

지하 화물교통체계의 개발현황과 전망

Underground Freight Transportation: Issues and Development

남두희*
Nam, Doohee

권혁빈**
Kwon, Hyukbin

ABSTRACT

Urban areas face congestion problems that diminish personal mobility and freight-transportation productivity. An increasing number of experts suggest that separating freight traffic from passenger traffic makes sense in terms of economics, the environment, and safety. Some experts suggest that underground freight transportation are the solution. The objective of this paper is to review the potential benefits and limitations of freight pipelines as a viable mode of cargo transport that can alleviate congestion on urban highways.

1. 서 론

2004년 국내 부문의 국가물류비는 92조4천590억원으로 GDP 대비 국가 물류비 비중은 11.9%를 차지하고 있다. 기업 물류비 중 운송비가 차지하는 비중은 2001년 46.5%, 2003년 52.7%, 2005년 58.3%로 급격한 상승곡선을 보이고 있는 반면, 보관비는 정보화된 물류체계를 구축함으로 인하여 점차 줄어들고 있다. 2005년을 기준으로 각 수단별 수송 분담률을 보면 여객, 화물 모두 도로가 74.6%, 76.5%로 가장 높고, 여객수송 보다는 화물량의 증가율이 커서 향후 이로 인한 대기오염은 더욱 심각해질 것으로 보인다. 또한 유가상승 및 교통체증의 심화로 인하여 도로를 이용한 화물운송의 물류비 증가는 더욱 심해질 것으로 판단된다. 많은 인구와 큰 경제 규모를 가진 혼잡한 도시 지역은 질 높은 운송 서비스를 요구하고 있다. 소형 우편물의 증가, 산업 물류 등은 소량의 물품을 정해진 시간내에 도착시켜야 하는 특성을 가지고 있다.

인구의 정체 및 감소에도 불구하고 차량 및 화물수송 수요의 증가로 인하여 도로중심의 수송체계에서 타 수송수단 및 신교통수단으로의 전이가 요구된다고 하겠다. 도시 지역의 도로 확장은 공간적인 제약으로 인해 한계점을 드러내고 있어 이러한 운송 서비스를 공급하기 위해 지하 화물운송수단이 개발되고 있다.

2. 지하 화물교통(UFT : Underground Freight Transportation)

지하공간을 이용한 화물교통은 150년 전부터 터널과 튜브를 사용하여 액체 등 여러 형태의 화물을 이송하는데 사용되어왔다.

* 한성대학교 교수, 정회원

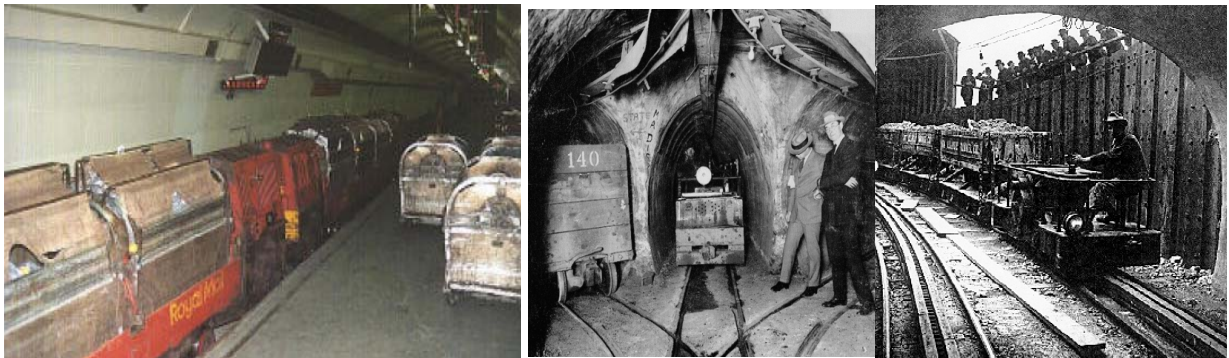
E-mail : doohee@hansung.ac.kr

TEL : (02)760-5931 FAX : (02)760-5930

** 철도기술연구원

*** 저자3의 소속

1853년 영국 런던에는 지하 파이프라인을 설치하여 통신사간 메시지 전송에 사용된 것을 시작으로 1861년부터 1874년까지는 직경 30인치의 파이프라인을 설치하여 무게 3톤 정도의 캡슐을 40mph 속도로 우편수송에 사용하였다. 비슷한 시스템이 19~20세기에 걸쳐 뉴욕, 파리, 베를린, 프라하 등에 설치되었다. 영국은 또한 1928년부터 전기를 사용하는 우편철도시스템인 Royal Mail을 운영하고 있으며 이는 세계에서 자동화된 지하 화물시스템 중 가장 오래된 것이다. 또한 승객용으로 1864년 프로토타입을 전시하였으며, 1860년대 미국의 알프레드 비치가 승객과 우편물 운송 용도로 몇 가지 프로토타입이 제시된 적이 있다. 미국 시카고 터널회사에서는 1899년부터 1959년 까지 시카고 도심 지하에 60마일 연장의 철도 네트워크를 구성하고 149대의 전기 기관차와 3,000대의 화차를 이용하여 여러 형태의 화물을 수송하였다.

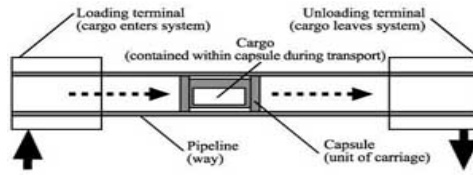


<그림 1> 영국 지하 우편철도와 시카고 화물터널

2.1 튜브운송시스템

5대 주요 수송수단인 도로, 철도, 항공, 해운, 파이프라인 중 파이프라인에 해당되는 운송수단으로, 파이프라인은 현재까지 주로 유류 운송에 사용되어 왔으나 점차 소량화물(우편 및 현금) 및 광물 등의 화물 수송에 쓰이고 있으며 승객 및 중량화물까지 운반하려는 연구개발이 진행 중에 있다. 튜브운송수단은 파이프라인을 이용함으로써 혼잡한 도심에서 화물을 빠르고 적시에 운송이 가능하도록 하는 안전하고 경제적인 시스템으로 평가받고 있다. 또한 파이프라인을 통해 운송되는 캡슐을 각각 개별적으로 이동시킬 수 있고, 무인운전이 가능하고 지상의 교통 상황 및 날씨에 영향을 받지 않는 시스템이다. 도로교통 혼잡비용이 증가하고 있고 화물운송에 대한 요구가 증가됨에 따라 튜브를 이용한 접근법이 각광을 받고 있다. 튜브의 가장 큰 장점으로서는 두 가지를 들 수 있다. 첫째, 지하를 통한 중심부 연결이 가능하다. 지하에 설치된 수송 파이프 네트워크를 통해 도시를 통과하게 되므로 지상의 교통 혼잡, 도로교통 신호, 고장, 사고에 무관하게 되어 정확한 지점 및 시간에 최적화된 절차로 운송이 가능하며 또한 컴퓨터에 의해 제어□운영되는 차세대 수송시스템으로 환경 친화적이다. 둘째, 공간 및 에너지 자원의 절약이 가능하다. 첨단기술을 사용한 빠른 건설과 환경 친화적인 파이프라인 건설기법의 사용으로 공간, 에너지 및 자원이 절약된다.

튜브운송시스템은 캡슐 파이프라인 시스템 형태로 다른 지상 운송 시스템과 유사한 형태를 보인다. 입출구 역할을 하는 터미널과 터미널을 잇는 링크(파이프라인)가 존재하며 화물을 실은 운반체(캡슐)는 파이프라인을 따라 이동하는 시스템으로 개념적인 관점에서는 도로 혹은 열차 시스템과 크게 다르지 않다. 하지만 캡슐 파이프라인 운송 방법은 파이프라인 사이를 이동하는 캡슐이나 튜브에 움직일 수 있는 동력이 주어지지 않았다는 점에서 다른 운송 수단과 구분될 수 있다.



<그림 2> 캡슐 파이프라인 개요도

□ Pneumatic Capsule Pipelines (PCP)

공기의 압력차를 이용하여 파이프를 따라 캡슐이 이동하게 되는 유체역학이론을 바탕으로 한다. 튜브에 공기를 넣어 캡슐을 이동시키는 원리로 주로 고정된 위치 간에 소규모 소량화물 운송을 하는데 사용한다. 병원에서의 의료물품 및 서류 이송, 공장내 상품 이송, 사무실 우편 및 문서 배달, 은행 또는 상점의 현금 운송 사례를 들 수 있다. 운송 중에는 파이프라인의 양쪽 끝을 밀봉하여 캡슐의 앞과 뒤의 공기 압력을 조절하는데 이는 여러 캡슐을 위한 충분한 압력 생성에 비효율적이기 때문에 단순한 PCP 방식은 한 번에 하나의 캡슐만을 전송할 수밖에 없다. 현대 PCP 시스템은 제트 펌프 주입기라고 불리는 유압 펌프를 사용한다. 이 장치는 여러 캡슐이 이동할 수 있도록 압력 차이를 생성하는데 펌프 주입기를 파이프라인의 가운데 설치하여 공기를 불어 넣으면 파이프를 이동하는 두 캡슐간의 압력 차이가 발생하는 방식이다. 긴 파이프라인에서 규칙적인 간격으로 펌프 주입기를 설치하면 많은 캡슐들을 동시에 운송할 수 있다. 프라하에 설치된 튜브 시스템은 전체 길이 약 55km로 최대 3kg, 직경 5cm, 높이 30cm의 물건을 전송할 수 있다. 중앙 제어실은 프라하 우체국 건물에 위치하고 있다. 운송 통로는 내부 직경 65mm의 강철 파이프로 구성되어 있으며 90~150cm의 길이로 문혀 있다. 각 라인 별로 최대 10개의 캡슐을 운반할 수 있으며 제어 장치 전면부에 운반되고 있는 캡슐 개수가 표시되며 캡슐은 평균 속도 35km정도로 운반된다. 중대형 화물은 바퀴달린 캡슐을 사용하며 일본에서 광물 운송용으로 1983년부터 튜브 직경 1미터, 대당 1.6톤을 운반하는 시스템을 운영중이다. 초기 미국의 Tubexpress, 러시아의 Transprogress에서 중대형 운송시스템을 선보였고 공기압 캡슐 시스템은 소규모 화물 운송에만 한정되어 있지 않으며, 팔레트로 상품을 운반하는 방식도 개발되고 있다.

□ Hydraulic Capsule Pipelines (HCP)

HCP에서는 파이프를 따라 흐르는 물의 흐름을 이용해 캡슐을 운반한다. 유속이 낮으면 캡슐은 파이프 바닥을 따라 흘러내려 가지만 유속이 빠르면 캡슐이 물 위에 떠서 이동하게 되어 PCP에 비해 약 10~30%의 에너지를 절약할 수 있다.

□ Electro Magnetic/Linear Induction

기존 공기압 파이프라인은 공기압의 특성상 용량에 제한이 있으나 전자기 추진력 사용시 캡슐의 직접 조정이 가능하여 시스템 용량을 증가시킬 수 있다. 전자기 선형 유도를 이용한 캡슐 운송 방법은 유압 운송 파이프라인 방법의 대체 수단으로써 제안되었다. 캡슐이 파이프라인에 감긴 전자기 유도 코일을 따라 이동함으로써 각 캡슐에는 전자기 추진력이 생기게 된다. 선형 유도 추진방식(LIM)은 코일이 파이프라인에 규칙적인 간격으로 위치하며 선형 동기 추진방식(LSM)은 연속된 코일이 설치된다. 이 방법은 유압 펌프를 이용한 PCP 방법보다 빠른 속도로(최대 60mph) 많은 양을 운반할 수 있다. 1984년 William Vardersteel에 의해 특허 출원된 선형 모터 방식에 따르면 튜브 전체에 설치할 필요 없이 특정 구간위치에 설치하면 되며 캡슐은 피스톤 역할을 하고 튜브내 다른 튜브를 움직이게 된다.

□ Automated Vehicle System

자동 차량시스템은 지하 화물교통에 있어 특히 관심이 모아지고 있는데 외부의 방해 없이 지하에서 운영할 수 있어 신뢰성과 효율성 증가가 기대된다. 오늘날 화물 운송 중 가장 중요한 수단으로 사용되는 트럭의 자동화를 1980년대 일본 건설성의 공공노동연구원(PWRD)에서 지하화물 교통과 이중용도트럭(DMT)에 대한 연구를 수행하였다. 비슷한 개념으로 Automated Guided Vehicle 방식이 있으며 Metrofreight으로 불리는 영국 Royal Mail 터널이 있다.

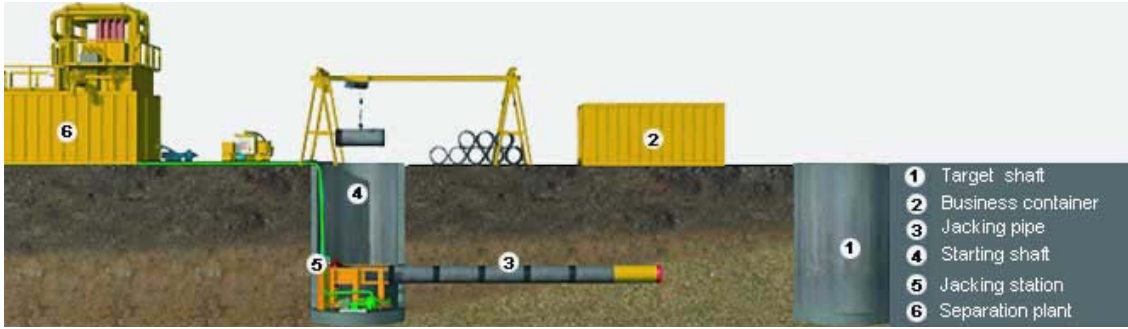
2.2 튜브시스템의 적용

튜브시스템은 다음과 같은 적용가능 분야를 생각할 수 있다. 첫 번째로 광석운반을 들 수 있다. 1980년도 스미토모에서 석회석운반을 위해 개발한 시스템이 그 예이다. 3개의 캡슐이 연결된 형태로 각 캡슐은 2톤의 석회암을 운반하게 설계되었고 연간 1백만 톤(2006년 기준)을 운반하고 있다. 컨베이어시스템보다 효율적이고 안정적인 시스템으로 증명이 되었다. 두 번째는 폐기물 운반이다. 2004년 뉴욕시에서 시내에서 발생하는 폐기물의 운반을 위해 튜브운송시스템을 계획하였다. 6MTY(metric tons a year)을 운송하도록 설계되었고 트럭을 이용하는 것에 비해 비용대비 경제성이 우수함을 보였다.

무엇보다도 튜브시스템의 진가는 Pallet형태의 제품 운반에 쓰일 때이다. 현재 트럭으로 운반되는 모든 화물은 박스 형태나 팔레트로 운반되고 있어 튜브시스템을 설계할 때 팔레트의 크기를 고려한 설계는 효율성을 높일 수 있다. 미국의 표준 팔레트 크기는 40inch(1.02m)×48inch(1.22m)로 1.22m 폭과 6.40m 길이의 화차로 5개의 팔레트를 운반할 수 있다. 터널의 직경은 2.13m로 설계되었다. 컨테이너를 운반하기 위해서는 4.57m의 원형터널이나 폭 3m 높이 4m의 터널이 필요하고 철도를 이용하고 LIM추진체계 이용을 생각할 수 있다. 소음문제가 있으나 대부분 지하에서 운행하는 점과 화물운송이 주가 되는 것을 고려하면 경제적 관점에서 고무타이어보다는 속도와 에너지 측면에서 steel wheel이 경제적으로 분석되었다.

3. 튜브운송시스템 개발 현황

튜브운송기술의 개념이 정립된 것은 1994년경으로 물류운송 및 여객운송용으로 10여 년 동안 튜브운송 기술 실용화 연구를 진행 중에 있다. 실제 운영 사례는 극소수에 불과하기 때문에 시스템 검증은 안 되어 있어 각 시스템에서 주장하는 성능과 사양중심으로 기술하도록 한다. 미국은 종래의 공기 압력식(Pneumatic) 소형튜브운송기술을 바탕으로 장거리 트럭운송을 대체할 목적으로 선형모터 추진 방식의 TUBEXPRESS를 연구 중이며, 독일은 도시내 지능형 물류시스템의 연구결과를 바탕으로 2002년 CargoCap社를 설립하고 실용화 준비 중에 있다. CargoCap은 철로를 이용한 방식으로 선형모터에 의해 운행되는 철도 차량으로 도심내, 산업시설, 비즈니스센터, 물류창고, 공항 간을 연결하도록 개발되었고 튜브 직경은 1.6m, 두 개 팔레트 규모의 캡슐(W*L*H = 800*1200*1050mm)을 사용한다. 자동운행방식으로 차량의 속도는 36kph, 차량간 간격 2m로 현재 프로토타입이 개발되어 있다. CargoCap의 지하 파이프 네트워크는 지상 구조물에 영향을 받지 않는 pipe-jacking 방법을 통해 구축된다. 컴퓨터 제어식으로 두 지점(Starting shaft, Target shaft)간의 파이프를 밀어 넣는 방법을 사용하며 수 cm만의 오차를 가질 정도로 정확한 건설이 가능하다.



<그림 3> CargoCap의 pipejacking 구성도

pipe-jacking 방법은 교통 시설 및 여러 지상 구조물에 대한 영향을 최소화하고 깊이에 관계없이 빠르게 건설할 수 있는 장점을 가지고 있다. pipe-jacking 건설기법과 작은 직경을 갖는 운송 파이프를 사용하기 때문에 이미 존재하는 기반시설 옆이나 아래에 설치될 수 있다. CargoCap은 지하에 건설하기 때문에 제한없이 쉽게 확장할 수 있으며 추가적인 파이프 건설로 화물 운송량을 증가시킬 수 있다. Cap은 2개의 euro-pallet을 적재할 수 있는데 Cap의 바퀴는 베어링 기능을 하고 측방 롤러는 Cap이 트랙에서 이탈되지 않도록 고정시키는 역할을 한다. Cap은 3단계 비동기 모터로 움직이는데 이 모터는 주파수 변조기(frequency converter)로부터 전력 공급을 받는다. 이러한 동작 방식은 전력 소모가 적고 수명이 길다는 장점과 적은 초기 투자비용으로도 기반 시설을 건설할 수 있다. CargoCap의 다른 중요한 측면은 완전 자동화된 운영 관리가 가능하다는 점이라고 할 수 있다. 이 시스템은 분산 아키텍처 형태로 트랙, 운반체, shunting, load turnover 제어를 관리한다.

여객운송용으로는 1990년대 스위스가 진공에 가까운 터널을 이용한 초고속 자기부상운송시스템인 SWISSMETRO기술을 2001년 미국의 ET3가 소형터널을 이용한 초고속 door-to-door 여객운송시스템(Evacuated Tube Transport:ETT)으로 개발 중이며 플로리다 고속운송시스템에 제안된 바가 있다. 또한 러시아에서는 기존의 거대도시의 여객교통을 대체할 수 있는 Flexitaxi를 연구 중이다.



<그림 4> Cargocap, et3와 Flexitaxi 상상도

ETT는 새로운 승객 운송시스템으로 차량이나 항공기보다 매우 적은 에너지를 소비한다. SUV 크기의 캡슐은 ETT 네트워크상의 어디든지 non-stop으로 이동될 수 있고 수많은 작은 터미널들이 넓은 지역에 분포되어 있기 때문에 접근성이 높다. 또한, ETT캡슐 안에 적재될 수 있는 MoPod 소형 차량을 이용하면 가까운 ETT 역으로 몇 분 안에 이동할 수 있다. 지역 도시간 이동에는 최대 350마일, 국가 간 이동은 최대 4000마일의 속도를 낼 수 있다고 주장하고 있다. Freight Pipeline Company의 경우 PCP, HCP, CLP방식을 제안하고 있다. Pneumatic capsule pipeline (PCP)는 공기로 차 있는 파이프라인과 바퀴 달린 캡슐(화물이 적재되는 캐리어)을 이용해 화물을 운반한다. 공기는 파이프라인에서 캡슐을 미는 역할을 한다. 3피트 직경의 파이프라인에서 각 캡슐은 약 25마일 속도로 2톤 무게의 화물을 운반할 수 있다. 메일이나 소포와 같은 제품 운송에 사용될 수 있으며, 큰 도시의 지하 운송 체계에 적합하다. Hydraulic capsule pipeline (HCP)는 유체가 차 있는 파이프라인과 바퀴가 없는 캡슐로 화물을 운반한다. 유체는 캡슐을 띄우고 미는 역할을 하여 초당 6~10피트만큼 화물을 운반하는데 이는 PCP보다 훨씬 낮은 속도이다. 하지만 HCP와 PCP의 파이프라인과 같은 직경을 사용한다면 HCP가 PCP에 비해 몇 배 많은 양을 운반할 수 있고, PCP보다 에너지 소모량이 적으며 경제적이다. Coal log pipeline (CLP)는 HCP의 특수한 유형으로 캡슐은 유체와 파이프에 직접 접촉할 수 있는 압축된 coal 형태를 취한다. CLP에서는 컨테이너가 필요하지 않기 때문에 빈 컨테이너 회송용 운행이나 전용 파이프라인이 필요 없다. CLP는 캡슐 파이프라인 운송 방법 중 비용면에서 가장 효율적이나 석탄 등 광물, 고체 폐기 물질 등으로 한정되어 있다. Magplane Pipeline Transport는 선형 동기 모터(Linear Synchronous Motor)를 이용한다. Magplane 캡슐 파이프라인 개발은 플로리다 인근 광산에서 기존 운송 방법이 가지고 있던 환경 문제를 줄이기 위한 비용효율적인 방법을 찾기 위해 시작되어 채굴 지역과 항구를 잇는 50km의 파이프라인이 Lakeland의 IMC-Agrico 회사에 의해 건설되었다. 60cm 직경의 파이프라인을 사용하였고, 최대 65km/h 속도를 보였으며, 1.8m의 휠베이스 길이와 270kg의 적재량을 가지고 있다.

<표 1> 튜브운송시스템 적용사양 비교

구분	직경(m)	용량(ton)	속도(km/h)	비고
런던	0.76	3	64	우편
시카고	2.3			화물, 석탄
일본	1	1.6		광물
뉴욕	2.13			팔레트(1.02×1.22×6.4m)
OLS	2~2.5, 5			꽃, 팔레트, 컨테이너
CargoCap	1.6		36	팔레트(0.8×1.2×1.05m) LIM, 차량간격 2m
Freight Pipeline	0.9	2	40	
Magplane Pipeline	0.6	0.27	65	LSM, 50km 구간
ET3			6,437	여객용(8인)

제언 및 결론

새로운 화물운송시스템으로 지하공간을 활용한 튜브운송시스템의 연구가 활발하다. 국외에서는 개념 연구수준을 넘어 적용단계의 연구가 진행 중에 있음을 알 수 있다. 또한 텍사스 교통국 및 FHWA의 협력으로 수행된 '고속도로 정체 완화를 위한 튜브(Tube) 수송의 타당성' 연구를 비롯하여 여러 국가에서 정부 차원에서 튜브운송기술의 경제적 타당성을 평가한 적이 있으며, 향후 이에 대한 실용화를 위하여 정부뿐만 아니라 민간업체 차원의 연구도 진행 중에 있다. 앞서 제시된 바와 같이 튜브운송시스템의 전체적인 시스템 구현 계획은 제시된 바는 없으나, 개별 기술 요소별 특허 및 상용화 연구가 진행 중에 있어 조만간 상용화 및 표준관련 활동이 예상된다. 미래의 화물수송수요에 대응하고 효율적이고 환경친화적인 화물운송시스템의 연구가 필요하다. 이를 위해 경제성을 고려한 시스템의 성능조건 연구와 세부 기술개발이 필요하다고 하겠다.

참고문헌

1. 국가물류기본계획 수정계획(2006~2020), 건설교통부, 2006
2. 2006년 기업물류비 실태조사 및 기업물류비 산정지침 보고서, 산업자원부, 2007.5.
3. 화물자동차 전용도로 및 전용차로의 도입을 위한 기초연구, 한국교통연구원, 2002
4. FHWA (2001). Feasibility of Tube Transportation to Relieve Highway Congestion
5. Gifford-Hill American, Inc. (1998). Tube Transportation for Freight. Engineering Department Communication.
6. Ingersoll, William (1998). Tube Freight Transportation. Unpublished Paper. San Antonio, TX: Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Texas at San Antonio.
7. Vandersteel, William (1995). The Great Freight Stream. Natural Science, November 160-167.
8. Zhao, Yiyuan and Thomas S. Lundgren (1996). Dynamics and Stability of Capsules in Pipeline Transportation. Report MN/RC-96/17. Minneapolis, MN: Aerospace Engineering and Mechanics Department, University of Minnesota.
9. Frank Ralbovsky (2004). Feasibility of Underground Pneumatic Freight Transport in New York City. NYSERDA.
10. Henry Liu, Freight Pipeline Company(2006) Use of Pneumatic Capsule Pipeline for Both Underground Freight Transport and Tunnel Construction, International Academic Conference on Underground Space (IACUS) Beijing