

특별세션 II

" 신 성장 동력 창출을 위한 미래철도 기술 "

* 전기에너지 및 친환경시대의 교통수단 개발 전략

방연근 한국철도기술연구원 선임부장

전기에너지 및 친환경시대의 교통수단개발전략

Transport Mode Transfer for the Electric Energy and Environmental Age

방 연근 한국철도기술연구원 수석연구원

I. Peak Oil 논쟁

에너지뿐만 아니라 현대 문명의 상당부분이 유한자원인 원유(crude oil)에 의존하는 상황에서 원유의 고갈은 인류의 재앙으로 여겨지고 있으며 원유의 고갈이 도래하기 전에 새로운 문명을 준비하여야 한다는 것은 정치의 중요한 과제라는 것을 의심하는 사람은 없는 것으로 보인다. 그러나 원유의 고갈에 대응하기 위한 노력을 본격적으로 언제 추진하여야 하는가 하는 관점에서 원유의 생산정점(peak oil)의 도래시기를 두고는 낙관론과 비관론이 첨예하게 대립되어 있다고 할 수 있다.

낙관론의 대표주자는 미국의 USGS(US Geological Survey)인데 이들은 지질학에 확률론을 적용하여 평균값을 활용한 원유(crude oil) 매장량을 추정(세계 총계 3021십억배럴)하고 있다는 점에서 현실성이 결여된 것으로 비판을 받고 있다. 비판론자들의 추정은 세계 총계 1900십억배럴이다(Colin J. Campbell, 2002. Forecasting Global Oil Supply 2000-2050. Hubbert Center Newsletter #2002/3).

<표 1 > USGS의 2000년 원유매장량 추정값

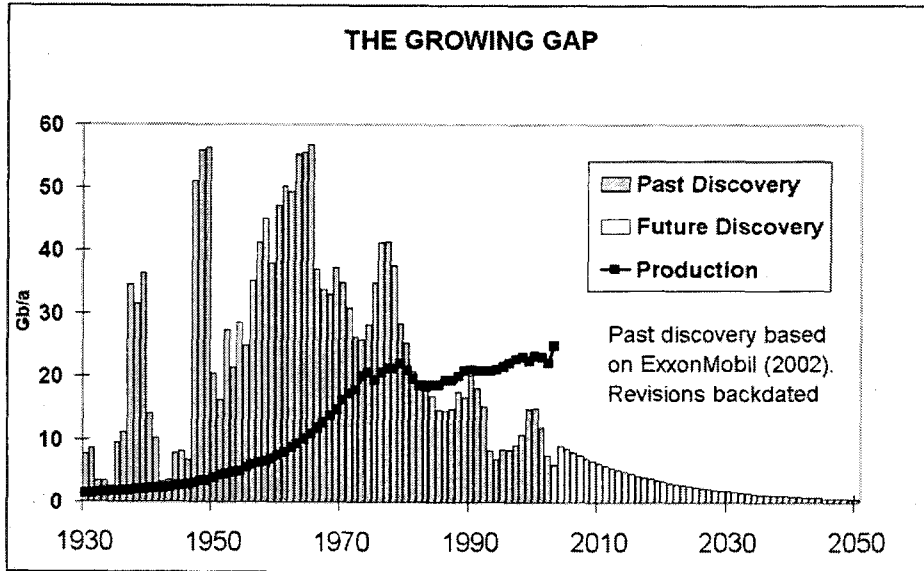
	원유 십억배럴		가스 십억배럴상당(BBOE)		천연액화가스(NGL) 십억배럴	
	평균값	95%확률	평균값	95%확률	평균값	95%확률
세계(미국제외)						
미발견량	649	334	778	383	207	95
보유량중대분	612	192	551	175	42	13
잔여보유량	859		770		68	
누적생산량	539		150		7	
소계	2659		2249		324	
미국						
미발견량	83	66	88	66	원유에 포함	
보유량중대분	76		59			
잔여보유량	32		29			
누적생산량	171		142			
소계	362		318			
세계 총계	3021		2567			

자료: US Geological Survey World Petroleum Assessment 2000.

비관론자들은 원유발견정점이 있는 후 20~30년 후에는 생산정점이 도래하였다는 사실에 근거하여 전세계적으로 1960년대가 원유발견정점이었던 만큼 2000년을 전후하여 생산정점에 도달하였다고 추정하는 것이 타당하다고 보고 있다(Kenneth Deffeyes 2005년, Henry Groppe

2006년, Ali Samsam Bakhtiari 2007년, Richard Duncan 2007년, Oil Depletion Analysis Centre 2007년, Colin Campbell 2010년, Rembrandt Koppelaar 2013년, Jean Laherrere 2015년).

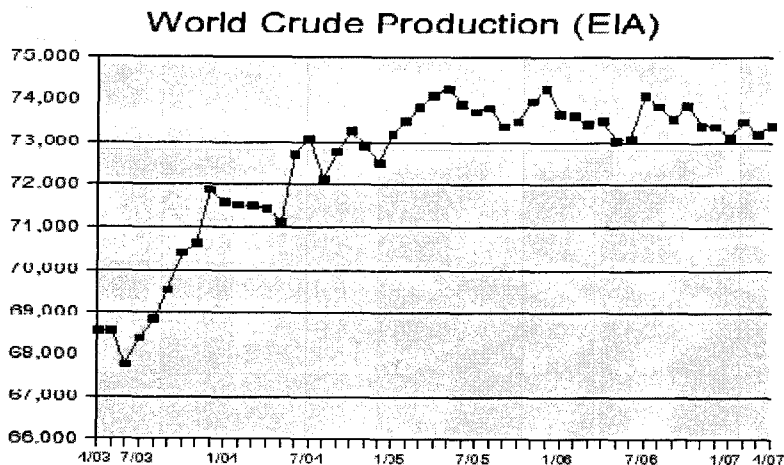
<그림 1 > 원유매장량 발견정점과 생산정점



자료: Colin J. Campbell. 2001

Richard Heinberg(Richard Heinber's Museletter- The View From Oil's Peak, 2007)는 미국 EIA(Energy Information Administration) 자료에 근거하여 전세계 차원에서 2005년 5월 일일 생산 74.2백만배럴을 정점으로 원유의 생산정점은 이미 지나갔다고 보고 있다 (원유를 포함한 모든 액화연료를 기준으로 할 때는 2006년 2월에 일일 생산 84.578백만배럴로 생산정점에 도달하였다고 보고 있다).

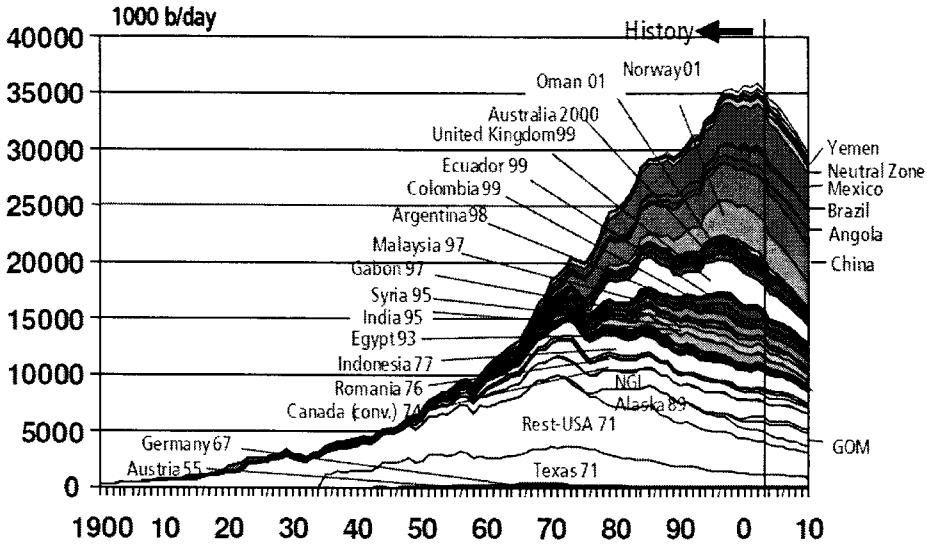
<그림 2 > 세계 원유 생산 추이



자료: Chart 3. Global crude oil production to April 2007. Source: EIA

이들은 이미 원유를 생산하는 각국에서 발견정점 이후 20~30년 후에 생산정점을 겪고 있는 것을 제시하고 있다.

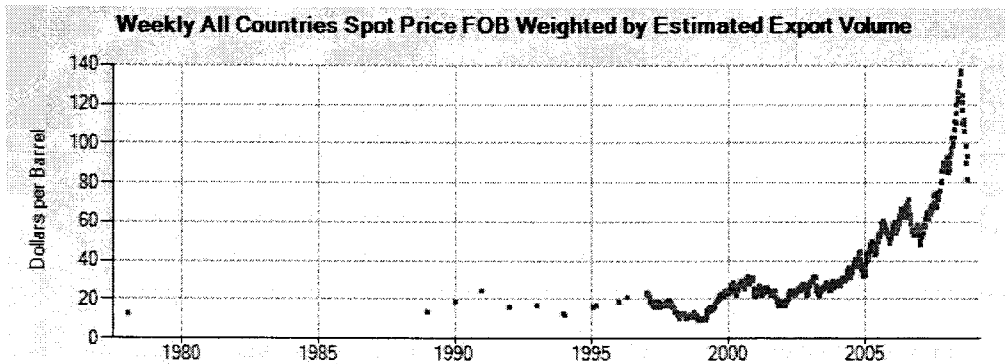
<그림 3> 원유생산 각국의 생산정점



Source: Industry database, 2003 (IHS 2003)
OGI, 9 Feb 2004 (Jan-Nov 2003)

또한 이들은 낙관론자들이 근거하고 있는 각국의 원유생산 및 보유량에 관한 자료들이 신뢰성이 결여되어 있고, 신뢰성있는 자료를 구하기 어렵다는 점에서 원유의 생산추이에 근거하여 생산정점을 판단하여야 한다고 주장하고 있다. 그리고 2000년 이후 유가가 가파르게 상승하고 있는 것을 보면 비관론자들의 주장이 설득력 있어 보인다.

<그림 4> 원유가격 변동추이



Source: U.S. Energy Information Administration

유럽연맹의 European Strategic Energy Technology Plan(2007)에서는 앞으로 석유를 사용할 수 있는 기간을 42년으로 보고 있다. 그러나 남은 기간에 원유가는 고공행진을 할

것이고, 경우에 따라서는 수요와 공급에 의존하는 완전한 시장경제체제가 아닌 지구온난화를 방지하기 위한 배출가스처럼 배급제가 가미된 거래시스템이 자리 잡을 가능성이 크다고 할 수 있다.

<표 2 > 전기 생산을 위한 에너지자원 비교

전기 에너지 원천	적용 기술	2005년	2030년	환경가스 배출	효율(%)	생산가능 기간(year)
		원가	추정원가			
천연가스	OCGT	45-70	55-85	440	40	64
	CCGT	35-45	40-55	400	50	
석유	디젤엔진	70-80	80-95	550	30	42
석탄	PF	30-40	45-60	800	40-45	155
	CFBC	35-45	50-65	800	40-45	
	IGCC	40-50	55-70	750	48	
핵	경수로	40-45	40-45	15	33	85
Biomass	생태발전소	25-85	25-75	30	30-60	재생가능
바람(풍력)	On shore	35-175	28-170	30	95-98	
		35-110	28-80			
	Off shore	50-170	50-150	10	95-98	
		60-150	40-120			
물(수력)	대형	25-95	25-90	20	95-98	
	소형(<10MW)	45-90	40-80	5	95-98	
태양(Solar)	Photovoltaic	140-430	55-260	100		

자료: European Strategic Energy Technology Plan, Annex1.

주: 2005년 원가(유로/MWh), 2030년 추정원가(유로/MWh with 20-30유로/tCO2), 환경가스배출(kg CO2eq/MWh), 생산가능기간(proven reserves/annual production), OCGT(open cycle gas turbine), CCGT(combined cycle gas turbine), PF(pulverised Fuel with flue gas desulphurisation), CFBC(Circulating fluidized bed combustion), IGCC(Integrated gasification combined cycle), 생태발전소 (biomass generation plant)

II. 환경문제

2012년까지 탄소배출권거래제(ETS, emission trading system)의 시험적인 단계가 끝나면 우리나라도 예외 없이 탄소배출을 줄이기 위한 노력을 하지 않을 수 없게 될 것이다. 따라서 peak oil 이후의 대체에너지 개발 및 사용에 있어 환경문제를 고려한 선택을 하여야 한다. 그런 점에서 환경가스배출이 적은 핵에너지의 개발 및 이용이 선호될 수 있다고 본다. 지구의 기후를 안정시키기 위해 달성하여야 할 이산화탄소 농축수준은 450ppm CO2e 이다.

환경문제를 해결하기 위한 탄소배출권거래제의 성공여부는 생산정점(oil peak)을 지난 원유의 거래에도 좋은 준거가 될 것으로 보이고 있다. 일부에서는 TEQs(tradeable energy quotas)를 제안하고 있기도 하다(ian Dunlop, 2007. Climate change and peak oil: an Integrated strategy for Australia. Public Ecologist).

<표 3 > 2050년까지 달성하여야 할 CO2e 감축목표

국 가	배출량	2005	2025	2050	변화율1	변화율2
미국	per capita	4.85	1.95	0.37	-60	-92
	계	1.45	0.70	0.14	-52	-90
호주	per capita	4.57	1.90	0.37	-59	-92
	계	0.091	0.044	0.009	-52	-90
서유럽	per capita	2.06	1.18	0.37	-43	-82
	계	0.85	0.48	0.15	-44	-82
전세계	per capita	1.23	0.85	0.37	-31	-69
	계	7.91	6.69	3.55	-15	-55
중국	per capita	0.66	0.62	0.37	-6	-43
	계	0.86	0.89	0.53	+4	-38
인도	per capita	0.40	0.55	0.37	+39	-6
	계	0.43	0.76	0.55	+74	+28

자료: Ian Dunlop. 2007. Climate change and peak oil: an Integrated strategy for Australia. Public Ecologist. 주: per capita emissions=metric tonnes carbon per capita. 계=gigatonnes carbon

환경문제가 중요한 가치가 되면서 소음 기준이 강화되고 있는데, 원유를 사용하지 않고 전기를 사용하는 친환경 교통수단의 개발에 있어 소음을 줄일 수 있는 방안이 함께 고려되어야 한다.

III. 원유의 의미

원유는 단순히 교통수단이 이용하는 에너지일 뿐만 아니라 원유로부터 많은 생활제품이 만들어지고 있다는 점에서 현대문명의 기초를 이루고 있다. 이러한 현대문명의 기초를 교통수단의 연료로 태워 없앤다는 것은 원유의 고갈을 멀지 않은 현실로 받아들여야 하나 아직 대안이 마련되지 않은 시점에서 매우 어리석은 일로 보인다. 현재 교통수단의 원유 의존율은 90%가 넘는 것으로 파악되고 있다. 대체연료의 개발 및 사용이 시급하다 할 것이다.

또한 우리나라가 원유를 전량 수입하지 않을 수 없다는 점에서, 원유의 공급부족으로 인한 고유가가 우리 경제에 미치는 엄청난 주름살을 고려하면 여러 가지 대체교통수단이 있는 교통부문에서 원유의 소비를 최소화하여 경제의 활성화에 기여하여야 한다. 2006년에는 수입 원유 762.3백만배럴의 34%, 261.5백만배럴을 교통부문에서 사용하였는데 과거보다 증가하고 있다(2006산업자원백서). 금액으로는 1배럴당 100달러로 계산하면 연간 261억5천만 달러, 달러당 1000원으로 계산할 때 26조1천5백억원이 된다. 교통부문에서의 에너지 전환대책이 국가 경제에 크게 기여할 수 있는 여지가 있다는 것을 알 수 있다.

<표 4 > 부문별 원유소비현황

단위: 백만배럴

연도	산업부문	교통부문	가정/상업	공공기타	전환	합계
2004	383.1	249.1	79.7	9.6	30.8	752.3
2005	388.9	255.3	75.8	9.9	31.2	761.1
2006	394.3	261.5	68.3	8.8	29.4	762.3

교통부분에서 원유의 사용은 CO2를 배출한다는 점에서, 2012년 이후 탄소배출권거래제 (emission trading system)도에 대비하여야 하는 상황에 비추어서도 최소화하거나 환경가스 배출이 적은 다른 대체 연료의 사용을 확대하는 것이 바람직한 것이다.

IV 대체에너지의 개발 및 전기에너지 시대

생산정점을 지난 원유의 고갈을 지연시키는 방안의 하나로는 차량의 연비개선, 가스의 액화 사용(gas-to-liquids(GTL)), heavy oil 및 oil sand 개발 활용, 석탄액화, 원유의 발견 (enhanced oil recovery(EOR))을 증대시키는 것이다. 그러나 이러한 방법들은 들어가는 에너지에 비해 생산되는 에너지의 효율성이 적을 뿐만 아니라 환경가스문제를 야기시키는 단점들을 내포하고 있다.

다른 방안으로는 핵(nuclear), 풍력, 태양열, 수소, biomass, shale oil을 이용하는 것인데, 핵(nuclear), 풍력, 태양열은 에너지의 액화가 아닌 전기에너지로의 전환을 통해 이용할 수 있고, 수소는 아직 생산되는데 소요되는 에너지가 많아 경제성이 없다고 판단되고 있으며, biomass도 경제성이 없다고 보고 있고, shale oil은 상업성이 없다고 보고 있다.

풍력, 태양열, 조력 등과 같이 재생할 수 있는 에너지는 전기형태로 전환되어 사용할 수 있다는 점, 핵 에너지의 이용도 전기형태로 전환된다는 점에서 향후는 전기에너지의 시대에 본격적으로 돌입하게 된다고 볼 수 있겠다. 핵 에너지도 영원하지는 않겠지만 핵 융합이 실현되면 상당기간 에너지 문제는 걱정하지 않아도 될 것으로 이야기 되고 있다.

IV 교통수단의 변화

1. 교통수단에 미치는 영향

원유가 peak oil을 지나 공급제한이 되고 고가격(high price)이 되면 제일 먼저 영향을 받는 교통수단은 원유에 의존하는 교통수단이다. 자동차, 선박, 항공기가 대표적이라고 할 수 있다. 철도의 경우는 대표적인 상품인 고속철도 및 도시철도가 전철화되어 있고 도시간 철도 및 화물철도도 전철화되는 추세이어서 상대적으로 영향을 적게 받는다.

자동차, 선박, 항공기 중에서도 단위 운행 거리당 원유를 가장 많이 쓰는 항공기가 가장 큰 타격을 받을 것이고 항공의 대중화시대는 끝났다고 할 수 있을 것이다. 자동차의 경우는 전기자동차의 증대, 선박의 경우는 공간적인 여유로 인해 항공기보다는 에너지기술의 발전을 수용할 수 있는 유연성이 크다고 할 수 있다.

현재의 고유가에도 많은 항공사들이 경영상 어려움을 겪고 있고, 이러한 고유가가 계속되거나 더욱 가격이 오르고 원유의 배급제가 시행되는 상황이면 항공의 대중화는 지속되기 어려울 것이다. 2008년 7월 유가는 배럴당 137달러를 넘었고 10월 중순 시점에서 80달러를 넘나들고 있다. 경기침체로 수요가 둔화되면서 유가는 다소 내려갈 수 있으나 공급력의 한계로 조그만 수요 증가에도 유가는 크게 오를 것이다. 아무런 준비가 되어 있지 않은 상황에서 유가가 배럴당 200달러가 넘으면 재앙으로 여겨지고 있다.

<표 5 > 유가가 항공에 미치는 영향(미국사례)

유가 (\$/배럴)	항공유가 (\$/갤론)	유류비 (백만\$)	유류비 증대 (백만\$)	가격인상		인력축수	공급력 축소 (%)
				(\$)	(%)		
100	3.1	51375	17481	24	13	44300	11
110	3.3	55327	21433	29	16	54315	13
120	3.6	59279	25385	34	18	64329	15
130	3.8	63231	29337	40	21	74344	18
140	4.0	67183	33289	45	24	84359	20
150	4.3	71135	37241	50	27	94374	23
170	4.8	79039	45145	61	33	114403	28
200	5.5	90894	57000	77	41	144448	35

자료: Oil Prices and the Looming U.S. Aviation Industry Catastrophe: A Hole in The Transport Grid(2008), Business Travel Coalition and AirlineForecasts, LLC, 5쪽.

주: 유류비증대는 2007년 대비. 가격인상은 유류여객당. 인력축수 및 공급력축소는 추정 수요가격탄력성에 기초. 유류비 증대는 연료 헤지효과(hedge benefits) 반영하지 않음.

항공부문에서 현재 oil peak를 인지하고 post oil peak에 대비하는 방안들이 논의되고 있다. 먼저 단기적으로는 연비의 개선 등을 통해 유류사용의 효율성을 높이는 것인데, 여기에는 기체설계개선(경량화, 복합소재이용, 출력부분개선), 공력학적 효율성 증대(날개구조 개선, 예 B-2 스텔스 폭격기의 flying wing 또는 blended wing), 엔진성능개선(연비개선을 위한 geared turbofan의 개발(fan blades의 수를 줄이고 gear box를 채택))을 들 수 있다 (Eric Schniter, 2008. The Oil Crisis and Aerospace. <http://cr4.globalspec.com/blogentry/6027/The-Oil-Crisis-and-Aerospace>).

장기적으로는 원유를 대체하는 대체연료를 개발하여 이를 사용할 수 있는 추진방식을 개발하는 것이라고 할 수 있다. 대체연료로는 Biofuels(에탄올, 바이오디젤, 조류에 기반한 유류(algae-based oil)), 액화석탄(Coal-to-Liquid), 액화가스, 수소연료전지를 들 수 있다.

추진방식의 개발에서는 단거리 컴퓨터 항공이 사용하는 터빈엔진(turbo-prop 또는 turbofan 엔진)은 Biofuels, 액화석탄, 액화가스를 사용하는데 별 문제가 없는 것으로 판단되고 있으나, 문제는 이들 연료들이 지상교통수단과의 경합으로 가격이 낮지 않을 것이라는 데 있다고 판단되고 있다.

장거리 운항의 경우는 아직도 많은 연구가 필요한 실정인데 초저온액화수소(supercooled liquid hydrogen)를 사용할 수 있는 추진방식의 개발과 나노기술과 고온초전도기술(high-temperature superconductivity)의 발전을 기반으로 하는 고밀도에너지저장장치(high-density energy-storage system)를 사용하는 추진방식의 개발이 관건으로 인지되고 있다. 초전도에너지저장시스템은 액화질소를 사용하는 냉각시스템을 필요로 한다(Harry Valentine, 2008. Alternatives in Aviation After Peak Oil. <http://www.airliners.net/aviation-articles/read.main?id=98>).

장거리 운항에 필요한 300-MW-hr ~ 1000-MW-hr의 출력(power)을 항공기에 공급하기 위해 많은 항공기가 이착륙하는 대형국제공항은 수소융합을 이용하는 핵발전소가 필요할 것으로 판단되고 있다. post oil peak 시대에 항공기가 장거리를 운항하기 위해선 해결하여야 할 과제가 산적해 있다고 할 수 있다.

2. 공력저항을 극복하는 Tube 기술 개발

국가간 교통에서 항공여행의 대중화를 경험한 인류에게 고속의 상대적으로 저렴한 교통수단을 계속 제공하여야 하는 것은 풀어야 할 큰 숙제라고 할 수 있다.

상대적으로 저렴한 항공여행이 기술적으로 불가능하다고 보여지는 상황에서 대안은 육상 교통의 고속화인데, 현재의 고속철도는 시속 400~500km에 머물고 있어 국가간 교통의 소임을 담당하기에는 부족한 점이 많다고 할 수 있다.

그러나 현재 지상에서 시속 700~800km를 넘어 그 이상의 속도를 실현하는데 공기저항이 큰 제약요인이다. 공기저항을 줄이는 경제적인 진공 Tube 기술의 개발이 필요한 것이다. 현재의 Tube 기술은 직경 2~3m 수준에서 진공을 이루는 것이어서 더 큰 직경에서 경제적으로 진공을 유지하는 기술개발이 필요하다. 이러한 Tube 기술과 고속철도기술의 만남은 항공의 빈자리를 메울 수 있을 것이다.

일반적으로 에너지 효율적인 속도향상을 위해 고려되어야 하는 요소로는 엔진의 연비향상, 에너지 낭비를 최소화 하는 주행정차(Stop), 공기저항, 마찰저항, 차량무게 등을 들 수 있다.

3. 자기부상기술의 발전

바퀴에 의한 부상을 이용하지 않고 자기력에 의한 부상방식을 택하는 자기부상열차는 부상방식에 있어 EMS(electromagnetic suspension, 독일의 Transrapid가 대표적인 사례), EDS(electrodynamic suspension, 일본이 대표적인 사례인데 아직 실험단계) 방식이 있는데, 기술의 발전으로 다양한 변형방식이 나타나고 있다. 영구자석을 이용하는 Hybrid EMS(MagneMotion기업), Halbach array를 사용하는 EDS(미국의 General Atomics기업)가 그러한 사례이다.

자기부상열차의 추진방식에 있어서는 LSM(linear synchronous motors), LIM(linear induction motors) 방식이 있다. 부상방식과 추진방식의 조합에 따라 다양한 방식의 자기부상열차가 있을 수 있게 된다.

독일과 일본이 발전시킨 초고속자기부상열차를 1세대라고 하면, 미국에서 2002년 이후 제안되고 있는 초고속자기부상열차는 2세대라고 할 수 있는데, 1세대에 비해 Guideway 건설비용의 획기적인 감축, 분기점에서도 고속주행을 가능하게 하는 물리적인 이동 없는 방향 전환, 자기부상궤도를 전통적인 바퀴부상방식의 열차가 이용할 수 있는 점 등을 들고 있다.

그런데 바퀴에 의한 부상방식을 택하는 초고속열차에 비해 자기부상열차가 갖게 되는 장점은 시속 800km이상을 주행하게 될 때 분명하게 되는데, 지상에서 1기압 상태에서 시속 800km 이상의 속도를 낸다는 것은 비현실적인 것이기 때문에 아진공상태의 튜브가 필요하게 된다(Galen J. Suppes, A Perspective on Maglev Transit and Introduction of PRT Maglev, <http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/suppes.htm>).

V 세계화를 대신하는 지역경제

값싼 원유가 항공을 통하여 세계화를 가능하게 하였다면 post oil 시대에는 항공에 버금가는 시속 700km~800km 고속철도에 기반하는 지역경제활성화가 주류를 이룰 것으로 보인다. 즉 환황해권, 환동해권 등 지역경제를 근간으로 하는 정책들이 재조명되고 개발되어야 한다.

국가단위보다는 인근 국가들이 통합되는 지역단위, 각 지역들이 하나로 묶이는 세계수준의 단위에서 자원의 개발 및 활용 등이 최적화하는 것이 우리 인류가 지향하여야 할 최선의 목표라고 할 수 있으나 이를 뒷받침할 수 있는 교통수단이 여의치 않다면 그러한 목표를 달성하고자 하는 전략은 수정되어야 한다고 본다. 통신수단의 활용증대 등 교통수단이라는 인프라의 변화를 보완하는 전략이 추진되어야 한다. 그럼에도 불구하고 국가간 교통이 대중화될 수 없다면 인근 국가간의 경제를 대상으로 하는 지역경제의 활성화가 실질적인 차선택(목표)이 될 수밖에 없다고 본다.

한중간의 열차페리, 한일간의 해저터널, TCR 및 TSR과의 연계는 중국의 동해안과 한국의 서해안, 한국의 동해안과 러시아 연해주, 일본의 서해안을 묶는 지역경제활성화를 가능하게 할 것이다.

VI 항공에 버금가는 초고속 Tube Train 개발

원유의 생산정점이 이미 지났거나 조만간 다가 올 것이라는 점에서 post oil 시대의 에너지문제에 대처하지 않을 수 없다. 연비의 개선과 대중교통수단의 이용 장려는 단기적인 처방이고 계속되어야 하는 처방이나 대체에너지의 개발과 핵 에너지의 이용이 중장기적인 대안이라는 점에서 전기를 이용하는 문명이 기초를 이룰 것으로 보인다. 태양열, 풍력, 조력과 같은 재생할 수 있는 에너지들이 전기방식으로 이용된다는 점에서 전기문명이 계속될 것이다.

또한 지구온난화로 인한 재앙을 막기 위해 환경가스배출 억제라는 과제를 인류가 안고 있고 이를 반드시 달성하지 않으면 안된다는 점이 교통수단의 개발에 중요한 고려요인이 되고 있다. 즉 배기가스를 많이 배출하는 연료를 사용하는 교통수단이 주류를 형성하기 어려울 것이다. 많은 화석 연료를 사용하고 배기가스를 많이 배출하는 항공의 쇠퇴와 재생에너지와 핵 연료에 기반한 친환경적인 전기를 이용하는 교통수단의 대중화가 예상된다. 이런 점에서 전기에너지를 사용하는 자기부상열차가 대안일 것이다.

항공의 후퇴로 인한 세계화의 후퇴는 지역경제의 활성화라는 대안에 집중하여야 한다는 것을 시사한다. 환황해권, 환동해권 등으로 대표되는 지역경제의 활성화가 post oil 시대엔 인근 국가 국민들의 삶의 질을 유지 발전시킬 수 있는 방안이라고 할 수 있다.

자기부상열차는 시속 800km가 넘어야 확실히 경쟁우위를 갖는 것으로 이야기 되고 있고 또한 그것은 확실해 보인다. 그러나 지상 1기압 상태에서 이러한 속도를 달성한다는 것은 거의 불가능에 가깝다. 그래서 진공 또는 아진공 상태에서 고속운행이 가능한 Tube train의 개발이 필요한 것이다. post oil 시대의 항공의 쇠퇴로 인한 국가간 교통의 쇠퇴는 시속 800km 이상의 고속 tube train으로 어느 정도 보완될 수 있을 것이다.