

# 세계 원자력발전 시장의 최근 동향 및 전망

글 서균렬 \ 서울대학교 원자핵공학과 교수 겸 필로소피아 대표이사 \ 전화 02-880-8324 \ E-mail kysuh@snu.ac.kr



이 글은 2011년 일본 후쿠시마 제1원자력발전소 사고 이후 세계 원자력발전 시장과 현안이 되고 있는 원자력발전 기술 동향, 그리고 건설업계의 경쟁력 확보 방안 및 해외시장에서의 전략 등에 관해 저자의 입장에서 풀이한 것이다. 2011년 3월 11일 발생한 일본 지진으로 후쿠시마 원전 사고가 일어나 그에 따른 국내외 원자력 시장은 무엇보다도 안전을 논해야 하고 추구해야 하는 시점에 와있으며 속수무책으로 자연재해로 인해 원전에서 일어날 수 있는 사고를 막기 위해 현재 일어나고 있는 원전 선진국들에서의 기술 개발 노력을 소개하고 그럼에도 왜 원자력발전이 필요한지, 다른 대안은 없는 것인지에 대해서도 언급한다.

## 1. 시작하며

2011년 3월, 한창 아랍에미리트 원전 수주로 고조되고 있는 국내 원자력발전 시장과 침체를 벗어나 새로운 중흥 시대를 맞고 있는 세계 원자력 시장에 일침을 가하는 충격적인 사건이 발생했다. 3월 11일, 14시 45분경, 일본 도호쿠 지방 부근 해저(동경 북동쪽 370 km 거리)에서 규모 9.0의 지진이 발생하고, 10m가 넘는 지진해일이 일어나 후쿠시마 원전의 전원공급계통을 마비시켰다. 1년이 지난 현재까지도 이 사고는 해결되지 않고 있으며, 사고 이후 지금까지도 아무도 장담할 수 없는 방사성물질이 새어 나오고 있다.

후쿠시마 원전 사고는 인류가 잠시 잊고 있던 원자력에 대한 공포를 다시금 일깨웠다. 지금까지 있었던 미국 쓰리마일 원전 사고와 구소련 체르노빌 원전 사고, 그리고 이어 후쿠시마 원전 사고는 무엇이 가장 중요하고 필요했었는지를 경각시켜주는 잊혀지지 않을 역사가 되었다.

그럼에도 불구하고, 원자력이 주고 있는 혜택은 현재 우리가 버릴 수 없는 상태임에 주목할 필요가 있다. 현재 각광받는 신재생 에너지들이 과연 원자력을 대체할 만큼의 기술을 확보했는지와 경제적 요건을 충족하는지, 그리고 현실적으로 가능한지에 대해 생각하다 보면 이 에너지들은 원자력 다음 세대에 활용될 수 있는

것일 수도 있다.

무엇보다도 현재 세계는 더 많은 에너지를 필요로 하고 발전을 해 오며 그 동안 무시해왔던 지구환경, 구체적으로 온실효과로 말미암아 더 많은 재해를 불러들이고 있는 시점에 와있다.

원자력은 이런 문제를 불러일으키고 있는 화석연료의 단점을 해소시켜줄 수 있는 현재로서는 유일한 발전 에너지원일 수 있다. 왜 그런 것인지에 대해서, 그리고 어떻게 현재 세계 에너지 시장의 문제점을 해결해 나갈 수 있는지와 기술 개발 노력들에 대해서 적어나간다.

## 2. 필요한 에너지원, 원자력

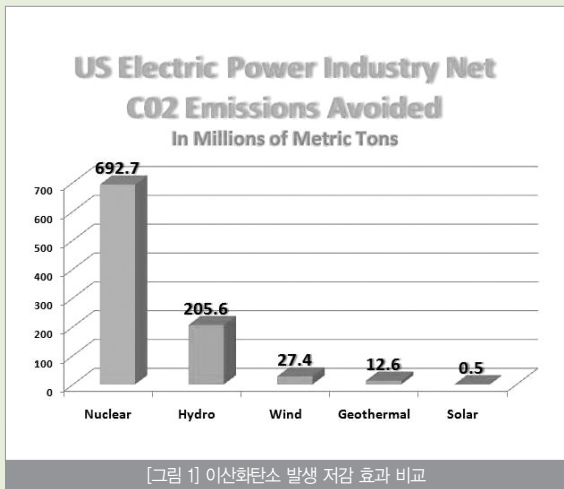
지금까지 역사 속에서 인류를 충격에 빠뜨렸던 원자력 사고들을 둘러보노라면 우리가 왜 이제까지 원자력발전을 유지하고 있는지와 대안이 없었던 것인지에 대해 의구심을 가질 수 있다. 이에 대해 이야기하기 위해서는 온실효과, 다른 신재생 에너지, 원자력 산업의 가치, 후쿠시마 원전 사고, 세계시장 및 각국의 입장, 원자력의 이점 등에 대해서 논의할 필요가 있다.

### 2-1. 온실효과와 원자력

온실효과와 원인이 되는 온실가스 중 이산화탄소가 인위적으로

발생되는 배출량의 3/4을 넘어서고 있고, 이산화탄소 배출량 중의 가장 높은 비율을 차지하는 분야가 바로 전기생산을 위한 발전이다. 따라서 현재 온실효과를 유발시키는 가장 큰 이유는 다른 아닌 발전소라고 할 수 있다.

[그림 1]에서 보는 바와 같이 미국 환경보호기관의 조사에 따르면 수력, 풍력, 지열, 태양열과의 비교에서 원자력이 이산화탄소 배출을 가장 많이 저감시키는 발전원으로 집계가 되었다. 이제는 지구 상에서 온실효과를 유발시키는 화석연료 발전소는 서서히 멈춰야 할 때가 된 것이다. 여기에 현재 원자력발전이 가장 큰 역할을 해내고 있다.



[그림 1] 이산화탄소 발생 저감 효과 비교

그렇다면 우리가 왜 온실효과를 막아야 하는가? 그 이유는 단순하다. 온실효과는 인간의 힘으로는 감당하기 힘든 재해를 불러일으키기 때문이다. 쉽게 우리나라의 경우만 해도 여름만 되면 발생하는 태풍을 비롯해서 국지성 폭우로 인한 홍수, 가뭄, 폭설 또 전 지구적으로 일어나는 해수면 상승 등은 인류의 힘으로 막기 힘든 재앙이고, 이 같은 현상은 바로 온실효과로 인해 더욱 가속화되고 있다.

이런 상황에서 우리가 원자력만 고집할 이유는 없을 것이다. 원자력이 아니더라도 어떤 에너지원이라도 현재 가속화되고 있는 지구 온난화를 막을 수 있다면 주저 없이 도입해야 할 것이다. 현재 기술 개발 중인 대체 에너지 현황은 어떠한가?

## 2-2. 대체에너지의 한계

가장 각광받고 있는 태양열의 경우에는 가장 큰 한계라고 여겨지는 효율을 둘째 치고라도, 필수적인 요소라 할 수 있는 태양전지를 제작하는 데에 필요한 자원이 부족한 상황이다. 또한 이 자원

문제는 현재의 화석연료와 같은 길로 빠져들 수 있어서 미래에 태양 전지 자원을 두고 각국의 흥망성쇠가 결정되고, 여러 정치적인 문제점이 불거질 수 있는 개연성이 있다.

지열의 경우 사용 가능한 지역이 매우 제한적이며, 재생이 불가능한 에너지란 면에서 한계를 나타내고 있다.

바이오 연료의 경우에는 원재료가 되는 식물을 경작해야 하는데 대규모 에너지 생산을 위하여 농경지를 확보해야 한다. 이는 환경 파괴를 불러올 수 있는 요인이 될 수 있고, 원료가 되는 식물이 부족하게 될 경우, 식량난을 불러올 뿐만 아니라 에너지난도 아울러 불러들여 자칫 더 큰 재난을 초래할 수가 있다. 그리고 태양열과 마찬가지로 날씨에 좌우되는 단점을 가지고 있다.

풍력의 경우에는 각국에서 여러 가능한 지역에 세워 전기생산의 일부를 담당하고 있지만, 만일 풍력발전기를 현재 전세계 에너지 생산의 큰 축으로 만들 만큼 제작하게 되었을 때, 발전기 제작을 위해 소모되는 철 소모량이 전세계 철 매장량을 고갈시킬 정도의 위협적인 요인이 되고 있다. 그리고 역시 날씨와 지역적인 요인에 제약을 가지고 있다. 더욱이 우리나라처럼 평지와 바람이 동시에 부족한 상황에서는 현실적인 대안이 되기에는 역부족이다.

수소의 경우 거의 무진장한 원료를 가지는 에너지원으로 기술 개발이 이루어지고 있지만 아직은 수소를 생산하기 위한 에너지가 발전된 전기보다 더 큰 기술적 한계를 크게 벗어나지 못하고 있다. 경제성과 효율성에서 현재 이용가치가 뒤진다고 할 수 있다.

그에 비해 원자력은 현재 충분한 전기를 생산할 만큼의 기술력을 확보하고 있고, 다른 자원발전에 비해 전기생산비용도 매우 낮은 장점을 가지고 있어서 현실적으로 버릴 수 없는 상태이다.

## 2-3. 후쿠시마 원전 사고

원자력에 대해서 거부감과 불안감을 조성하는 이유가 되는 원전 사고, 그 중에서 작년에 일어났던 후쿠시마 원전 사고에 대해 살펴본다. 현재 일본정부와 도쿄전력은 원자로 입력용기의 온도계가 고장이 났다고 선언하면서 최근 온도계가 표시한도인 400도를 초과한 사건에 대해 여전히 사고 원전 원자로가 냉온정지상태라고 주장하고 있다. 지난해 12월 일본 노다 총리는 후쿠시마 제 1 원전의 원자로 온도가 100도 이하로 내려갔으며 이에 냉온정지상태로 공언하면서 원전사고가 수습되었다고 발표한 적이 있다. 그 후 2월 일부 온도계가 400도 이상 올라간 상황은 사실 이해하기 힘든 현상이고 지금까지의 일본 정부와 도쿄전력의 내력으로 볼 때 전적으로 신뢰할 수 있는지에 대해서 의문이다.<sup>1)</sup>

[그림 2]와 같이 작년 3월 후쿠시마 원전사고는 대지진과 지진해일이 발생한 이후 차단된 전력문제를 해결하지 못해 발생한 것이

라 볼 수 있다. 1호기의 경우 수소폭발로 격납용기가 부서지고 방사성물질이 누출되었다. 4호기는 냉각수 공급이 끊겨 연료저장조의 수위가 낮아져 수소와 방사성물질로 된 증기발생이 폭발을 일으켜 문제가 되었다. 결국 초동대응 실패와 비등경수로 중 제대로 안전성이 보장되지 않은 원전을 사용함으로써 빚어진 사고라고 할 수 있다.

못지 않는 큰 피해를 주고 있는 상황이어서 사실 어느 것 하나 포기할 수 없다. 현재 원전은 사실상 화석연료보다 더 좋은 효율로 경제성을 갖춘 대안이 되고 있다. 만일 대체 에너지가 기술적으로 원자력을 능가하게 되고, 충분한 경제성과 실용성을 갖추게 된다면 그 때에는 전 세계를 불안에 떨게 했던 원자력은 사라지게 될 것이다. 하지만 그 전까지 원자력은 전 세계의 발전과 안전이라는 진퇴양난 속에서 계속 끌어안고 가야 할 에너지원이 아닌가 한다.



[그림 2] 후쿠시마 원전 사고 현장

## 2-4. 사고 이후 세계 동향

후쿠시마 원전 사고 이후, 원자력발전을 사용하는 나라들은 보유하고 있는 원전에 대해 대대적인 안전 점검에 돌입하였다. 특히 독일은 2022년까지 원전을 모두 폐쇄하기로 결정하고 원자력 이외의 대체에너지비율을 40%까지 끌어올린다는 목표를 세워놓고 있지만, 목표기한까지 가능할지 미지수이다.<sup>2)</sup>

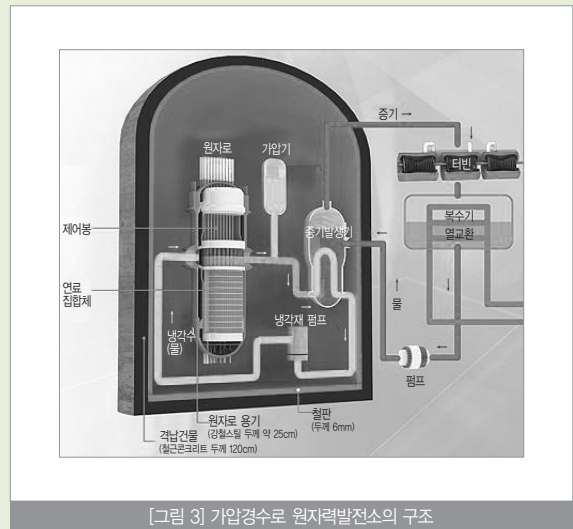
지난 겨울에는 혹한이 몰아 닥쳐 멈춰 세웠던 5기를 재가동시키는 촌극을 벌이기도 했다. 대부분의 나라에서는 후쿠시마 원전 사고를 계기로 원전에 대한 경각심이 자극을 받아 안전 점검과 향후 대책을 놓고 고심하는 분위기이나, 현재 전력난과 온실가스 문제를 해결해줄 현실적 대안이 원자력이라는 것을 자각하고, 원전 운영과 증설 계획은 그대로 유지하지만 안전을 더욱 강화하는 방향으로 정책과 기술에 초점을 맞추고 있다.

앞으로 후쿠시마와 같은 원전 사고가 나지 않으리라는 보장은 없지만, 온실효과로 인한 자연재해 증가도 세계 각지에서 원전 사고

## 3. 원자력발전 개요와 최근 기술 동향

### 3-1. 원자력발전의 원리

원자력 기술을 이해하기 위해 원자력발전의 원리를 설명하자면, [그림 3]과 같이 우선 격납건물이라고 하는 폐쇄 공간에 원자로와 핵연료를 식히는 냉각재계통이 서로 연결되어 있다. 원자로에서 핵분열반응으로 일어나는 고온의 열이 고압 냉각수를 데우고, 증기발생기에서 수증기가 가열되면 이 증기가 터빈을 돌려 이를 이용해 발전기가 전기를 생산하는 구조로 되어 있다.



[그림 3] 가압경수로 원자력발전소의 구조

### 3-2. 원자력발전 세대

원자력발전의 세대별 흐름을 살펴보면, 초기 제1세대 원전들은 원형로거나 민간 원자력 기관들에 의해 건조되었다. 주로 1950년에서 1960년대에 있었던 미국 Pennsylvania주 Shippingport 나 Illinois주 Dresden 1호기, 영국 Calder Hall 1호기 등이 있

1) <http://lgaim.egloos.com/3806007>

2) [http://news.chosun.com/site/data/html\\_dir/2011/05/31/2011053100081.html](http://news.chosun.com/site/data/html_dir/2011/05/31/2011053100081.html)

다. 2세대 원전은 현재에도 운영되고 있는 상업용 원자로들이라고 할 수 있다. 경수로 형태 중에 가압형, 비등형과 중수로 중 CANDU 등을 꼽을 수 있다. 대략적으로 가동연한이 40여 년 되는 상업로들로 경제적이고 1세대보다 안정적임 모험들이다.

우리나라에서도 2세대 원전들을 기반으로 가동되기 시작하였다. 표준형원전인 OPR1000은 대표적인 2세대 원자로라고 할 수 있다. 3세대 원자로로는 2세대 원자로에서 진화된 최신 설계로 개선된 원자로라고 할 수 있다. 핵연료기술, 열효율, 모듈화 건설공법, 안전계통 등 여러 면에서 진화되어 평균수명도 60년으로 늘어났다. 대표적으로 아랍에미리트에 수출한 신형경수로 APR1400이 3세대 원전에 해당된다.

다음은 4세대와 3세대의 중간 격인 3+세대 원자로들이다. 3+세대 원자로들은 3세대 설계로부터 안정성을 대폭 향상시킨 것으로 미국 AP1000이나 프랑스 EPR 등을 들 수 있다. 3+세대 원자로들의 일부 피동안전기능은 눈 여겨 볼만하다. 이 원자로들은 이전 세대보다 연소율이 더 높아 연료소비와 방사성폐기물을 줄일 수 있는 장점이 있다.

다음으로 4세대 원자로들은 연구개발 단계에 있다. 기본적으로 4세대 원자로들은 3+세대 특징을 모두 가지고 더욱 고온에서 작동되고, 경제적인 수소생산이 가능하다든지, 심지어 담수화 가능까지 포함하고 있다. 그리고 향상된 액티나이드 관리 기능 등이 포함될 수 있다. 여기에는 고온가스, 액체금속로, 초임계압수로 등이 있다.

### 3-3. 원자력발전의 종류

상용화되어 널리 사용되는 원자로들은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 그 중 경수로는 물을 냉각재로 사용하여 물이 끓지 않고 고온을 유지할 수 있도록 고안된 장치로, 두 가지 형태로 나뉜다. 그 중 우리나라에 많이 쓰이는 가압경수로는 원자로 압력을 150기압 정도로 올려서 물의 온도를 300도 정도로 가열하고, 그 고온의 물로 증기발전기는 장치에서 수증기를 만들어 수증기의 팽창된 힘으로 터빈을 회전시켜 전기를 생산해내며, 국내 원전은 월성 4기를 빼고 모두 가압경수로이다. 반면 일본 후쿠시마 사고 원전에 쓰인 비등경수로는 70기압의 원자로에서 직접 수증기를 만들어, 이 수증기가 곧바로 터빈을 돌리는 발전 형태로 전 세계 원전 중 20% 이상을 차지하고 있고, 안전보다는 효율 중심의 원자로라고 할 수 있다. 즉, 증기발전기를 거치지 않기 때문에 열손실이 줄어

들고, 원자로에서 나온 열을 보다 경제적으로 전력 생산에 쓴다고 볼 수 있다. 그러나 가압경수로의 간접 가열방식이 아닌 점에서 사고시 더 큰 피해를 불러들일 수 있는 단점을 가지고 있다.

경수로와는 다르게 중수로는 캐나다에서 기술 개발한 원자로형으로 천연 우라늄을 핵연료로 사용하고 감속재로 중수를 사용하는 것이 특징이다. 중수가 감속재인 경우 경수보다 중성자를 덜 흡수해 핵분열이 더 잘 되어 핵연료 농축과정이 필요 없는 천연 우라늄을 원료로 사용하고 있다. 우리나라의 경우 월성이 캐나다에서 만든 중수로 CANDU형 원자로이다. 세계에서 운영 중인 원자로의 60% 정도와 건설 중인 원자로 중의 80%이상이 가압경수로이다.

### 3-4. 최근의 기술 동향

본격적인 원전 수출을 위해 노력해온 우리나라는 2009년 12월 아랍에미리트에 총 400억 달러 규모의 원전 건설 공사를 수주하게 되었다. 세계 원자력 강국들을 제치고 이뤄낸 성과지만, 세계 원자력 시장에서 살아남기 위한 노력을 계속해야 함에는 반론의 여지가 없다. 정부는 Nu-Tech 2030이라는 원전기술국가대장정을 계획하고, 원전 기술 자립화와 수출을 위해 2012년까지 핵심 기술 국산화 완성과 2022년까지 IPOWER, 즉 혁신경수로 개발을 목표로 기술 개발을 추진하고 있다. 특히 우리나라 원전의 3대 미자립 기술인 원전 설계코드와 원자로냉각재펌프, 원전제어계측 장치 중에 설계의 핵심코드를 개발하는 것은 올해 말이면 원전기술 소유권을 확보해 원전설계와 수출에 견인차 역할을 할 것으로 기대되고, 성공하게 되면 개발국으로서는 미국, 프랑스에 이어 세계에서 3번째가 되는 것이다.

원전 기기 중에 중요한 역할을 담당하는 냉각재펌프의 경우, 두산중공업 주도 하에 2012년 중반 개발을 목표로 현재 진행되고 있고 제어계측장치, 일명 MMIS는 2010년 이미 개발이 완료되어 원전의 설계에서부터 운영까지 적용되는 고부가가치 기술로 국산화의 의미가 매우 크다고 할 수 있다.<sup>3)</sup>

이와 별도로 현재 개발 중인 고유경수로 APR+ 원전의 경우 외부 전원 없이도 원자로를 안전하게 냉각시킬 수 있는 피동보조급수 계통을 장착하게 되어 이번 후쿠시마에서 크게 문제되었던 전원 상실 시 냉각 불능 상태에서도 피동냉각이 되어 최소 사흘까지 대처 시간을 확보할 수 있게 되었다. 이는 가압경수로에서는 세계에서 첫 번째로 개발에 성공한 것이다.<sup>4)</sup>

3) <http://olv.moazine.com/rviewer/index.asp>

4) <http://economy.donga.com/total/3/01/20111123/42081360/1>

## 4. 원자력 안전과 디지털 기술, 그리고 그 동향

최근 세계 원자력 시장은 거의 모든 초점이 안전에 맞추어져 있다고 해도 과언이 아니다. 원자력은 그 효율만큼이나 파괴력이 잠재해 있기 때문에 원전을 잘 운영한다고 하는 것은 '어떻게 하면 원전을 사고 없이 운영하느냐' 라는 말과 동일하다.

### 4-1. 외부요인 대처

과거 역사 속에서 일어난 원자력 사고는 크게 세 가지로 이야기되고 있는 미국 쓰리마일과 체르노빌은 원전 내부 문제로 인해 야기된 것이라고 할 수 있다. 하지만 [그림 4]와 같이 후쿠시마의 경우, 원전 자체의 원인이었다기보다는, 내재된 원전 내부의 결함을 부추기는 외부 요소, 즉 지진과 그로 인해 나타난 해일 때문에 일어난 사고로 과거 두 사건과는 다른 면을 보이고 있다. 이제 원자력발전소는 자체의 구조적인 문제뿐만이 아니라 외부에서 발생하는 요인에도 대처를 할 수 있어야 한다는 것이다.

사실 자연재해로 일어난 사고들은 인간의 힘으로 막기 힘든 상황으로 이어져가는 것이 대부분이다. 그리고 인류가 만든 제품들은 결함이 있을 경우 인간의 손으로 그 원인을 해결해 나왔던 것이 사실이나, 자연재해를 원인으로 본다면 그 원인을 해결할 수 없는 것이 현실이다. 원인을 해결할 수 없다면, 피해를 일으키는 과정을 분석하고 최대한 피해를 줄이는 것이 우선 책임 것이다. 덧붙여 과정을 분석하고 피해를 줄이기 위해서는 실험을 통해 검증하는 단계가 필요하다.



[그림 4] 후쿠시마 원전으로 다가오는 지진해일

### 4-2. 자연재해 실험

하지만, 자연재해는 기타 다른 요인들과는 달리 미리 실험해보기 힘들다는 제약조건이 있다. 10m 이상 높이로 다가오는 해일을 인

공적으로 만들기란 쉽지 않고, 실험 대상과 그에 따른 결과도 이미 실험의 의미를 넘어서게 될 것이다. 하지만 현대 과학기술의 총아인 디지털 기술을 활용한다면 이것이 가능하다.

디지털 기술은 가상공학을 기반으로 한다고 할 수 있다. 세계 이쪽 편에서 저쪽 편에 있는 친구와 화상대화를 하기 위해서는 인터넷이라는 가상전산망을 만들어놓고, 그 공간에 소리와 그림을 주고받으며 대화를 하는 것이다. 가상실험이라고 한다면, 실험공간을 실제 시도해보고자 하는 현실공간과 똑같이 가상으로 구현해 놓고, 똑같은 입력조건을 주고 똑같은 전개과정이 나오도록 알고리즘을 구현하고 시각화 기술을 적용해서 출력값을 받아 검토해 볼 수 있는 것이다.

이제는 자연 재해급 규모의 가상실험도 가능해지는 시대가 되고 있다. 정교하게 짜인 물리 연산 엔진을 장착하고, 똑같은 지형과 환경을 구성하여 해일이라는 입력조건을 주면 실제현실과 유사한 방식의 계산과정을 거쳐 똑같은지 않지만 마치 실제처럼 유사한 수치의 결과를 산출해 낼 수 있다.

### 4-3. 후쿠시마 사고 이후 각국의 대처

미국 원자력안전규제위원회 NRC는 모든 원전에 임시보안 행정 명령지침에 따라 광역재해 완화지침 EDMG를 개발, 대응방안을 구축하고, 후쿠시마 사고 이후 정부산하기관과 공동으로 원전광역범위 재난 경험을 바탕으로 후속대책을 강화하고 있다. 부지에서 장기 전원상실 등의 복잡한 사고에 대해 시뮬레이터를 사용한 훈련의 필요성을 강조하고 있다.

프랑스, 영국, 벨기에 등 유럽연합 EU 국가들은 안전점검(Stress Test)에 따라 원전광역부지 재해사고에 대한 안전여유도를 재평가하고 있다. 조만간 광역부지 재해 대처능력 강화를 위한 방안을 제시하고 EU 각 원전 보유국은 안전성을 높일 계획이다.

IAEA, INPO, WANO 등 국제 원자력 기관과 EPRI, OECD/NEA, IRSN, ASN 등 연구기관은 후쿠시마 후속 대책으로 중대사고 관리개선과 방향전환 및 광역부지 재난사고에 대응할 수 있는 지침 개발과 대응설비 구축을 제시하게 되었다.

### 4-4. 후쿠시마 사고 이후 국내 실정

우리나라의 경우에도 후쿠시마 원전과 유사하게 동일 부지에 많은 원전이 모여 있는 형태이고, 앞으로 건설될 원전도 그러한 부지로 예정되어 있어서 다수호기의 원전부지에 대한 자연재해 중대사고 발생에 대비할 필요가 있다. 일본에 비해 비교적 지진 등에 안전하다고 생각했던 우리나라였지만 최근 지구 온난화로 인한 이상 자연재해가 많이 닥쳐와 더 이상 안전지대라고 장담할 수



없게 되었다. 기후변화로 설계기준을 뛰어넘는 자연재해가 언제든지 발생할 수 있고, 이 경우 발전소의 구조물과 기기 등에 대한 직접적 피해와 더불어 전력공급 불능상태가 될 가능성이 커졌다. 그리고 이러한 경우 후쿠시마처럼 장기적인 다수호기 대형재난으로 확대될 수 있다.

국내에서는 한국원자력안전기술원이 가압경수로 및 중수로에 대한 표준사고관리지침서를 개발하고 산업계가 이를 기반으로 중대 사고관리지침서 SAMG를 확보하고 있으나 모두 단일 호기를 기준으로 작성되어 있어 후쿠시마와 같이 원전부지 내에 동시에 발생할 수 있는 외부사건에 대한 실질적 대책이 없는 상황이다. 후쿠시마 사고 이후 교육과학기술부의 국내안전점검 결과 50개 개선항목을 도출하여 정지 및 저출력 SAMG 등의 보완 및 개발을 추진하고 있으나 광역부지 재난사고에 대한 포괄적 대책이나 대응전략은 미흡한 실정이다.

#### 4-5. 재난 대비 디지털 시뮬레이션 사례

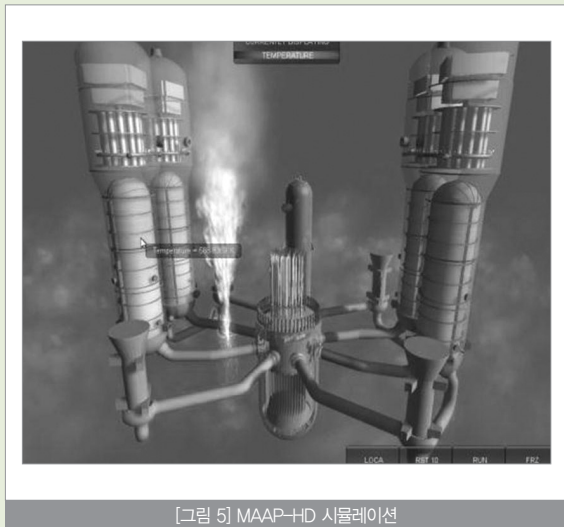
이에 따라 해외 원전 선진국들은 원자력발전과 관련한 재난재해를 실험할 수 있는 시뮬레이션 기술을 개발하여 왔다. 미 국방부 산하 국방위협감소국 DTRA이 개발하여 안보당국과 전문연구소에서 사용하고 있는 소프트웨어 HPAC은 원자력발전소, 재처리 시설 등에서 사고가 일어났을 때 피해규모를 산정하고 피해범위를 분석하는 작업을 가능하게 한다.

Micro-Simulation Technology는 가압경수로, 비등경수로 및 AP1000, ABWR, EPR을 포함하는 모든 종류의 경수로에서의 중대사고와 방사능 확산에 대한 시뮬레이션과 이에 근거한 PCTTRAN 중대사고 대처훈련 프로그램을 개발했다. GSE

Systems는 MAAP5를 바탕으로 하여 MAAP-HD(그림 5 참조) 중대사고 코드를 개발하였고, 격납건물, 보조 건물, 사용후연료저장조 등의 상태를 실시간으로 분석하고 가시화할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다.

미국 Environmental Tectonics에서 개발한 ADMS는 화재, 홍수 등 자연재해 비상사고대응훈련을 위해 3차원 가상현실을 활용하여 광역부지 재해에 대응이 가능하다.

국내 원자력 분야의 디지털 기술 접목을 선도해온 (주)필로소피아는 원전 운전원들의 중대사고 훈련을 위해 가상현실을 활용하여 Windows 기반의 사용자접면 GUI를 제공하는 3차원 시뮬레이터 SAM+를 개발 중에 있다. [그림 6]의 SAM+는 중대사고 전산코드의 출력을 완전 3차원, 고해상도, 초고속으로 사용자와 개발자에게 전달하는 지능형, 대화형 솔루션으로 PC나 스마트 기기에서 사용이 가능하다.



[그림 5] MAAP-HD 시뮬레이션



[그림 6] 필로소피아 3차원 시뮬레이터 SAM+

### 5. 원전 건설과 해외시장 추진 전략

#### 5-1. 세계 원전 건설 동향

최근 미국이 34년 만에 처음으로 원전 건설을 승인한데 이어 점점 까다로워지는 이산화탄소 규제에 부합되기 위해서 화석연료를 대폭 줄이고 이를 다른 에너지원으로 충당해야할 필요성이 증대되고 있다. 이에 따라 각국에서는 원자력발전 계획을 이행하고 있고, 원전 수출국들은 건설수주를 위해 각축을 벌이고 있다. 프랑스는 사실 현재 원자력발전을 통해 생산된 전기를 유럽 주요 국가들에게까지 공급하는 역할을 담당하고 있다. 이런 전력공급이 가능한 이유는 발전설비 중 원자력 비중이 높기 때문이다.

프랑스는 전체 발전량 중 자국의 전력수요를 충당하고 남은 12%를 이웃나라에 수출하고 있다. 프랑스의 원자력 전력 생산은 전체의 78%를 차지하고 있다. 프랑스는 미국 쓰리마일 사고 이후에도 원전을 지속적으로 건설한 나라 중에 하나이다. 현재도 프랑스 AREVA는 원전 수주를 위해 자국이 원자력발전 강국이라는 이점을 살려 성과를 거두고 있다. 이러한 사실들 덕분인지 프랑스의 온실가스 배출량 중 석탄이 차지하는 비중은 세계 평균과 비교했을 때 극히 낮은 수치를 기록하고 있다.<sup>5)</sup> 온실가스 배출원 중 발전에 의한 원인을 이미 해결한 것이나 다름없다고 할 수 있다.

현재 세계 원전 건설의 현안 중 하나는 아시아나 중동 지역 국가들의 원전계획에 따른 선택권을 누가 획득하느냐이다. 이들 원전 수주에는 프랑스, 미국, 캐나다, 일본이 경쟁에 뛰어들고 있고, 여기에 한국이라는 신흥 원전 수출국가가 발을 내딛었다. 이 중에 비등경수로를 주로 운영하고 있는 일본의 도쿄전력은 운영 상에서 가동률이 낮은 수치를 보여주고 있었고, 이는 바로 전체적인 계통의 안정성에 대한 결과라고도 볼 수 있다. 그리고 실제로 위에 언급한 국가 중에 비등경수로를 경쟁하는 국가는 일본밖에 없다. 더구나 작년 후쿠시마 원전도 비등경수로이었던 점을 이유로 원전 건설 계획이 있는 나라들에서 일본 원전에 대한 기피 현상이 나타나고 있다.

2009년 말 아랍에미리트는 한국전력을 비롯한 연합업체들을 통해 원전을 건설하기로 하였다. 터키의 경우 시놉 지역에 1,400 MW 급 원전 4기를 건설할 계획이 있었고, 애초 일본이 우선협상자 지위를 획득하면서 수주할 가능성이 희박해졌으나, 후쿠시마 원전 사고 등 일본이 난항을 겪으면서 우리나라에게 협상 기회가 다시 오게 되었다.

베트남의 경우에는 총 14기의 원전을 2030년까지 건설할 계획을 가지고 있다. 2010년 일본이 이 중 2기의 원전 건설을 수주하였고 러시아가 추가로 4기를 수주하였다. 이에 우리나라도 2기의 수주를 겨냥해 물밑 작업을 진행해온 것으로 알려졌다.

## 5-2. 원전 건설 현안

원전 수주에 결정적인 역할을 하는 요인 중 하나는 바로 건설단가와 건설기간이다. <표 1>에 보이나 일반적으로 한국 원전 건설공기는 다른 원전 선진국의 건설공기보다 몇 개월씩 빠른 편이다. 그렇다면 왜 건설공기가 수주를 좌지우지할 만큼 큰 현안이 되는 것인가? 물론 원자력발전소가 아닌 다른 대형건물도 비슷한 이유

가 있겠지만 원전의 경우 생각해볼 수 있는 것은 빨리 지을수록 그만큼 빨리 전기를 생산할 수 있다는 점이 있다. 원자력발전소 1기를 짓는데 대략 3조 원이 소모된다. 만약 1기에 대해 1개월의 건설기간이 줄었을 때 건설비용을 200억 원 정도 절감할 수 있다. 그런데 여기서 그치는 것이 아니라 1개월 더 빨리 전기를 생산할 수 있으므로, 1개월 생산될 전기비용까지 합하면 1개월 공기 단축에 1천억 원 정도 비용을 절감할 수가 있는 것이다. 이 점을 원전을 건설하려는 국가들도 익히 알고 있기 때문에, 건설비도 절감하고 더 빨리 전기를 생산하겠다는, 즉 건설단가가 낮고 건설공기가 짧은 조건을 제시한 나라를 선호하는 것이다.

표 1 국내 원전의 건설 공기

원전호기	영광 3	울진 3	영광 5	울진 5
건설공기	63개월	61개월	59개월	58개월
원전호기	울진 6	신고리 1&2	신월성 1&2	-
건설공기	55개월	53개월	52개월	-

지난 번 아랍에미리트 원전 수주의 경우에도 사실 우리나라가 제일 낮은 건설단가와 제일 빠른 건설공기로 제안을 했었기 때문에 수주에 성공한 것이 아닐까싶다. 수주는 그냥 쉽게 이루어지는 것이 아니니 결국은 기술력이 바탕이 되어야만 하는 것이다. 건설사의 입장에서도 원전 수주의 경우 대부분 금액과 기간을 정해 놓고 제안하는 방식이기 때문에 건설공기를 늘릴 이유가 없고, 더 빠른 시일 내에 안전하게 지을 수 있는 기술력을 확보하는 것이 관건이다.

## 5-3. 원전 건설공기 단축과 가상현실 시뮬레이션

그렇다면, 공기를 단축할 수 있는 방법은 무엇인가? 똑같은 자재를 가지고 똑같은 인력과 장비로 더 빠르게 건설하기 위해서는 최적화된 건설 세부계획과 효율적인 공법이 필요하다. 특히 원자력 발전소와 같이 수백만 개 이상의 부품과 거기에 소요되는 자재, 설치를 위한 대형 크레인, 원전 주기기 등 여러 특화요소가 가미되어있어 기존의 일반적인 대형 건물의 건설계획에 추가로 원전만이 가지고 있는 요인들에 대한 세부계획이 필요하다.

일단 원전 건설이 시작되면, 아무도 어떻게 하는 것이 최적 계획인지, 최고 공정인지 알려주지 않는다. 풍부한 현장경험이 결집인

5) [http://booja.blogspot.com/2011/03/3\\_29.html](http://booja.blogspot.com/2011/03/3_29.html)

6) <http://energyjustice.tistory.com/406>

잘 짜인 건설공정 계획은 건설, 기계, 전기, 전자공학이 어우러져 지어지는 원전 같은 경우 결코 쉬운 일이 아니다. 인간의 두뇌로 원전 건설에 소요되는 자재를 다 기억할 수조차 없다.

정보를 다루는데 강점인 디지털 기술은 여기에 응용되고 있다. 건설공정 시뮬레이션 기술은 실제 건설과 가장 유사하게 공정계획을 짜고 가상의 원자력발전소를 계획대로 건설하여 미리 살펴볼 수 있는 이점을 제공한다. 이런 과정을 통해서 건설 관리자와 공정 계획자, 현장 감독자는 시뮬레이션을 통해서 짜인 건설 모습을 구체적으로 살펴보고 현재의 건설공정에 어떤 문제가 있는지, 혹은 공정이 비효율적인지 않은지, 실제 건설 시 예기치 못한 문제가 발생할 수 있는지에 대해서 면밀히 파악하고 미리 대비할 수 있다.

[그림 7]의 핀란드 올킬루오트 3호기는 2005년 공사가 시작되면서 시공사인 아레바가 2009년 가동을 약속하고 건설을 시작했지만, 공사 내내 지연이 거듭되면서 운영사는 2013년으로 가동시기를 늦추었다. 애초 시기보다 4년 넘게 밀린 것이다.<sup>6)</sup>

건설 공정 시뮬레이션을 통해서 시공사는 공정을 검증하고 건설공기를 가능해볼 수 있다. 공정 시뮬레이션을 미리 지어볼 수 없는 원전 같은 경우, 더욱더 필요한 필수적인 요소이고, 건설공기의 지연을 막을 수 있는 대책 중 하나다. 원자력발전소의 경우에 최근 각국의 시공사가 건설공정 시뮬레이션을 적극 도입하여 추진하고 있는 추세에 있다.



[그림 7] 핀란드 올킬루오트 3호기

그렇다고 해서 실제 건설공기를 시뮬레이션이 알아서 줄여주는 것은 아니다. 건설공기를 줄일 수 있는 실체기술은, 잘 짜인 공정 계획과 건설공법에 있다. 공정 시뮬레이션은 이 두 가지가 잘 발휘될 수 있도록 해주는 하나의 도구이다. 그렇다고 해서 공정 시뮬레이션이 무시될 수 있는 것은 아니다. 원전과 같은 복잡한 건축물의 경우, 수많은 자재와 부품, 기기, 인력, 설비, 장비 등과 복

잡한 공정계획을 체계적으로 정리해주고 공정계획을 가시화시켜 가상으로 건설을 시험해 보여주는 도구가 필요하다. 이에 따라 디지털 시뮬레이션은 원전 건설분야에 있어서도 선택이 아닌 필수 사항으로 자리매김한 것이다.

(주)필로소피아에서는 국내 올진 5호기 원전을 대상으로 건설공기 8개월 단축을 공정 시뮬레이션을 통해 시험해 본 바가 있다. 공정 시뮬레이션은 세부적인 공정계획이 반영될수록 더욱 자세하고 우수한 사전자료가 될 수 있다. 그리고 여러 공기단축을 위한 공법을 가상건설을 통해 시험해보고 공학적, 경제적 타당성을 미리 검토해 볼 수 있다.

#### 5-4. 해외시장 진출과 수출을 위한 해답

신규원전 건설시장을 비율로 계산해 볼 때 중국과 인도 등 아시아권이 건설예정 호기의 60%가 넘을 것으로 예상된다. 대략 연평균 140조원 내외의 시장규모로 예상할 수 있다. 주요 원전 수출국은 기존 5개국, 즉 미국, 프랑스, 일본, 러시아, 캐나다에 한국이 가세하여 치열한 경쟁이 예상된다. 원전 건설계획을 가지고 있는 국가들의 최대 관심사는 우선적으로 안전한 원전을 건설하는 것이다. 후쿠시마 원전 사고 이전의 일이긴 하지만, 국내 원전의 우수한 점 중에 하나가 세계 1위의 원전 운영률이다. 운영률이 높다는 것은 그만큼 원전이 안정적으로 가동되고 있다는 것을 의미한다. 여기에 추가로 앞서 언급했던 건설비용과 건설공기가 원전 수주에 큰 요인으로 작용하고 있다.

핀란드의 올킬루오트 원전의 건설 지연으로 인해 프랑스 아레바가 매우 곤란한 입장에 빠진 것을 보더라도 건설공기는 지연될수록 운영국가와 시공사 모두에게 큰 손실을 가져다준다. 최소한 약속한 공기는 지켜내야 하며, 더 많은 유익을 위해서 공기는 단축될수록 바람직하지만 그렇다고 부실시공으로 이어져서도 안될 문제이므로, 기술적으로 건설의 완벽성을 기하면서 공기를 지켜내고 더 나아가 공기를 줄일 수 있는 기술력을 확보하는 것이 해외시장 진출에 있어서 필수적인 요구조건이다.

국내의 경우 현 대통령이 직접 원전 건설공기를 단축시키라는 지시를 내렸을 만큼 경쟁력 확보를 위해서는 꼭 필요한 요소이다. 이를 위해서는 정확하고 구체적인 공정 최적화가 필요하고, 이를 돕기 위해서 디지털 시뮬레이션을 도입할 필요가 있다.

결과적으로 해외시장 선도를 위해서 상기되어야 할 것은, 누구나 알고 있고 가장 단순하고 명명백백한 사실이지만, 되풀이해도 지나치지 않을 단어들이 있다. 바로 원전안전, 건설비용, 공기단축이 그것이다. 세가지는 모두 탄탄한 기술력이 뒷받침되어야만 가능한 일이다.



## 6. 맺음말

원전이 녹색성장의 주요 수단으로 평가되면서 세계적으로 신규 원전 건설 및 도입에 대한 관심이 고조되고 있다. 원전 건설의 확대 및 신규도입이 전 세계적으로 추진되고 있는데 중국, 러시아, 인도, 미국, 핀란드 등은 추가건설을 추진하고 아랍에미리트, 베트남 등 약 60개 국가가 새로이 원전도입을 계속 추진하고 있다. 세계적으로 원전 가동년수의 증가로 노후 원전 정비시장도 대규모로 형성될 전망이다. 노후 원전 88기에 88조원 규모의 정비시장이 형성되리라 예상되는 것이다.

또한 세계적 원전 확대로 우리나라 수요가 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 우리는 가격이 최근 안정세이나, 광산사고, 투기수요 등 수급불안과 가격 상승 요인이 상존하고 있다. 선진 원전 공급사들은 경쟁력 강화를 통한 시장 장악력 확대에 총력을 기울이고 있다.

한편, 최근 후쿠시마 사고가 원전산업 전반에 미친 심각한 악영향에도 불구하고 원전의 신규 건설 및 도입은 지속될 전망이다. 후쿠시마 사고의 영향은 받을 것으로 예상되나 온실가스를 포함하는 에너지 문제 해결을 위해 원전 수요의 증가 전망은 크게 변하지 않을 것으로 예상된다. 원전 선진국들은 신형원전을 개발하여 원전시장을 선점하려 하고 있으며, 안전성을 향상시킨 신개념 원자로 개발 등을 통해 미래에 대비하고 있다.

대한민국은 2009년 12월 정상외교 등을 통해 아랍에미리트에 원전 첫 수출의 쾌거를 이루었다. 정부는 국가 발전전략으로서 녹색성장 정책을 강력하게 추진하고 있으며, 후쿠시마 원전사고를 계기로 최상의 원전안전 확보를 기본전제로 원전산업의 발전을 도모하고 있다. 아랍에미리트 사업 수주를 계기로 국내원전 산업은 국내시장 중심에서 세계시장을 대상으로 경쟁, 성장해야 하는 사고방식 변화를 거쳤다.

수출시장과 국산원전의 경쟁력에 대한 철저한 분석을 통해 시장 맞춤형 기술 개발 등을 내용으로 하는 중장기 전략 수립이 필요한 시점에 와있다. 후쿠시마 원전사고를 계기로 최상의 안전성을 가진 원전 기술 확보가 최고 경쟁력을 가지는 것이며 원전산업의 지속가능발전을 가능하게 한다는 사실을 재확인한 것이다.

최고 안전성을 가진 원전 기술 확보를 위해 지속적으로 혁신적 안전성 향상 기술개발이 필요하고 선진 원전 공급사를 상대로 경쟁력 우위를 지속 확보하기 위해서는 개량, 개선 기술개발에서 벗어나 선도기술 개발, 확보가 관건이다. 원전 핵심기술뿐 아니라 건설, 연료, 부품, 소재 등 연관기술의 뒷받침과 안전하고 친환경적인 원전운영, 유지 기술 개발이 동시에 필요하다.

대한민국이 머지않은 장래에 전 세계 곳곳에서 전력을 생산하는 원자력발전소의 명품제조, 운영, 유지, 보수 국가로 거듭나기를 기대해 본다. S

### 참고문헌

- 1 김장범, 2010, "원자력발전 산업 동향과 해외 진출 확대 방안."
- 2 지식경제부, 2011, "원전기술 국가로드맵 (Nu-Tech 2030)."
- 3 S.M. Goldberg, R. Rosner, 2011, "Nuclear Reactors: Generation to Generation" American Academy of Arts and Sciences.
- 4 J.H. Choi, D.M. Kim, K.Y. Suh, 2012, "SAM+: Severe Accident Manager Plus for Multi-Unit Nuclear Power Plants", 18th Pacific Basin Nuclear Conference (PBNC), Busan, Korea.
- 5 J.H. Choi, K.Y. Suh, 2012 "Nuclear Safety in A Post-Fukushima Era: Moving Forward with Smart Mobile Technology," 18th Pacific Basin Nuclear Conference (PBNC), Busan, Korea.
- 6 서균렬, 2011, "4차원 너머 원자력 세계," 동아 사이언스.
- 7 서균렬, 2012, "원전, 국민 신뢰를 받으려면," 서울경제.
- 8 서균렬, 2012, "우리에게 없는 세 가지의 대안, 원자력" 중앙일보.
- 9 서균렬, 2012, "첨단 소프트웨어와 원자력," 디지털타임스.