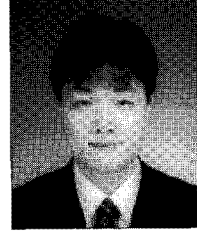


친환경적 미래교통시스템의 구축을 위한 튜브운송기술의 현황과 전망

State-of-the-Art and Prospects on Tube Transportation Technology
for Development of Environment-Friendly Future Transportation System



권혁빈*



장승엽*

* 한국철도기술연구원 초고속열차연구실 선임연구원

1. 머리말

최근 세계는 온실가스 저감과 지속가능한 성장이라는 인류의 생존과 직결되는 난제를 앞에 두고 있다. 세계 각국이 앞다투어 온실가스 감축계획을 내놓고 있으며 지속가능한 성장을 이끄는 미래기술의 연구에 국가의 사활을 걸고 있다. 우리나라도 최근 2020년까지 온실가스를 배출전망치 대비 30% 줄이기로 목표를 정하고 이를 실현할 정책들을 추진하고 있다. 이런 패러다임의 변화 앞에서 화석연료에 의존하는 현대의 교통시스템은 더 이상 경쟁력을 가질 수 없을 것은 자명하며, 따라서 우리는 더 친환경적이고 지속가능한 교통시스템을 개발하고, 도입해야만 하는 시대적 요구를 받고 있다. 이런 미래교통시스템 대안의 하나로 우리가 주목해 볼만한 기술로 튜브운송기술을 들 수 있다. 튜브운송기술은 기존 도로 또는 철도 네트워크와 분리된, 튜브로 연결되는 네트워크를 이용하는 운송기술로 기존 육상교통의 한계를 극복하고 고밀도 고속운송을 실현할 미래 신교통시스템으로 새롭게 조명되고 있다.

본 고에서는 이러한 튜브운송기술의 개념과 역사, 그리고 세계 각국에서 제안되고 있는 튜브운송기술에 대한 연구를 소개하고 각각의 시스템에 대한 특징을 비교·분석한 후 향후 튜브운송기술의 개발 방향과 전망에 대해 논하고자 한다.

2. 튜브운송기술의 개념

튜브운송의 정의는 미국 교통성 연구혁신기술국 산하의 볼페(Volpe) 국가교통시스템 센터가 1994년 발간한 자료¹⁾에서는 다음과 같이 정의하고 있다.

- 두 지점 사이를 연결하는 튜브 내로 꼭 차는 캡슐이나 캡슐 열차가 이동하는 교통시스템의 분류(A class of transportation system in which close fitting capsules or trains of capsules move through tubes between terminals)

이상의 정의에서 알 수 있듯이 튜브운송은 튜브를 인프라로 이용하고 캡슐을 단위로 하여 운송을 한다는 것이 가장 큰 특징이다. 튜브운송기술은 일반 터널보다 상대적으로 훨씬 작은 크기의 튜브가 사용되기 때문에 건설비를 줄일 수 있고, 토지점유율을 최소화할 수 있으며, 중앙제어방식 등을 적용함으로써 고밀도 운송을 실현할 수 있고, 기상 조건에 따른 운행 제한을 줄일 수 있으므로 용량을 극대화할 수 있어서 그만큼 에너지 효율이 높아지며, 그 밖에도 안전, 환경측면에서 많은 장점을 확보할 수 있다.

튜브운송기술의 역사

튜브운송기술의 기술적 개념은 이미 1867년 알프레드 비

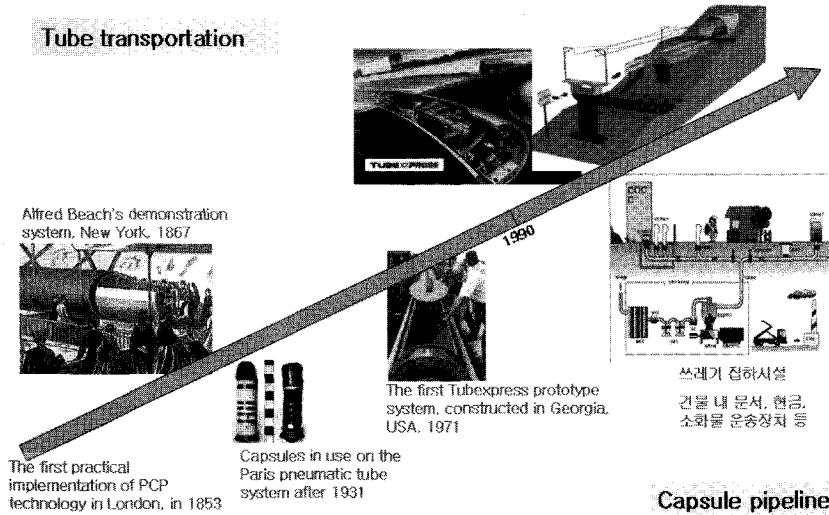


그림 1 튜브운송과 캡슐-파이프라인 시스템의 역사

치(Alfred Beach)에 의해 뉴욕에서 처음 시연되었지만, 제반 기술의 미성숙으로 인하여 별다른 발전을 이루지 못하였다가 현대 육상교통의 한계를 극복하고자 최근에 다시 연구가 시작되는 추세이다.

그림 1에서는 튜브운송과 캡슐-파이프라인 시스템의 발전 역사를 나타내었다. 먼저 튜브운송기술과 밀접한 관계에 있는 캡슐-파이프라인 시스템은 19세기 중반 런던에서 전보 운송용으로 처음 실용화되었는데, 이처럼 작은 직경을 가진 캡슐-파이프라인 시스템은 도시 내의 중요 지점 간의 통신 수단으로 20세기 중반까지 사용되었다. 이후 통신의 발달로 통신수단으로써의 캡슐-파이프라인 시스템은 사라졌지만, 건물 내의 현금 또는 소화물 등의 배달이나 쓰레기 집하 등의 용도로 현재까지도 유용하게 이용되고 있다.

20세기 들어 파이프라인의 직경을 보다 크게 하여 화물 운송에 이용하려는 시도가 많이 행하여 졌다. 대표적으로 손꼽을 수 있는 것은 1971년 미국에서 개발된 TubeExpress를 들 수 있는데, 이와 함께 비슷한 시기에 러시아나 일본에서 개발된 시스템들은 대부분 공압 추진 방식을 이용하여 광물이나 곡물들을 산지에서 집하시설까지 이송하는 목적으로 사용되었다.

그러나 캡슐-파이프라인 시스템은 캡슐 자체가 추력을 갖지 않기 때문에 주로 파이프라인 내의 공기압력을 조절하여 캡슐 전후방의 압력차를 이용하여 추진하는 공압 추진(Pneumatic propulsion) 방식을 채택하고 있는데, 공압 추진 방식은 좁은 파이프 내의 공기저항 문제를 해결하는 효율적인 방법임에도 불구하고 신속한 제어와 복잡한 망구조에서의 적용 등 여러 기술적 난제로 인하여 더 이상의 발전을 이루지 못했다.

캡슐-파이프라인 시스템이 작은 직경의 튜브를 이용한 소형화물 운송 분야의 틈새시장에서 이용되고 있는 것에 반해 기존의 육상교통을 대체할 수 있는 큰 직경의 튜브를 이용하는 튜브운송기술이 더 이상의 기술발전을 이루지 못하고 정체상태에 있는 동안 자기 부상·추진 기술, 향상된 공력설계 기술, 새로운 제어기법과 신소재의 등장 등 기존의 공압추진 기술을 대체할 수 있는 여러 가지 기술적 진보가 이루어졌다. 따라서, 튜브운송기술은 이러한 캡슐-파이프라인의 전형에서 벗어나 다양한 신기술의 접목을 통한 기술혁신을 이루고자하는 역사적 맥락에서 탄생하였다.

1960년대 후반부터 개발되기 시작한 TubExpress는 초기에는 전형적인 캡슐-파이프라인 시스템 중 하나였으나, 이후 공압 추진방식의 한계를 극복하기 위하여 선형유도 혹은 선형동기 방식의 추진시스템으로 방향을 선회하였으며, 관련 기술을 1980년 특허등록 하였다.²⁾ 1990년대 이후 튜브운송기술은 현대적 의미로 정립되었고, 세계 각국에서 튜브운송기술의 실용화를 위한 활발한 연구가 이루어지고 있다. 앞서 언급한 TubExpress는 장거리 트럭운송을 대체할 목적으로 미국에서 연구가 진행되고 있으며, 독일에서는 휠-레일 기반의 저속 도시 내 지능형 물류시스템 개발을 목적으로 연구를 진행하고 있으며 2002년에는 이 기술의 본격적인 상용화를 위하여 CargoCap社가 설립되기도 하였다. 여객운송 분야에서는 1990년대 아진공 터널을 이용한 초고속 자기부상운송시스템인 SWISSMETRO 기술이 스위스에서 연구되었으며, 2001년 설립된 미국의 ET3.com社는 소형 튜브와 자기부상추진시스템이 결합된 초고속 door-to-door 여객운송시스템인 ET3을 구상하여 플로리다 고속운송시스템에 제안한 바 있다. 또한 러시아에서는 기존의 대도시 여

객운송의 대체를 목표로 하는 Flextaxi를 연구하고 있다.

튜브운송기술의 특성

그림 2에서는 육상교통 및 파이프라인 네트워크의 인프라와 운송체를 나타내었다. 파이프라인 네트워크는 물이나 기름 등 유체를 운송하기 위한 수단으로서 생산지에서 목적지까지 중단 없이 대상물을 공급할 수 있다. 파이프라인 네트워크의 대표적인 예로서 현대의 식수공급체계를 들 수 있는데, 종래에 우물 등에서 물을 길러 통 단위로 식수를 공급하던 방식이 현대에는 파이프라인 네트워크를 통해서 각 가정까지 직접 운송되는 방식으로 변경됨으로써 보다 빠르고 저렴한 식수공급체계가 확립되었다.

파이프라인 네트워크의 장점을 소형 고체화물에 적용한 것이 캡슐-파이프라인 시스템이다. 캡슐-파이프라인 시스템은 캡슐에 소형 화물을 담아 파이프라인 망을 통해 이동시키는 운송방식으로서 캡슐 자체는 추진력을 갖지 않는 대신 파이프 내의 압력을 조절하여 캡슐을 추진하는 공압 추진 방식을 이용한다는 점이 튜브운송과 가장 큰 차이점이다. 이러한 방식은 19세기 말에 시작된 영국의 소화물서비스에 처음 적용된 이후 현대에는 건물 내에서 다양한 지점 간에 빈번히 이루어지는 현금, 약품 등 소형 화물의 운송에 주로 쓰이고 있다.

튜브운송은 캡슐-파이프라인의 보다 진보된 형태로서 기존의 캡슐-파이프라인 시스템의 기술적 요소들을 혁신하여 기존의 철도교통과 도로교통이 담당하는 여객 및 화물운송을 대체하기 위한 신교통수단이다. 철도교통과 도로교통은 각각 철도와 도로라는 인프라를 이용하여 여객 및 화물을 운송하는데, 앞서 살펴본 바와 같이 철도는 대량의 화물과 여객에 적합하고, 도로는 개별 여객에 적합하나 대형 트럭

의 운행도 가능한 노면의 폭이 규정되어 있다. 반면 튜브운송의 경우에는 파이프라인 시스템의 특징인 소량화물과 개별 여객의 door-to-door 운송이 가능하도록 튜브를 이용하여 캡슐 단위로 여객 및 화물을 운송할 수 있다.

튜브운송시스템은 신궤도시스템의 하나로서 다른 신궤도 시스템과 공통으로 갖는 특징과 튜브운송기술의 고유한 특징을 동시에 갖추고 있다. 튜브운송기술은 기존의 도로망을 이용하지 않기 때문에 기존 도로교통의 수송량을 분담하는 특성이 있다. 전기에너지를 사용하기 때문에 배기가스 배출을 저감하고 석유에너지 고갈에 따른 고유가 추세를 고려한다면 운송비용의 절감효과도 점점 커질 것으로 예상된다. 그리고, 중앙집중식 제어를 이용하기 때문에 정시성이 확보되고 24시간 무인안전체계를 통해 운용비의 절감이 가능할 것으로 기대된다. 이상의 특징들은 경전철 시스템과 정성적으로 동일하지만, 철도시스템에 기반하는 경전철시스템의 성능 특성이 일정한 범위 내에서 예측가능한 반면, 튜브운송기술은 신기술 적용 시 보다 향상된 정량적 특성을 갖는 시스템의 설계가 가능할 것으로 기대된다. 신교통기술의 개발 시 고려해야 할 중요한 특성 중 하나는 무감속 분기기술이다. 기존의 도로시스템이나 철도시스템에서는 분기 시 신호에 따른 정차 및 안전성 확보를 위하여 감속이 필수적인데, 이러한 감속이 최소화되도록 한다면 운행속도 및 운송용량이 크게 증가할 수 있다.

그림 3에서 볼 수 있듯이, 튜브운송기술의 가장 큰 특성은 도로나 철도에 비해 캡슐 단면에 근접하는 소형 튜브를 인프라로 이용한다는 점이며, 이것은 튜브운송기술의 본질적인 기술적 특성을 규정짓는 역할을 한다.

	Infra	Conveyance
Ground/underground Transportation		
Road/Vehicle mode	Road	Vehicles
Railway/Train mode	Railway	Train
Tube transportation mode	Tube	Capsule(s)
Capsule pipeline mode	Pipeline	Capsule(s)
Pipeline network	Pipeline	Water, Oil

그림 2 파이프라인시스템과 육상교통수단의 인프라와 운송체

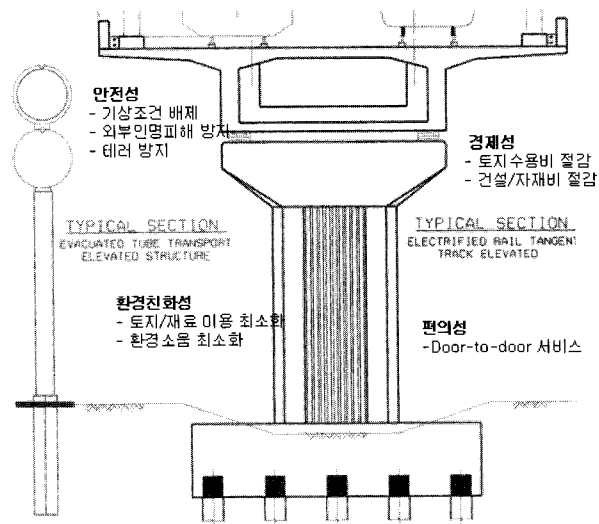


그림 3 튜브운송시스템(ET3)와 철도시스템의 인프라 비교

먼저, 안전성의 측면에서 볼 때 튜브구조는 외부환경과 운송체를 완전히 단절하기 때문에 강우나 강풍 등 기상조건을 배제하여 안전성을 향상시킬 수 있고, 시스템 외부에 존재하는 인명을 완벽하게 보호할 수 있다. 또한 튜브가 지하공간이나 지상 위에 설치되기 때문에 외부인의 접근이 어려우므로 현대에 있어 점점 중요성이 더해가는 보안의 문제에 있어서 더 유리한 구조임을 알 수 있다.

환경적인 측면에서도 튜브운송기술은 인프라로 이용되는 튜브는 최소한의 공간을 점하기 때문에 토지와 재료의 이용을 최소화할 수 있으며, 외부로 방사되는 소음을 차단하기 때문에 환경소음을 최소화하는 특징이 있다.

편의성의 관점에서 튜브운송기술은 파이프라인 시스템과 마찬가지로 수많은 터미널을 직접 연결하기 때문에 출발지에서 도착지까지 직접 연결하는 door-to-door 서비스를 제공할 수 있다.

마지막으로 튜브운송은 도로나 철도에 비해 획기적으로 작은 튜브구조를 사용하기 때문에 토지수용비와 건설/자재비를 절감하여 건설비용을 비약적으로 저감할 수 있기 때문에 경제성의 측면에서도 높은 경쟁력을 갖고 있다.

튜브운송기술 개발 현황

튜브운송기술의 본격적인 연구개발은 1990년대 이후이며, 전세계 각국에서 다양한 기술적인 시도가 이루어지고 있다. 그 중에서 대표적인 사례로서 화물 운송용으로 개발되고 있는 TubExpress⁴⁾, CargoCap⁵⁾과 여객용으로 개발 중인 ET3⁶⁾, Flextaxi⁷⁾, 그리고 Tubeway⁸⁾ 등 5가지 기술에 대한 개발 현황을 조사하였다.

1) TubExpress²⁾

TubExpress는 교통량의 증가와 이로 인한 교통체증의 증가로 인해 화물운송을 주로 담당하고 있는 트럭의 수송 효율성 저하, 물류비용의 증가, 에너지 비용을 증가 등의 문제를 해결하기 위한 대책으로 미국에서 연구되기 시작했다. TubExpress의 시초는 1960년대 후반부터 주로 단거리 구간에서 광석 또는 석탄과 같은 입상 벌크 화물(bulk granular cargo)을 수송하기 위해 시작된 연구에서 찾을 수 있다. TubExpress는 지하에 건설된 콘크리트 파이프라인으로 도시 중심 간을 연결하여 화물을 수송하기 위한 자동운전 시스템을 갖춘 튜브운송시스템이다. 화물은 전기 에너지를 사용하는 파이프라인을 통해 추진되는 프리휠링(free-wheeling) 캡슐에 탑재되어 운반된다(그림 4).

미국의 경우 도시 간 화물수송의 경우 상당부분 장거리 운송 트럭에 의존하고 있는 실정인데, TubExpress는 도시간 화물 자동 운송이 가능하므로 트럭의 역할을 대체할 수 있는 해결책이 될 수 있다. 첫째, 지상의 교통수단과 인터페이스 없이 지하를 통해 화물을 수송하기 때문에 사람들의 이동과 화물의 수송을 분리할 수 있으며, 화물수송트럭으로 인해 발생하는 인명 및 재산 피해를 크게 줄일 수 있을 것을 기대된다. 둘째, 트럭운송의 경우 무거운 대형 트럭의 이동으로 인해 도로의 파손 등이 발생하여 이로 인해 많은 유지보수 비용이 발생하지만 TubExpress는 이와 같은 비용이 거의 필요 없다. 셋째, 디젤연료를 사용하는 트럭에 비해 전기에너지를 사용하는 TubExpress는 트럭보다 1/3정도의 에너지를 사용하며 이는 전체 석유 소비를 낮추는데 기여한다. 넷째, 도로교통수단에 비해 교통체증이나 오염물질 배출을 현저하게 낮출 수 있다. 마지막으로 자동운전, Pallet를 적재할 수 있는 소형 캡슐사용, 정시 배송, 적재 및 자재 관리비의 감소 등이 가능하므로 전체적인 수송비용을 최소화 할 수 있다.

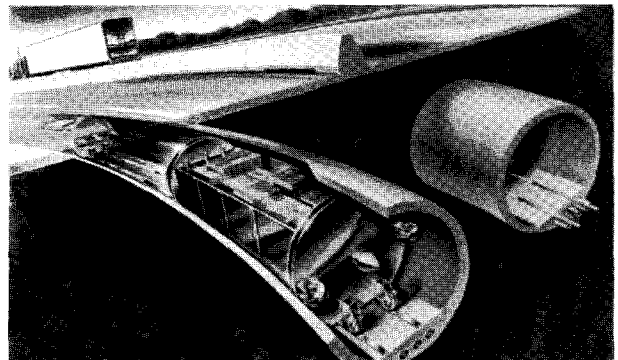


그림 4 TubExpress 개념도

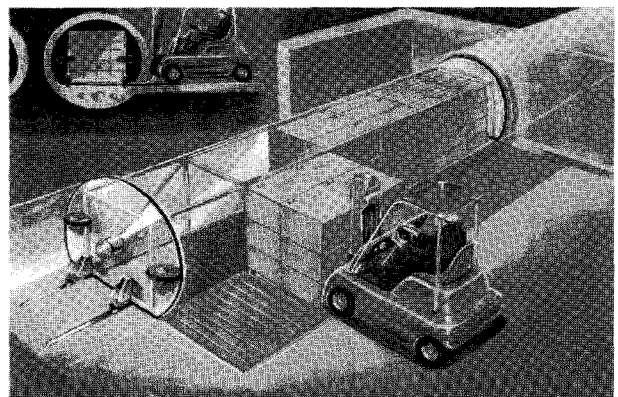


그림 5 TubExpress 화물 적재

2) CargoCap³⁾

CargoCap은 독일에서 처음 연구되기 시작했으며, 혼잡한 도심지역에서 교통 혼잡을 피해 지하공간을 활용하여 도시간 화물을 운송하는 튜브운송시스템이다. 이 시스템은 목적지까지 화물을 정확하고 신속하게 운송하기 위해 자동운행기능을 포함하는 지능형 물류시스템이다(그림 6).

CargoCap 역시 지하공간에 건설되기 때문에 지상의 도로교통수단과 독립된 시스템이다. 화물수송을 관리하기 위해서 지상의 물류중심지역에 작은 터미널을 건설하며, 터미널 내부에 설치된 승강용 리프트를 활용하여 지하로 이동한다. CargoCap은 화물수송을 위해 설계되었으며, 튜브를 통해 도시간 화물수송라인을 형성한다. CargoCap의 경우에는 내경 2.0m의 튜브를 이용하게 되는데, 최신의 파이프재킹 기법을 이용하기 때문에 건설에 따른 도심혼잡을 최소화하면서 신속한 건설이 가능하다. 캡슐은 화물이 가능한

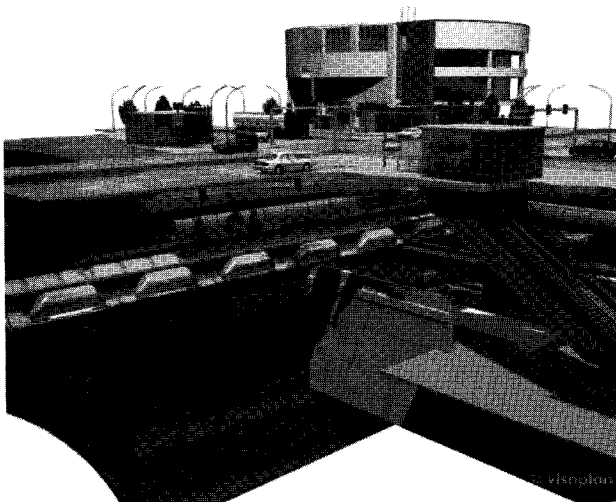


그림 6 CargoCap 개념도

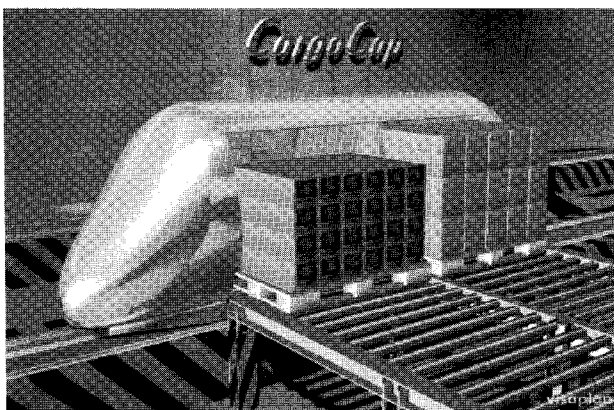


그림 7 CargoCap 화물 적재

신속하고 효율적으로 적재되는 구조를 가지도록 설계되었으며, 하나의 캡슐에 두 개의 규격화된 Euro-pallets(800mm x 1200mm)를 적재할 수 있다. 모든 적재 및 운송, 그리고 하역활동은 프로그래밍에 의해 자동적으로 이루어진다.

CargoCap 시스템은 기존의 도로교통수단이 주로 담당하던 화물수송의 큰 부담물을 상당량 줄일 수 있을 것으로 평가되고 있다. 화물운송 지역과 운송량이 확대되어 네트워크를 형성할 경우 도로교통에서 발생하는 교통 혼잡을 획기적으로 줄이고, 교통 혼잡으로 발생하는 연료 소모 및 매연으로 인한 환경오염을 줄이는데 기여를 할 것이다.

3) ET3⁴⁾

ET3(Evacuated Tube Transportation Technology)는 진공튜브 기술을 이용한 초고속 운송시스템이다. 튜브 내를 진공으로 만들 경우 공기저항이 이론적으로 0이기 때문에 초고속 운행이 가능하며, ET3의 경우에는 350mph에서 4000mph까지의 속도로 도시 내, 도시 간뿐만 아니라 대륙간 교통까지 가능할 것으로 전망한다.

ET3의 진공기술은 1990년대 아진공(亞眞空) 터널을 이용한 초(超)고속 자기부상운송시스템인 스위스의 SWISSMETRO 기술에서 발전된 형태로서 튜브의 직경을 1.5m까지 소형화하여 개인여행 및 소형 화물의 door-to-door 운송에 적합하도록 하여 도로교통의 편이성과 철도교통의 안전성 및 정시성을 확보할 수 있도록 하였다.

ET3는 도시내의 단거리에서부터 대륙간 장거리 구간까지 대상으로 하고 있으며, 노선의 상황에 따라 지상과 지하에 건설된다. ET3는 기존의 자기부상시스템(Transrapid)과 비교하여 건설비용이 매우 적게 소요되며, 지상에 건설되는 Guideway Span으로 인한 토지 수용면적이 매우 적다.

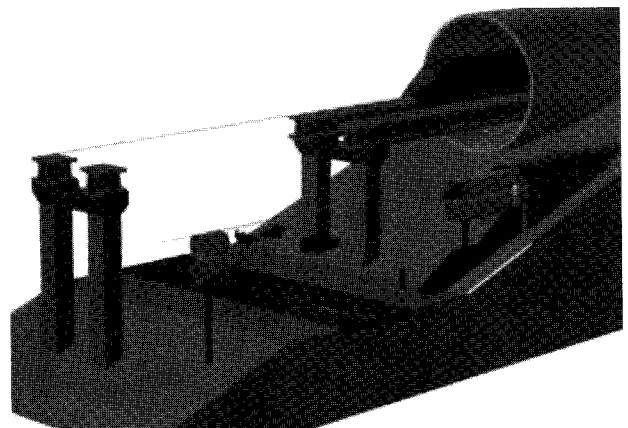


그림 8 ET3 개념도

또한 ET3는 여러 가지 운행모드를 가지고 있으며, 안전 제어시스템을 통해 초고속으로 운행된다.

4) Flextaxi⁵⁾

러시아에서 연구 중인 Flextaxi는 몇 개의 위성도시를 포함한 거대 도시권에서 개인이나 소규모의 위탁 판매물을 자동적이고 안전하게 주소지까지 운송하고자 하는 튜브 추적(Tube Tracing)개념을 가진 튜브운송시스템의 일종으로, 기존의 거대 도시의 도로중심의 여객운송체계를 새로이 대체할 수 있는 대안으로 연구되고 있다.

Flextaxi는 튜브운송시스템이 가지고 있는 본래의 목적을 달성하기 위해 4가지 기술적 접근이 시도되고 있다. 첫째는 추적 및 운송기술의 구현이다. Flextaxi는 많은 사람이나 대형의 화물을 운송하는 목적이 아니고 개인이나 소규모의 화물을 정해진 목적지까지 정확히 운송하는데 주목적이 있다. 이 시스템은 거대도시내의 어느 곳이나 정거장을 설치하여 개인이나 소화물을 자유롭게 탑승(적재), 하차(하역), 정차, 정지할 수 있으며, 이러한 모든 과정이 자동적이며 안전하게 이루어진다.

두 번째는 지진을 고려한 설계를 통해 주위환경과 보다 친화적인 도시 설계를 할 수 있다. 이 튜브시스템은 기존 도시의 외형에 영향을 받지 않고 건설이 가능하다. 이 시스템은 지상과 지하에 모두 건설될 수 있으나, 대부분에 경우 지상의 도시 구조물 사이의 공간을 활용하여 건설된다. 이러한 경우 도시의 기존 구조물보다 위에 건설되고, 튜브의 재질이 투명하기 때문에 어떠한 날씨조건에도 도시 광경을 즐길 수 있다. 또한 튜브의 외벽은 훌륭한 광고판으로도 활용될 수 있다. 튜브를 지지하고 있는 지지대는 진동을 흡수할 수 있는 설계되었으며, 이 지지대의 양끝에 로프가 연결되어 있으며, 연결된 로프에 일정한 간격으로 튜브를 지지하고 있는 로프가 있는 구조로 되어 있다. 이처럼 진동을 흡수할 수 있는 구조설계가 가능하며, 이것은 시스템에 대한 높은 신뢰성을 부여한다. 또한 이렇게 단순하면서도 신뢰도가 높은 설계는 다른 튜브시스템보다 전체 튜브시스템의 무게를 작게 할 수 있다. 이는 비용측면에서도 유리하다.

세 번째는 특유의 추진방법, 운행 속도, 그리고 정지 메커니즘이다. Flextaxi는 튜브 내부에서 발생시킨 압축공기를 이용하여 운송차량을 추진하거나 정지시키거나, 전자기(Electromagnetic)와 브레이크를 이용하여 추진 및 제동을 수행한다. 그리고 이 튜브시스템은 최대 120mph(192km/h)까지 운행할 수 있으며, 시스템의 안전 제어를 통해 차량간 최대 시격을 10~15초까지 유지할 수 있다.

마지막으로 이 튜브시스템의 무게와 비용과 관련된 기술



그림 9 Flextaxi 개념도

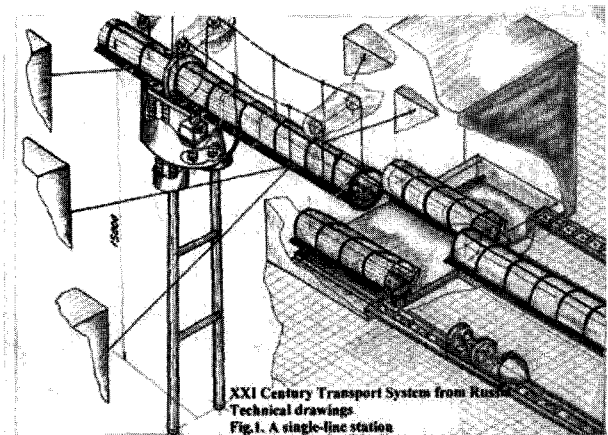


그림 10 Flextaxi single line station 개념도

이다. 이 시스템은 전체 시스템의 무게를 줄이기 위한 설계를 통해 로프를 포함한 진동 흡수 지지대를 제외하고 한 구간(span)의 무게가 6ton에 불과하다. 그리고 시스템 개발 비용 측면에서 여러 가지 나라에 따라 다르게 계산되기는 하나 기존 전통적인 교통 시스템보다 비교적 유리할 것으로 추정되고 있다. 새로운 거대 도시의 여객운송수단으로 부각되고 있는 Flextaxi는 낮은 건설비와 기존 도시환경과 잘 어울리는 설계, 그리고 안전 제어를 통한 높은 시스템 신뢰성 등 많은 장점을 가지고 있는 반면, 이를 구현하기 위한 구체적인 체계적인 접근이 필요하며, 보다 구체적인 노력이 요구되는 실정이다.

5) Tubeway⁶⁾

Tubeway는 고갈되어 가고 있는 화석연료에 의존하고 있는 현재의 교통수단에 대한 대체 방안으로 연구되기 시작되어 혁신적이며 에너지 절약적이고 친환경적인 기술에 의

한 여객 및 화물수송을 목적으로 하는 튜브운송시스템의 한 형태이다. 이 시스템은 이미 150년 전부터 연구 시험되어 오고 있던 공압 배달(Pneumatic dispatch) 장치에 기반하지만 압축공기와 함께 흡입공기를 이용하며 또한 광전지 기술을 도입하여 환경적 이점과 높은 효율성을 가진 새로운 교통수단으로 발전되고 있다. 고가선로와 비슷하게 건설되는 투명한 튜브는 현재의 수송 시스템을 연장한 것이라 할 수 있으며, 자동 제어되는 구동 유닛이 여객이나 화물을 싣고 유리 튜브 안을 미끄러지듯이 달린다. Tubeway는 대중교통수단으로서 개인승객과 일반 화물운수업체를 위하여 설계된 것이며, 그 제조와 건설이 용이하다.

Tubeway의 특징으로는 낮은 자체 하중과 효율적인 형태, 공압기술(Pneumatic Technology)을 이용한 부드러운 주행, 그리고 광전지 및/또는 송전 네트워크를 사용한다는 점이다. 또한 이 시스템은 기상 조건과 관계없으며, 낮은 마찰 계수를 가지므로 내구성이 있으며, 유지보수 비용이 적게 소요되는 이점이 있다. 추가적으로 Tubeway 시스템이 지니고 있는 장점을 살펴보면, 석유를 소비하지 않음으로 인해 기존 화석연료를 사용한 교통수단에 의한 배연으로 인한

환경오염문제를 해결하는데 획기적으로 기여할 수 있으며, 건설비용과 유지보수비용이 기존 도로교통 비용보다 적게 소요되고, 이로 인해 저렴한 비용으로 이 시스템을 이용할 수 있다. 그리고 다양한 안전시스템을 도입하여 기존 철도나 항공시스템에 비하여 매우 안전할 수 있다. 또한 튜브내를 이동하는 글라이딩 캡슐의 설계를 변경하여 다양한 크기 및 형태의 화물 수송용이나 개인적인 용도로 활용할 수 있을 것이다.

기존 튜브운송기술 비교 분석

앞에서 살펴본 기존의 다섯 가지 튜브운송기술들을 비교 분석하여 표 1 ~ 표 3에 나타내었다.

먼저, 일반적인 사항 중 개발 국가, 개발형태, 연구시작 연도에 대해 분석하였는데, 개발 국가는 미국이 3개, 독일, 오스트리아, 러시아 등이었다. 개발 형태는 대학연구에서 민간기업으로 이전된 형태가 제일 많았으며, ET3, Tubeway는 개인의 아이디어를 바탕으로 소규모 기업으로 발전한 경우이다. TubExpress는 종래의 캡슐-파이프라인 개념으로 개발되기 시작한 때가 1960년대이며, 이후 리니어모터를 적용하는 현대적인 튜브운송의 개념으로 발전하여 개발이 진행되고 있으며, 이를 제외하고는 대부분 1990년대에 연구가 시작되었다. CargoCap의 경우에는 현재 1/2 모델을 제작하여 주행, 추진 시험이 진행되고 있는 등 활발히 연구가 진행되고 있으며, ET3나 Tubeway, Flextaxi는 개인 또는 소규모 연구그룹에 의한 아이디어의 정립 단계에 있는 상황으로 파악된다.

1) 운영 개념

표 3에서 각 시스템의 운영 개념을 살펴보면, TubExpress와 CargoCap은 화물운송을 목표로 하지만, 각각 도시 간 물류와 도시 내 물류를 목표로 하는 점에서 차이가 있다. ET3는 여객을 우선적으로 고려하고 있으며 도시 내에서 대륙 간까지 다양한 거리를 목표로 하고 있다. 나머지는 모두 여객과 화물 모두를 대상으로 하여 주로 광역 도시권 내에서의 운영

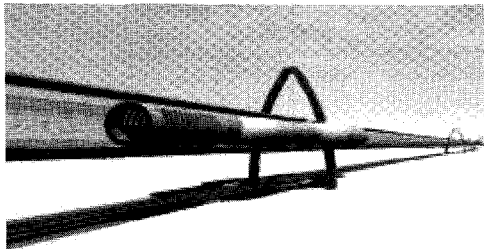


그림 11 Tubeway 개념도

표 1 기존 튜브운송기술 분석(일반)

구분	1	2	3	4	5
	TubExpress	CargoCap	ET3	Flextaxi	Tubeway
국가	미국	독일	미국	러시아	오스트리아
개발 형태	대학 연구 -> 민간기업 설립	대학 연구 -> 민간기업 설립	개인 연구 -> 민간기업 설립	대학 연구	개인 연구 -> 민간기업 설립
연구시작	1960's	1996	1990's	1990's	1990's

표 2 기존 튜브운송기술 분석(운영 개념)

구분	1	2	3	4	5
	TubExpress	CargoCap	ET3	Flextaxi	Tubeway
개요	도시 간 장거리 화물운송트럭을 대체하기 위한 지하 물류운송	도시 내 지하공간을 이용한 24시간 자동 물류운송	초고속 개별 여객 서비스	다목적 door-to-door 여객 서비스	도시 간 대량 통근 운송
용도	화물	화물	여객	여객, 화물	여객, 화물
운영 조건	도시 간	혼잡한 도심 내	도시 간/대륙 간	광역도시권	광역도시권, 산악교통, 도시 간, 신도시
운영 최고속도	36km/h	36km/h	320~6400km/h	192km/h	300km/h 이상
시격/간격	21sec (210m)	N/A	0.125sec@500km/h	10~15sec	N/A
캡슐당 운송량	8 ton	2 ton	6 seats	N/A	28 seat
시간 당 운송량 (편도)	1000ton/hr (70% load factor)	N/A	0.172M seat/hr (@350mph), 2M seats/hr (@4000mph)	N/A	45,000 seats/hr

을 목표로 하고 있다. 튜브운송의 여객 또는 여객·화물 겸용으로 개발되는 경우 속도가 200km/h 이상의 고속으로 추진되지만, 화물전용으로 개발되는 TubExpress나 CargoCap의 경우에는 모두 36km/h의 속도를 목표로 하고 있다.

캡슐의 최소 시간 간격(headway)은 대부분 20초 이하이므로 수송용량이 매우 크며, 특히 ET3의 경우에는 분기부의 전환이 필요 없는 수동형 분기부를 이용함으로써 0.125sec의 매우 짧은 시격으로 운행이 가능하여 수송용량을 매우 크게 할 수 있다. 캡슐 당 수송량은 TubExpress와 CargoCap은 각각 8ton과 2ton으로 도시 내 소량화물에 적합한 CargoCap이 캡슐당 수송용량이 더 작으며, TubExpress는 미국 내 도시 간 장거리 화물트럭을 대체하기 위한 개념이므로 보다 큰 캡슐당 수송량을 갖는다. 여객의 경우 ET3은 좌석 수 6개의 매우 작은 캡슐을 사용하므로 개별 여행객의 편의성에 중점을 두었으며, Flextaxi도 정확한 좌석 수는 문헌에 나타나지 않았지만 이와 유사하게 작은 좌석 수를 가질 것으로 추측된다. Tubeway는 28석으로 개별여행과 대량운송의 중간정도 수준에 위치하는 것으로 나타났다. 시간 당 운송량은 TubExpress는 시간당 1000ton의 화물운송이 가능하며, ET3는 시간 당 172,000인으로 여객운송 중 최대이며, Tubeway는 시간당 45,000인의 수송량을 목표로 하고 있다.

2) 기술적 특징

표 3에는 각 시스템의 기술적 특징을 비교하여 나타내고 있다. 저속 화물용 튜브시스템(TubExpress, CargoCap)의 경우에는 기존의 도로나 도시 내의 지하공간을 이용하여 튜브를 건설하고 전통적인 휠/레일의 반력지지 방식을 이용

하는 것으로 나타났다. 그러나, 고속의 여객용 튜브운송의 경우에는 저마찰 소재를 이용하여 지지한 후 공압으로 추진하는 Tubeway를 제외하고는 모두 자기부상 방식을 이용하여 캡슐을 부상시킨 후 리니어모터를 이용하여 추진하는 방식을 택하고 있다.

튜브의 구조를 살펴보면, TubExpress는 직경 2m의 튜브를 지하에 매설한 후 평판형 레일을 설치하고, 캡슐에 부착된 4개의 강철휠로 하중을 지지하고, 4개의 고무휠로 좌우를 지지한다. CargoCap의 경우에는 이보다 좀 더 작은 1.6m 직경의 튜브 내에 일반 레일을 설치하고 모터가 부착된 철제 휠을 이용하여 지지되고 추진된다. CargoCap은 도시 내에 설치된 복잡한 튜브 네트워크에서 운용되기 때문에 많은 분기부를 통과하게 된다. 따라서, 무감속 분기기술을 적용하여 분기부 통과 시의 속도저하를 방지하여 운송용량을 증대할 수 있도록 하였다. ET3는 개인여행을 목적으로 하기 때문에 가장 작은 1.5m 직경의 튜브를 이용하는데, 튜브 내를 진공으로 유지하여 공기저항을 완전히 제거하기 때문에 초고속의 운행이 가능하다. 중고속의 여객용 튜브운송인 Flextaxi나 Tubeway는 각각 2m와 2.1m 직경의 튜브를 이용하며, 채광 및 조망을 위하여 투명 혹은 반투명의 플라스틱이나 유리섬유로 튜브를 제작하여 여행자의 편의성을 제고하도록 하였으며, 고가교 위나 기존의 고층건물에 케이블로 연결하는 방식으로 튜브를 설치하도록 하고 있다.

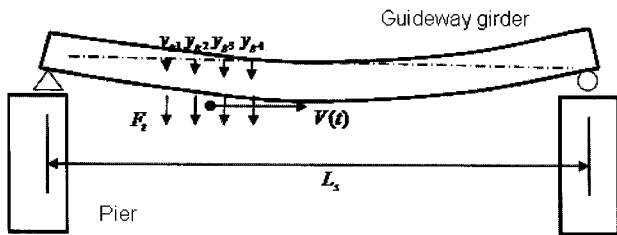
캡슐의 중량은 6인승의 ET3의 경우 최소 120kg의 초경량 제작이 가능하다. Tubeway의 경우에는 자체적인 추력을 가지는 구동유닛의 경우 1.3ton의 중량을 가지며, 구동유닛에 의해 유도된 기류에 의해 이동하는 일반유닛의 경우에는 약 300kg에서 600kg의 중량으로 설계된다. 모든 시스템

표 3 기존 튜브운송기술 분석(기술 특징)

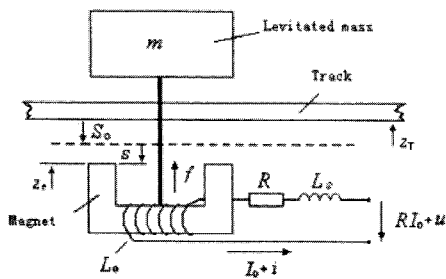
구분	1 2 3 4 5					
	TubExpress	CargoCap	ET3	Flextaxi	Tubeway	
기술 개요	기존 고속도로 지하에 콘크리트 튜브 선로 건설	굴착기법 이용 지상공사 최소화, 추진·제어는 기존 기술 이용	진공튜브를 이용 주행저항 제거, 자기부상추진기술로 초고속 운송	지상고가에 튜브를 설치하여 조망성, 내진성 높임	공압추진시스템과 저마찰 코팅소재 이용	
건설 장소	지하, 해저	지하	지상, 지하, 해저	지상 (도심 전력선 위)	지상	
부상방식	반력지지	반력지지	자기부상	자기부상	반력지지 (직접접촉)	
추진방식	휠+레일	휠+레일	LSM	LIM+공압추진	공압추진	
튜브	형식	튜브+평판레일	튜브+레일 무감속 분기부	진공 튜브 무감속 분기부	지상고가 튜브	튜브+접촉식
	재료	콘크리트	철근콘크리트	강철	플라스틱	유리섬유
	튜브 직경	2m	2.0m	1.5m	2m	2.1m
캡슐	형식	강철휠 4개 고무휠 4개	유선형 전두부, 직경 200mm 휠	내경 1.3m, 두께 1.34mm	N/A	구동유닛 1개 + 일반유닛 60개
	중량	N/A	800kg	120kg	N/A	300~600kg (일반유닛) 1.3t (구동유닛)
운영제어	중앙 컴퓨터 제어	중앙 컴퓨터 제어 + 차상 컴퓨터	N/A	N/A	N/A	
전력시스템	N/A	3400W(정속) 35000W(최고)	N/A	N/A	1450kw 3상모터 태양열 보조발전	

에 있어 운영제어는 중앙컴퓨터에 의한 자동제어를 이용하는 것으로 밝혀져 있거나 추정된다.

튜브운송의 핵심기술과 전망



(a) 가이드웨이 구조물 모델



(b) 차량 현가장치 모델

그림 12 차량-구조물 동적 상호작용 해석모델

앞서 근대 육상교통의 발전을 살펴보면, 새로운 교통수단의 출현에는 핵심기술(key technology)의 발명이 전제되는 것을 알 수 있었으며, 철도의 경우 고압증기기관, 도로의 경우에는 내연기관이 각 교통수단의 지배적 등장을 가능하게 하였음을 알 수 있었다. 튜브운송의 경우에서도 좁은 튜브 내에서의 공기저항을 효율적으로 극복할 수 있는 튜브 내 추진기술이 튜브운송기술의 성패를 좌우할 것으로 판단된다.

튜브운송시스템은 밀폐된 튜브 내에서 캡슐이 이동하게 되므로, 기존의 교통수단과 다른 추진시스템이 필요하다. 공기 중에 이동하는 모든 물체는 속도의 제곱에 비례하는 공기저항을 경험하게 되는데, 튜브 내에서는 개활지에 비해 공기저항이 훨씬 더 커지기 때문이다. 따라서, 튜브운송의 이전 형태인 캡슐-파이프라인 시스템에서는 주로 공압추진을 이용하여 캡슐을 이동시켰다. 공압 추진 방식은 튜브 내에서 발생하는 높은 공기저항의 문제를 원천적으로 해결할 뿐만 아니라 에너지 효율이 증대하고, 운송체인 캡슐에 별도의 추진기관이 필요하지 않기 때문에 구조가 간단하고 제작비용이 저렴한 특성이 있다. 그러나, 공압 추진 방식은 고속주행과 캡슐의 정교한 제어가 힘들다는 문제점이 있기 때문에 최근에는 기존의 휠-레일 시스템에서부터 리니어모터 및 자기부상기술 등을 이용한 새로운 추진/부상기술을 튜브운송에 적용하여 보다 효율적이고 안전한 시

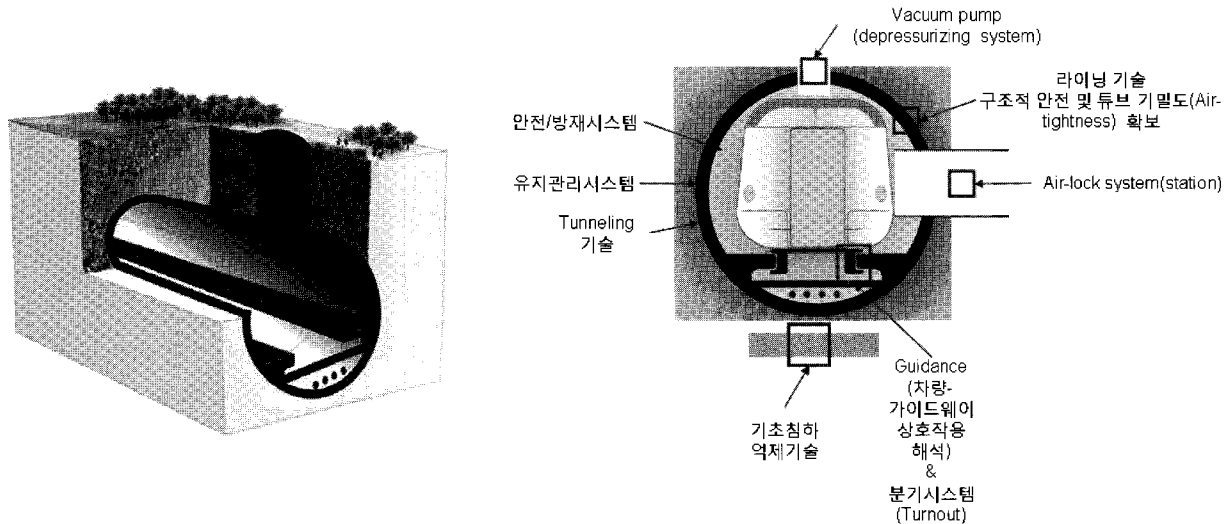


그림 13 아진공 튜브구조물의 개념과 핵심 요소기술

시스템을 개발하고자 시도하고 있다. 자기부상기술을 도입할 경우 튜브구조물과 차량과의 동적상호작용 해석기술이 구조물과 차량의 설계에 있어 매우 중요한 핵심기술이 된다.

진공기술을 튜브운송의 추진기술에 응용하는 것도 이러한 새롭고 혁신적인 시도 중의 하나이다. 튜브 내를 진공 또는 진공에 가깝게 유지할 수 있다면 공기저항은 현저히 감소하게 되므로 아주 작은 동력으로도 캡슐의 추진이 가능하다. 또한, 속도가 증가하여도 공기저항은 증가하지 않고, 음속을 초과하더라도 충격파가 발생하지 않기 때문에 초음속 여객기와 같은 속도로의 운행도 가능하다. 이와 같이 진공 또는 아진공 상태의 튜브 구조물을 실현하기 위해서는 대용량의 진공기술이 필요하고, 항공기에 준하는 안전장치와 튜브구조물 내에서의 승객대피 등 안전/방재 시스템이 중요하게 고려되어야 한다. 또 튜브를 이루는 재료는 공기 유출을 막을 수 있을 정도로 충분히 밀실해야 하므로 기밀성이 높은 건설재료기술도 필요하며, 또한 정거장에서는 승객이 타고 내릴 때 필요한 air-lock system 기술도 적용되어야 할 것이다. 이런 여러 가지 기술적 한계를 극복하고 저렴한 비용으로 튜브를 진공으로 유지하는 기술이 개발되어 튜브운송시스템에 도입된다면, 튜브운송기술을 이용한 음속 이상의 속도에서 운행이 가능하여 대륙 간 초고속 육상운송의 실현도 기대해볼 수 있을 것이다.

맺음말

본 고에서는 기존 육상교통의 한계를 극복하고 고밀도 고속운송을 실현할 친환경적인 미래 신교통시스템으로 주목받고 있는 튜브운송기술의 개념과 역사, 최신 연구동향

과 앞으로의 발전방향 등에 대해 살펴보았다.

1990년대 이후 현대적 의미로 재정립된 튜브운송기술은 화물이나 여객을 탑재한 캡슐을 튜브망 내에서 중앙자동제어 방식으로 운송하여 효율성, 이용편의성, 안전성 등을 증대시키고 에너지, 자원, 토지 이용을 최소화시키는 교통기술로서, 날로 증가하는 물류, 교통 수요에 대응하여 물류운송비용의 저감 및 기존 교통수요의 부담을 통한 교통혼잡비용의 저감과 함께 여행시간의 단축을 통한 여행자의 교통편의 증대와 국토 이용의 효율화를 꾀할 수 있기 때문에 미래의 지배적인 육상운송수단으로서의 가능성이 큰 것으로 보인다. 따라서, 튜브운송기술이 갖는 고유의 본질적 장점이 효율적인 추진기술 및 인프라 구축기술과 잘 결합된다면 미래 교통수단의 유력한 대안으로 자리매김 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. Vance, L., Mattson, P., (1994), Tube Transportation, US Dept of Transportation, Volpe National Transportation Systems Center, Feb.)
2. <http://www.tubexpress.com/index.htm>
3. http://www.cargocap.de/html_en/strasse_01.html
4. <http://et3.com/index.html>
5. <http://faculty.washington.edu/~jbs/itrans/flextaxi.htm>
6. <http://www.tubeway.de>