

지구환경 보전과 미래의 에너지 전망

로날드 데이비드슨 박사

이 글은 한국원자력문화재단에서 특별초청한 미국 프린스턴대학 플라즈마물리연구소의 로날드 데이비드슨 소장의 지난해 12월 강연 내용을 게재한 것이다.

향후 세계 에너지수요는 인구증가율과 경제 성장률 그리고 에너지 절약이 얼마나 성공적으로 추진되는가에 따라서 결정될 것이다. 또 비교적 최근에 산업화에 성공한 국가들보다는 급속한 인구증가와 경제 개발이 동시에 이루어지고 있는 개발도상국들이 앞으로 수십년동안의 에너지 수요 증가율의 대부분을 차지할 것이다.

보수적인 예측에 따르면, 세계인구는 2040년까지 현재의 약 두배로 증가하며, 에너지 수요는 같은 기간동안 약 3배에 이를 것으로 관측되고 있다. 현재 전세계 에너지의 75% 정도가 석탄, 석유 천연가스 등 화석연료에 의해서 공급되고 있다. 이러한 화석연료가 지구 차원의 환경에 미치는 영향은 매우 심각한 것으로서, 전세계 에너지 수요가 계속 증가한다면 이에 대한 규제책이 반드시 도입되어야 한다. 화석연료가 환경에 미치는 악영향은 주로 온실효과가스의 발생으로 비롯되며 이는 이산

화탄소, 황산화물, 질소산화물 등과 같은 특수한 오염물질이 대기중에 유입됨으로써 발생한다. 또 카드뮴의 대기유입도 화석연료 사용에 따라 발생하는 바람직하지 않은 효과이다.

오늘날 에너지 문제에 대한 전반적인 검토는 전세계적으로 이루어지고 있으며, 화석연료 사용량 축소와 핵분열 에너지, 지열 그리고 핵융합 에너지에 이르기까지 안전성과 환경친화성을 갖춘 에너지로의 전환이 이루어져야만 하고, 또 현재 사용되고 있는 에너지의 효율성을 증대시키려는 노력과 이의 기술적 개선을 위한 노력도 병행되어야 한다.

특히, 현재까지 실용화되어 있는 대규모 대체에너지원인 원자력발전은 환경오염물질을 배출하지 않는 깨끗한 에너지원으로서 심각해져가는 지구환경훼손 등을 고려할 때 그 이용도를 확대해 나가야할 에너지원인 것이다.

성공적인 원자력발전계획을 추진하고 있는 한국은 급속한 경제개발을 겪고 있는 다른 국



가들이 본받아야 할 모델로서 가동중인 11기의 원자력발전소는 뛰어난 안전성 기록을 보유하고 있을 뿐만 아니라 총발전량의 35% 이상을 공급함으로써 선진국중에서도 우수한 실적을 나타내고 있다.

미래에너지로 각광받고 있는 핵융합에너지 연구의 본산인 프린스턴대학교 부설 플라즈마 물리연구소는 1951년 개원한 이래 지난 1993년 12월 인류역사상 처음으로 핵융합장치에서 3천 3백만와트의 에너지를 얻는데 성공하였다. 앞으로 인류의 에너지문제를 해결하기 위하여는 지구에 「인공태양」을 만드는 핵융합기술의 확보가 중요하며 핵융합의 원료인 중수소 및 삼중수소가 바닷물 속에 무진장으로 있고 이 반응에 의해 생기는 물질은 거의 공해가 없다는 장점을 갖고 있다.

현재, 실험적인 규모로 핵융합에 성공한 나라는 미국을 비롯하여 유럽연합과 일본 등인데 이들 국가는 미국, 러시아와 함께 국제열핵융합실험로(ITER)를 만들어 2020년경에 핵융합 에너지의 실용화를 목표로 원자로 설계를 하고 있다. 따라서 21세기 중반이전에 인류는 핵융합에너지의 상용화에 성공할 것으로 기대된다.

저는 프린스턴대학 천체물리학과 교수이며 프린스턴 플라즈마물리연구소의 소장으로서 있는 Ronald Davidson입니다. 이 연구소는 미정부의 유일한 핵융합연구소입니다.

원자력문화재단에서 이 특별한 강연회에 저를 초청해 주신 것을 대단히 고맙고, 영광스럽게 생각합니다. 한국이 원자력, 핵융합에너지와 같은 최첨단 에너지기술에 장기적 투자를 하는 것을 진심으로 경하하는 바입니다. 특히 원자력과 핵융합에너지 기술은 공급, 안전, 환경 측

면에서 대단히 바람직합니다.

1. 21세기 에너지 전망

세계의 에너지필요성을 고찰하기 전에, 저는 21세기 중반인 2040년경의 에너지수요를 간단히 기술하겠습니다.

미래의 지구 에너지수요는 인구증가, 경제성장과 지구 각 부분에서의 에너지 보존노력에 의해 결정될 것입니다. 저개발국의 고인구증가와 빠른 경제성장은 다음 수십년동안 지구 에너지 수요증가의 주요 원인이 될 것입니다. 장기 안목으로 볼 때 세계가 필요로 하는 에너지는 다음 세기 중반중 세배가 될 것으로 예상됩니다.

현 시점에서 우리는 에너지수요를 대부분 화석연료에 의존하고 있습니다. 현 추세대로 화석에너지를 사용하면 환경오염으로 인하여 우리자손과 인류미래에 엄청난 피해를 끼칩니다.

1.1 세계 에너지공급

현 상태로 에너지를 사용할 때, 현재 알려진 세계 에너지매장량은 다음과 같습니다.

에너지원	매 장 량
석 유	60년간 공급할 수 있으며 Tar나 혈암유와 같은 특수 유기물에 함유된 것을 고려하면 몇 십년 내지 몇 세기를 공급할 수 있음
천연가스	100년간
석 탄	200년 이상
우 라 늬	200년간의 원자로 운전



태양과 재활용가능 에너지	지속적인 공급은 가능하나 세계의 에너지수요를 충족할 수 없음
핵 융 합	중수소와 삼중수소의 융합 경우, 중수소는 물에서 얻을 수 있고 삼중수소는 리튬을 중성자로 분해하여 만들어 현대 세계 에너지 수요로 100만년을 공급할 수 있음. 중수소, 중수소융합과 같은 첨단 연료는 100억년동안 사용 가능

미 국	1인당 24시간 소비량이 10kW
유 럽	4천 watt(4kW)
일 본	4천 watt (4kW)
한 국	2천 watt(2kW)
저 개발국	수백 watt
세계 평균	2천 5백 watt(2.5kW)

평균 에너지소비량을 1인당 2,500Watt로 잡을 때, 50억을 상회하는 세계인구가 사용하는 총 에너지의 양은 130억kW 정도가 됩니다.

1.2 세계 에너지사용량

1994년 통계에 의하면 세계 에너지사용량은 다음과 같이 그 형태에 따라 분류됩니다.

석유	석탄	천연 가스	원자력	수력	기타
34%	22%	19%	6%	6%	12%

여기에서 보시는 바와 같이 화석연료가 현 세계 에너지사용량의 75%를 차지합니다. 화석연료의 제한된 공급과 환경에 미치는 영향을 생각할 때 우리 미래의 에너지상은 대단히 불투명합니다.

에너지 연구에 선도적 역할을 하고 있는 하버드 대학의 John Holdren교수는 이러한 상황을 마치 '에너지 기차'와 '환경 기차'가 정면 충돌하고 있는 것과 같다고 표현했습니다.

1994년 통계에 의하여 구역별로 대체적인 에너지사용량을 보기로 합니다.

고도로 산업화된 국가들의 평균 에너지사용량은 세계 평균치보다 상당히 많습니다. 광범위한 수송능력이 요구되는 미국의 경우, 유럽과 일본의 수준으로 사용량을 내리기 위해서는 에너지 절약을 지속적으로 강조해야 합니다.

1.3 미래의 세계 에너지수요

미래로 넘어가, 예를 들어 2040년경을 생각해 보면 아무리 적게 잡아도 세계인구는 현재 50억의 두배인 100억은 될 것으로 보입니다.

여기에 평균적인 생활수준의 향상을 감안해서 에너지 소비율을 현재의 세계평균치보다 1kW 크고 일본의 현재 사용량보다 0.5kW 작은 1인당 3.5kW로 가정한다면, 2040년의 세계의 에너지 총 사용량은 대략 350억kW가 될 것입니다.

이는 대략 현재의 세 배에 해당하는 양입니다. 이와같은 증가는 대부분이 개발도상국들의 사용량 증가에 따른 것입니다.

1.4 화석연료가 환경에 미치는 영향

세계 전체로 볼 때, 화석연료가 환경에 미치는 영향은 매우 심각합니다. 특히 지구온난화를 유발하는 이산화탄소, 아황산가스, 이산화질소 등의 기체들이 치명적이라고 할 수 있습니다. 해양을 오염시키는 탄수화물과 공기중으로 스며드는 질산화물, 메탄가스, 카드뮴도 바람직하지 못한 효과라고 할 수 있습니다.



예를 들어 석탄을 연료로 하는 100만kW급의 발전소를 보기로 합시다. 이 발전소는 매일 8백만kg의 석탄을 소모합니다. 이로 인하여 매일 생성되는 공해물질에는 다음과 같은 것들이 있습니다.

이산화탄소	아황산가스	이산화질소
2,700만kg	50만kg	7만kg

이에 비해 같은 급의 원자력발전소는 매일 70kg의 산화우라늄을 소모해서 대략 70kg의 핵폐기물을 생성합니다. 약간의 주의만 기울이면 환경에 미치는 영향없이 안전하게 저장할 수 있는 양입니다.

앞서 언급했듯이 전 세계적으로 볼 때 현재의 에너지 사용량의 75%는 화석연료에서 비롯됩니다. 사실 19세기의 산업혁명 이래로 주된 에너지의 원천이 바로 화석연료였습니다.

화석연료사용에 따른 영향은 다음과 같습니다.

- 지구상에서 아황산가스의 방출은 1860년 이래 30배 증가하였으며
- 메탄 농도는 1860년 이래 2배정도 증가하였고
- 이산화질소 농도는 1860년 이래 7%이상 증가하였으며
- 이산화탄소의 농도는 같은 기간 동안에 20% 증가하였습니다.

한편, 1860년 이래, 세계 에너지 소비량은 11배 증가하였으며, 더욱이 1950년 이후에 대부분의 증가가 이루어졌습니다. 온실효과가스가 기후에 미치는 효과는 어떤 것이 있을까?

- 이산화탄소, 메탄, 수증기 및 온실효과 가스 때문에 지구대기권의 에너지 방출이 심하게 영향을 받기 때문에 이로 인해서 지구의 표면이 더욱 더워지고 있습니다.

- 오늘날 대기권의 이산화탄소 농도는 산업혁명 이전보다 28% 높으며, 메탄의 농도는 100%가 높아졌습니다.
- 오늘날의 이와 같은 농도는 과거 16만년 동안의 어느때보다도 더 높습니다.
- 이산화탄소의 증가가 대기권내에서 에너지 방출에 미치는 영향은 전체 온실효과의 50% 내지 70%가 됩니다.
- 여러 부문에서 지구 온난화 현상이 벌어지고 있습니다.
- 수증기 농도는 다른 온실효과 때문에 증가하고 있습니다. 이러한 효과는 지구온난화 편상을 가속시킵니다.
- 평균 지구지상온도는 과거 100년동안 약 0.5°C 증가하였으며, 지구의 해수면은 같은 기간동안에 10에서 20cm 높아졌습니다.
- 과거 140년동안 아홉해가 더웠습니다. 1990, 1991, 1988, 1987, 1981, 1983, 1989, 1980, 1993.
- 대양의 큰 열용량 때문에 우리는 더욱더 무더운 해를 맞이하게 될 것입니다.
- 이산화탄소의 증가는 대부분 화석연료 사용에서 기인됩니다.
- 지금과 같은 추세로 온실효과 가스를 방출하면 매 10년마다 21세기 온도가 0.2°C 내지 0.5°C 증가할 것이고, 2090년 경에는 지구온도가 2°C내지 5°C가 증가될 것입니다.
- 2090년의 지구는 지난 16만년동안 가장 무더우며 바다 수위가 현재에 비하여 30내지 100cm 높을 것입니다.
- 지구온난화현상은 기후패턴을 바꿀 것입니다. 폭풍우, 강수량, 지표의 수분함량, 흑독히춤고 무더운 현상 등이 생깁니다.



- 또한 기후변화 때문에 농업, 임업 그리고 어업이 더욱 심각하게 타격을 받습니다.
- 기후 변화에 적응하기는 어려워질 뿐만 아니라, 가난한 나라는 부자 나라에 비하여 더욱 어렵게 됩니다. 왜냐하면, 가난한 나라의 농업과 임업 발전 임계조건이 불안하고 자본과 기술에 제한이 있기 때문입니다.

2040년 경에는 세계 에너지소비량이 거의 3배 가량 증가할 것으로 예상되며, 화석에너지 사용량을 최소로 축소해야 한다고 저는 생각합니다.

1.5 미래 세계 에너지정책에 대한 제안

- 다음 몇가지 정책을 제안합니다.
- 미국과 같은 선진국의 에너지 사용의 효율을 높인다. 특히 온냉방장치, 수송, 전기모터 등의 효율을 높인다. 또한 개발도상국의 에너지효율도 증가시킨다.
 - 현존하는 에너지 선택을 현명하게 하여 온실효과가스 방출을 막고 분진을 최소화한다. 또한 원자력에너지의 안전성과 핵확산을 막도록 노력한다.
 - 첨단에너지 생산방식의 도입을 가속화 한다. 첨단에너지로는 핵분열, 핵융합, 지열 등이 있다.
 - 분진이나 온실효과가스 방출을 막기 위하여 국제적인 기술교육, 공동연수 등을 수행한다.
 - 교육, 건강상담, 가족계획 등을 통하여 세계 인구를 100억의 안정선으로 유지한다. 우리가 미래를 전망할 때, 각각의 에너지 선택에는 고유의 문제점이 있습니다.

석유와 가스	제한된 자원
석탄과 석유 웨일	환경오염의 주범
바이오매스(Biomass)	제한된 국토면적
수력과 풍력	제한된 지역
원자력	고도의 기술
전기광전판	너무 비쌌
핵융합 에너지	고도의 창조력

• 미래를 위한 중요기술은 다음과 같이 요약할 수 있습니다.

- 분명히 중요한 것	• 진보된 화석연료 • 바이오매스
- 중요할 수 있는 것	• 풍 력 • 태양에너지 • 연료 Cell
- 중요하게 취급되어야 할 것	• 진보된 원자로 • 핵 융 합 • 태양광전판 • 뜨거운 바위를 이용한 지열

제 견해로는 핵분열이라든지 궁극적으로 핵융합과 같은 고도의 기술이 미래의 에너지 공급에서 한층 더 중요한 역할을 해야 한다고 봅니다. 이 분야에 대한 한국의 정책과 활동은 매우 인상적입니다.

2. 핵분열에 대한 전망

이제 증대되고 있는 세계의 에너지수요와, 환경에 미치는 영향을 고려해 화석연료의 사용을 최소화해야 한다는 면에서 핵분열에너지의 역할에 대해 생각해 보기로 합시다.

2.1 세계 에너지 사용량

세계의 에너지 사용량과 인구 증가에 대한 다음과 같은 사실을 주지해 주시기 바랍니다



(1990년 통계).

- UN의 보고에 따르면 현재 53억인 세계 인구는 2025년까지 85억으로 증가할 것으로 예측됩니다.
- 이 증가분 32억중 30억은 개발도상국가의 증가분입니다. 참고로 현재에도 이미 세계인구의 75%는 개발도상국가에 있습니다.
- 1980년대 세계의 에너지 수요는 거의 20%까지 늘어났습니다. 선진국에서의 증가량은 9%에 불과했지만, 저개발국의 증가량은 거의 60%에 달했습니다.
- 세계인구의 16%밖에 안되는 선진국의 에너지 사용량은 세계 전체의 52%에 달합니다. 세계의 전력생산을 에너지원(源)에 따라 분류해보면 다음과 같습니다.

(%)

원자력	석탄	석유	천연가스	수력
17	42	10	12	19

(자료 : Uranium Institute, 1990)

석탄·석유·천연가스의 전력생산은 전체의 64%에 해당합니다.

2.1. 원자력발전에 의한 세계의 전력생산

원자력에너지 의존도를 국가별로 비교해 봅시다.

(1993년 통계, %)

프랑	스	77
한	국	40 (1993), 36(1995)
일	본	31
미	국	21
중	국	0.3

전력생산의 상당량을 원자력에너지에 의존해야 한다는 강한 의지를 보여온 국가들이 프랑스와 한국, 스웨덴, 일본, 벨기에, 리투아니아, 헝가리 등입니다.

저는 원자력에너지에 대한 미래지향적 견해를 갖고 이 분야에 적극적 활동을 해온 한국정부와 기업에 찬사를 보냅니다.

이제 온실효과와 상당량의 전력공급을 원자력에너지로 전환시킨 프랑스의 경험을 보기로 합시다.

- 온실효과로 유발되는 지구온난화의 대략 절반정도가 이산화탄소에 의한 것입니다.
- 화석연료를 태우면서 방출되는 이산화탄소는 연간 200억톤 정도입니다. 이중 1/3이 전력생산을 위해 사용된 화석연료입니다.
- 현재의 원자력발전소들이 만약 석탄을 사용한다면 이산화탄소의 방출량에는 20억톤이 추가됩니다. 전력생산에 의한 방출량을 28% 증가시키는 양입니다.
- 프랑스는 1980년부터 1987년까지 전력생산으로부터 방출되는 이산화탄소의 양을 80%나 줄였습니다. 물론 원자로발전용량을 늘였던 것에 기인합니다. 또한 독일의 원자력발전은 1961년 이래로 총 16억톤에 달하는 이산화탄소의 방출을 예방할 수 있었습니다.

2.3 한국의 원자력발전 능력

이제 한국의 원자력발전 능력과 계획에 대해 봅시다. 이 자료는 한국원자력연구소와 국제원자력기구(IAEA)에서 얻은 것입니다.

우선 한국에서 사용하고 있는 원자로는 가압경수로입니다. 안전성이 매우 탁월한 것으로



알려져 있으며 전력생산능력 또한 우수합니다. 1996년 현재 모두 11기의 원자로가 가동중에 있고 5기의 원자로를 현재 건설중이며, 4기가 계획중인 것으로 알고 있습니다. 현재의 발전 용량은 960만kW 정도입니다.

원자력발전시설을 구축하는 과정에서의 국제 사회 특히 미국과 캐나다, 프랑스와의 상호협력관계 또한 매우 인상적입니다.

과학기술의 우선순위를 정하는 과정에서 한국이 보인 범국가적 계획과 외국과의 상호협력 태도는 빠르게 산업화되어가고 있는 여타국가들의 귀감이 되어 마땅합니다.

현재 가동중에 있는 4기의 고리 가압경수형 원자로를 웨스팅하우스(미국) 설계를 기본으로 하였습니다. 4기의 월성 가압경수형원자로를 1기는 가동중이며 현재 3기는 건설중에 있습니다. 이 원자로를 캐나다 회사의 원자력 설계를 기초로 하였습니다.

모두 6기의 영광 가압경수로(4기는 가동중이며, 2기는 건설중)가 있습니다. 그들중 2기는 웨스팅하우스(미국) 설계를 따랐습니다. 나머지 4기는 한중-한국원자력연구소 설계-을 따랐으며, 이는 미국과의 협력사업으로 개발되었습니다.

모두 4기의 울진 가압형경수로가 있습니다 (2기는 가동중이며, 나머지 2기는 현재 건설중). 가동중에 있는 2기의 원자로를 프랑스 설계를 기초로 하였습니다. 현재 건설중에 있는 2기의 원자로를 미국과의 협력사업으로 개발된 한중-한국원자력연구소 설계-을 따랐습니다.

매우 중요한 것은 보다 좋은 안전성 확보를 위하여 위험분석을 하고 있으며, 이를 통해 최선의 설계를 지향하고 있다는 것입니다.

저는 강한 국가적 필요에 따라서, 한국에서

의 원자력발전소에 의한 발전용량은 계속적으로 증가할 수 있다고 확신합니다. 또한 협력약정서를 체결하여 한국은 여러 아시아 개발도상국에서 전력생산을 위한 원자력 발전소의 선택에 중요한 역할을 담당할 수 있습니다. 모든 지역에서의 에너지 사용량은 계속적으로 크게 증가할 것이며 한국 및 다른 나라에게 미치는 경제이익 및 환경이익을 무시할 수 없습니다.

한편 핵분열에 의한 에너지 생산이 미래 세계 에너지 필요량에 부응하여 중요하고 더 많은 역할을 수행하겠지만, 현재의 에너지소비율로 볼 때 몇세기안에 연료공급(이산화 우라늄) 문제에 부딪히게 됩니다. 그러므로 다른 형태의 첨단 에너지기술을 개발하는 것이 중요합니다.

3. 핵융합 전망

핵융합은 가벼운 핵자들이 결합할 때 거대한 양의 에너지를 방출하는 과정을 말합니다. 핵융합은 태양과 별의 에너지를 공급합니다.

핵을 결합시키기 위해서는 매우 높은 온도를 가열시켜야 합니다 - 원자핵들을 강제적으로 충돌시키기 위해서는 1억도 이상이 요구됩니다. 이와 같은 고온에서는 원자들은 존재할 수 없으며, 음전하를 가진 전자와 양전하의 핵자로 구성된 기체를 형성합니다. 이와 같은 물질의 상태를 플라즈마라고 부릅니다. 관측가능한 우주에서 물질의 99%이상이 플라즈마입니다. ◀