21세기 미래 사회와 전기의 역할

이 태 준 · 윤 성 원
한국원자력연구소 정책연구부

21세기 미래 사회의 유망 에너지로서 전기 에너지의 특성과 역할을 예측 · 분석하였다. 먼저 에너지와 문명 발전과의 관계를 에너지와 경제 그리고 에너지 안보 차원에서 고찰하고 이들 간의 공진화 관계를 산업 혁명 이후의 세계 경제의 장주기적 변화 관점에서 분석하였다. 그리고 20세기에 전기 에너지가 세계 경제 사회에 미친 중요한 영향을 분석한 후에 21세기 지식 기반 디지털 경제 사회에서 전기 에너지의 개발 환경 및 수요 특성을 전망하였다.

서론 : 에너지와 경제

2003년 2월 26일 이라크전의 위기감이 고조되면서 뉴욕에서 원유가가 배럴당 40달러를 기록했다. 이날 오전 후반 서부 텍사스산 중질유(WTI) 4월물은 배럴당 2달러 30센트가 올라 배럴당 40달러까지 치솟아 지난 1990~1991년 제1차 걸프전 이후 12년만에 최고치를 기록했다.

만일 이라크 전쟁이 발발해 단기전으로 그치지 않고 이라크 이외의 지역으로 확산될 경우 유가는 배럴당 80달러까지 치솟아 세계 경기 침체를 초래할 것이라고 뉴질랜드 재무부가 보고서를 통해 2월 27일 전망했다.

이라크전과 관련된 국제 유가의 상승으로 2003년 들어서 한국 경제는 수출 호조에도 불구하고 국제 유가 상승세가 계속됨에 따라 무역 수지가 두 달 연속 적자를 냈다.

2003년 2월 수출입 실적(통관 기준)을 잠정 집계한 결과, 수출 135억500만 달러, 수입 138억 2200만 달러로 3억1700만 달러의 적자를 기록했다. 무역 수지 적자는 2003년 1월 8700만 달러 적자에 이어 두 달째로서, 적자 규모도 2억 3천만 달러가 더 증가했다. 2개월 연속 적자는 한국이 외환 위기를 겪을 당시인 1997년 9~10월 이후 처음이다.

2003년 2월 중 수출은 지난해 같은 달 110억2300만 달러보다 22.5% 늘어난 것으로, 역대 2월 실적 가운데는 최고 실적을 기록했지만 수입이 2002년 2월 104억7100만 달러에 비해 32.0%나 증가해 수출 증가율을 훨씬 웃돌았다.

이는 원유 도입 단가가 전해 같은 달과 견주어 58%나 상승하는 등 국제적인 고유가 현상에 따라 원자재 수입이 25% 늘어나고, 반도체 장비 · 자동차 부품 등 자본재 수입도 44% 증가했기 때문이었다(인터넷 한겨레, 2003. 3. 2).

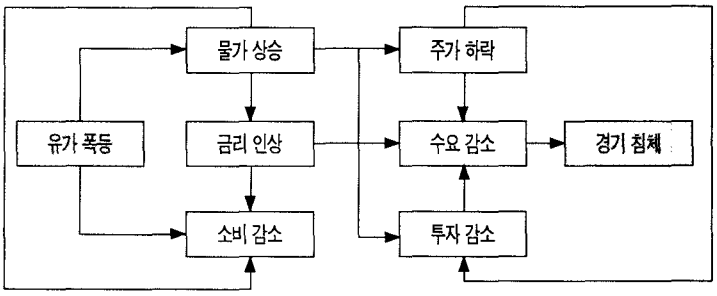
에너지 가격 상승은 단순히 에너지 부문 내에서의 경제 활동에만 영향을 미치는 것이 아니라 국가 및

세계 경제 전체에 그 영향이 확산된다는 데에 그 심각성이 있다.

에너지 가격이 상승하면 생산 제품 가격 및 물가 상승을 유발하고 이에 따라 소비가 위축되면서 생산 투자가 감소하고 이는 후속적으로 경기 침체로 이어진다.

실제로 1973년 석유 파동의 결과, 세계 경제적으로 ① 생산성 증가율의 저하(productivity slow down) 및 이에 따른 GDP 성장이 둔화되었고 ② 인플레이션과 실업률의 동시 증가를 나타내는 속칭 '스태그플레이션' 현상이 출현된 바 있다(박정기 · 최기련, 1997)[1].

특히 한국과 같은 에너지의 해외 의존도뿐만 아니라 해외 무역에 대한 경제 의존도가 높은 경우에는 국제 유가 폭등으로 국내 물가 불안이 심화되는 것 이외에도 에너지 가격 상승은 경제 성장에 결정적인 위협 요인이 된다. 〈그림 1〉은 유가 상승이 국내 경제에 미치는 파급 효과를 보여주고 있다.



(그림 1) 유가 상승의 경제적 파급 효과 (황인성, 2000)

보다 구체적으로 유가 상승이 국가 경제에 미치는 영향은 직접적 영향과 간접적 영향으로 나누어 생각할 수 있다.

직접적 영향 중 하나는 원유 도입 단가의 상승에 따른 원유 수입액의 증가이다. 국제 유가 상승의 직접적 영향 중 두 번째는 휘발유 · 경유 · 등유 · 중유 · 제트유 등 석유 제품과 납사를 원료로 하는 석유 화학 제품의 가격 인상이다.

이를 통해 소비자 물가와 생산자 물가가 상승한다. 유류 및 석유 화학 제품의 가격 인상은 제조업 및 서비스업의 생산 원가를 상승시킴으로써 이차적 물가 상승 효과를 가져온다. 물가 상승 내수 감소를 통해 국내 경기를 위축시킬 뿐만 아니라 수출품 단가의 인상을 유발함으로써 수출을 감소시킨다. 이로 인한 수출 수요의 감소는 내수의 감소와 함께 경기 위축을 가져와 경제 성장률의 둔화를 초래하게 된다(신의선, 2001).

문명 발전과 에너지의 공진화 (Co-evolution)[2]

현대 사회뿐만 아니라 에너지는 인류 사회의 발전에 밀접하게 연관되면서 함께 변화되어 왔다. 에너지는 인류의 삶에 전제적으로 필수 불가결한 요소로서, 인류 문명은 에너지원의 변천과 함께 도약적인 발전

1) 이에 대한 자세한 설명은 박정기 · 최기련(1997)의 P89~90 참조할 것.

2) '문명이란 개념은 18세기 프랑스 사상가들이 '야만'의 개념과 반대되는 뜻으로 발전시켰음. '문명 사회는 정착 생활을 하며 도시와 문자를 가지고 있다는 점에서 원시 사회와 다르다. 문명은 독일을 제외하고는 문화적 실체로 파악된다. 19세기 독일의 사상가들은 기계 · 공학 · 물질적 요소와 결부되어 있는 문명(civilization)과 한 사회의 가치관 · 이상 · 지적으로 높은 수준에 있는 예술적 · 윤리적 특질과 결부되어 있는 문화(culture)를 엄격하게 분리했다. ..... 문명과 문화는 모두 사람들의 총체적 생활 방식이다. 문명은 크게 쓰여진 문화다. 문명과 문화는 모든 주어진 사회에서 ..... 우선적으로 중요성을 부여한 가치 · 기준 · 제도 · 사고 방식을 담고 있다(Huntington/이희재 역, 2002: 46-47).' 이에 따라 본 연구에서는 문명은 주어진 시대와 사회에서 크게 쓰여진 사람들의 총체적 생활 방식으로서 대표적인 가치 · 기준 · 제도 · 사고 방식을 포함하는 개념임. 그럼에도 불구하고 본 연구에서 문명의 개념은 상대적으로 정신적 보다는 물질적 측면에 다소 근접하고 있음.

을 거듭해 왔다고 볼 수 있다.

불을 사용하고 에너지를 이용할 수 있었기에 만물의 영장이 될 수 있었다. 석탄을 이용하는 증기 기관의 발명은 산업 혁명을 가져왔고 석유를 이용하는 내연 기관의 발명은 20세기 기계 문명을 꽃피웠다.

한편 전기 · 전자 · 반도체 · 통신 등의 기술 집약적 첨단 산업은 전력을 에너지원으로 하고 있으며, 이 분야는 21세기 산업 발전을 주도해 나갈 것이다(신의순, 2001).

이처럼 에너지가 충분하게 공급되지 않으면 인간 사회의 기능은 제대로 작동될 수가 없으며 무엇보다도 문명 그 자체를 유지하는 것이 불가능하다. 따뜻하고 쾌적한 주거 환경 · 수송 · 통신 · 식량 · 제조 · 유통 그리고 국가 안보 등 모든 개인과 조직 사회 활동은 다양하고 지속 가능하며 관련 수요 · 공급 환경에 적응 가능한 에너지의 공급에 의존한다(EFTF, 2000).

산업 혁명 이후 에너지 대량 소비 기술이 경제적 산출 능력을 결정하고 있으며 이 능력은 곧바로 국부 수준을 결정하고 있다. 서구 선진국들이 걸어온 성장의 역사는 지속적 에너지 소비 증가에 의해 이룩되었다(박정기 · 최기련, 1997).

에너지 생산 능력의 확대는 현대 산업 기술 특성상 곧바로 재화 및 서비스의 공급 증대로 직결되고 나아가 물질적 부와 복지의 증대로 귀결되었다. 결과적으로는 지속적인 부와 복지의 확대 공급 메커니즘의 지속을 위하여 에너지 소비가 지속적으로 증가하는 사회 체계가 형성되었다.

따라서 현대 사회에서의 에너지 문제는 경제와 사회 개발 문제로 직결된다. 즉 에너지 활용 가능성은 경제 · 사회 개발 방향으로 귀결되고 경제 · 사회 개발은 에너지 활용 능력의 확대를 요구한다(오원철, 1997).

이에 따라 에너지 분배량(현실적으로는 소비량, 그러나 범세계적 에너지 수급 시스템 기준으로는 분배량)의 수준이 산업 발전과 복지 수준을 결정하는 요인이 되고 있다. 즉 풍부한 에너지 자원의 확보는 부(富) 내지 풍요를 의미하게 되고 에너지의 부족은 빈곤을 의미하게 되었다(박정기 · 최기련, 1997).

따라서 인류 문명의 역사는 삶의 질을 높이기 위해 품질이 좋고 풍부한 에너지를 확보하기 위한 경쟁의 역사로 볼 수 있다. 즉 인류 역사의 초기에 에너지는 인간의 노동력과 동물로부터 구해졌다. 근대에 이르기까지 노예 제도가 성행했던 까닭은 그것이 인간 에너지를 착취하기 위한 제도적인 수단이 되었기 때문이었다.

인간과 동물의 에너지 다음에는 인류는 풍력과 수력을 이용하면서 더 많은 에너지를 개발하였다. 그리고 지난 두 세기 동안에는 상업적으로 생산된, 특히 석탄 · 석유 · 천연가스 및 원자력 등의 에너지가 인간과 동물의 에너지를 대체하게 되었다(INSC/이창건 역, 1996).

영국의 산업 혁명과 더불어 진행된 인류 문명의 산업화는 인간과 동 · 식물의 에너지 및 풍력과 수력 이외의 새로운 에너지원의 도입과 더불어 진행되었다. 산업 혁명의 핵심적 특징의 하나는 이전보다 훨씬 더 연료 효율적인 기술의 개발이다.

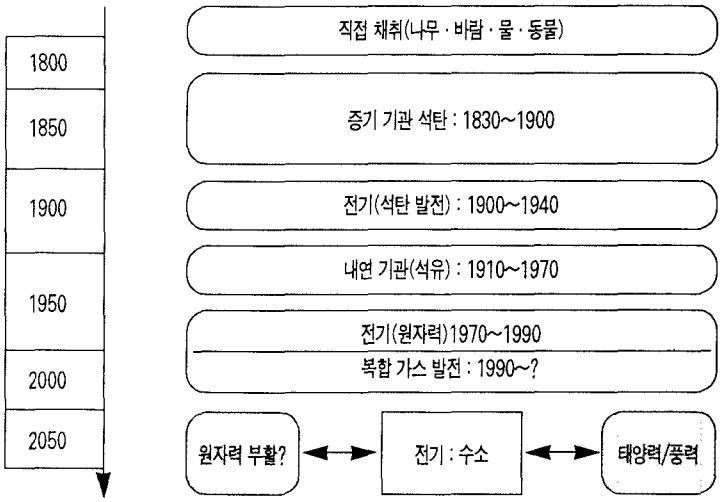
여기에는 기존의 연료를 이용해서 경제 생산 단위당 연료 소모량을 줄이는 기술을 개발하는 것뿐만 아니라 보다 풍부한 그리고 물리 화학적으로 보다 좋은 특성을 가지는 에너지원을 탐색하는 기술이 포함된다. 왜냐하면 이 모든 기술들이 에너지 투입과 최종 제품의 성능 및 생산성과 직결되었기 때문이다(Rosenberg, 1982).

예를 들면 에너지원을 나무에서 석탄(코크스)으로 바꿈으로서 에너지 효율성과 경제적 생산성이 크게 증가하였다. 18세기 말까지 영국의 제철 산업은 지리적으로 분산되어 있었는데 그 주요 원인은 연료가 나무라는 사실에 기인하였다. 즉 제철 산업에는 많은 에너지가 소모되는데 그 연료인 나무는 지리적으로 분산되어 있었다.

또 한 가지의 특징은 나무를 원료로 하는 목탄은 쉽게 부숴지는 특성

때문에 운송이 어려웠다. 또한 이러한 목탄의 물리적 특성이 제철 산업의 생산성을 크게 제약하였다. 다시 말해서 목탄의 쉽게 부서지는 특성은 매우 높은 용광로에서는 무거운 무게를 지탱할 수 없게 만들고 결과적으로 용광로의 높이를 제한하였다.

연료를 목탄보다 훨씬 강하고 단단한 코크스로 대체하면서 목탄보다 더 큰 무게를 지탱할 수 있게 되었고 용광로를 더 높게 만드는 것이 가능해졌다.



(그림 2) 에너지 기술의 진화

1800년까지 나무 연료를 기반으로 한 제철 산업의 에너지원은 석탄으로 실질적으로 전환되었다. 요약컨대, 18세기에 용광로에 코크스가 도입되면서 제철 산업이 나무 연료가 훨씬 풍부하고 물리적으로 더욱 적합한 에너지원(석탄)이 개발됨으로써 200년에 걸쳐 계속된 생산 기술(야금술)을 진보, 즉 용광로의 높이를 증가시키고 그 결과 에너지의 효율성과 산업의 생산성이 크게 향상되었다(Rosenberg, 1982).

이와 같이 18세기 및 19세기 초에 일기 시작한 산업 혁명은 석탄을 연소시켜서 증기를 에너지로 활용하는 등 석탄 이용 기술이 광범위하게 도입된 과정으로 볼 수 있다(Rosenberg, 1982). 석탄을 연소한 증기 엔진은 나무와 물과 바람을 대체하면서 산업 혁명 초기 단계에 동력을 제공하였다(Shell International, 2001).

산업 혁명 전에는 나무가 주요 에너지원이었는데, 증기 기관이 발명되어 점차 공장에서 사용됨에 따라 보다 효율성이 높은 석탄이 주요 에너지원으로 사용되었다. 결국 석탄이라는 새로운 에너지원이 발견되고 널리 사용되면서 산업 혁명이 비로소 가능하게 되었던 것이다(민동필, 2001).

뒤이은 19세기 말과 20세기 초부터는 석탄 · 석유 및 천연 가스 등의 화석 연료를 사용하는 에너지 기술이 개발 · 확산되기 시작했다(Rosenberg, 1982). 또한 약 1910년경부터 내연 기관은 넓은 범위에 걸쳐서 편리한 운송 수단을 제공하면서 석유의 소비를 부추겼다(Shell International, 2001).

20세기에 들어서 화석 연료와 수력을 이용해서 또 다른 새로운 에너지 형태인 전기를 개발 · 사용하였으며, 전기의 보급은 생산 공정, 사업 조직과 삶의 패턴에 근본적인 변화를 촉발하였다(Shell International, 2001). 이러한 전기를 생산하는 경제적인 기술적 방법으로 20세기 중반에 원자력이 탄생하였다.[3]

3) 역사적으로 전기 사용의 증가와 중앙 집중식 발전의 출현을 촉발한 가장 중대한 시발점은 백열등의 발명이었음(Rosenberg, 1982).

시기	제1물결 1780s~ 1840s	제2물결 1840s~ 1890s	제3물결 1890s~ 1940s	제4물결 1940s~ 1990s	제5물결 1990s~?
Kondratieff 장기 파동 (long Wave)	산업 혁명: 섬유 공장 생산	증기 동력과 철도 시대	전기와 철강 시대	자동차와 합성 재료 대량 생산 시대	전자공학과 컴퓨터 네트워크 시대
핵심 요소	면화 · 철(Iron)	석탄 · 철(Iron) 운송(철도)	강철(steel)	석유(에너지 · Plastic)	칩(Micro- Electronics)
지배 에너지	수력 · 목탄	증기력(석탄)	전기(석탄) 석유(내연 기관)	석유 (1차 연료/발전)	가스/석유 · 전기 · 수소?
수송/통신	운하 마차로	철도(Iron) 전보	철도(Steel) 전화	자동차 고속도로 비행기 라디오 · TV	정보고속도로 디지털 네트워크
주도 산업	섬유	철강	자동차	화공 · 항공	정보 통신, 생명 공학
과학 기술 학습	도제 학습, 실행 학습 -Learning by Doing 과학적 사회	기계/토목 전문 기술자 기술 개발 전문 기관 대량 초등 교육	산업 연구소 화학/전기 국립 연구소 표준 연구소	대규모 산업/ 정부 연구소 대량 고등 교육	데이터 네트워크 글로벌 R&D 네트워크 평생 교육 훈련
주도 국가	영국-프랑스 -벨기에	영국-프랑스 -벨기에 -독일-미국	독일-미국- 영국-프랑스 -벨기에	미국-독일- 타EEC- 일본-스웨덴	미국-일본- 독일-스웨덴 ?

(그림 3) 산업 혁명 이후 문명 사회의 장주기 변화

오늘날에는 전기가 많은 산업 부문에서 지배적이며 선호되는 에너지로 자리잡고 있다. 이처럼 인간이 더 많은 에너지를 더욱 편리하게 사용하게 되면서, 사람들은 점점 더 풍요로운 삶을 구가하며 장수하게 되었다(INSC/이창건譯, 1996).

〈그림 2〉는 Shell International (2001)를 자료를 토대로 에너지 기술의 발전 과정과 미래 전망을 나타낸 것이다.[4]

러시아 경제학자인 콘드라티에프(Kondratiev)는 산업 혁명 이후의 세계 경제 변화를 대표적으로 설명하고 있다고 인정받고 있다. 소위 콘드라티에프 주기 (Kondratieff's Long Wave of Technological Change)라고 일컬어지는 세계 경제 및 기술 변화 주기를 보면 산업 혁명이 일어난 이래로 약 50년 주기로 세계 경제가 크게 변화해 왔으며, 그 커다란 변화의 주기마다 이를 주도한 특별한 기술, 산업 그리고 에너지원의 발견이나 혁신이 있었다(〈그림 2〉와 〈그림 3〉 참조) (Freeman & Soete, 1997; Shell International, 2001).[5]

1870년대를 주도했던 철강업과 무연탄은 1920년대에는 자동차와 전기 에너지로 바뀌고, 1970년대에는 항공 · 화공 산업과 석유 에너지로 바뀌었다.

그렇다면 21세기 중반에 미래 사회 경제를 주도할 새로운 기술과 산업은 무엇이고, 이들이 필요로 하는 에너지는 어디서 공급받게 될까? 본 연구의 주제는 원자력의 이용 개발 관점에서 이 질문에 대한 대답을 탐색하는 것이다.

4) 2050년대를 전망한 부분을 제외하고는 Shell International(2001) 자료를 인용하였음.
5) 〈그림 2〉 〈그림 3〉에서 대부분의 내용은 Freeman & Soete (1997: 19 & 65-70) 참조함. 그러나 주도 산업 부분은 민동필(2001: 323)의 내용을 추가하였고, 지배 에너지 부분에서 제5물결에서 전기와 수소 에너지는 저자의 의견을 반영하였음.
6) 이 부분은 주로 Klare/김태유 · 허은녕 역(2002)을 발췌 · 요약하였음.

에너지 안보[6]

콘트라티에프 주기에서 지적된 것처럼 지난 20세기 사회는 석유 시대로 대표되고 있다. 석유로 대표되는 화석 연료의 중요성을 일찍 간과한 산업화된 서구 선진국들은 석유 확보를 위해서 총력을 기울여왔다.

현대 산업 사회에서 에너지 확보를 위한 투쟁은 제 2차 세계 대전과 같은 인류 역사상 가장 큰 재난을 초래하기에 이르렀다. 인류 역사상 가장 큰 전쟁으로 기록되고 있는 이 전쟁도 석유를 중심으로 일어난 에너지 전쟁이었다.

제1차 세계 대전 후 재무장한 독일과 일본 등 제국주의 세력의 팽창이 기존 국제 질서를 심각하게 위협하기 시작하자 미국 · 영국 등 연합국은 1940년과 1941년 이들 국가들에 대하여 차례로 석유 금수 조치를 선포하게 된다. 당시 국내 석유 수요의 대부분을 미국과 동인도 제도에 의존하고 있던 일본과, 루마니아의 플로에스티 유전에서 석유를 절반 이상 도입하던 독일은 석유의 확보가 가장 시급한 국가적 사안이었다.

독일은 1939년 개전과 동시에 코카서스 유전 지대를 점령하고 1942년 말에서 1943년 초에 걸쳐 북아프리카 석유 지대를 확보하였다. 일본은 1942년 진주만을 공격함으로써 인도네시아 · 말레이시아 등의 유전 지대부터 일본 열도에 이르는 석유 송수선을 확보하려 하였다는 사실은 세계 대전이 에너지(석유)를 확보하려는 목적에서 진행되었음을 보여주고 있다.

1973년 10월 6일에 이집트 · 시리아 · 이스라엘 사이에 재발한 제4차 중동전을 계기로 아랍측이 10월 16일 석유를 무기화하기로 결정하고 중립국과 비우호 국가에 대해 원유 공급을 감소 내지 중단함으로써 아랍 주요 산유국들이 석유 감산 내지 공급 중단을 결의한다. 이것이 바로 세계 경제를 뒤흔든 제1차 석유 위기(Oil Shock)이다.

이는 곧 전 세계적인 경제 성장 둔화와 불황, 인플레이션 등을 불러일으켰다. 미국의 국민 총생산은 1973년에서 1975년 사이 6%나 감소하였으며, 실업률이 9%까지 치솟았다. 1974년 일본 경제는 전후 최초로 국민 총생산 감소를 경험했다. 또한 한국의 경우 전기료가 최고 49%, 석유류 가격이 30% 상승을 기록하는 등 세계 각국의 물가가 기록적으로 치솟아 1976년 서방 공업국들의 경제가 회복된 이후에도 인플레이션은 풀리지 않은 과제로 남아 있었다.

1979년 이란 팔레비 독재 정권을 무너뜨린 민주화 회교 혁명의 소용돌이 속에서 이란의 대 서방 석유 공급량이 크게 감소된 데 이어 산유국의 유가 인상 러시, 소비국의 비축 경쟁으로 유가는 1979년 초의 배럴당 12.70달러에서 연말엔 배가 넘는 배럴당 24~30달러 선으로 폭등하면서 제2차 석유 위기가 일어났다. 급기야 1980년 현물 시장에서는 1991년 기준으로 실질 원유가가 46~70달러로 치솟았다.

이상 두 차례에 걸친 석유 위기는 세계 경제를 파탄 직전까지 몰고 갔으며, 현대 산업 문명이 석유 문제에 얼마나 취약한지를 보여주는 일대 사건이라고 하겠다.

거대한 지하 석유 분지가 양국에 걸쳐 있고 양국 중 한 나라가 석유 생산량을 제 몫 이상으로 과도하게 뽑아낼 때, 이것은 상대국의 석유 예상 수익을 감소시켜 갈등을 초래하게 된다. 이것이 1980년 후반 이라크와 쿠웨이트의 관계를 악화시킨 원인 중의 하나였다.

바그다드는 쿠웨이트가 루마일라(Rumaila) 유전에서 할당된 공정한 몫보다 더 많은 석유를 뽑아내고 있어서 1980~88년 사이 이란과 이라크간 전쟁의 회복을 저해하고 있다고 주장했다.

1980년대 후반쯤, 미국의 정책 입안자들은 이라크의 군사력 강화를 우려하기 시작했다. 이란과의 8년 전쟁(1980~88)에서 승리하고 프랑스와 소련의 현대식 무기로 잘 무장한 이라크는 남쪽 걸프 연안의 인접 국가들, 특히 쿠웨이트와 사우

디아라비아에 대해 위협을 가하기 시작했다.

사담 후세인이 이 지역을 지배한다면 서방 국가들이 페르시아만의 석유에 접근하기가 어려울 것이므로 미 전략가들은 1989년 후반 이라크와의 전면전을 위한 청사진을 준비하기 시작했다. 그리고 그 결과가 바로 1991년의 '사막 폭풍 작전(Operation Desert Storm)' 이었다.

군사 대국 러시아가 체첸에 그렇게 집착하는 것도 페르시아만 다음으로 석유가 많이 매장된 카스피해 지역에 대한 러시아의 이해 관계 때문이다.

2000년 초에 세계의 석유 확정 매장량은 그 시절 하루 사용량이 7,300만 배럴의 비율로 볼 때, 앞으로 40년 동안 세계 소비를 충족시킬 만한 양인 1조 330억 배럴로 나타났다.

그러나 석유 소비가 매년 2%씩 증가한다면-미 에너지부가 예측한 대로-현존하는 공급량은 40년이 아니라 25년에서 30년 내에 사라질 것이다.

물론 미래의 새로운 기술의 도입은 지금 개발하기에 너무 먼 거리에 있거나 개발하기에 너무 어려운 조건 하에 있는-시베리아 북쪽과 대서양 심연의-개발되지 않은 유전들에서 추가로 석유 공급을 할 수 있을 것이다.

그렇다 하더라도 세계는 2020년, 2030년까지는 재래식 석유의 심각한 부족을 겪기 시작할 것으로 예상된다(Klare/김태유 · 허은녕 譯, 2002).

20세기 문명 발전에 대한 전기의 역할

미국 국립공학아카데미(the U. S. National Academy of Engineering)는 광대역 전력 공급망을 20세기 가장 훌륭한 공학적 성과로 선정하고, 20세기 삶의 질에 미친 영향 측면에서 그 가치를 자동차 · 방송 · 전기 통신 · 컴퓨터 및 보건 기술 발전보다도 더욱 높게 평가하였다(Yeager, 2001). 이러한 것은 다음과 같은 전기의 기술 경제적 특징에 기인한다.

전기의 역사는 가장 값이 싼 에너지원을 위한 탐색 과정이라기보다는 경제적으로 바람직한 특징을 가지는 에너지 형태를 탐색하는 지속적인 과정의 결과였다.

에너지가 이용되는 형태의 경제성은 비용 절감으로 나타나게 되며, 비용 절감이란 총에너지 소요량의 감축, 즉 경제 산출에 대한 에너지 효율성 증진으로 설명될 수 있다.

전기의 높은 에너지 밀도(energy density)를 이용한 기술은 광산업의 생산성을 크게 향상시켰으며, 전기 에너지는 열 에너지와 기계 에너지를 제어하고 조작하는 데 있어서 다른 에너지원이 필적할 수 없는 탁월한 수단을 제공하였다(Rosenberg, 1982).

전기 에너지의 장점은 크게 물질의 물리적 화학적 변형에 관련된 열의 원천으로서의 우수성과 전기 구동 기계의 도입과 관련된 에너지 형태로 문명 발전에 대한 기여로 크게 구분될 수 있다.[7]

먼저 열의 원천으로서의 전기의 장점을 논의하기 위해서 제철 산업을 예로 들어 보자. 제철 산업의 핵심 기술인 야금술은 19세기까지 석탄 연료를 주로 이용하였다. 20세기에 들어서 전기의 이용이 확산되자 야금술에 전기를 에너지로 하는 전기로가 도입되었다. 전기로의 강점은 우선 품질 향상에 있었다.

석탄 연료가 용광로에서 연소될 때는 소량이라 할지라도 불순물이 생길 수밖에 없다. 그러나 전기를 사용할 경우 이러한 문제가 전혀 발생하지 않기 때문에 전기로는 고품질의 제품 생산에 사용되었고 또한 다양한 합금을 생산하는 최적의 생산 방법으로 틈새 시장을 확보하게 되었다.

7) 전기 에너지의 장점은 대부분 Rosenberg(1982)를 참조하였음.

둘째, 열을 제어하는 능력은 전기로의 또 다른 장점이다. 1970년대 미국 내 가장 큰 특수 유리 제조업체인 코닝사는 기존의 가스 융해로를 대체하는 전기 융해로를 개발하였다. 개발된 전기 융해로의 열효율은 가스 융해로보다 3배나 뛰어났다.

가스 융해로는 수평로인데 천연가스가 투입물 위에서 연소되기 때문에 많은 열이 융해로 상부로 빠져나가서 열효율이 떨어진다. 이에 반해 전기 융해로는 양측면에 전하가 장착된 수직 실린더형인데 열이 융해로 중앙에 집중되고 투입물이 상단에서 들어오기 때문에 상부를 통해 열이 손실되는 것을 방지한다.

130개의 전기 융해로를 가동하면서 코닝사는 에너지 비용을 약 1/3로 줄이면서 2500만불을 절감하였다(Rosenberg, 1982).

셋째, 전기를 사용한 전기 집약적 공정은 총에너지 수지를 크게 개선시킬 수 있다. 가장 대표적인 예는 전기 집약적 방법을 사용해서 우라늄을 농축하고, 그 농축된 우라늄을 사용해서 전기를 다시 생산하는 과정에서 살펴 볼 수 있다.

기체확산법으로 농축 우라늄 1톤을 생산하는 데는 약 100만kWh의 전기가 소모되며, 농축 우라늄 1톤으로 원자력발전소에서는 3,200만 kWh의 전기를 생산한다 (Rosenberg, 1982).[8]

전기의 이용으로 천연 자원 소비의 효율성 증진되었던 것이다. 전력화의 결과로, 20세기 동안 에너지 강도 (energy density)는 전 세계적으로 점진적으로 감소하여서 연간 1%까지 줄어들었으며 탄소 강도 (carbon density)는 같은 기간 동안 매년 0.3%씩 줄어들었다 (Yeager, 2001).[9]

넷째, 전기는 새로운 산업을 창출한다. 여기에서는 알루미늄 산업이 대표적이다. 알루미늄은 전기에너지에 의해서 산업적으로 이용될 수 있는 제품이다. 알루미늄은 1825년에 외르스테드(H. C. Oersted)에 의해서 분리되었지만 오랫동안 그 이용이 확산되지 못했다.

1886년에 이르러서 미국의 홀(C. M. Hall)과 프랑스의 푸상 (P. L. Poussaint)이 제각기 독립적으로 전기 분해 공정 개발에 성공한 후에야 상업적으로 거래되기 시작했다.

보오크사이트 원광이 알루미늄산화물로 변화한 뒤 다시 알루미늄과 산소로 분리되는 과정에는 엄청난 양의 전기를 필요로 한다.

이처럼 전기 집약적인 알루미늄 산업은 전적으로 값이 싼 전력에 의존하였다. 따라서 1890년대에 나이아가라 폭포에 발전소가 건설되고 전력 요금이 인하되면서 알루미늄의 상업적 활용이 활발해지게 되었다 (Rosenberg, 1982).

알루미늄 산업 발전에 결정적인 요인이 된 전기는 알루미늄 활용이 증가되면서 20세기 산업 발전에 지대한 공헌을 하게 된다. 알루미늄은 전기 전도성과 열 전도성이 높고 내부식성이 뛰어나며 그리고 무게에 비해 강도가 매우 세다. 또한 알루미늄은 쉽게 다른 금속과 합금이 가능하고 더욱 강한 강도의 금속 재료를 만들 수 있다.

이러한 매력적인 산업 특성 때문에 다양한 부문에서 매우 뛰어난 산업 재료로서 쓰인다. 또한 알루미늄의 무게에 비해 강도가 센 특성, 에너지를 절약하면서 재활용이 쉬운 장점 때문에 에너지 절감의 기회를 제공한다.

가벼울수록 에너지가 크게 절약되는 자동차나 비행기와 같은 운송수단에서 알루미늄은 에너지의 사용을 크게 줄여준다. 그리고 알루미

8) Rosenberg는 Miller(1976: 10)에서 인용하였음; Miller, S. (1972) The Economics of Nuclear Power, Praeger: New York.

9) 에너지 집약도 (energy intensity)는 단위 경제 가치당 소비된 에너지로 정의되며, 탄소 집약도(carbon intensity)는 단위 에너지당 탄소량(carbon per unit of energy)으로 정의됨.

늄은 쉽게 재활용이 되며 그 과정에서 소모되는 에너지는 매우 적다.

즉 2차 알루미늄의 재활용은 최초에 보오크사이트에서 알루미늄을 생산하는 데 소모되는 에너지를 약 95퍼센트 절감하고 단지 5퍼센트를 사용해서 이루어진다.

이와 같이 알루미늄은 최초로 제품을 생산할 때는 많은 에너지, 특히 전기를 소모하지만, 알루미늄의 산업적 활용 폭과 규모를 고려할 때, 특히 에너지 절약적 재활용 용이성을 감안하면, 알루미늄의 산업적 이용의 결과를 포함한 수명 주기 전체의 관점에서 볼 때, 오히려 에너지 절약적으로 계산된다(Rosenberg, 1982).

인류 문명에 보다 근본적인 변화를 초래한 전기의 역할은 전기의 두 번째 장점인 전기 구동 기계의 에너지원으로서의 역할이다. 19세기 말엽에 나이아가라 폭포에 수력발전소가 준공되면서 전기 구동 기계의 발전이 시작되었다. 20세기에 접어들면서 증기 터빈, 중앙 집중식 발전, 전동 모터의 개발이 완성되면서 전력이 산업적으로 폭넓게 활용되었다.

1899년에 전동 모터가 미국의 제조 산업에서 소비된 총에너지(마력)의 5% 이내이었지만 불과 20년만에 절반을 넘어선 55%를 차지하였고 40년만인 1939년에는 90%에 달하였다.

이처럼 전기가 빠른 속도로 산업 동력을 압도적으로 지배할 수 있었던 것은 증기 기관에 의한 에너지에 비하여 다음과 같은 장점 때문이었다(Rosenberg, 1982).

첫째, 공급 규모의 유연성, 즉 조절 가능성이다.

전기는 어떤 크기로도 담아질 수 있다. 반면에 증기 엔진은 어떤 규모 이하에서는 상당히 비효율적이다. 전기모터는 산업 수요의 특성에 맞추어 정확한 용량으로 제조될 수 있었다.

이처럼 분할 가능한 동력의 사용은 많은 에너지와 자본을 절감할 수 있게 하였다. 특히 소규모 또는 단속적인 동력이 요구될 때, 대규모 증기 엔진으로 필요 이상의 과도한 동력을 생산할 필요가 없기 때문이었다.

전기는 특정 수요에 맞추어 동력의 공급 규모를 미세한 수준까지 제어할 수 있게 하였다. 따라서 분산된 수요에 대한 경제적 경쟁력이 뛰어나다.

둘째, 사용의 편리성이다.

산업적 관점에서 전기의 편리성은 생산 방식의 유연성을 증진시켰다. 전기 모터는 작업장의 필요 공간을 줄였고 작업장의 조직과 구획을 변경시킬 수 있는 여유를 증가시켰다. 전기의 덕택으로 조립 라인 방식과 대량 생산 방식이 도입되면서 생산성이 크게 향상되었다.

전기가 공장에 들어오면서 공장의 작업 배치와 설계가 완전히 재조직되었다. 증기 기관의 벨트와 축이 닿지 않는 곳을 포함해서 기계와 도구들은 어느 곳에나 설치될 수 있었기 때문이다.[10]

이러한 전기의 유연성과 편리성은 궁극적으로 특히 전기를 사용하는 산업에서 광범위한 노동 절약적 기술 혁신을 촉진함으로써, 산업과 비즈니스의 경제적 효율성과 노동생산성을 증가시키고, 나아가 부의 창출과 경제 발전에 기여하였다(Rosenberg, 1982; Yeager, 2001).

재료/물질을 취급하는 새로운 방법, 운반이 편리하거나 휴대용의 새로운 도구와 장비, 품질 관리 혁신, 자동 윤활 시스템 또는 자동 세척 장치, 새로운 측정 · 탐지 · 분석 기술 등이 이에 해당된다. 특히 새로운 자동화 또는 연속 공정 생산 기술이 광범위하게 보급되면서 소규모 일괄 처리 기술을 대체하였다(Rosenberg, 1982).

10) Rosenberg는 Boff (1967: 513)를 인용함; Boff, R. B. (1967) 'The Introduction of Electric Power in American Manufacturing,' Economic History Review.

셋째, 전기 사용의 환경 친화성이다.

전기는 도시 환경의 청결에 기여하였다 (Yeager, 2001). 최근에는 환경에 대한 관심이 증가하면서 오염 경감 장비 또는 청정 전동 기술이 상대적으로 공해를 유발하고 불결하며 위생적이지 못한 비전기 기술을 대체하고 있다.

에어컨은 민감한 장비와 계측 또는 실험 조건은 정확한 온도 제어를 요구하는 특정 산업에서는 매우 중요하게 사용된다. 또한 그것은 작업장의 쾌적함을 향상시킴으로써 생산성을 증가시키고자 하는 많은 산업에서 사용되고 있다(Rosen berg, 1982).

넷째, 20세기에 전기가 인류 문명에 미친 가장 중요한 영향으로서, 전기 신호의 전달과 관련된 산업의 창출이다. 빠른 속도와 장거리 통신의 모든 형태-전신 · 전화 · 라디오 · 인터넷 등-는 전기 신호의 전달로 이루어진다 (Rosenberg, 1982).

이처럼 현대의 산업 문명에서 많은 기술들이 전기에 의존하고 있고 이에 대한 현실적인 대안의 아직까지 도입되고 있지 않다. 이러한 이유로 20세기 동안 전기는 지속적으로 사용이 증대하여 OECD 국가에서는 거의 에너지 소비의 40%를 차지하게 되었다 (Yeager, 2001).

21세기 디지털 경제에서의 전기의 역할[11)]

미국의 전력연구소 (Electric Power Research Institute, EPRI)는 미래 사회를 지식 기반 디지털 경제 사회로 전망하고 이에 대한 전기 기반 혁신의 환경 (역할과 방향)을 4가지로 정리하였다 (Yeager, 2001).

첫째는 전기 기반 혁신의 지속적 필요성에 관한 것으로, 전기 기반 혁신은 지속 가능한 세계 발전에 중심적인 역할을 할 것이다.

전기 기반 기술 혁신은 전기 제품 그 자체와 생산 및 저장 유통 과정에서의 혁신과 전기를 이용한 제품 또는 과정에서의 혁신을 포함한다.

제조업 · 농업 · 수송 및 서비스업을 위한 전기 기반의 전자 기술 혁신이 장려되었고 정보 처리와 인공지능 기술의 기하 급수적인 발전과 연계해서 전기 기반 혁신은 이들 산업의 생산성을 지난 30년간 증가된 것보다 두 배 이상 생산성 증가율을 높였다.

둘째는 전 세계적으로 전력 공급의 균등화 관점이다.

전기 기반 혁신은 세계경제의 남북 격차를 좁히는 데 필요할 것으로 예측되었다. 세계 인구 증가와 이를 부양하기 위한 전기의 공급은 생산성 증가 및 삶의 질 향상에 대한 수요를 충족시키면서 전 지구적 삶의 질의 관리에 필요하다.

EPRI는 2050년경에 세계 인구를 90억 내지 100억으로 추정하고 이들의 삶을 영위하기 위해서는 매년 2%의 생산성 향상이 필요하다고 전망하였다.

2050년까지 적어도 매년 1억명에게 전기를 공급해야 하며 이를 위해서는 전 세계적으로 매년 일인당 1000kWh의 전력을 추가로 공급해야 한다고 전망하였다.

셋째는 전기 인프라 개선은 급속히 발전하는 디지털 사회 지원에 핵심적인 역할을 할 것이다.

디지털화가 가속화되면서 디지털 기술과 관련 장비의 사용으로 전기 수요는 크게 증대되고 있다. 2001년에 미국에서 디지털 기술과 장비 사용은 위한 전력 소비는 미국 전기 에너지 소비의 10~13%에 달하고 있다.

향후 20년 이내에 현재 미국에서 생산하는 전기의 30~50%가 다음과 같은 용도로 미래 디지털 사회에 소요될 것으로 전망된다.

11) 이 부분은 EPRI의 소장겸 CEO인 Hurt E. Yeager가 2001년 10월 21-25일에 아르헨티나의 부에노스아이레스에서 개최된 세계에너지협의회 (World Energy Council) 제 18차 회의에서 발표한 자료를 많이 이용하였음 (Yeager, 2001).

전기의 주요 용도로서는 컴퓨터 · 인터넷 · 선진 자동화 · 지능형 주택(smart house) · 의료용 간호 장비(critical care equipment) · 광섬유 통신 (*fiber optic communications*) · 디지털 가전기기, e-commerce 기업, 무선 전화 시스템, 전기 통신 서비스와 관련된 자동화 공정 및 응용 기기 등이 꼽히고 있다. 또한 전기 수송 수단이 도입되면, 전기 수요는 더욱 폭발적으로 증가할 전망이다.

마지막으로 미래 사회는 전기 기반 혁신을 중심으로 청정 에너지 포트폴리오를 개발하여 경제 성장과 지구 환경 보호를 동시에 추구하게 된다.

EPRI는 화석 연료 경제에서 청정 수소 경제로 이동할 때까지 환경 친화적인 전기 기반의 기술 혁신을 통해서 '2050년을 향한 지속 가능한 미래 발전을 위한 2퍼센트 해법 (2 % solution for sustainable future for the next half century)' 을 이룩할 때 지구적인 인구-가난-환경 오염의 트릴레마 (3P-trilemma)가 해결될 수 있다고 주장하였다.

즉 전기 기반 기술 혁신을 통해서 전지구적으로 경제 생산성, 에너지 효율성, 오염물 배출 감축, 농업 수확률, 담수 이용률을 적어도 2050년까지 각각 매년 2% 이상 증진시킬 때, 전 지구적인 딜레마가 해결될 수 있다고 주장하고 전기 산업 부문의 비전을 다음과 같이 설정하였다(Yeager, 2001).

〈표 1〉 2050년의 전력 산업 비전(Yeager, 2001)

■ 2050년의 세계 전기 에너지 이용 개발 환경
1) 일인당 전력 소비량 증가 ● 세계 평균 연간 6000kWh (최빈국 1000 kWh/년) - 이를 위해 설비 용량 10,000 GWe 필요 (70% 이용률) 2) 환경 친화적 포트폴리오 구축 ● 발전시 탄소 배출 50% 제거 및 SO_2, NO_x 및 독성 물질 배출 거의 억제 - 1.8 GT의 탄소 배출 저감
■ 2050년의 세계 전력 에너지 구성
1) 10,000 GWe 중 이산화탄소 무방출 전원 50 % ● 1.8 GT의 탄소 배출 저감: 원자력 30%; 수력 8%; 재생에너지 12%로 구성 - 이를 위해 이산화탄소 방출이 거의 없는 원자력과 재생 에너지로 생산 목표 할 것을 제시함 - 특히 원자력은 가장 많은 전력을 공급하는 에너지원으로서 3000GWe까지 요구됨 2) 고효율 화석 발전 50%: 가스 (30%) 및 석탄 발전 (20%) - 에너지 전환 효율 70% 이상, CO_2 배출 저감 장치 부착
■ 2050년의 평균 전력 판매가: $50 US/MWh ($0.05 US/kWh)
● 발전소별 총자본 비용 목표 (경제적 경쟁 구도) - 원자력 $ 700 US/kW - 비수력 재생 에너지 $ 700 US/kW - 가스 $ 800 US/kW - 석탄 $ 1000 US/kW

종합적으로 2050년을 향한 지구 차원의 미래 전력 시스템 요건으로 EPRI는 ① 생산과 소비자 간의 거리 단축, ② 발전 기술의 유연성,[12] ③ 발전 비용을 낮출 것, ④ 보다 환경 친화적일 것 등을 강조하였으며 이러한 요건을 만족시키려면 미래 전력 시스템은 소형 분산형 발전 시스템이 보다 유망한 것으로 전망하였다.[13]

이를 바탕으로 구체적인 전기 기술 개발 목표는 ① 에너지 변환 효율 획기적 증진, ② 전력 시스템 운

12) 디젤 엔진을 사용한 분산형 발전소를 미래에는 가스 연소형 마이크로 터빈, 가스 또는 수소 연료 전지 또는 태양광 전지 또는 풍력 발전소로 변형 가능할 수 있어야 함을 의미함 (Yeager, 2001: 15).

13) EPRI는 2050년까지 고품질 전력 시스템은 신뢰도가 최소 99.999 % (Five-Nines) 이상이 되어야 하며 유동적 분산형 발전 및 저장 시스템이 총발전 시스템의 50% 정도로 확충될 것으로 전망하였음 (Yeager, 2001).

영 비용 획기적 절감, ③ 환경 영향 대폭 축소를 설정하였다. EPRI가 설정한 2050년의 세계 차원의 전력산업 부문 비전은 〈표 1〉에 요약하였다 (Yeager, 2001).

결 론

결론적으로, 전기 소비는 21세기에 지속적으로 증가할 전망이다. 1975년까지 전기는 선진국에서 에너지 소비의 25%를 차지하였는데 2000년까지 37%로 증대하였고 2025년까지 최종 에너지 소비의 50%를 넘어설 것으로 전망되고 있다.

특히 21세기에는 디지털 경제의 중추 동력(prime mover)으로서 전기의 역할은 더욱 중요해질 전망이다. 과거의 전통 경제에서는 자원 소비에 따른 경제적 가치가 점진적으로 성장하지만, 디지털 경제에서는 전기를 중추 동력으로 하는 네트워크를 통해서 경제 활동의 가치가 기하급수적으로 성장한다 (Yeager, 2001).

통신 · 금융 · 무역 및 기술 발전에 대한 전지구적인 실시간 네트워을 가능하게 하면서, 전기 기반 혁신(electricity-based innovation)이 지식 기반 디지털 경제(know ledge-based digital economy)의 중추 동력이 되고 있다.

디지털 사회에서 전력화는 에너지와 정보를 가진 지능 전자를 이용해서 지속적으로 생산성과 생산 자원의 효율성을 높여준다.

따라서 전 세계 국가들은 전기 기반 혁신을 통해서 이룩되고 있는 네트워을 국가의 경제 성장을 가속화하고 국민의 삶의 질을 높이는 열쇠로 인정하고 있다(Yeager, 2001).

레이저에서 마이크로프로세서까지 전기 기반 혁신은 21세기에 산업의 생산성과 효율성을 지속적으로 증진시키고 천연 자원 소비와 환경 영향으로부터 경제 성장을 분리하는 개념인 지구의 지속 가능성 (global sustainability) 증진에 중심적 역할을 할 전망이다.

〈참 고 문 헌〉

민동필 (2001) '핵에너지와 미래의 에너지,' 서울대학교 자연과학대학 교수 31인 지음, 21세기와 자연과학, 서울대 교수들의 과학 이야기, 15판, 사계절: 서울, p 322-334.

박정기 · 최기련 (1997), 21세기 동북아 에너지, 동북아공동체연구소.

신의순 (2001), 한국경제와 에너지정책, 도서출판따님: 서울.

오원철 (1997), 에너지정책과 중동진출, 한국형 경제건설 6, 한국형경제정책연구소, 기아경제연구소:서울.

황인성 (2002), 유가급등과 경제적 파급효과, Issue Paper, 삼성경제연구소.

Huntington, S. P./이희재譯 (2002), 문명의 충돌 (The Clash of Civilizations), 김영사.

International Nuclear Societies Council (INSC)/이창건譯 (1996), 향후 50년간의 원자력 전망과 추진전략 (A Vision for the Second Fifity Years of Nuclear Energy: Vision and Strategies), 한국원자력학회-한국원자력연구소.

Klare, Michael/김태유?허은녕譯 (2002), 자원의 지배, 세종연구원.

Energy Future Task Force (EFTF) (2000), Fuelling the Future: A consultation document, UK.

Freeman, C. and Soete, L. (1997), The Economics of Industrial Innovation, London: Pinter.

Rosenberg, N. (1982) 'The Effects of Energy Supply Characteristics on Technology and Economic Growth,' Chap. 4 in N. Rosenberg, Inside the Black Box: Technology and Economics, Cambridge University Press, pp 81 - 103.

Shell International (2001), Energy Needs Choices and Possibilities : Scenarios to 2050, Global Business Environment, London.