

# 수소경제의 이슈화 배경과 의미

산업혁신팀 부연구위원  
이광호(leekh@stepi.re.kr)

## I. 서론

최근 들어 신문지상이나 방송매체에서 “수소경제(hydrogen economy)”란 용어가 자주 등장하고 있으며, 우리나라를 포함한 세계 각국 정부들이 앞 다퉈 수소경제를 미래 국가경제의 기반으로 삼기 위해 다양한 전략들을 발표하고 있다. 그러나 일반 대중들에게 있어서 수소경제란 아직 그리 친숙하지 않은 용어이며, 전문가들 사이에서도 수소경제 실현에 대한 낙관론과 회의론이 각각 존재하고 있는 실정이다. 낙관론을 펼치고 있는 쪽은 화석연료 고갈과 환경문제 대두에 의해 수소경제 실현을 위한 배경이 갖춰져 있으며, 기술적 불확실성 해소가 가까운 시간 내에 해결될 것이라고 보고 있다. 반면, 회의론을 펼치고 있는 쪽은 수소란 어차피 다른 에너지원에 의해 제조되어야 하기 때문에 에너지 변환 효율이 나빠질 수밖에 없으며, 수소를 화석연료처럼 널리 사용하기에는 안전성과 인프라가 절대적으로 부족하다는 입장이다.

수소경제란 용어가 대중들에게도 확산되기 시작한 것은 문명비평가이자 환경철학자로 잘 알려진 제레미 리프킨(Jeremy Rifkin)의 2002년 저서 <수소경제>를 통해서이다. 그는 수소가 지구상에서 가장 풍부하게 얻을 수 있는 자원이고, 환경문제를 유발시키는 화석연료를 대체할 유일한 대안이라고 선언하며, 수소경제 실현을 위한 새로운 에너지공동체의 개념을 제시하였다. 하지만 현실에서는 석유, 석탄, 천연가스과 같은 화석연료가 주요 에너지원으로 여전히 사용되고 있으며, 이들 화석연료에 의한 각종 환경문제가 급증하고 있음에도 각국이 처한 에너지 환경과 경제적 상황에 따라 국가마다 대응 전략에 차별성을 보이고 있다. 대표적인 사례로 각국의 CO<sub>2</sub> 배출을 의무적으로 감축시키기로 한 국제협약인 교토의정서가 2005년 발효되었음에도 불구하고, 이와는 별도로 최근 미국을 중심으로 6개국(미국, 일본, 중국, 한국, 인도, 호주) 외무장관들이 아·태지역 기후변화 대응 파트너십을 구성한 것들을 들 수 있다. 이는 현재 가장 많은 CO<sub>2</sub>를 배출하고 있는 미국과 앞으로 가장 많은 CO<sub>2</sub>를 배출할 것으로 예상되는 중국 등이, 교토의정서가 주는 자국내 산업에의 경제적 부담을 줄이고 의무 이행 시기를 지연시키기 위해서이다.

이처럼 수소경제의 도래 여부는 국내외 정치·경제·사회적 환경 변화와 기술적 불확실성 해소 여부에 의해 결정될 수밖에 없으며, 최소한 단기간 내에 실현되기는 어렵다고 판단된다. 그럼에도 불구하고 선진국을 중심으로 많은 국가들이 수소경제에 대한 준비를 하는 것은 그만큼 화석연료의 한계가 뚜렷해지고 수소경제가 가져올 다방면의 파급효과와 영향력이 크기 때문이다. 따라서 이 글에서는 수소경제가

이슈화된 배경을 화석연료의 정치·경제적 문제, 글로벌 환경문제, 기술적 진보의 세 부분으로 나누어 살펴보고 수소경제로의 전환이 의미하는 바를 고찰하고자 한다.

한편 수소경제를 논하기 전에 우리가 흔히 사용하는 에너지의 개념을 명확히 할 필요가 있다. 왜냐하면 여러 문헌 및 자료에서 각종 에너지의 개념을 혼재하여 사용하기 때문에 개념의 본질적인 차이에서 오는 특성을 잘못 이해할 수 있기 때문이다. 에너지를 언급할 때 여러 가지 용어들이 혼재되어 쓰이고 있으나 다음과 같이 크게 두 가지로 나누어 정리할 수 있다.

첫째, 자연 상태에서 바로 얻어질 수 있는 에너지원(energy source)이 있다. 대표적인 에너지원으로는 화석연료인 석유, 천연가스, 석탄 등과 소위 신재생에너지(renewable energy) 혹은 대체에너지(alternative energy)로 불리는 태양력(태양열+태양광), 바이오매스(biomass), 풍력, 조력, 소수력 등이 있으며, 원자력 발전에 쓰이는 우라늄 등이 있다.

둘째, 자연 상태에서 직접 얻을 수 없지만, 에너지원을 사용하여 우리가 원하는 목적에 맞는 에너지 형태로 전환되어 통용되는 에너지통화(energy currency)가 있다. 가장 대표적인 것이 전기이며 정제된 석유나 가스도 여기에 해당된다. 수소는 자연 상태에 거의 존재하지 않아 다른 에너지원을 사용하여야만 얻을 수 있는 형태이며, 자동차를 비롯한 각종 기계에 연료로서 직접적인 사용이 가능하기 때문에 에너지통화적인 특성을 가지고 있다.

## II. 수소경제 이슈화 배경

### 1. 화석연료(석유)의 정치·경제적 문제

화석연료라고 불리는 주요 에너지원에는 석유, 석탄, 천연가스의 3가지가 대표적이다. 이들 화석연료를 사용함으로써 인류는 급격한 물질문명의 발달과 경제적 풍요를 이루어 낼 수 있었지만, 화석연료는 지역적 편재성과 매장량의 한계로 여러 정치·경제적 불안요인을 근본적으로 가지고 있다. 석탄은 미국과 중국을 비롯한 여러 국가들에 비교적 폭넓게 분포되어 있어 지역적 편재성이 덜하지만, 석유는 중동지역에 전체 매장량 및 가채매장량(매장량 중 현실적으로 채굴할 수 있는 양)이 집중되어 있다. 석탄과 천연가스도 여러 가지 정치·경제적 문제를 가지고 있으나 본고에서는 화석연료 중 가장 큰 영향력과 비중을 차지하고 있는 석유를 중심으로 언급하고자 한다.

#### 1) 정치적 측면

<표 1>에서 나타낸 바와 같이 2003년 기준, 세계 석유 생산은 중동권 국가, 러시아, 북미 및 중남미 등에서 비교적 골고루 되고 있다. 총 생산량 중 OPEC 회원국

이 차지하는 비율은 39.7%로 오히려 비 OPEC 회원국의 46.4% 보다 적다. 하지만 <표 2>에서 알 수 있듯이 향후 석유를 더 채굴할 수 있는 석유 확인 매장량을 비교하면 중동권 국가들이 왜 세계의 주목을 받고 있는가가 뚜렷해진다. 즉, 사우디아라비아, 이란, 이라크 등 중동권 국가들이 1위부터 5위까지의 확인 매장량 순위를 차지하고 있으며, 이들 국가가 주축이 되는 OPEC 회원국이 전체 확인 매장량의 76.8%를 차지하고 있다. 이는 현재의 석유 소비 추세를 감안할 때 미국을 비롯한 구경제권에 속하는 국가들의 석유 생산이 가까운 미래에 급격히 감소 혹은 중단될 것을 의미하며, 세계 거의 모든 국가들이 향후 중동권 국가들의 석유 공급에 전적으로 의존하게 됨을 시사한다. 따라서 지금도 OPEC을 중심으로 한 중동권 국가들이 세계 석유 시장에서 영향력을 행사하는 경우가 많지만, 앞으로 더욱 이들의 영향력 및 이들 국가들과의 정치적 관계가 세계 각국의 에너지 수급에 심각한 영향을 미치게 될 것이다.

<표 1> 세계 석유 현재 생산량(2003년 크루드 오일 기준, 단위: 1,000배럴/일)

순위	국가	현재 생산량	비율(%)
1	사우디아라비아	9,817	12.8
2	러시아	8,543	11.0
3	미국	7,454	9.2
4	이란	3,852	5.1
5	멕시코	3,789	5.1
6	중국	3,396	4.6
7	노르웨이	3,260	4.3
8	베네수엘라	2,987	3.8
9	캐나다	2,986	3.8
10	아랍에미레이트	2,520	3.2
11	쿠웨이트	2,238	3.0
12	나이지리아	2,185	2.9
	OPEC 회원국	30,383	39.7
	비 OPEC 회원국	35,917	46.4
	구 소련 국가	10,477	13.9

자료: 대한석유협회 홈페이지([www.petroleum.or.kr](http://www.petroleum.or.kr))

<b>&lt;표 2&gt; 세계 석유 확인 매장량(2003년 크루드 오일 기준, 단위: 10억 배럴)</b>			
순위	국가	확인 매장량	비율(%)
1	사우디아라비아	262.7	22.9
2	이란	130.7	11.4
3	이라크	115.0	10.0
4	아랍에미리트	97.8	8.5
5	쿠웨이트	96.5	8.4
6	베네수엘라	78.0	6.8
7	러시아	69.1	6.0
8	리비아	36.0	3.1
9	나이지리아	34.3	3.0
10	미국	30.7	2.7
11	중국	23.7	2.1
12	캐나다	16.9	1.5
	OPEC 회원국	882.0	76.8
	비 OPEC 회원국	178.8	15.6
	구 소련 국가	86.9	7.6

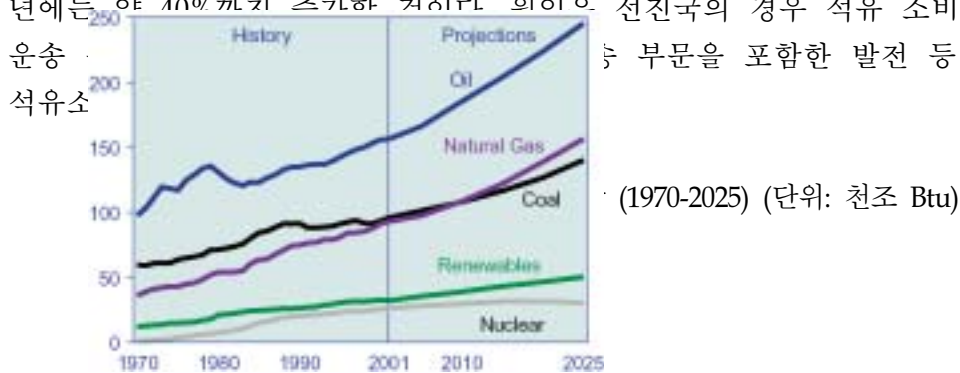
자료: 대한석유협회 홈페이지([www.petroleum.or.kr](http://www.petroleum.or.kr))

따라서 세계 각국은 이들 중동권 국가들의 정치적 상황 변동에 매우 민감하게 반응할 수밖에 없으며, 20세기부터 중동권에는 크고 작은 여러 분쟁과 전쟁이 끊이지 않았다. 이러한 갈등의 배경은 크게 두 가지로 요약될 수 있는데, 첫 번째는 이스라엘과 범아랍권 국가들 간의 종교적 갈등이고, 두 번째는 이들 중동국가들이 보유한 석유자원을 둘러싼 갈등이다. 또한 이들 중동국가들은 종교적으로는 이슬람권 문화의 동질성을 가지고 있지만, 집권 정치세력들이 미국을 비롯한 서방 선진국들에 대해 가지고 있는 태도에는 큰 차이가 있다. 즉 사우디아라비아, 쿠웨이트, 아랍에미리트 등은 전통적으로 친서방적 정권이 집권하고 있어 석유 공급의 안정성이 높지만, 이란과 이라크는 미국이 최근 악의 축으로 지정함에서도 알 수 있듯이, 미국과의 관계가 특히 매끄럽지 못하며 국내정세도 매우 불안하다. 따라서 이란과 이라크의 정세불안은, 이란·이라크 전쟁, 이라크의 쿠웨이트 침공, 이라크 1차·2차 전쟁 등에서 확인된 바와 같이 이슬람권 전체를 불안정시킬 수 있으며, 이는 곧 세계 석유 공급 체계의 붕괴로도 이어질 수 있다. 따라서 중동산 석유에 대한 의존도가 70% 이상인 우리나라는 과거 1·2차 오일쇼크에서처럼 중동지역의 정치적 불안에 심각한 타격을 받을 수 있다.

## 2) 경제적 측면

경제적 측면에서 석유의 문제를 살펴보면, 석유는 지각에 매장되어 있는 유한한 자원이기 때문에 에너지소비 증가와 맞물려 가격은 지속적으로 상승할 전망이며,

생산량이 정점에 다다른 후부터는 급격한 가격 상승이 예상된다. 세계 총 에너지 수요는 세계 GDP가 연평균 3% 수준으로 성장한다고 가정하면, 2025년에는 2001년 대비 약 54% 정도 증가할 전망이다. 여러 에너지원들 중에서 <그림 1>에서 나타낸 바와 같이 석유와 천연가스의 소비증가율이 가장 높아질 것이다. 에너지소비 증가분 중 대부분은 중국과 인도와 같은 아시아 개발도상국의 급격한 성장에 의한 것으로 추정되며, 세계 에너지 총수요 증가에서 차지하는 아시아 지역의 점유율은 2025년에는 약 10%까지 증가할 것으로 예상된다. 선진국의 경우 석유 소비 증가는 주로 운송 및 제조업 등 모든 분야의



자료: US DOE/EIA, International Energy Outlook 2004

최근 들어 국제유가가 연일 급등하여 배럴당 60달러를 넘는 사상 최고가를 기록하고 있다. 이에 따라 국내 소비 원유의 거의 대부분을 수입에 의존하는 우리 경제에 심각한 타격을 주고 있으며, 정부와 기업은 대비책을 마련하기에 분주한 실정이다. 우리나라의 경우 원유가가 배럴당 1 달러가 상승하면 연간 12억 달러의 수입액이 추가되고 경제성장률은 0.1%가 하락하며 소비자물가는 0.15% 상승한다. 또한 원자재 가격의 동반 급등으로 제조업 위주의 수출에 심대한 악영향을 미친다는 것이 잘 알려져 있다. 석유 가격의 가파른 상승세는 21세기 들어와 불안해진 국제정세 때문이기도 하지만, 근본적인 원인은 세계 경제 성장에 따른 석유 수요의 증가가 한정된 원유 매장량에 따른 제한된 공급보다 우위에 있다는 사실이다. 따라서 수송 및 발전 등에 있어서 석유의 비중이 크면 클수록 경제에 미치는 영향은 커질 수밖에 없으므로 지속적인 경제성장과 사회 인프라를 구축하기 위해서는 석유 가격의 안정과 공급의 안정이 필수적이다.

## 2. 글로벌 환경문제

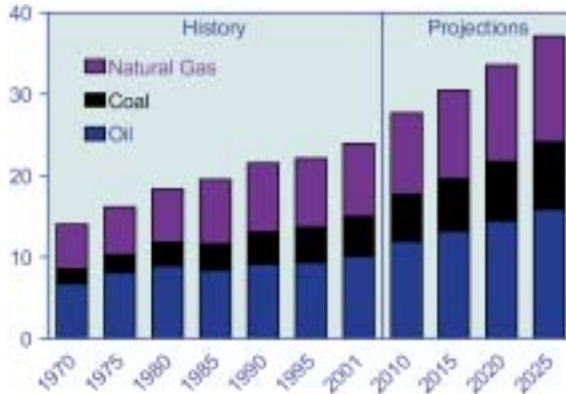
화석연료의 지속적 사용에 의한 환경오염은 과거에는 지역적 차원에서 대기·수질·토양 오염의 시각에서 그 심각성이 논의되어 왔다. 그러나 최근 이러한 환경오염은 지역적 차원을 넘어서 지구 환경 전체의 오염과 생태계 파괴의 시각에서 논의되고 있으며, 대표적인 것이 지구 온난화 현상이다. 본고에서는 수소경제의 이슈화 배경 중 환경적 요인인 지구 온난화 현상에 대해 살펴보고, 이의 주원인인 CO<sub>2</sub> 배출의 국내외 현황과 이를 해결하기 위한 국제적 노력인 교토의정서에 대해 언급하고자 한다.

### 1) 지구 온난화 현상

근래에 국지적 폭염, 폭설, 집중호우 등 세계적인 기상 이변 현상이 자주 발생하고 있으며, 우리나라도 사계절이 뚜렷한 전형적인 온대성 기후 특성을 점차 잃어가고 있다. 일만 년 동안 지구의 평균기온 상승이 1°C에 불과한 반면, 20세기 이후 평균 기온은 백년 남짓한 동안 0.6°C 상승하였으며, 우리나라의 평균 기온은 1.5°C나 상승하였다. 또한 전세계 평균기온 상승에 따라 고산지역의 빙하와 얼음의 질량이 감소하고 북극의 해양기온이 상승함에 따라 빙하의 범위와 두께가 감소하는 현상이 발생하고 있다. 극지방의 빙하 감소는 해수면의 상승을 초래하게 되는데 이는 저지대 지역의 침수와 경작지 유실로 이어지게 된다.

현재 기후변화의 문제는 그 속도에 있으며 최근 백년동안 온난화 정도는 과거 천년 동안의 온도변화 정도의 수십 배에 해당하므로 지구의 자동 온도조절 능력이 한계에 도달하여 생태계가 파괴될 가능성이 매우 크다. 이러한 기상이변 및 기후 변화의 원인은, 많은 과학자들이 지적한 바와 같이 대기 중 온실가스(CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub>, HFCs, PFCs, O<sub>3</sub> 등) 농도 증가에 의한 온실효과 때문이다. 여러 온실가스들 중에서 가장 큰 비중을 차지하는 것은 CO<sub>2</sub>이므로 CO<sub>2</sub> 배출 및 감축이 글로벌 환경문제의 핵심으로 인식되고 있으며, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 증가의 직접적인 근본 원인은 인류의 지속적인 화석연료의 사용이다.

미국에너지정보청(EIA)의 "International Energy Outlook 2004"에 따르면 세계 CO<sub>2</sub> 방출량은 2001년 239억 톤에서 2020년 371억 톤으로 연평균 2% 가량의 꾸준한 증가세를 기록할 것으로 전망된다. 또한 화석연료 중 현재는 석유에 의해 방출되는 CO<sub>2</sub>의 양이 가장 많으나, 석유자원의 고갈에 따라 천연가스와 석탄의 소비가 증가하여 여기서 방출되는 CO<sub>2</sub>가 점차로 증가할 것으로 예상된다. 특히 중국과 인도를 비롯한 개발도상국의 에너지 소비가 급증하여 개발도상국의 CO<sub>2</sub> 방출량은 2001년 대비 2025년에는 61%까지 증가할 것으로 예측된다. 따라서 CO<sub>2</sub> 방출에 의한 환경문제는 선진국과 개발도상국 모두에게 해당되는 국제적인 환경문제로 인식되고 있다.



량 추이 및 전망 (단위: 십억톤)

자료: US DOE/EIA, International Energy Outlook 2004.

## 2) 국내외 CO<sub>2</sub> 배출 현황

국제에너지기구(IEA)의 2003년 “세계 CO<sub>2</sub> 배출 현황 자료”에 의하면 2001년 기준 세계에서 가장 많은 CO<sub>2</sub>를 배출하고 있는 국가는 미국으로 전체 배출량 중 23.7%의 비중을 차지하고 있다(<표 3> 참조). 선진국들을 주축으로 하는 OECD 국가의 배출량은 1990년~2001년 동안 연평균 1.1%의 완만한 증가율을 기록하였으며 비중은 거의 변하지 않았음을 알 수 있다. 반면 중국과 인도는 동기간에 각각 2.5%, 5.1%의 급격한 증가율을 보이고 있으며, 향후에도 지속적인 경제성장에 따른 높은 증가율을 나타낼 것으로 많은 전문가들은 예측하고 있다.

우리나라의 경우 국제에너지기구(IEA)의 “세계 주요 에너지 통계” 자료에 따르면 2001년 기준 CO<sub>2</sub> 배출량은 세계 9위 수준이며, 1인당 CO<sub>2</sub> 배출량은 세계 27위인 것으로 조사되었다. 하지만 <표 3>에 나타난 바와 같이 1990년~2001년 사이의 국가별 CO<sub>2</sub> 배출량을 비교해 보면, 동기간 내에 CO<sub>2</sub> 배출량의 증가율은 5.9%로 비교국 가운데 가장 높은 증가율을 보이고 있다. 또한 CO<sub>2</sub>를 포함한 총 온실가스 배출량 역시 1990년부터 연평균 5.1%의 높은 증가율을 보이고 있다. 부문별 온실가스 배출 현황을 분석해 보면, 2002년 기준 전체 온실가스 배출량 중 수송과 전력이 중심이 되는 에너지부문이 83.4%로 산업공정(10.9%), 농업·축산(2.9%), 폐기물(2.8%) 등 타 부문에 비해 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 이는 우리나라의 지속적인 제조업 성장과 맞물려 전력 생산이 증가하여 왔고 수송 부문에서 자동차의 꾸준한 증가에 기인한 결과이다. 따라서 국가별 CO<sub>2</sub> 감축량을 의무화한 교토의정서가 발효될 시 지속적인 경제성장과 CO<sub>2</sub> 감축을 동시에 달성하기 위해서는 친환경산업으로의 산업구조 개편이 필요하지만, 현실적으로 이를 단기간 내에 성취하기는 어려워 일

정 부분 직접적인 부담을 피할 수는 없을 것으로 보인다.

<표 3> 국가별 CO <sub>2</sub> 배출량 : 에너지 부문						
(단위: 천CO <sub>2</sub> 톤, %)						
I		'90		'01		90-'01 증가율
		배출량	비중	배출량	비중	
	전세계	21,210	100.0	24,002	100.0	1.1
	Annex 국가	13,822	65.2	13,926	58.0	0.1
	OECD	11,111	52.4	12,594	52.5	1.1
	미국	4,852	22.9	5,689	23.7	1.5
				3,167	13.2	2.5
	러시아	-	-	1,524	6.3	0.5
	일본	1,049	4.9	1,183	4.9	1.1
	인도	605	2.9	1,046	4.4	5.1
	독일	969	4.6	862	3.6	-1.1
	영국	569	2.7	556	2.3	-0.2
	캐나다	421	2.0	513	2.1	1.8
	<b>한국</b>	<b>237</b>	<b>1.1</b>	<b>444</b>	<b>1.8</b>	<b>5.9</b>
	이탈리아	397	1.9	425	1.8	0.6
	프랑스	364	1.7	373	1.6	0.2
	우크라이나	-	-	353	1.5	-1.4
	멕시코	297	1.4	369	1.5	2.0

주: Annex1 국가 - 기후변화협약상 구속력 있는 감축의무를 부담하는 국가(OECD 국가 및 동구권 국가 등, 한국은 제외)

자료: IEA, CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion 2003.

### 3) 교토의정서(Kyoto Protocol)

CO<sub>2</sub>를 비롯한 온실가스에 의한 피해는 글로벌 환경문제뿐만 아니라 사회·경제적으로도 심각한 문제를 야기하게 되자 온실가스 배출을 1990년 수준에서 5% 이하로 억제하도록 하는 교토의정서가 1997년 채택되었다. 의무이행 대상국은 교토의정서가 채택될 당시 미국, 일본, 호주, EU 회원국 등 총 38개국이었으나, 미국은 자국 산업 보호를 위해 2001년 3월에 탈퇴하였다. 교토의정서에서 대상으로 삼고 있는 온실가스는 CO<sub>2</sub>를 비롯한 6종의 가스이며, 55개국 이상의 비준과 비준국의 CO<sub>2</sub> 배출량 합계가 선진국 전체 배출량의 55% 이상이 되는 시점부터 3개월 후 발효된다. 2004년 10월까지 126개국이 비준하였으며, 2004년 11월에 러시아가 교토의정서에 서명함으로써 이 기준을 충족시켜 2005년 2월에 정식으로 발효되었다.



<표 4> 교토의정서(Kyoto Protocol) 주요 내용	
항 목	내 용
대상국가	38개국
대상가스	이산화탄소(CO <sub>2</sub> ), 메탄(CH <sub>4</sub> ), 아산화질소(N <sub>2</sub> O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화유황(SF <sub>6</sub> )
기준년도	1990년도 (HFCs, PFCs, SF <sub>6</sub> 에 대해서는 1995년도)
목표기간	2008년-2012년

목표치  
 증가허용 : 아이슬란드(+10%), 호주(+8%), 노르웨이(+1%)  
 유지 : 러시아, 뉴질랜드, 우크라이나  
 감축 : 스위스, 동유럽 및 EU(-8%), 미국(-7%), 일본, 캐나다, 헝가리, 폴란드(-6%), 크로아티아(-5%)

발효기준  
 55개국 이상이 비준해야 하며, 비준국의 1990년도 온실가스 배출총량이 지구 전체 배출량의 55% 이상을 차지해야 함

교토의정서는 또한 의무이행 당사국의 감축 이행 시 신축성을 허용하기 위해 배출권거래(Emission Trading), 공동이행(Joint Implementation), 청정개발체제(Clean Development Mechanism) 등의 제도를 포함하고 있다. 배출권거래제도는 온실가스 감축의무가 있는 선진국이 지국에 할당된 양을 기초로 하여 다른 나라로부터 배출권을 구입할 수 있는 것을 허용하는 제도로, 배출권 관련 선물(futures)이 런던주식 시장에서 현재 거래가 이루어지고 있으며 석유가격의 가파른 상승으로 인해 선물가격도 급등하고 있다. 공동이행제도는 선진국 간 공동으로 온실가스 감축을 할 때 이를 인정하는 제도이며, 청정개발체제제도는 선진국이 개발도상국에 자본과 기술을 투자하여 온실가스 저감사업을 벌이고 이 과정에서 발생된 온실가스 배출 감축분을 자국의 감축실정으로 인정받는 제도이다.

교토의정서가 가지는 의미는 단순한 국제환경 규제 차원을 넘어서 자국 내 산업에 직접적인 영향을 미칠 수 있다는 것이다. 즉 국가별로 할당된 감축분을 이행하지 못할 시 배출권을 타국으로부터 구입하여야 하므로 국가경제에 상당한 부담으로 작용하기 때문이다. 미국이 교토의정서를 탈퇴한 것은 이러한 상황으로 인해 현실적으로 자국 내 산업에 직접적 피해가 예상되기 때문이며, CO<sub>2</sub> 배출량이 급속도로 증가하고 있는 우리나라도 그 피해가 적지 않을 것으로 판단된다. 왜냐하면 우리나라는 발전의 상당 부분을 화석연료에 의존하고 있으며 주력산업인 철강, 석유화학, 자동차 등이 에너지 다소비적인 산업구조 특성을 보이고 있기 때문이다. 따라서 교토의정서 발효에 따라 예상되는 경제적 부담을 줄이기 위해서는 무엇보다도 에너지 절약과 효율화가 선행되어야 하며, 산업의 친환경화와 더불어 화석연료를 대체할 수 있는 새로운 에너지의 개발이 요구된다.

### 3. 기술적 진보

위에서 언급한 바와 같이 최근의 유가급등과 환경문제의 근본적인 원인에는 석유를 중심으로 하는 화석연료 경제체제의 한계 때문이며 이를 극복하기 위한 세계 각국의 다양한 노력들이 진행 중에 있다. 수소경제가 현실적인 의미를 가지면서 본격적으로 논의되게 된 배경에는 수소경제 구축에 필요한 수소생산, 수소저장·수송, 수소활용 등에 관련한 기술적 진보가 있었기 때문이다. 하지만 각기 다른 배경과 학문 분야에서 출발한 수소 관련 기술들은 각각의 장점과 한계를 가지고 있고 내용도 매우 복잡하다. 본고에서는 수소경제 구축에 필요한 세 가지 축인 생산, 저장·수송, 활용에 대한 개략적 현황을 고찰하였다.

1) 수소생산			
에너지원	주요 제조 방법	장점	단점
수소는 기본적으로 자연계 상태에 거의 존재하지 않기 때문에 다른 에너지를 사용하여 탄화수소나 물을 분해해야만 에너지통화로 활용할 수 있다. 지금까지 알려진 수소의 주요 생산법은 사용하는 에너지원에 따라 크게 세 가지로 구분할 수 있고 각각의 장단점은 다음과 같다(<표 5> 참조).	<표 5> 주요 수소 생산 방법 비교		
화석 연료 (석탄, 천연가스)	수증기 개질 가스화	- 대량 생산 가능 - 저렴한 생산 단가 - 높은 기술 개발 성공 가능성	- CO <sub>2</sub> 발생 - 에너지 안보 취약
신재생에너지 (태양력, 풍력, 조력, 바이오매스, 광촉매)	전기분해 미생물 활용 광촉매	- 높은 친환경성 - 다양한 에너지원 활용 가능	- 높은 생산단가 - 지역적 제한성 - 낮은 에너지 효율 - 대량 생산에 부적합
원자력 (VHTR)	전기분해 고온 열분해	- 대량 생산 가능 - CO <sub>2</sub> 발생 없음	- 원자력에 대한 거부감 - 인프라 구축 미비

첫째, 석탄, 천연가스 등의 탄화수소계 화석연료를 환원분위기에서 촉매 반응을 이용해 분해하여 수소를 생산할 수 있다. 석탄은 가스화(gasification)를 통해, 천연가스는 수증기 개질(vapor reforming)을 통해 CO<sub>2</sub>와 수소로 분리 가능하며, 기술적

불확실성이 대부분 해소된 공정이므로, 수소의 대규모 생산이 가능하다. 대량생산의 이점이 있어 현재로선 가장 수소의 생산단가가 가장 낮으나, CO<sub>2</sub>를 다량 발생시킨다는 근본적인 단점이 있다.

둘째, 신재생에너지에 해당하는 태양력(태양광+태양열), 풍력, 조력, 파력 등을 이용하여 먼저 전기를 생산하고, 이를 이용해 물을 전기분해하여 수소를 얻는 방법이 있다. 이 경우 가장 친환경적이고 다양한 에너지원을 이용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 자연적·지리적 환경에 따라 그 편차가 심하고 에너지 변환 효율이 낮으며 대량생산이 어려워 수소 생산단가가 현재 가장 비싸다는 단점이 있다.

셋째, 원자력 발전을 이용하여 수소를 생산하는 방법이 있다. 즉 원자력 발전 시 발생하는 고온의 열을 이용하여 물을 직접 열분해하거나, 황(S) 혹은 요오드(I)를 이용한 IS프로세스에 의해 열화학반응을 유도하여 수소를 생산할 수 있으며, 유틸리티를 이용한 물의 전기분해도 가능하다. 기존의 원자력 발전을 이용하여 청정에너지인 수소를 대량으로 생산할 수 있는 장점이 있으나, 원자력에 대한 대중수용성(public acceptance) 문제와 관련 시스템 기술이 아직 연구개발 중이라는 단점이 있다.

이 밖에도 광촉매를 활용하여 직접 물을 분해하는 방법, 유기물을 혐기성 미생물을 활용하여 분해하는 방법 등이 있으나 대량으로 수소를 생산하기에는 효율이 너무 낮다는 단점이 있다.

## 2) 수소저장·수송

수소는 상온·상압에서 기체로 존재하기 때문에 에너지 밀도가 낮고 액체연료와 비교할 때 저장 및 운반이 불편하다는 단점이 있다. 수소가 에너지통화로서 실용화되기 위해서는 적어도 기존의 석유에 버금가는 편리하고 안전하며 경제적인 저장기술이 개발되어야 한다. 현재까지 알려진 수소저장법으로는 압축수소법, 액화수소법, 탄화다공체 저장법, 수소저장합금법 등이 알려져 있으나, 안정성 및 경제성 면에서 각각 장단점이 있어 각 분야에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다(<표 6> 참조).

		<표 6> 수소 저장 방법 및 장단점과 리스크	
저장방법	장점	단점	리스크
압축수소 (compressed H <sub>2</sub> )	-이용의 편리성 -작은 부피 -상온 -소량 이용에 적합	-저장용기가 무거움 -수소를 담을 수 있는 용기재료의 특수성 및 고압이 요구됨	-밸브 및 이음새에서의 유출 -감압 시 위험 -부식(화학적/물리적) -균열
액화수소 (liquid H <sub>2</sub> )	-대량 저장 가능 -상압	-극저온(20K)에서의 이용이 불편 -액화 시 추가 에너지가 필요하므로 비경제적	-밸브 및 이음새에서의 유출 -뚜껑에서의 O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> 결정화 -대량의 H <sub>2</sub> 손실
탄화다공체 (carbonaceous porous materials)	-100bar 정도의 압력에서 압축 수소와 거의 같은 저장 용량 - 안전성, 친환경성	-현재 연구단계로 아직 까지 산업에 응용되고 있지 않음	-소재의 범용화와 표면 처리기술의 미개발
합금화합물 (material compounds)	-H <sub>2</sub> 분자와의 결합에 의한 대량 저장 가능 -대량 H <sub>2</sub> 와 연관된 위험의 감소	-화합물 가격이 비쌈 -부식을 막기 위해 매우 고순도의 H <sub>2</sub> 필요 -현재 연구단계로 아직 까지 산업에 응용되고 있지 않음	- 저질량 합금개발이 선행되어야 자동차에 쓰일 수 있음 - 열화현상

수소의 수송은 경제성과 직결되는 중요한 문제이다. 가정용 수소는 천연가스처럼 파이프를 통한 공급망의 형성이 가장 바람직한 수송형태이며, 자동차용 수소는 현재의 주유소 형태와 같은 수소스테이션의 구축이 바람직하다. 하지만 두 경우 모두 안전성을 확보할 수 있는 소재 기술의 개발이 선행되어야 하며, 대규모 수소저장소와 수소스테이션은 지역 주민의 동의가 필요하다.

### 3) 수소활용

수소경제로 에너지체제가 전환되기 위해서는 수소가 시장에서 에너지통화로 선택되어 활용될 수 있어야 한다. 수소를 에너지로 활용하는 대표적인 사례는 연료전지(fuel cell)이며, 연료전지는 수소와 산소의 화학반응을 통해 전기에너지를 발생시킬 수 있다. 연료전지는 기존 화석연료를 사용하는 발전기기 및 내연기관에 비해 거의 소음을 내지 않고 공해물질 배출이 없으며 에너지 효율이 40% 이상으로 매우 우수하다. 연료전지는 가정용, 산업용, 사무용 등 중소규모 발전용으로 사용 가능할 뿐만 아니라, 특히 자동차의 내연기관을 대체할 수 있다. 현재 미국, 캐나다, 독일, 아이슬란드 등에서는 연료전지 버스가 시범 운행 중이며, 토요타를 비롯한 글로벌 자동차 메이커들은 차세대 자동차로 연료전지를 탑재한 자동차를 설정하고 연구개발 및 시제품 제작에 많은 비용을 투자하고 있다. 이밖에도 연료전지는 우주선과 잠수함과 같은 특수목적용으로도 사용 가능하며 노트북이나 휴대폰 등의 전원에도 이용

될 수 있어 활용 범위가 매우 광범위하다.

수소를 연료로 사용하는 연료전지는 사용하는 전해질의 종류에 따라 기술적으로 크게 다섯 가지로 구분된다(<표 7> 참조). 이 중 고체고분자형 연료전지(PEMFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell)는 다른 연료전지에 비해 크기가 작고 저온에서 구동 자동차에서의 활용이 기대되고

<표 7> 연료전지의 종류 및 활용분야						
유형	인산형 (PAFC)	고체고분자형 (PEMFC)	융용탄산염형 (MCFC)	고체산화물형 (SOFC)	알칼리형 (AFC)	
전해질	인산	이온교환막	탄산리튬 / 탄산칼륨	지르코니아	수산화칼륨	
이온전도체	수소이온	수소이온	탄산이온	산소이온	수소이온	
작동온도(℃)	200	<100	650	1,000	<100	
효율(%)	40	45	45	45	40	
출력범위 (kW)	100-5,000	1-1,000	1,000 -10,000	1000 -10,000	1-100	
활용분야	분산전원	가정용, 수송(자동차)	대형 발전	대형발전	우주선	

자료: 한국과학기술원, 연료전지연구센터(fuelcell.kist.re.kr)

하지만 연료전지가 자동차에 활용되기 위해서는 아직 해결해야할 문제점들이 많다. 기술적인 면에서는 연료전지 자체의 성능향상과 안정성 및 타 자동차 부품과의 연계성 등이 해결되어야 하며, 무엇보다도 대량생산이 가능해 기존 내연기관을 사용하는 자동차와 비교했을 때 가격면에서 경제성이 확보되어야만 시장에서 선택받을 수 있을 것이다. 또한 수소연료를 쉽게 활용할 수 있도록 충분한 연료공급 시설의 설치가 선행되어야하며, 환경규제 강화와 세금 혜택 등의 제도적인 뒷받침이 있을 때 연료전지 자동차의 미래가 보장받을 수 있다.

### III. 수소경제의 의미

#### 1. 에너지체제의 변화

수소경제의 의미를 살펴보기 위해서는 먼저 기존의 에너지원과 경제체제와의 관계를 역사적으로 살펴볼 필요성이 있다. 왜냐하면 경제체제는 그 체제를 유지하려는 다양한 주체들의 이해관계에 의해 정치성을 필수적으로 가지며, 주체들이 소속되어 있는 사회의 지속가능성에 큰 파급효과를 가지기 때문이다.

인류가 불을 발견한 이후, 산업혁명이 일어나기 전까지 가장 큰 연료원은 당연히

나무나 풀과 같은 자연계 상태에서 쉽게 채집할 수 있는 땀감이었다. 이후 산업혁명의 시작과 함께 발달된 석탄경제시대는 향후 200년 이상 서유럽을 중심으로 한 자본주의 경제체제 발달의 큰 원동력이 되었으며, 이어 등장한 석유경제시대는 식민지 경제체제가 종료되는 1900년대 초반에 시작되어 지금까지 지속되고 있다. 이제 석유경제시대가 100년을 지나는 시점에서 향후 어떤 에너지원이 주력 에너지원으로 사용될 수 있을가에 대해 많은 연구가 이루어지고 있는 실정이다.

에너지를 기준으로 한 경제체제의 구분에 있어서 가장 중요한 특징은 누적성이다. 주요 에너지원의 변화는 어느 한 순간 A라는 에너지원에서 B라는 에너지원으로 급격하게 변화하는 것이 아니라, A가 주로 사용되다가 어느 시점에 있어서 새로운 B 또는 C라는 에너지의 비중이 점점 증가하게 되는 경향을 나타내기 때문이다. 지금 현재를 석유경제시대라고 부르고 있지만, 여전히 석탄이 주요한 일차에너지원으로서 쓰이고 있고, 향후 수소경제시대가 오더라도 석탄, 석유, 천연가스 및 신재생 에너지를 동시에 사용하는 과정을 분명히 거치게 될 것이다. 아직도 세계 인구 중 약 20억 이상이 나무를 주요 연료원으로 사용하고 있다는 사실이 좋은 예가 될 것이다.

현재 세계 주요 에너지원은 석유, 석탄, 천연가스와 같은 화석 연료와 원자력, 다양한 신재생에너지 등이 모두 사용되고 있다. 특히 석탄과 천연가스의 비중이 각각 2001년 기준 23% 이상으로 상당 부분을 차지하고 있다. 그럼에도 불구하고 현재를 석유경제시대라고 부르는 이유는, 석유를 중심으로 한 세계 정치·경제 구도가 형성되어 있기 때문이다. 즉 석유의 채굴 및 공급이 미국을 중심으로 한 세계 경제 중심국들에게 집중되어 있고, 이들 나라에 소속되어 있는 소수 거대 기업들에 의해 “집중형 에너지 공급체계”가 형성되어 있기 때문이다. 엑슨, 모빌오일, 셰브론, 로열 더치셸, 걸프, 텍사코, 브리티쉬 석유 등은 이러한 역할을 하는 대표적인 7대 거대 기업으로, 1928년 가격 카르텔에 합의한 이래 강력한 콘체른(Konzern)을 형성하고 있으며, 이들 중 어느 하나에 의해 시장이 독점될 수 없도록, 민감한 석유시장을 상호 통제하는 기능을 수행하고 있다. 이는 미국을 중심으로 하는 선진국들이 석유시장의 급격한 요동에 의한 경제체제의 붕괴를 결코 원하지 않기 때문이다. 따라서 이들 국가들은 불확실성의 가장 큰 원인이 되는 석유 및 석유로 만든 최종 생산품의 수입이 국가 안보를 위협하는 것을 용납하지 않으려 해왔다. 일례로 세계 2차 대전 발발의 직접적 원인 중 하나는 독일과 일본과 같은 후발 공업국들의 안정적인 에너지원 확보 욕구였으며 이에 대항한 연합국의 주요 국가는 기존 공급체제를 유지하고자 참전하였다는 것은 잘 알려진 사실이다. 또한 아프가니스탄, 이라크 등에서 최근 발발한 전쟁들은 표면적으로는 테러리즘의 척결과 독재정치의 종식이나, 근본적인 원인은 세계 최대 원유 매장지역인 중동지역의 불안정한 정치구도를 해소하여, 안정적인 석유 및 천연가스의 공급을 확보하기 위함이라는 것이 대부분의 전문가들의 일치된 견해이다.

위에서 살펴본 바와 같이 주요 에너지원의 확보는 경제체제 유지의 핵심이 되고

세계 정치·경제의 주도권의 확보와 직결된다. 현재 세계 대부분의 국가들은 주요 에너지원의 확보를 국가 생존 및 번영과 관계된 중요한 문제로 인식하고 대처하고 있다. 이러한 상황에서 20세기 후반부터 꾸준히 제기되어 온 화석연료(특히 석유)의 고갈 및 환경문제의 해결을 위해 선진국들은 미국을 중심으로 수소경제로의 이행을 면밀하게 검토·준비하고 있다. 이들 국가들에 있어서 수소경제로의 이행이 의미하는 바는 에너지원의 변화에도 불구하고 변화된 경제체제에서도 주도권을 확보하기 위함이다. 따라서 2003년 1월에 미국 부시대통령이 에너지 자립을 위한 수소경제시대로의 이행을 선포하고 수소연료선도계획(HFI: Hydrogen Fuel Initiative)을 발표하여 수소경제를 주도하려는 사실은 의미하는 바가 매우 크다. 왜냐하면 수소의 생산은 석유와 달리 지역적 특수성에 구애받지 않고 이루어질 수 있기 때문에, 석유경제체제에서 형성된 집중형 에너지 경제체제가 근본적으로 변화할 가능성이 있기 때문이다.

## 2. 공급체계의 다원화

앞에서도 살펴본 바와 같이 수소경제로의 전환은 기존 석유경제가 가지고 있는 집중형 에너지 공급체계가 변화함을 의미한다. 즉 수소는 다양한 제조방법에 의해 생산될 수 있기 때문에 지역적 편재성을 극복할 수 있고 이는 곧 “분산형 에너지 공급체계”가 일부 혹은 상당 부분 도입될 가능성이 높아지는 것이다.

수소의 생산방식은 국가별로 처한 에너지 환경이나 사회·경제적 수요 및 기술적 진보 정도에 의해 결정될 확률이 높다. 즉 수소를 생산하기 위한 일차 에너지원의 활용 여부, 환경문제에 대한 접근 방식, 제조방법의 경제성, 생산기술 확보 정도 등이 국가마다 차이가 나기 때문이다. 현재로서는 앞서 언급한 세 가지 주요 생산방법에 대한 연구개발이 각각 진행되고 있으며, 각각 장단점이 뚜렷하게 존재하기 때문에 상호 보완적 형태의 생산 및 공급체계가 구축될 가능성이 크다. 또한 수송·저장 및 어떤 활용기술이 지배적으로 사용되는가와 일차 에너지원의 상황 변화에 의해 이들 생산법의 비중이 점차 변화할 것이다. 예를 들면 석탄과 천연가스의 개질에 의한 수소의 생산은 현재 가장 경제적 생산법이어서 가까운 시간 내에 실현될 수 있지만, CO<sub>2</sub> 배출이라는 근본적 문제와 원료 가격의 지속적인 상승으로 시간이 흐를수록 그 장점이 줄어들어간다. 원자력을 이용한 수소의 생산은 대량생산이 가능하고 CO<sub>2</sub>를 배출하지 않는 장점이 있지만, 관련 시스템 기술 개발에 15년 이상의 시간이 필요하고 사회적 합의가 수반되어야 하므로 가까운 시간 내에 실현되기 어렵다. 반면 신재생에너지에 의한 수소 생산은 비록 대량생산에는 부적합하지만 관련 기술(특히 연료전지)의 진보에 의해 가정용이나 근거리 지역의 자급용 수소를 공급할 수 있을 것이다.

따라서 수소경제시대에는 기존의 집중형 공급체계가 산업부문과 수송부문에서는 여전히 유효할 수 있지만 상당 부분 지역별 공급체제로 대체될 수 있으며, 가정용

수소는 대부분 지역별 공급체계에 의해 그 수요를 만족시킬 수 있을 것이다. 이와 같은 상황이 현실화된다면 기존의 에너지 수입국 및 수출국의 역할 분담구조에도 근본적인 변화를 가져오게 되며, 일부 기업들에 의해 독과점되었던 에너지 공급체계가 개인 및 지역 단위의 다원화된 에너지 공급체계로 전환될 수 있을 것이다. 또한 분산된 에너지 공급체계는 각종 자연재해 및 국제정세의 급변에 의한 사회적 혼란의 피해를 최소화하는데도 이바지할 수 있다.

### 3. 기술혁신 촉진과 신산업의 창출

새로운 동력원의 개발은 관련 기술들의 혁신을 촉진하고 새로운 산업 창출에 결정적 영향을 주어 왔다. 유럽의 풍부한 석탄은 증기기관의 개발 및 활용을 촉진시켰으며, 석유는 내연기관을 비롯한 20세기 대량생산 체제용 기술 개발과 관련 제품의 폭발적 공급을 가능하게 하였다. 즉 기존의 화석연료는 경제성장 위주의 저렴한 에너지 공급이 목표였다면, 수소는 지속가능한 성장을 주도하고 에너지 자립도를 제고시키며 친환경성을 높일 수 있다. 수소를 새로운 동력원으로 사용하기 위해서는 다양한 분야의 기술혁신이 요구되고 수소를 활용한 각종 기기와 제품들의 출현에 의해 신산업의 창출이 가능하다.

먼저 수소의 생산 측면에서 보면 각종 촉매의 제조와 반응의 효율성을 높이는 공정기술 및 CO<sub>2</sub> 포획기술의 개발, 신재생에너지의 에너지 밀도 증가와 변환 효율을 높이는 기술의 개발, 수소생산에 최적화된 원자로 시스템의 개발 및 수소의 안전성 향상과 관련된 각종 소재 제조기술의 개발이 촉진된다. 수소의 저장·수송 측면에서는 수소 저장용 탄소복합체 및 저장합금의 개발 등이 촉진되며, 저장 용기의 경량화와 내압특성을 높이기 위한 기술 등의 개발도 예상된다. 수소의 활용 측면에서는 제품화와 관련된 다양한 연료전지의 제조와 자동차의 아키텍처를 변환시키는 기술들의 개발이 촉진되며, 각종 전자기기의 경량화를 위한 부품소재의 개발과 기존 내연기관과 연료전지를 함께 쓸 수 있는 하이브리드 기관의 개발도 촉진된다.

수소경제의 구축은 위에서 언급한 수소와 관련한 직접적인 기술혁신과 이에 따른 신제품 개발에 의해 전력, 자동차, 원자력, 전기·전자 등 여러 산업분야에서 새로운 산업이 파생될 수 있게 할 뿐만 아니라, 각종 제도 및 정책 변화에 의해 기존 산업구조를 친환경적으로 전환시킬 수 있다.

## IV. 결론

지금까지 수소경제가 이슈화된 배경을 화석연료의 정치·경제적 문제, 글로벌 환경문제, 기술적 진보의 세 부분으로 나누어 살펴보고 그 의미도 에너지체계의 변화, 공급체계의 다원화, 기술혁신의 촉진과 신산업 창출의 관점에서 고찰하였다.

역사적으로 주요 에너지체계의 변화는 그 전방위적 파급효과가 인류에게 미치는



영향이 지대하였고 주도권 확보가 국가 발전에 결정적 요인으로 작용하여 왔다. 현재 우리나라는 에너지 소비 세계 10위, 석유 수입 세계 4위, 천연가스 수입 세계 2위인 실정으로 거의 대부분의 에너지를 수입에 의존하고 있다. 또한 화석연료의 고갈과 글로벌 환경문제에 의해 지금의 에너지체제는 수십 년 이내에 근본적인 변화를 가질 수밖에 없다. 물론 수소가 석유를 잇는 새로운 에너지 대안이 되기에는 넘어야 할 여러 기술적 한계, 시장에서 받아들일 수 있는 경제성, 사회 구성원들의 합의 등이 있어야 하며 그 시기도 수십 년이 걸릴 수 있다. 그러나 현재 제시되고 있는 여러 에너지 대안들 중 수소경제가 가장 구체적이고 실현 가능성이 비교적 높은 것은 분명하다.

수소경제로의 에너지체제 변화는 우리에게 에너지 자립도를 높일 수 있는 새로운 기회임과 동시에 관련 기술개발이나 인프라 구축이 미비할 경우 위협이 될 수 있다. 따라서 수소경제 실현 여부와 관련된 리스크를 줄이고 향후 수소경제시대의 주도권을 확보하기 위해서는 국가적 차원에서 중장기적인 에너지전략을 세우고 체계적인 준비를 하는 것이 필요하다. 즉 에너지 확보와 에너지 효율화라는 큰 전략적 목표 하에 기존 화석연료의 안정적 공급과 에너지 소비의 효율화 및 친환경산업 육성을 추구함과 동시에 수소경제를 실현하기 위한 기술개발과 인프라구축을 병행해야 한다. 특히 수소의 생산에서는 한 가지 방법에 전적으로 의존하기 보다는 적절한 포트폴리오를 구성하고 에너지환경 변화와 기술개발 정도에 맞춰 그 비율을 조절하고 공급체계를 다원화하는 전략이 필요하다. 인프라구축 면에서도 장기간의 시간이 필요하므로 일부 지역을 수소에너지를 사용하는 시범지역으로 선정하여 수소경제 실현에 대한 정책적 의지를 표명하고 향후 발생할 수 있는 여러 문제점들을 미리 진단하고 대비하는 계획이 필요하다.

#### [참고문헌]

국제에너지기구(IEA), "CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion 2003".

미국에너지정보청(EIA), "International Energy Outlook 2004".

기상연구소(2004), "기후변화에 대한 과학적 이해와 향후 대처방안",

최기련·박원훈(2002), 『지속가능한 미래를 여는 에너지와 환경』, 김영사.

제러미 리프킨(2003), 『수소혁명』, 민음사.

폴 로버츠(2004), 『석유의 종말』, 서해문집.

권터 바루디오(2004), 『악마의 눈물, 석유의 역사』, 뿌리와이파리.

21C 프론티어 수소에너지 기술개발사업단(2005), 『수소에너지』, 아진.

대한석유협회 홈페이지([www.petroleum.or.kr](http://www.petroleum.or.kr))

한국과학기술원 연료전지연구센터 홈페이지([www.fuelcell.kist.re.kr](http://www.fuelcell.kist.re.kr))