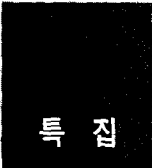
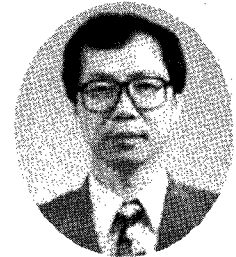


Hitachi가 제작한 흑연타일을
설치한 JT-60U 진공용기 내부



핵융합개발을 진단한다

産業的 評價와 産業體의 役割



홍 상 희
서울대 원자핵공학과 교수

국가가 장기적인 기술개발 정책으로 에너지전략을 수립할 때 정책 결정자들을 가장 곤혹스럽게 만드는 것이 아마 핵융합에 대한 처리일 것이다. 마찬가지로 원자력산업관련 기업이 장기투자 기술개발 방향을 설정할 때도 겪는 어려움이다.

이 문제에 대해서 우리나라에서는 핵융합개발이 아직도 초기 단계이고 막대한 투자 경비를 필요로 한다는 일반적인 인식이 지배하고 있기 때문에, 정책 결정에 있어서 지금까지 논의의 대상에서 제외된 실정이다. 그러나 그동안 핵융합개발에 심혈을 기울여 온 선진국에서조차 이 문제는 항상 고민거리였다.

원자력산업에서 핵융합 위치

40년 이상의 연구개발을 지속해 오면서도 뚜렷한 핵융합발전 상용화의 전망을 자신있게 제시하지 못하고 있는 핵융합계는 신랄한 비판과 함께 실용화에 대한 회의적인 시각을 인접 기술분야에서 받아왔다. 원자력에너지의 이용이라는 같은 뿌리를 가지고 있으면서 현 원자력산업의 주축을 이루고 있는 핵분열계에서 오히려 이러한 냉소적인 태도를 두드러지게 나타내보임으로써 타분야의 사람들을 더욱 혼란스럽게 만들기도 하였다.

이러한 시각은 거의 비슷한 시기에 개발을 시작하여 벌써 상용

화된 핵분열발전으로 전력 공급에 상당한 몫을 원자력발전소가 제공하고 있다는 단순한 자부심의 간접적 표현만은 아니다.

그렇다고 원자력발전에 대한 일반대중들의 강한 반발과 그 결과로 이어진 원자력발전소 건설 부진에 따른 원자력산업의 사양화, 안전규제 강화에서 오는 경제성의 약화, 신형로 개발의 부담감과 핵융합개발과의 경쟁관계에서 오는 불편함이 복합적으로 작용하여 핵분열 중심 원자력산업이 표출한 불안감만으로 간과할 수도 없다.

핵융합계가 실용화 개발 부진에 대한 설득력 있는 이유를 설명하고 상용발전에 대한 확고한 비전과 확증을 제시하여 기울어져 가는 현존 원자력산업의 활로에 새로운 돌파구를 제공했어야 한다.

안전문제와 경제성에 대한 관심을 미룬 채 물리학 및 기술문제에만 집착하여 상용화 시기를 단축시키지 못하고 지지부진함을 보이면서도, 반핵의 확산에 따라 세계적으로 번지는 원자력산업의 후퇴로 핵융합개발에도 불뚝이 튀어 그나마 너덕지 못한 개발투자비의 감소를 우려하지 않았나 하는 의구심도 뒤따른다. 소위 「침몰하는 배」에 동승하는 것을 꺼려하며 적극적으로 기존 원자력산업의 활용과 협조에 이러한 소극적인 태도를 취해 온 핵융합개발 선도자들의 책임도 크다.

불협화음의 조율

그러나 최근에 원자력 집안끼리의 이러한 불협화음이 차츰 해소되어 가는 조짐이 보이기 시작했다. 91년 말 유럽공동체 JET의 D-T 핵융합에 의한 1.8MW 열 출력실험, 올해 일본 JT-60U의 팔목할만한 밀폐와 가열 실험결과, 미국 TFTR의 야심찬 D-T 실험계획으로 사실상 이들 세계 3대 토크막에서 핵융합의 에너지 손익분기점인 임계조건이 달성되어 핵융합의 과학적 실증은 끝났다는 관점이 지배적이다.

다음 단계 공학적 실증을 위한 기술개발도 이미 착수된지 오래되었다. 이들 선진 3국은 독자적으로 공학실험로 개발계획을 세워 추진하고 있을 뿐만 아니라, 국제원자력기구(IAEA) 주관하에 옛 소련을 포함시켜 국제공동으로 토크막형 공학실험로 개발도 순조롭게 진행하고 있다.

「국제열핵융합실험로(ITER)」로 불리는 열출력 100만kW급의 이 공학실험로는 이미 개념설계가 끝나고 상세설계에 들어가 2005년에 건설이 끝나면 본격 가동할 계획이다. 이러한 공학실험로들의 개발과정에서는 이미 핵분열 원자력에서 축적된 많은 기술적 자료와 경험이 본격적으로 활용될 것이다. 벌써부터 선진국에서는 이런 측면에서 핵융합계와 핵분열계의 협조적인 분위기

가 조성되어 가고 있다.

현존 원자로와 유사한 열과 방사선 환경에 놓일 핵융합로는 노재료문제, 방사성물질 취급, 원격 운전제어, 안전성 및 경제성 평가 등에서 상당부분을 현 원자력발전소의 경험을 기초로 해야 한다. 핵융합로를 단지 발전을 위한 동력원으로만 이용하지 않고, 핵분열로보다 훨씬 큰 에너지를 발생하는 중성자원으로 활용하여 핵분열 중성자의 산업적 응용에서 부딪혔던 한계를 극복하고 더 효율적인 결과를 얻을 수도 있다. 이러한 발전 이외의 응용도 현 원자력산업의 기반 위에서 꽃 피울 수가 있다.

그동안 여러가지 핵융합설비 건설과정에서 이미 각국의 원자력산업체는 장치제작에 깊이 관여하여 왔고, ITER 개발이 본 궤도에 오르자 이들 기업의 적극적인 참여와 관심이 더욱 고조되고 있다.

특히 일본원자력산업회의에서는 수년 전에 핵융합이 타 산업에 미치는 파급효과와 관련 기술들을 면밀하게 조사하여 기업의 참여와 자국 핵융합개발정책 결정에 영향을 미치고 있다. 미국 에너지부(DOE)의 한 자문위원회는 2025년까지 핵융합발전소 실증과 2040년까지 상업화 운전을 목표로 하는 권고를 내놓아 핵융합기술 산업화를 더욱 부채질하고 있다.

핵융합 무감각의 국내 원자력계

위와 같은 선진국에서의 고무적인 핵융합개발 분위기와 여건 변화에도 불구하고 우리나라에서는 핵융합에 관한 한 무감각 지대로 여전히 남아 있다. 우리나라의 원자력기술과 산업 관련자들에게는 핵융합개발이 인류가 지금까지 도전한 과학기술 중 최대난관의 거대 첨단과제이며, 막대한 투자비를 요구하는 대규모 개발사업이며, 수십년간 걸리는 초창기 연구로만 일반적으로 인식된 듯 하다.

이 시점에서 우리가 선불리 여기에 뛰어든다는 것은 모험이며 부질없는 낭비만 초래할 뿐, 선진국에서의 움직임은 우리에게는 그저 환상일 뿐이라는 자세에서 좀처럼 벗어나지 못하고 있다.

그러면서도 원자력을 비롯한 첨단기술 및 소재개발을 국내에서 추진하는 경우, 명분과 기대효과로 가장 많이 내거는 것으로 「핵융합개발」에 귀결된다는 주장을 서슴없이 하고 있다. 실은 핵융합 연구개발에 아무런 실질적인 투자나 관심도 없으면서 핵융합을 해당 과제의 정당화나 개발 명분을 세우는 들러리로 삼고 있는 경우를 흔히 볼 수 있다.

대표적으로 우리나라 전력공급의 주체인 한국전력공사의 로고(logo)에 상징적으로 시각화된 핵융합과 핵분열, 지금 한창 열기가

더해가는 대전 EXPO의 전기에너지관에 전시되어 있는 핵융합로 모형, 중장기원자력연구개발의 상당수 세부과제들에서 내세우는 연구목표와 기대효과들에서 이러한 예를 볼 수 있다.

상용단계 참여는 시행착오 반복

선진국에 의해 핵융합발전이 상용화된 후에 이용하겠다는 발상은 원자력기술자립과 관련해서 우리나라가 지금 겪고 있는 어려움과 시행착오를 반복하겠다는 어리석음을 내보이는 것과 같다.

현 핵융합개발단계에서 우리나라의 과학기술 수준과 산업계 능력에 맞는 참여부분을 찾아 기술개발 능력을 배양하고 관련 산업의 준비와 조직화로 상용화 될 핵융합 발전에 대비하여야 한다. 따라서 국내에서 핵융합 개발에 대한 관심을 환기시키고 현 개발단계에서 특히 우리 산업체가 할 수 있는 역할을 찾기 위하여 다음과 같은 내용을 살펴보고자 한다.

우선 개발될 핵융합 발전을 현존 원자력산업의 주류인 핵분열발전과 비교평가하여 상호 연관관계, 장단점, 문제점 등을 파악한다. 이어 핵융합의 전력생산 이외의 응용기술 분야가 어떤 것이 있으며 발전목적의 핵융합로 개발과 관련된 요소기술의 종류와 산업적 파급효과를 제시한다. 아울러 선진국에서 원자력 관련기

표 1. 핵융합과 핵분열 발전의 비교평가

발전방법		핵융합(D-T 토카막로)	핵분열(경수로)
비교항목	핵 연료	바다물 → 중수소(² D) 리튬 → 삼중수소(³ T)	우라늄광 → 농축우라늄(²³⁵ U)
	핵 반응	중수소 + 삼중수소 → 알파입자 + 고속중성자	우라늄 + 열중성자 → 핵분열생성물 + 고속중성자
발생에너지	핵반응당(MeV)	17.6	200
	연료 1g당(MWh)	100(석유 약8톤 해당)	23(석유 약2톤 해당)
발생중성자	에너지(MeV)	14.1	5
	발생량(g/h)	2.15	0.5
	잉여량(g/h)	0.7-1.6	0.1
환경 및 안전성	주요방사성물질	삼중수소, 중성자 방사화 생성물	핵분열생성물, 악티노이드핵종, 중성자방사 화생성물
	환경오염 가능성	적 음	있 음
	노심용융사고 위험성	없 음	있 음
	핵무기전용 가능성	없 음	있 음
경제성	원자로본체중량 (100만kW급)	2-3만톤	천톤
	건설단가 대비	2	1
	발전단가 대비	1.3	1
종합평가		핵연료자원, 핵반응이용률, 환경과 안전면 에서 우위. 기술적 타당성이 실증되어 있 지않고 초기원전에 막대한 투자	현재로는 경제성 우위에 있으나 안전 규제 강화로 경제성 감소. 한정된 연료자원, 고준위 핵물질 처리, 임 계사고위험, 핵분쟁 유발 가능

업들의 핵융합개발 참여현황을 조사하여 참여기술의 종류와 산업체의 역할을 알아본다.

핵융합 발전에 대한 평가

핵반응에 의해서 발생하는 에너지와 방사선을 평화적으로 이용하는 기술이 원자력공학과 산

업의 주요 대상이다. 이중 원자력 이용이 시작되고 나서 오늘날까지 원자력개발이라는 것은 기본적으로 에너지를 이용하는 발전 기술에 치우쳐 왔고 부분적으로 방사성물질의 응용이 다른 산업과 기초과학 쪽에 이용되어 왔다.

반응 전후의 질량결손에 의한 핵에너지의 방출이라는 근본을

같이 하면서도, 핵연료의 종류와 반응을 실현시키는 방법에 따라 핵융합과 핵분열발전은 처음부터 기술개발이 갈라졌다. 출발 시점은 핵분열 쪽이 5년 남짓 앞섰다. 핵발전 상용화도 개발 시작후 10여년만에 핵분열쪽이 먼저 성공하여 1992년 말 현재 세계적으로 핵분열 발전소 421기가 28개국에

서 운전중에 있다. 반면 개발 시작 후 40년이 지난 핵융합발전은 이제야 기술적 실증을 준비하는 단계로 뒤쳐져 있다. 핵융합 발전로의 상용화를 가정했을 때 가장 유력한 핵융합로 후보인 중수소, 삼중수소 사용의 토카막 핵융합로를 현 핵분열 발전의 주종을 이루고 있는 경수로와 비교하여 차이점을 <표 1>에서 보여주고 있다. 한마디로 핵융합발전이 핵연료, 반응 에너지 및 중성자 이용률, 환경 및 안전성 면에서는 유리하지만 경제성에 있어서 아직 현 기술수준 선상에서는 핵분열에 비해 불리하다고 말할 수 있다.

의심할 수 없는 궁극의 에너지원

핵융합 발전의 가장 큰 장점으로 내세우는 지역편중 없는 무진장의 연료자원으로 지상에서 궁극의 에너지원이 된다는 주장에 반론이 없지 않다. 중수소는 어디에나 있는 바닷물의 0.015%를 차지하고 있어 의심치 않으나, D-T 핵융합에서 삼중수소를 증식할 리튬(Li) 자원양에 문제를 제기하는 사람이 있다.

역시 바다물 중 0.17ppm으로 존재하고 있는 저품위 리튬을 제외하더라도 지하원에서만 얻는 것으로도 수만년 동안 핵융합 발전에는 걱정이 없다. 고속증식로를 사용하더라도 수백년을 넘기 기 어려운 한정된 우라늄 자원에

의존하는 핵분열 경우와는 견줄 수 없다. 초기 D-T 핵융합로 사용동안 중수소 만을 연료로 쓰는 D-D 핵융합로를 개발하면 궁극적으로 에너지 문제는 해결되는 셈이다.

핵반응 이용의 우위성

한번의 핵반응에서 얻을 수 있는 에너지는 17.6MeV의 핵융합에 비해 약 200MeV의 핵분열이 훨씬 많아 보인다. 그러나 수소동위원소와 우라늄의 질량차를 생각한다면 한번 반응에 소모되는 핵연료는 핵분열이 47배나 무겁다. 따라서 1g의 같은 양의 핵연료를 사용하였을 때 오히려 핵융합쪽이 약 4.4배의 에너지를 더 얻을 수 있다.

어떤 사람은 핵분열반응을 일으키기 위해서는 사실상 입력이 필요 없으나, 핵융합 반응에는 점화온도까지 핵연료 플라즈마를 가열하기 위해서 많은 에너지를 투입하지 않으면 안되기 때문에 비효율적이라고 말한다. 이는 과학적 실증을 보이는 임계로를 두고 하는 말이나, 공학실증로 또는 상업로에서는 핵융합 생성물인 알파입자의 자체가열에 의해서 운전되는 자기점화로 더 이상 외부에서의 에너지 입력이 필요없게 된다.

성냥불로 쉽게 붙어 붙는 종이나 장작불보다, 번개탄이나 별도 점화장치를 사용해야만 어렵게

붙이 붙지만 일단 점화된 후에는 연탄이나 용광로가 화력이 더 강하고 오래 지속된다는 사실을 이해하지 못하는 것 같은 발언이다.

양쪽 핵반응에서는 고속의 중성자들이 각각 방출되기 때문에 발전뿐만 아니라 고에너지 중성자의 핵반응을 이용한 다양한 산업적 응용이 가능하다. 핵융합은 80%의 에너지를 14.1MeV의 중성자가 가지고 나오는 반면, 핵분열에서는 평균 2.5개의 중성자들이 방출되면서 전체 핵분열 에너지의 약 2.5%에 해당하는 5MeV 정도를 가지고 나온다.

핵융합 반응물이 훨씬 크기 때문에 시간당 중성자 발생 중량도 핵분열 경우보다 4배 이상이 많은 2.15g이다. 이 고속중성자들은 블랭킷 내 물질들과의 핵반응에 따른 중성자 증배에 의해 1.4~1.8배 늘어나고, 연료로 쓰일 삼중수소의 증식 반응을 증식률 1.05 정도로 유지시킬 때 시간당 2.3g 정도 소모되어 실질적으로 한시간 동안 0.7~1.6g의 잉여중성자가 핵융합로에서는 생산된다.

반면에 핵분열 연쇄반응을 지속시키기 위해서는 시간당 0.4g의 중성자가 소모됨으로써 핵분열 원자로에서는 실질적으로 한시간에 0.1g 정도의 잉여중성자밖에 얻을 수 없다. 따라서 핵융합로에서 나오는 훨씬 에너지가 크고 양이 많은 잉여중성자의 여러가지 핵반응 특성을 활용하면 다양한 산업적 응용이 가능하

로 발전로로만 고집하여 핵융합 개발을 추진할 필요는 없다. 이러한 잉여중성자를 이용하는 구체적인 활용기술은 다음절에서 다시 논의하겠다.

방사선환경과 안전성에서 월등

방사성 물질에 의한 환경오염과 여러가지 핵사고와 관련된 안전성 면에서 핵융합은 단연 핵분열에 비해 걱정할 필요가 없는 에너지이다. D-T 핵융합로에는 연료로 쓰는 삼중수소, 융합반응에서 나오는 고속중성자와 이에 의한 노재료들의 방사화가 주요 방사성 오염원이 된다. 삼중수소는 반감기가 13년 정도인 저준위 방사성물질이고 물질 중의 침투성이 강해 누설관리가 곤란한 점이 있기는 하나, 고준위 핵분열 폐기물에 비하면 안심할 수준이며, 연료 순환계의 운전과 기기개선으로 블랭킷 등의 노구조물 내 인벤토리를 줄일 수 있다.

핵분열로에서 보다 오히려 많이 발생될 방사화 물질은 대부분 노재료 금속 내에 갇혀 있어 교체 또는 폐로시에 적절히 처리하면 주변 환경에 흩어질 염려는 없다. 따라서 D-T 핵융합로가 방사능 면에서 아주 깨끗하다고 할 수 없으나 고준위의 핵분열 생성물이나 악티노이드 핵종은 발생하지 않고, D-T 다음 세대로 이어질 D-D 융합로에서는 삼중수소와 고속 중성자에 의한

방사능 수준은 급격히 감소하여 거의 깨끗하다고 할 수 있다.

가장 이상적인 D-3He 핵융합로가 최종 단계에서 개발되면 삼중수소나 고속중성자가 융합반응에 전혀 개입치 않아 완전히 깨끗한 에너지를 얻을 수 있게 된다.

발전소 운전 중 돌발적인 사고나 실수로 노심이 녹아나는 용융사고의 위험은 핵융합로에서는 절대 일어나지 않는 고유한 안전성을 지니고 있다. 필요한 만큼 소량의 핵융합 연료를 연속적으로 주입하면서 운전하기 때문에 노심에 수십 톤의 원자연료 집합체를 장전하여 운전하는 경수로에서 염려되는 임계 사고가 일어날 수가 없다.

또한 핵융합로에서는 핵무기를 제조할 수 있는 부산물이 나오지 않아 핵분쟁이나 핵사찰과 같은 국제적인 규제와 감시를 받을 필요도 없다. 핵연료 농축과 재처리 과정에서 원폭제조에 필요한 원료를 얻어낼 수 있는 핵분열발전에서 끊임없이 일어나는 국제적 마찰이 핵융합발전에서는 사라질 것이다.

고농축의 핵분열성 물질만 확보되면 어렵지 않게 원자폭탄을 제조할 수 있는 데 비해, 핵융합로에서 사용하는 중수소와 삼중수소 연료를 확보하였다 해서 수소폭탄을 생산할 수 있는 것은 아니다. 기폭제로써 원폭이 있어야만 수폭을 제조할 수 있는 것

이다.

위와 같은 환경과 안전성 측면에서 두드러진 장점을 가지고 있어서, 일반 국민들의 핵에 대한 거부감이 완화되고 핵융합로가 높은 사회적 수용성을 얻게 될 것이다. 이에 따라 발전소 부지의 확보가 용이해지고 대도시 근처에 건설하여 송전에 따르는 비용과 전력 손실을 획기적으로 낮출 수 있다.

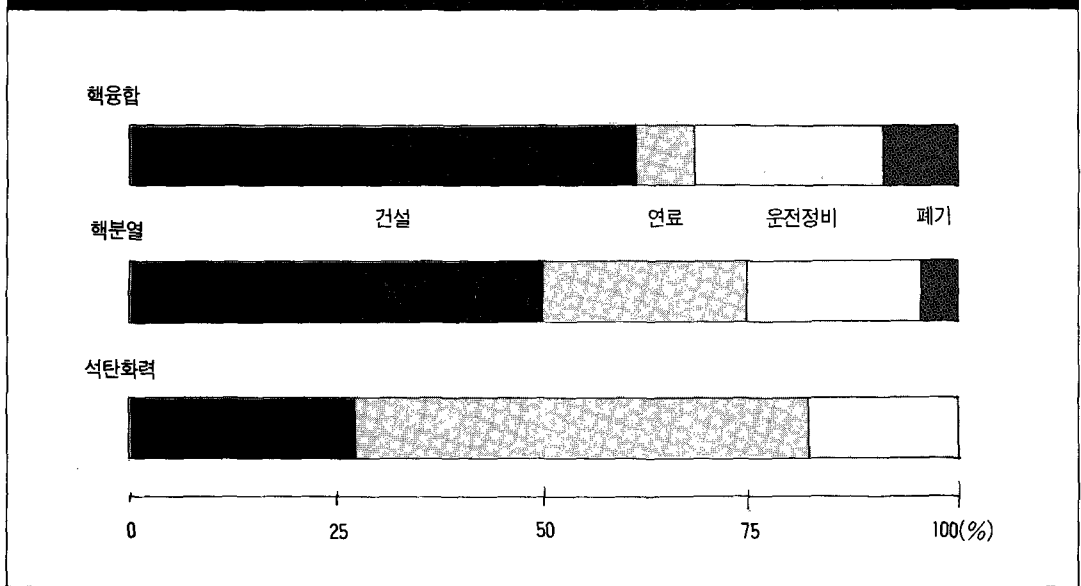
경제성은 미지수

아직 공학실험로도 건설되지 않은 단계에서 경제성을 정확히 평가하기는 곤란하고 시기상조인 듯 보인다. 그러나 개발 당시의 낙관적인 경제성 예측이 개발 최종단계에서 경제성 성립에 차질이 생겨 개발된 기술의 실용화를 무산시키는 어리석음을 범하지 말아야 한다. 평가의 기준으로 여러가지를 고려할 수 있으나, 발전소 건설에 따른 물량을 토대로 건설비와 연료, 운전, 수리정비 등에 소모되는 발전비를 다른 에너지원과 비교하면 어느 정도 경제성을 판단할 수 있다.

먼저 건설비, 연료비, 운전비, 폐기비용이 핵융합, 핵분열, 석탄 화력 발전에서 각각 차지하는 비율을 <그림 1>에서 살펴보자.

핵융합발전은 건설비의 부담이 가장 커서 초기 투자비용이 높다는 것을 알 수 있다. 연료비는 다른 발전소에 비해 단연 유리하여

그림 1. 발전소 종류에 따른 전력 생산비용 배분



우리나라 화석연료 가격이 상승하면 경제적으로 핵융합이 매우 유리한 에너지원으로 더욱 각광 받게 될 것이다.

토카막 핵융합로를 사용하여 상업발전을 하려면 그 규모가 경수로보다 훨씬 커져야한다는 불리한 점을 가지고 있다. 원자로 본체의 규모는 중량비가 2~4만톤 대 천톤 정도로 현격한 차이가 나지만, 비슷한 만톤 규모의 냉각계통과 2~3만톤 정도의 터어빈 등 주변설비 규모가 같아 결과적으로 핵융합 발전소 물량은 5~7만톤, 경수로 발전소의 경우는 3~4만톤이 된다.

이에 따라 각 발전소 물당량 단가를 고려하여 건설비를 대략 산정하면 D-T 토카막로는 경수

로에 비해 2배 정도 더 들 가능성이 있다. 핵융합 연료비는 발전비용의 10% 전후로 무시할 수 없는 값이고, 블랭킷은 정기적으로 교환할 필요가 있어 핵융합로의 발전 비용은 경수로의 약 1.3배로 예측된다. 현재의 기술 연장 상에서 100만kW급 토카막 핵융합로의 발전 비용을 경수로보다 낮추기는 어렵지만, 핵융합로 개발과 더불어 나타날 여러가지 기술적 진전을 고려하면 경제성의 개선이 이루어질 가망이 많다.

1988년 미국에서 발행된 「자기 핵융합 에너지의 환경, 안전성, 경제성에 관한 Senior 위원회의 보고서」에는 2015년 이후의 여러가지 토카막 및 RFP 핵융합로 상황에 대해 전망하고 가압경수

로, 고속중식로, 고온가스로 등의 핵분열로와 비교하였다. 이 보고서는 놀랍게도 RFP와 같은 핵융합로는 경수로에 비해 경제성이 많이 뒤떨어지지 않아, 가압경수로보다 10%정도 많은 발전 비용이 들 뿐이라고 말하고 있다. 종합적으로 핵융합로는 환경과 안전성에서 유리하고 경제성에서도 핵분열로들에 결코 뒤지지 않는다는 결론을 내리고 있다.

핵융합의 발전 외 응용기술

핵융합로는 핵반응 과정에서 고에너지의 입자와 열을 방출하여, 핵연료들이 초고온에서 플라즈마 상태로 되어있다. 핵융합로에서 방출되는 이들 중성자와 열

표2. 핵융합의 과학기술 응용분야

이용대상	응용 분야
중성자	· 핵융합· 핵분열 혼성로 (핵연료/전력 생산형) · 방사성동위원소 생산 · 방사성폐기물 소멸처리 · 신소재개발/표면처리
열	· 합성연료 생산 · 공업용 열생산
플라즈마	· 우주선 추진 · 직접 에너지 변환 · 저온 플라즈마 · 산업적 응용

과 플라즈마 입자들을 전력 생산 이외에 다른 방면으로 유효하게 활용할 수 있다면 핵융합개발의 부가가치를 더욱 높일 수 있을 것이다. 현재 연구되고 있는 응용 가능한 분야를 <표 2>에 수록하였다. 각 활용 분야에 따른 기술 내용을 간략히 소개하면 다음과 같다.

중성자 이용기술

원자연료 및 전력생산

앞서 살펴 본 바와 같이 핵융합로는 아주 높은 에너지를 가진 많은 수의 잉여 중성자를 방출하기 때문에 핵분열 연료와 전력을 동시에 생산하는 원자로로 개발할 수 있다. 즉, 블랭킷에 자연광

의 주성분인 ^{238}U 이나 ^{232}Th 를 장전하고 고속 중성자에 의해 핵분열성 물질인 ^{239}Pu 나 ^{233}U 로 변환시켜 핵분열 발전연료로 사용하여 지하자원의 이용률을 높일 수 있는 원자연료 생산형이 그 하나이다.

100만kW급 혼성로 1기가 핵분열 발전로 5~10기의 원자연료를 공급할 수 있는 능력을 가지고 있어서 현 원자력발전의 중심인 경수로와의 공존을 통한 실용화를 노린 것이다.

방사성 동위원소 생산

블랭킷 내에서 고속 중성자 조사에 의해 ^{60}Co , ^{99}Mo , ^{103}Rh , ^{137}Cs 등의 방사성 동위원소를 신속하게 다량으로 생산할 수 있어서 현재의 동위원소 가격을 반이하로 하락시킬 수 있다. ^{60}Co , ^{137}Cs 같은 감마선원은 식품처리, 의료기기 살균소독, 식수정화, 하수처리, 질병 진단 및 치료 등에 활용된다.

고준위 방사성폐기물 소멸처리

핵분열발전소의 사용후연료 속에 포함되어 있는 반감기가 긴 초우라늄을 고속중성자로 반감기가 짧은 원자로 핵변환시켜 고준위 방사성폐기물을 처리할 수 있다. 핵융합은 다량의 고속 중성자를 방출하므로 가속기나 고속중성자로 보다 더 효율적인 폐기물 처리 능력을 가지고 있다.

신소재 개발 및 표면처리

고속 중성자 조사에 의해 화학 촉매, 여과막, 다공성차폐재, 비정질재료, 초전도체, 희귀금속 등의 생산이 가능하다. 초경합금 성분으로 쓰이는 오스미움이나 전기집점으로 사용되는 백금계열의 로듐 등 희귀금속은 공급 부족으로 매우 고가로 거래되고 있다. 핵융합 플라즈마에서 방사광보다 고출력의 방사선을 얻을 수 있어서 재료 표면처리에 또한 적합하다.

열 이용기술

합성연료 생산

블랭킷에서 1000°C 이상의 고온을 얻어 물이나 기화 석탄을 열분해시켜 수소와 같은 합성연료를 생산해 낼 수 있다. 수소는 환경면에서 매우 주목을 끄는 새로운 연료이다. 물로부터 얻으므로 채광이 필요없고, 연소 후에 물로 변해 공해가 전혀 없으며, 수소연료 자동차개발, 화학적 합성 등에 널리 사용된다. 현 수소의 공급원인 석유자원이 메말라감에 따라 다음 세기에는 핵융합에 의한 수소 합성에 더욱 기대를 걸게한다.

공업열 생산 및 지역난방

핵융합 에너지로 600°C 정도의 증기를 생산하여 공업용 열원으로 사용할 수 있고, 핵융합로를 대도시 근처에 건설할 수 있어서

200°C 정도의 폐열로 지역 난방이 가능하다.

플라즈마 이용

우주선 추진

핵융합 반응에서 나오는 중성자로 우주선의 전력을 생산하고, 이온들은 우주선 추진에 사용할 수 있다. 이때의 추진력은 보통 화학 추진제 로켓의 100배가 넘어 우주선을 소형 경량화 시킬 수 있다. 예를 들면 10만kW급 핵융합원으로 5년간 항해에 필요한 D-T 연료는 200kg에 지나지 않아 특히 장거리 우주여행에 플라즈마 추진 우주선이 필수적이다.

직접에너지 변환

핵융합로에서 나오는 물질은 전기를 띤 입자인 플라즈마이기 때문에 자장을 걸어주면 직접 전기를 얻을 수 있어 터빈발전기의 과정을 거치지 않고 높은 열효율로 직접발전을 할 수 있다. 자기미러형의 핵융합로가 이에 적합하며 핵융합발전과 직접발전으로 동시에 운전하면 60~70%에 달하는 열효율로 전기를 얻을 수 있다.

저온 플라즈마의 산업적 응용

핵융합 플라즈마는 섭씨 1억도 이상의 초고온으로 완전 전리된 기체 상태이나, 글로우나 아크 방전처럼 수천도에서 수만도에 이

르는 온도를 유지하며 부분 전리된 저온 플라즈마도 있다. 이미 우리 생활 주변에서 사용하고 있는 형광등, 네온사인, 전자광, 레이저, 용접기, 코팅장치 등이 바로 이러한 저온 플라즈마 응용장치들이다.

핵융합로 상용화 개발이 지연되면서 최근 핵융합계 일부에서 저온 플라즈마의 산업적 응용에 관심을 돌리기 시작하였다. 특히 최첨단 산업기술에서 필요로 하는 소재나 재료가 다양해지고 특수 성질을 요구하면서 플라즈마 기술에서 해결책을 찾으려는 기술이 많이 등장하였다. 재래식의 열원이나 반응로에서 얻을 수 없는 온도와 화학적 반응 조건을 플라즈마가 제공함으로써, 재료나 신소재 산업에서 플라즈마 처리기술은 최근 수년 사이에 크게 각광을 받으며 다양한 기술개발과 함께 산업현장에서 널리 활용되고 있다.

대표적인 응용 예로는 각종 기계부품 및 공구의 내부식, 내열, 내마모, 초경 표면 코팅, 반도체 식각, 세라믹 미세분말합성, 초전도체 및 다이아몬드 합성, 각종 철강류 생산 및 공해물질 분해, 각종 소재의 표면개질, 레이저 발전 및 증폭 등 여러분야로 확산되어 가고 있다.

종합과학인 거대첨단극한기술

1950년대 초 핵융합기술개발

초창기에는 그 당시까지 연구되어 왔던 천체플라즈마, 대기플라즈마, 전기방전을 이용한 실험실적 저온플라즈마를 기반으로 해서 고온 핵융합 플라즈마에 관한 물리 연구가 중심이었다. 연구가 진행됨에 따라 핵융합개발 대상이 다양하고 복잡해지자 화학, 전기, 전자, 기계, 재료, 시스템 공학 등 인접 학문분야와 공학이 종합적으로 참여하게 되었다.

최근에 이르러 대형 실험로를 통해 임계조건을 달성하는 과학적 실증을 끝내고 있다. 곧 다음단계에서 자기점화로 장시간 연소를 할 수 있는 공학 실험로를 대상으로 한 공학적 개발을 본격적으로 시작하여 기술 실증을 보일 준비를 하고 있는 이행단계에 와 있다. 따라서 개발 대상 장치가 복잡 대형화 되고, 구체성을 가지는 비약적인 고도의 기술 수준을 요구함에 따라 종합 기술을 갖고 있는 산업계의 적극적인 참여를 필요로 하고 이에 대한 의존도가 증대되고 있다.

핵융합로 개발과 직접 관련된 기술의 특징은 초고온, 초고진공, 극저온, 초강자장, 초강도, 초대형, 초고속 등 수 없는 극한기술이 얽혀 여러분야의 과학기술과 산업의 뒷받침 없이는 해낼 수 없는 거대첨단기술로 종합공학의 극치라고 할 수 있다. 일본 원자력산업회의가 1987년에 조사한 핵융합 기술과 관련된 산업 기술을 <표 3>에 열거하여 놓았다.

특집/핵융합개발을 진단한다

표3. 핵융합 관련 기술과 그 파급효과

기술 분야	핵융합 기술	관련 산업기술	파급 기술	파급강도
중성자공학 및 핵융합로공학	핵융합 Neutronics, 핵융합 실험로	중성자원, Blanket, 방사선상해 해석, 핵 Data	핵폐기물소멸처리, 동위원소 생산, 핵연료생산혼성로	+12
고진공	핵융합로 진공용기, 초고진공 배기장치, 누설 탐지 기술	대형 진공용기, 초고진공용 펌프, 자동진공누설검출	고에너지 가속기 및 일반진공 장치	+12
초전도전자석	초전도 TF 전자석, 초전도 PF 전자석, 대형 전자석 코일	대전류초전도코일, 초전도체재료, 대형코일정밀성형기술	초전도 에너지 저장시스템, 자기부상열차개발	+3
극저온	He 액화 냉동계, 초전도코일냉각장치, NBI가열장치 진공계	터보압축기, 터빈 팽창기, 극저온 감압펌프, 단열기술 Cryostat	초전도 에너지 저장시스템, 자기부상열차개발	+2
고에너지 빔	NBI 가열장치	대전류 이온빔, 3차원 이온빔 인출 코드	위성제도수정이온엔진, 이온빔 링장치	+10
고주파에너지	고주파 가열장치	대전력 고주파 증폭기술, Klystron Gyrotron	방송통신용대전력 고주파증폭장치	-4
전력전자	융합로 접지계, 전자석 코일 전원, Flywheel 발전기, 변압기	접지계 설계 기술, 직류 차단기, 전력용 반도체, 초대형 Flywheel	직류송전시스템	+5
계측제어	플라즈마진단, 극저온 온도 계측, 분출물 제어, 운전 제어, Digital 제어, 전체통제어시스템	분광분석 기술, 레이저탐침계측법, 극저온 온도계, 광섬유 및 통신, 고속연산처리장치	분광계측장치, 고효율 레이저, 반도체 식각	+4
Computer 통신	Data 처리장치, 초고속연산처리장치, Computer Software, Data 통신 시스템	CAMAC 시스템, 초고속 Data기록계, Supercomputer 이용기술, 유체해석 Simulation, 컴퓨터간 통신, 광통신 시스템	정보처리시스템, Supercomputer	-8
재료/ 신소재	본체지지 비자성 구조재, 제1벽, Blanket, Limiter, Divertor 판, 초전도전자석, 거대 코일	비자성 구조용재, 저유도 방사화 재료, W-Cu 집합재, 내방사성 복합재, 극저온 고강도 구조재, 고온절연재	각종 공구, 장식품, MMD 발전전극	+7
생산 가공	핵융합로 접합, 대형 정밀 가공, 제1벽재료 및 검사	전자빔, 레이저 용접, 세라믹 코팅, X-선 CT Scanning	대형정밀용접	+14
시스템 공학	전원 시스템 해석, 전자장 해석	과도현상 해석 Program, 과전류해석, 3차원 자장해석	상용전력 과도현상 해석	-1
보수 점검	In-Situ 코팅장치, 융합로내 보수점검 계통, 원격 측정장치, 분해수리이동시스템	진공용기내 Manipulator, 중량물원격이동장치, Robot 시스템, Interface, 원격 절단장치	터빈 건물내 점검, 원격자동 보수점검	+5
가 타	삼중수소안전계, 연료 정제장치, 펠렛입사장치	삼중수소 모터, Pd합금막, 고속연료 가속기술		-1

* 파급강도는 핵융합이 타 분야에서 기술파급을 미칠 때 +, 타 분야에서 핵융합으로 파급효과가 나타날 때 -로 잡아 영향력 정도를 수치로 나타낸 것임(전체 평균파급강도는 +4)

핵융합 직접기술의 파급효과

위와같은 핵융합 직접기술은 단순히 기초과학과 공학의 범위를 넘어 다른 응용기술분야와 산업에까지 그 파급효과가 급속하게 확산되고 있다. 이 결과, 넓은 범위에 걸쳐 기존 산업에 활력을 불어넣고 각종 신기술 개발에 이바지하고 있다. <표 3>에 핵융합 기술과 상호 영향력을 미치고 있는 대표적인 파급기술을 열거하여 놓았고, 핵융합과 타산업 간의 기술 파급정도를 상대적인 강도로 표시하였다.

일본원자력산업회의에서 조사한 <표 3>에 나타난 파급기술의 수는 103건으로, 핵융합→타분야가 40%, 타분야→핵융합이 19%, 핵융합↔타분야가 41%의 비율로 보고되었다. 이들 기술간에서 서로 영향력을 미치는 정도에 따라 파급강도로 환산해서 평가하여 보면, 핵융합이 타분야에 주는 파급효과가 더 우세한 것으로 결과가 나왔다. 이중 가장 파급효과가 큰 분야는 에너지 분야이고 전자, 일반산업, 가속기, 정보, 교통 등의 분야들도 비교적 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

산업체의 참여와 역할

원자력개발사업은 기술의 특성상 초기에는 대학을 중심으로 한 여러가지 기초연구가 선행되면서

그중 가능성 있는 기술을 대상으로 공공 연구기관에서 집중적인 심화 연구 개발이 진행된다. 어느 정도 기술적 실증단계에 접어들면 본격적으로 관련 산업체와 기업들의 활동과 역할이 시작된다.

대형토카막 임계로가 핵융합 개발의 중심이 되어왔던 그동안의 과학적 실증 동안에는 대학과 전문 핵융합연구소에서 설계한 각종 핵융합 장치의 설비들을 수주받아 제작하고 필요 장비와 기기를 납품하는 소극적이며 자체 개발 능력이 없는 상태로 산업체 참여가 이루어져왔다.

물론 미국의 GA(General Atomic)처럼 세계 유수의 공공연구소와 경쟁하면서 독자적인 핵융합 연구개발을 수행하여 팔목할 만한 개발 실적을 내놓은 기업도 있다. 일련의 Doublet-III 토카막 장치 개발을 수행하면서 핵융합로 경제성의 척도가 되는 β 값의 최고치를 얻는 실험에 성공하기도 하고, 플라스마 밀폐시간을 획기적으로 개선하는 H-mode 현상을 확인하는 실험 업적을 GA는 갖고 있다. 1991년에 IAEA에서 내놓은 「제어열핵융합 연구의 세계적인 활동조사」라는, 학술지 Nuclear Fusion 특별 증보판에 의하면 25개 사기업이 핵융합 개발에 적극적으로 참여하고 있는 것으로 나타났다.

조사시기가 대형 토카막에 의한 임계실험이 아직 끝나지 않은 1988년이고 부분적으로 참여하고

있던 중소기업 및 협력업체들이 제외된 것이긴 하지만, 이 숫자는 조사된 대학 165개소와 공공연구기관 131개소와 비교가 된다.

기업 참여 현황

그러나 세계 3대 대형 토카막에서 임계조건 달성을 예고하는 실험결과들이 발표되고, IAEA의 주선으로 국제공동의 ITER 개발이 본 궤도에 진입하자 각국의 중소산업체와 대기업의 관심이 증대되면서 공학실험로 개발 단계에서 적극적인 참여 움직임을 보이고 있다. 단순한 장치 및 설비의 대리 제작, 관련 장비와 기기의 납품에서 벗어나, ITER 또는 자국 공학실험로의 개념 설계에도 참여하고 독자적으로 핵융합로 내의 첨단 장비와 소재 개발에 착수하고 있다.

작년 10월 미국 에너지부가 General Dynamics와 Westinghouse를 초전도 자석 개발의 일차적인 산업도급자로 선정한 예가 그 하나이다.

특히 미국과 일본의 산업체는 개별적인 핵융합 개발 참여뿐만 아니라 조직화된 단체를 결성하여 기술개발 추진을 여러가지 형태로 돕고 있다. 미국에는 비영리 교육과학연구재단인 핵융합전력 협회(Fusion Power Associates)에 14개 회원 기업과 26개 중소산업체가 가입하여 1989년부터 핵융합 개발 추진활동을 더욱 강

특집/핵융합개발을 진단한다

화하고 있다. 이 협회에 가입된 대표적인 기업명단은 <표 4>와 같다.

FPA는 핵융합을 사회적, 환경적, 경제적으로 가장 적합한 에너지 지원으로 규정하고 이의 적극적인 수용과 조기 기술 개발을 지원할 목적으로 국회 청문회 증언, 국회의원들과의 회합, DOE에 정보제공 및 설명, 정당대회 참석, 정책담당자와 일반대중에 대한 홍보와 교육, 매스컴을 통한 회견과 선전, 각종 과학기술회의에서

의 기조연설 등을 통해서 정책적 지원과 국민적 합의를 유도하고 있다. 또한 각종 소식과 책자의 출판, 국제학술회의 개최, 핵융합로 설계를 중심으로한 각종 연구 개발과제 수행, 핵융합 개발 유공자에 대한 포상 등으로 핵융합 추진 여건과 분위기 개선에 노력하고 있다.

일본의 경우는 이미 앞서 소개한 바 있는 원자력산업회의의 활동에서 핵융합에 대한 두드러진 관심을 드러내고 있다. 1987년에

일본 국내 산업체를 대상으로 조사 발표된 핵융합 파급효과에 미국, 유럽공동체, 옛 소련도 큰 관심을 나타내고 있고, 다른 산업에 큰 영향을 미치는 기술이 많아 세계의 주목을 받고 있다.

원자력산업에서도 균형있는 투자와 장기적인 전력확보전략에서 주도권을 차지하기 위한 사전 포석으로 현존 원자력발전 관련산업에만 치우치지 않고 핵융합에 대한 대책을 제시하고 있다. 일본 원자력산업회의는 1992년 10월에도 「핵융합에 있어서 산업계의 역할과 입장」이라는 보고서를 작성 발표하였다.

ITER의 개발 참여를 중심으로 한 일본의 「제3단계 핵융합 연구 개발 기본계획」을 바탕으로 산업계의 역할과 입장을 밝히고 있다. 또한 일본에는 순수 학술단체인 「플라즈마-핵융합학회」에 1993년 5월 말 현재 96개의 산업체가 찬

표4. 미국 핵융합전력협회(FPA)에 가입된 주요 기업

Bachtel Group	Ontario Hydro
Combustion Engineering	W. J. Schafer Associates
Ebasco Services	Science Application International
General Atomics	Stone and Webster Engineering
Grumman Aerospace Corp.	Spectra Technology
KMS Fusion	Varian Associates
McDonnell Douglas	Westinghouse Electric Corp.

표5. 일본 주요 대기업의 핵융합 개발 참여 역할

기업명	핵융합 기술개발 내용 및 실적
Hitachi(日立製作所)	JT-60U 노벽타일 및 다이버터판, 구조재 개발, LCT용 토로이달 코일 개발, 중성빔 입사 장치(NBI), 고주파 플라즈마 전류구동장치, 노내 구조물 자동원격조작, Blanket 개발, 자체 토카막 설비 HT-2(0.41/0.1m, 2.5T), 플라즈마 형상 실시간 표시장치, JT-60U 전계통 제어장치 고기능화, ITER, FER, SSTR 개념설계, LHD 설계제작
Kawasaki(川崎重工業)	Blanket 기술 및 증식재 개발, 플라즈마 대향 기기 및 조작 장치, 벽재료 개발
Mitsubishi(三菱重工業, 三菱原子力工業, 三菱電機)	JT-60 pellet 입사장치, 노벽재료 및 다이버터, LHD용 초전도 Helicoid 코일, 대출력 Gyrotron, 고열부하 실험설비, Blanket 증식재시험시설, 삼중수소 정제장치 및 취급기술
Toshiba(東芝)	DIII-D, WT-III 진공용기, 고열부하 구조재, 강제냉각 초전도코일, 대전력고주파출력 Gyrotron, 플라즈마대향기기 교환원격조정장치, 핵융합 연료 순환 시스템

조직원으로 가입하여 산학협동에 적극성을 보이고 있다.

반면 유럽의 산업체들은 조직적인 단체를 결성하여 핵융합을 추진하는 움직임은 보이지 않지만, 개별적인 기업 규모로 유럽쪽 핵융합 장치실험에 기여하는 정도는 미국과 일본이나 별 차이가 없다.

실질적인 핵융합 기술 개발이 전문한 우리나라에서는 산업체의 참여란 언급의 대상이 될 수 없다. 일부 대학과 연구소에서 그동안 진행된 소형 핵융합 실험은 장치를 자체 제작하여 해결하거나 미국에서 기증을 받아 설치하였으며, 일부 전원과 계측장비도 해외 구입에 의존할 수 밖에 없었다.

2001년까지 진행될 한국원자력연구소의 중장기 원자력기술개발 사업에는 중형 토카막 개발이 포함되어 있어 이 기간 중 국내 산업체의 부분적인 참여를 기대해 보고 싶다.

산업체 역할의 기대

1980년대 말까지 핵융합의 과학적 실증실험이 진행되던 기간에 산업체들이 참여하여 맡은 역할은 진공용기를 비롯한 전자석, 연료주입, 보조가열 등과 관련된 장치 제작이 주요 내용이었다. 아울러 이런 장치운전과 가동에 필요한 전원, 진공계통, 고주파 시설, 제어장치의 제공과 플라즈마

진단에 필요한 계측장비와 기기의 판매가 주류를 이루었다. 1990년대에 들어서서 공학적 실증 목적의 공학실험로 개발 계획과 더불어 기업들의 참여 형태에도 변화가 일어났다. 공학로에서 더욱 까다로워질 노재료에 대한 소재개발, 초전도 전자석 개발, 블랭킷 개발, 삼중수소 취급기술, 공학로 설계활동 등에 적극적으로 참여를 시작하였다.

위와 같은 산업체의 참여 역할을 일본의 대표적인 4대기업의 핵융합 기술개발 내용이 기술된 <표 5>에서 살펴보면 더욱 잘 이해할 수 있다.

산업체가 핵융합기술개발에 참여하여 그 역할을 계속적으로 안정되게 수행하기 위해서는 자체의 기술개발 능력을 배양해야할 뿐만 아니라 연구개발 과정에서 얻어진 첨단기술 개발 성과를 다른 분야에 활용하여 부수적인 파급 이득을 확대해야 한다. 장치의 설계, 제작, 실험, 신기술 도입 등의 협력은 산업계의 본래적 사명으로, 이에 필요한 기술자의 확보와 계획적 양성을 산업계의 역할로 일본원자력산업회의의 92년 보고서는 지적하고 있다.

또한 이 보고서는 산업계가 국가 핵융합개발계획에서 요청받고 있는 부분을 명확히 이해할 수 있도록 대학, 연구기관, 산업계의 역할 분담을 분명히 하여 국제협력과 국내추진을 구분할 것을 요구하고, 기술자 보호육성과 소

설비의 효율적 투입을 위해 장기적이고 연속성있는 계획으로, 안정적으로 확보된 국가 예산으로 추진되어야 한다고 요망하고 있다.

아직까지는 핵융합기술에 대한 구체적인 개발계획을 갖고 있지 않은 우리나라가 장차 국책사업으로 핵융합개발정책을 수립할 때 위 보고서의 지적은 정부, 연구계 및 산업계 모두에게 시사하는 바가 크다. 핵분열 발전에 의존한 전력수급과 당면문제 해결에 박찬 우리나라 정부와 원자력 산업계에서 장기적인 에너지 전력과 환경보전을 위해 핵융합개발이 필수적이라는 목소리는 아직 들리지 않는다.

일반 국민은 물론 과학기술계에서도 핵융합은 우리에게서 아득한 꿈을 쫓는 극한기술이며 현실적인 에너지문제 해결의 하나라는 인식이 보편화되어 있지 않다. 그러나 현재의 우리나라 경제적인 여력과 산업의 잠재력은 핵융합기술개발을 단계적으로 시작할 수 있는 충분한 여건과 능력을 갖추고 있다. 또다시 핵분열 발전에서와 같은 국내에서의 시행착오가 반복되지 않도록 하고, 선진국을 지향하는 국내 산업기술계의 자존심을 위해서도 우리 산업계가 핵융합 기술 개발에 참여하여 활력을 찾는 그날이 하루 빨리 오기를 기대해 본다.