있다는 것을 의미한다. 하지만, 완벽한 진공 상태가 아닌 이상 튜브 내를 이동하는 물체는 공기역학적인 문제로 인하여 운행속도의 물리적 제약을 받는다.

아래 [그림 6]에서 튜브 내를 이동하는 물체를 이와 등가인 축소-확대 노즐과 함께 나타내었다. [그림 6] (a)에 나타난 속도 V 로 이동하는 물체는 물체에 고정된 좌표계에서 보면 속도 V 의 관 유

동 내에 고정된 물체로 볼 수 있으며, 이를 다시 유체의 관점에서 보면 [그림 6] (b)와 같이 유체가 관을 따라 흐르면서 단면적이 좁아지다가 다시 확대되는 것으로 생각할 수 있다. 여기서 물체의 최대 단면적에 해당하는 노즐 목(throat)에서는 유체의 연속방정식을 만족시키기 위해 노즐 목 속도 (V')가 유동 속도(V)보다 다소 증가하게 된다. V' 가 아음속, 즉 음속보다 작은 조건 하에서는 V 는 계속적으로 증가할 수 있으며, 이에 따라 공기저항은 점진적으로 증가하게 된다.

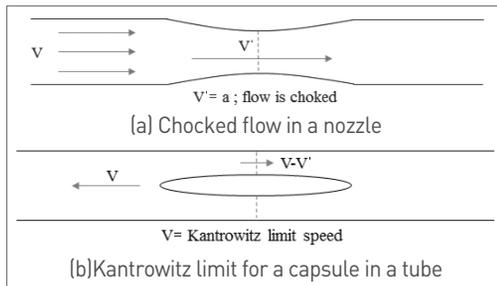


[그림 6] Capsule in a tube and equivalent nozzle

한편, 유속(V)이 계속 증가하다가 [그림 7] (a)에서와 같이 노즐 목 속도(V')가 음속에 다다르게 되면 노즐을 통과하는 유량이 더 이상 증가하지 않는 현상이 발생하게 되는데, 이를 초킹(choking)이라 한다. 초킹이 발생하게 되면 유량의 변화가 없기 때문에 유속(V)은 동일하게 유지되며, 이때의 유속은 해당 노즐에서의 최대 유속이라고 생각할 수 있다. 이처럼 정해진 노즐 축소비에 대하여 초킹이 발생하지 않는 최대 유속을 Kantrowitz limit이라고 부르며, 초킹의 발생 조건이 노즐 목에서 음속이 되는 것이므로 Kantrowitz limit은 음속보다 약간 낮은 값을 갖게 된다.

Kantrowitz limit의 원리를 [그림 7] (b)의 그림에서처럼 튜브 내를 움직이는 물체에 적용하면 튜브 내 물체의 최고 속도가 정해지는 것을 알 수

있다. 여기서 Kantrowitz limit에 해당하는 물체의 최고 속도는 대략 음속보다 약간 낮은 속도에서 물체와 튜브의 단면적비에 따라 정해진다.

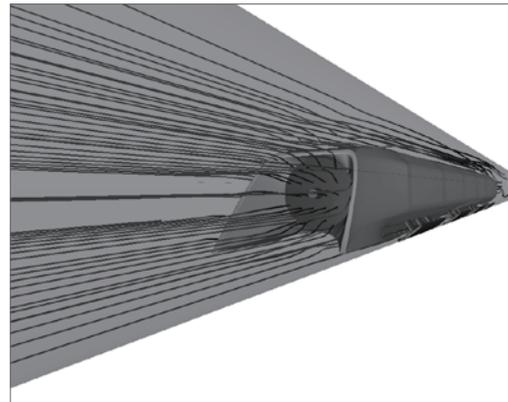


[그림 7] Choked flow and Kantrowitz limit

이상과 같이 튜브 내를 이동하는 물체는 Kantrowitz limit에 따라 최대속도의 제한을 받게 되는데, 이전의 아진공 튜브시스템에서는 이를 간과하여 최고속도를 음속의 수배~수십배에 해당하는 속도로 설정하거나[3,4] 이를 회피하기 위하여 최고속도를 음속의 약 60%에 해당하는 700km/h 정도로 설정하였다[9,10].

하이퍼루프는 이전의 컨셉들과 달리 운송체 전 두부에 전기모터로 구동되는 압축팬을 설치하여 튜브와 운송체 사이로 바이패스되는 유량을 줄임으로써 Kantrowitz limit을 높여 거의 음속에 가까운 속도로 운행할 수 있도록 한 것이 특징이다. 또한, 압축된 공기는 일부를 후방으로 분사하여 추진력을 얻는 동시에 나머지 일부를 부상판의 작은 구멍을 통해 바닥에 분출함으로써 에어 베어링과 같이 바닥과 접촉하지 않고 주행할 수 있게 해준다. 이러한 혁신적인 컨셉은 외부로부터 동력을 전달받지 않고 운송체에 내장된 배터리만으로 주행이 가능하도록 함으로써 튜브 구조물 외에 급전, 추진 및 부상을 위해 인프라에 투자되는 비용을 획기적으로 줄여줄 수 있으며, 가속과 구배의

극복을 위해 요구되는 강한 추진력은 일부 구간(전체 구간의 약 1%에 해당)에만 설치된 리니어 모터를 이용하여 해결하도록 하였다.



[그림 8] Streamlines for capsule traveling at high subsonic velocities inside Hyperloop[1]

3.6 기술 사양

이전의 초고속 아진공 튜브운송시스템에 비하여 하이퍼루프가 보다 기술적인 진보를 이루었다고 평가받는 점은 앞서 살펴본 바와 같이 관내 운송체의 한계속도를 결정하는 Kantrowitz limit을 고려하여 이를 해결할 수 있는 핵심기술(key technology)로서 전두부에 설치된 공기압축기와 이를 이용한 추진 및 부상시스템을 제시한 점이다.

뿐만 아니라 하이퍼루프는 이전과는 달리 개념설계(Conceptual design)에 그치지 않고 공학적 모델링과 해석을 통한 기본설계(Preliminary design)까지 수행하여 시스템의 사양과 비용을 비교적 구체적으로 제시하였다. 하이퍼루프 알파 문서[1]에는 승객전용 캡슐과 승객, 자동차 혼용 캡슐의 두 가지 모델에 대하여 기본설계결과를 제시하고 있는데, 이 중 승객전용 모델의 주요 사양을 [표 1]에 나타내었다.

[표 1] Major system parameters of hyperloop

| 항목 | 내용 |
|---------|----------------------------------|
| 노선 길이 | 560 km |
| 운행 시간 | 35분(표정속도:960km/h) |
| 최고 속도 | 1,220 km/h (M=0.91) |
| 튜브 단면적 | 3.91 m ² (직경 2.23 m) |
| 캡슐 단면적 | 1.41 m ² (튜브단면의 38%) |
| 튜브 내 압력 | 100Pa (대기압의 0.1%) |
| 시격 | 2 분 (30 캡슐/system) |
| 수송량 | 28인/캡슐 |
| 시스템 용량 | 7.4백만 인/라인/년 (2분 시격, 24시간 운행) |
| 총 동력 | 21 MW/system |
| 총 비용 | 60억 달러 |
| 운임 | 1회 운임 20달러 |

하이퍼루프의 최고속도는 1,220km/h(음속의 91%), 표정속도는 960km/h로서 샌프란시스코와 로스앤젤레스 사이를 35분 만에 주파하는데, 이는 캘리포니아 고속철도가 계획하는 2시간 40분의 약 4.5분의 1에 해당하는 시간이다. 또한, 하이퍼루프가 기대하는 운임은 20달러로서 80에서 90달러로 예상되는 캘리포니아 고속철도에 비해 약 4~4.5분의 1에 불과하다. 이정도면 일론 머스크의 실망감이 이해가 될 정도다.

초고속의 실현을 위해 필요한 튜브 내 압력은 대기압의 100Pa로서 대기압의 약 1000분의 1에 해당하며, 전체 시스템을 구동하기 위한 동력은 21 MW인데, 이 중 대략 절반이 30개의 각 캡슐에 탑재된 전기모터를 구동하는데 소요되는 동력이다. 하이퍼루프 1개 시스템이 약 840명을 동시에 수송한다고 가정할 때, 비슷한 수송규모를 가지는 KTX 한 대가 300km/h로 주행하는데 소요되는 동력이 약 7MW임을 감안하면 4배 이상의 속도를 제공하는 하이퍼루프의 요구 동력은 상대적으로 작음을 알 수 있다.

4 결론

하이퍼루프는 새로운 교통모드로서 제시되는 고속철도와 제트여객기의 대안이다. 하이퍼루프가 목표로 하는 운송거리는 현재의 고속철도와 제트여객기 모두 비효율적인 영역이기 때문에 샌프란시스코-로스앤젤레스 뿐만 아니라 이외 미국의 인접 주요 도시 간, 유럽이나 동북아의 대도시 사이에서 발생하는 막대한 교통수요를 감당하기에 가장 적합한 수단이 될 수 있다.

필자는 지난 2008년 튜브운송기술에 대한 기술적 고찰[13]에서 하이퍼루프와 같은 진공기술을 적용한 튜브운송시스템과 관련된 몇몇 사례를 소개한 바 있으며, 최근의 하이퍼루프와 관련된 기술적 발전에 대해서도 관심 있게 지켜보고 있다.

결론적으로 하이퍼루프는 아진공 튜브 내에서 발생할 수 있는 기술적 난제들의 도출과 이에 대한 해결 방안의 제시가 설계 과정에 적절히 반영되었다는 측면에서 유의미한 기술적 진보를 이루어냈다고 평가한다. 음속 근방에서 나타나는 공기역학적 비선형성에 기인한 초킹 현상을 적극적으로 해결하기 위하여 새로운 개념의 추진, 부상 기술을 제시하였을 뿐만 아니라 이에 대한 상세한 설계 결과를 제시하여 기술의 실현가능성을 한층 더 높였다.

또한, 하이퍼루프는 튜브를 이용하는 교통모드로서 기상조건의 영향을 받지 않으며, 도로와 철도 위를 횡단하여 건설될 수 있으므로 기존 교통에 방해를 주지 않는다. 관건은 최소의 비용으로 아진공 튜브를 건설하고 유지하는 것과 음속에 가까운 속도를 최소의 에너지로 구현하는 것이 될 것이다.

이를 위해 시험적으로 구현하기 힘든 아진공, 아음속에서의 공기역학 현상을 정확히 해석하고

추진, 부상, 주행안정성, 튜브 기밀 등 시스템 전 영역의 설계를 담당할 공기역학기술이 특히 중요하다고 볼 수 있다. 또한, 시스템 통합과 최적화를 지속적으로 반복하여 각 서브시스템에 정확한 성능 목표를 할당하고 관리하는 것이 핵심요소기술 개발의 효율성을 높이는 길일 것이다.

다시 처음의 물음으로 돌아가 보자. 과연 하이

퍼루프는 제 5의 교통모드가 될 수 있을까? 발상의 혁신적인 전환과 진지한 공학적 접근이 매스미디어의 위력과 결합되어 유래 없는 화려한 시작을 이루었지만, 하이퍼루프를 현실로 구현하기 위해서는 지난한 개발의 과정이 남아 있다. 아마도 그 해답은 세계 각국에서 속속들이 모여들고 있는 야심찬 인재들의 손에 달려 있을 것이다.



참고문헌

1. E. Musk(2013), Hyperloop Alpha, SpaceX. Retrieved August 13 2013, from <http://www.spacex.com/hyperloopalpha>.
2. A. Cuthbertson(2016), "Watch First Successful Hyperloop Propulsion Test," Newsweek article. Retrieved September 29 2016, from: <http://www.newsweek.com/watch-first-successful-hyperloop-propulsion-test-459016>
3. R. M. Salter(1972), The very high speed transit system (No. RAND-P-4874). RAND CORP SANTA MONICA CA.
4. Retrieved September 29 2016, from : <http://et3.com/>
5. Retrieved September 29 2016, from : http://www.retro-futurismus.de/radtke_zukunft.htm
6. J. H. Ausubel, C. Marchetti, P. Meyer (1998), "Toward green mobility: the evolution of transport," European Review, Vol. 6, No. 2, 137-156.
7. G. Bouladon(1970), "Technological forecasting applied to transport," Futures, Vol. 2, No. 1, pp.15-23.
8. S. Raghunathan, H.-D. Kim, T. Setoguchi(2002), "Aerodynamics of high-speed railway train," Progress in Aerospace Sciences Vol. 38, pp.469-514.
9. M. Bierlaire, K. Axhausen, G. Abay(2001, March), "The acceptance of modal innovation: The case of Swissmetro," In Proceedings of the 1st Swiss Transportation Research Conference.
10. H. Lee, et al.(2009), "Analysis of the magnetic effect on the tube infrastructure for a super speed tube train," International Journal of Railway Vol. 2 No. 4, pp.170-174.
11. Z. Shen(2005), "On developing high-speed evacuated tube transportation in China," Journal of Southwest Jiaotong University, Vol. 40, No.2, pp.133-137(In Chinese).
12. Y. Sato, et al.(2006, October), "SUPERMETRO - Super-High-Speed-Train in Low Pressure Tunnel," The World Congress on Railway Research(WCRR)
13. 권혁빈, 박준서, 남성원, 최성규(2008), "튜브운송기술의 현황과 전망," 철도저널, 제11권, 제3호(통권 제40호), pp.59-70.
14. W. P. Trzaskoma(1970), Tube vehicle system (TVS) technology review, No. M70-4 Intrm Rpt.