



경수로 핵연료 가공 국제 시장의 공급 전망

이 익 환

KISTI ReSEAT 전문연구위원

서론

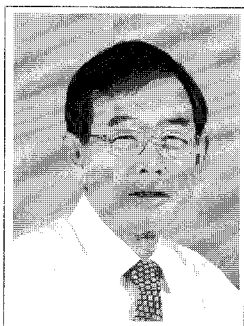
신규 원전을 건설하고자 하는 국가로서는 핵연료의 안정적인 공급을 위해 자국에 핵연료 공장 시설을 설치하려고 한다. 국제원자력기구(IAEA)가 제의하여 상당히 설득력을 얻고 있는 ‘핵연료은행’ 설치 개념에서 보면 핵연료를 공급받으려 할 경우 해당 정부가 핵연료의 사용 목적에 맞도록 사용하겠다는 것을 우선 보증하도록 한다는 것이다.

이는 핵확산 방지를 목적으로 하는 것이지만 자칫하면 핵연료 수요국은 공급국으로부터 규제를 받게 되는 형태가 될 수 있어 핵연료은행이 실현될 지 두고 볼 일이다. 물론 핵연료은행은 핵연료 가공 분야뿐 아니라 핵연료 주기의 전 과정에 대해 같은 맥락의 절차를 이행하게 될 것이다.

현재 세계의 운전 중인 기존 핵연료 가공 공장은 이미 많이 남아 있고 생산 시스템이 현대화 되지 않은 환경에서 국제 핵연료 수급 측면, 특히 향후 ‘제2의 원자력 르네상스’라는 관점에서 대규모의 신규 원전 건설이 도래하게 되면 국제 핵연료 공급 시장에 어떤 영향을 줄 것인지를 검토해 볼 필요가 있다고 본 것이다. 핵연료 수급에 따른 안정적 판단은 물론 핵연료 제조 가공에 대한 경제성 분석을 통해 핵연료 국제 시장의 수급 현황을 객관적으로 평가해 본 것이다.

우리나라는 1982년 경제 장관 회의의 결과에 따라 외국에 의존하던 핵연료의 국산화와 기술자립을 추진하게 되었고 1990년 중반에 국산화에 성공하였다. 여기에 머물지 않고 설계 기술의 자립과 핵연료의 연소도 향상 및 핵연료 재장전 주기의 연장 등 새로운 설계, 예를 들면 PLUS7 및 AEC7 설계 등의 개발로 세계적인 기술 수준까지 도달하였다.

그 단적인 예가 국내 원전 가동률이 세계 1위로 부상하게 하고 있는



한양대 원자력공학과 학사, 석사

현대건설(주) 원자력부장

한국원자력연구소 본부장

한전, 한수원(주) 처장

한국원자력기술(주) 회장

한전원자력연료(주) 사장 역임

IAEA 자문위원

민주평통 자문위원

데 이는 원전 발전 회사인 한수원의 훌륭한 운전 능력이 앞서겠지만 이에 못지않게 국내 핵연료의 결함률(Failure Rate)이 세계에서 가장 낮은 나라로 IAEA가 보고하고 있는 사항도 눈여겨보아야 할 것이다. 또한 한국표준형원전을 대상으로 제3세대의 핵연료인 HIPER연료의 설계가 개발되고 있다. 이럴 경우 우리나라는 고유의 원전 기술을 함께 확보하게 된다. 이러한 국내외 여건을 고려할 때 이 보고서는 우리에게 좋은 참고가 자료가 될 것으로 판단된다.

핵연료주기와 국제 핵연료 가공 시장

경수로 원전(LWR, Light Water Reactor)의 경우 1GWe 전력 시설 용량에 연간 우라늄 약 25톤(HMU, Heavy Metal Uranium)이 소요된다.

경수로에는 핵연료로서 U-235가 3~5%의 저농축 우라늄(LEU, Low Enrichment Uranium)을 사용하는데 저농축우라늄의 핵연료를 가공하기 위해서는 원광의 정련(U₃O₈), 농축을 위한 기체화(천연 우라늄 변환 UF₆), 그리고 농축 공정을 거치고, 농축된 우라늄(UF₆)을 핵연료 가공 공장에 수송하여 이를 재변환 공정을 거쳐 우라늄 분말을 만들어야 한다. 이 분말을 연료 소결체(Pellet)로 만들어 높은 온도에서 세라믹 형태로 밀도를 높여 이미 준비된 핵연료봉에 장입함으로 핵연료 제조 가공 공정이 마무리 된다.

우라늄 원광에서부터 핵연료 가공까지 일련의 공정을 선행 핵연료주기(Front End Fuel Cycle)이라 한다.

그리고 가공된 핵연료는 원자로의 노심에 장입되어 약 1년 반 내지 2년 연소된 후, 사용후핵연료(SF, Spent Fuel)로 인출되어 고준위 폐기물로 처리 또는 처분되든지 또는 재활용 단계를 거친다.

SF는 에너지 재활용 면에서 가치가 충분하기 때문에 재처리하여 SF 내에 있는 플루토늄을 추출, 이를 혼합 옥사이드 연료(MOX, Mixed Oxide)로 재가공하여 활용할 수 있으며, 또한 회수된 우라늄을 다시 농축하여 핵연료로 재가공하여 활용할 수 있다. 이를 후행 핵연료주기(Back End Fuel Cycle)라고 한다.

국제 핵연료 가공 시장은 원전을 운전하고 있는 국

가 중심으로 운영되고 있지만 국가별로 보면 미국이 전체 가공 시장의 32%, 프랑스가 27%(미국 내의 핵연료 시장의 32% 점유율 포함)를 차지하고 있다. 원전을 소유한 전력 회사 입장에서 보면 핵연료의 안정적인 공급이 경쟁력에 크게 영향을 미치기 때문에 이에 대한 관심이 매우 높다.

본 보고서의 목적은 아니지만 후행 핵연료주기에서 가장 활발하게 SF를 재활용하는 국가는 프랑스이며 연산 1600톤의 SF 재처리시설을 운영하고 있다. 그동안 유럽 여러 국가와 일본이 주고객으로 MOX 핵연료를 가공하여 기존 운전 중인 원자로에 재활용해 왔다.

핵연료 가공 비용과 세계 핵연료 가공 공장 현황

경수로 핵연료의 가공 비용은 미시 경제적인 엔지니어링 모델로서 일반적으로 사용하고 있는 고전적 하향식 방식을 택하여 생산 및 비용 함수, 지수 등에 관련된 공개된 자료를 분석, 객관성을 갖도록 하는 것이 중요하다. 그러나 핵연료 가공 산업의 비용 자료는 회사의 기밀자료로 비공개된 거의 독점 자료이기 때문에 접근이 쉽지 않음을 이해해야 한다.

<표>는 세계 핵연료 가공 공장의 현황을 나타낸 것인데 프랑스의 Romans 핵연료 가공 공장을 제외하고 모든 공장이 1990년대 또는 그 이전에 건설되어 남아 있고 생산 시설의 최신 기술을 접목하여 보완이 되고 있다고 봐야 한다.

가공 시설의 생산 규모에서 과거의 일부 생산 여유를 갖는 생산 규모는 비용을 줄일 수 있는 여지가 있으며 또한 가공비는 가공 공급자의 설계와 공정에 따라 달라질 수 있다.

LWR 중, 미국의 가압경수로(PWR)형 핵연료 가공비는 2003년 제의 가격으로 우라늄 kg당 220달러였는데 이 가격대는 그동안 널리 사용되어 왔고 유럽의 경우는 이보다 20~30% 높게 추정된다. 실제 공급자의 가격은 약 200불선으로 추정되고 있다.

비등형 경수로(BWR)은 PWR 핵연료 가공비보다 높아 약 300달러 수준인데 우리나라에서는 운전되지 않는 노형이므로 논제에서 제외하였다.



〈표〉 세계 핵연료 가공 공장 현황

국가	지역	운전	회사	원자로형	가공 용량 (우라늄톤/년)
벨기에	Dessel	1961	FBFC(AREVA)	BWR-PWR	400+
브라질	Resende	1982	FEC	PWR	250+
중국	Yibin	1993	CNNC	PWR	100
프랑스	Romans	1979	FBFC(AREVA, CERCA)	PWR	800
프랑스	Romans	2008	FBFC(AREVA)	PWR	580
독일	Lingen	1979	Advanced Nuclear Fuel(AREVA)	PWR-BWR	650
인도	Hyderabad	1974	DAE Nuclear Complex(NFC)	BWR	25
일본	Tokai	1980	NFI Ltd	BWR	250
일본	Kumatori	1972	NFI Ltd	PWR	383
일본	Tokai	1972	Mitsubishi Nuclear Fuel Co	PWR	440
일본	Yokosuka	1970	Japan Nuclear Fuel	BWR	750
한국	Daejeon	1989	Korea Nuclear Fuel(KNF)	PWR	400
러시아	Elektrstal	1996	JSC TVEL	VVER	620
러시아	Novosibisk	1949	JSC TVE	VVER	1000
스페인	Juzbado	1985	ENUSA	BWR-PWR	300
스웨덴	Vasteras	1971	WEC in Sweden	BWR-PWR	600
영국	Spingfield	1996	WEC in UK	PWR-VVER	330
미국	Lynchburg	1982	AREVA	PWR	400
미국	Richland	1970	AREVA	BWR-PWR	700
미국	Wilmington	1982	Global Nuclear Fuel(GNF)	BWR	1200
미국	Columbia	1986	WEC-Toshiba	PWR	1150

* 자료 : IAEA-TECDOC-1306 보완 + Nuclear Energy Agency
 * 한국의 경우 2009년 550톤 규모로 시설의 증설이 완료한 바 있음.

2008년에 미국의 PWR 핵연료 가공비는 약 250불로 추정된다. 이 가격이 가공 생산 비용에 접근한 가격 인지 또는 향후 신규 원전이 확충됨으로써 가공 생산 시설을 증축할 때 여지를 가질 수 있는 가격인지 핵연료의 가공 시장의 공급 측면에서 매우 중요하다.

가공비의 구성은 핵연료 하드웨어 측면의 비용, 인건비, 자본 투자비로 구성된다. 수명 기간 운영을 고려하여 가격을 비교하기 위해 한 시점으로 평균화(Levelizing)할 필요가 있어 2008년 현재 가격으로 종합 비교하였다. 투자 금액의 회수와 직결되는 투자 수익률(Rate of Return on Investment)이 중요하다.

핵연료 하드웨어 측면의 비용은 노형에 따라 다르다. PWR의 경우 우라늄 kg당 22달러 선으로 계산된

다. 인건비는 국가마다 인건비가 차이가 나지만 연산 730톤 규모의 시설을 운영할 때, kg당 48달러 선인데 80%의 가동률을 고려하면 59달러이며 여러 가지 생산 부담률을 고려하면 75달러가 된다. 1000톤으로 보간(補間)하면 94달러가 된다. 그리고 자본 투자비의 계산은 시설의 규모와 연관된 공식을 사용하여 계산하면 신규 시설로 최소 경쟁력이 있는 규모인 1000톤 용량을 가정하면 약 4억 달러가 소요된다.

경수로 핵연료의 가공 비용

일반적으로 핵연료 가공 비용 계산을 위해 생산 규모를 100톤, 300톤, 500톤, 1,000톤 및 1,500톤(우

라늄 기준)으로 규모를 달리하여 분석하였다. 각국의 가공 공장에 근무하고 있는 인력의 개인당 인건비 기준은 연간 90,000달러, 그 외 가격 변동 인자들, 예를 들면 가동률은 80%, 가공 공장의 수명은 15년으로 가정하였다. 또한 신규 시설일 경우 예견되는 인허가 비용은 6,700만 달러로 가정하였다.

각 가공시설의 규모별로 평균화하여 생산 시설의 규모에 따라 선으로 이어 보면 신규 가공시설을 건설할 경우가 기존 가공 시설보다 건설 투자비가 높다는 결론이며, 경쟁력 있는 최소한의 경쟁력을 갖춘 생산 규모는 연산 990톤으로 분석되었다. 이 경우의 생산 단가는 kg당 203달러이다. 이 규모 이상으로 운전 중인 가공 시설은 미국의 2곳(Wilmington 및 Columbia), 러시아 1곳 등 세계에서 모두 3개의 시설 밖에 없다.

기존 시설을 가진 가공 시설 공급자들은 이미 투자되어 인허가 비용 등에 대해 부담이 더 이상 없기 때문에 비용을 줄일 수 있다. 따라서 신규 시설을 건설하지 않는 기존 공급자의 경우는 작은 규모로도 최소한의 경쟁력을 갖추 수 있는데 연산 240톤으로 추정되었다.

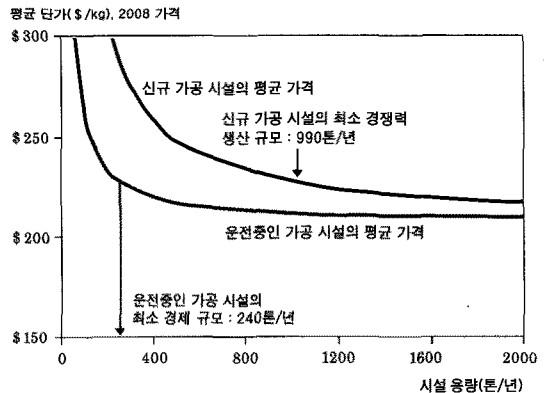
다시 말하면 신규 원전을 건설하면서 소규모의 핵연료 가공 시설을 건설한다는 것은 경제적인 측면에서 쉽게 결정할 수 있는 사항이 아님을 알려준다.

<그림>은 기존 운전 중인 핵연료 가공 시설과 신규 가공 시설을 건설할 경우 시설의 규모별로 소요되는 평균 가격을 보여주는 그림이다.

국제 경수로 핵연료 가공 공급 관련

운전 중인 원자력발전소의 평균화된 한계 비용은 기존 시설의 투자비와 인건비를 사용하여 실제와 근접하는 근사치를 구할 수 있으며 생산 시설의 규모별로 다음과 같은 특성이 있다.

- 브라질, 러시아 : 저인건비로 kg당 150~200불 미만 가격대로 연산 1,250 톤 생산
- 유럽, 일본, 미국 : 고인건비와 낮은 자본비로 kg당 약 200불 가격대로 연산 8,750 톤 생산
- 일부 유럽과 미국 : 고인건비와 고자본비로 kg당



<그림> 기존 및 신규 가공 시설의 규모별 평균 가격 분석

230불 가격대로 연산 750톤 생산

- 중국, 인도 : 경제적인 면과 거리가 멀고 연산 125톤 생산

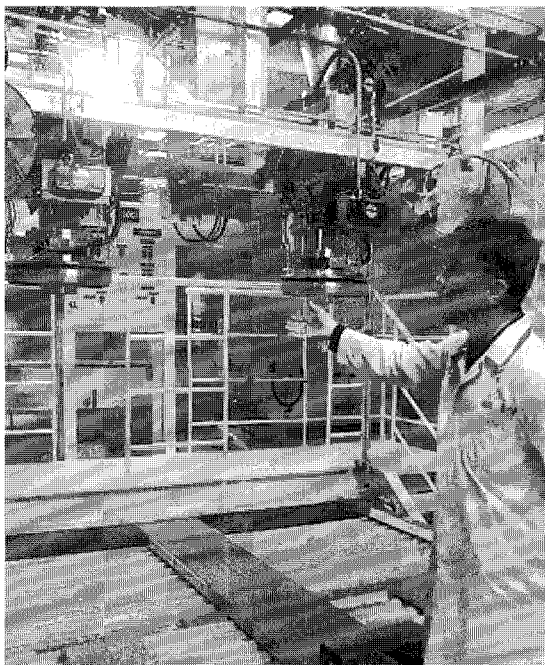
이상을 종합해 볼 때, 시장성이 있는 확실한 가격대는 kg당 230불대이며 세계 핵연료 가공 생산 규모는 원자로 노형을 구분하지 않고 연산 10,000톤 정도로 추정된다. 단 이 가격에는 하드웨어 비용은 포함되지 않은 가격이다.

체르노빌 원전 사고 이후 약 20년 이상 침체기에도 핵연료 개발에 투자한 국가는 핵무기 개발과 관련된 중국, 프랑스, 러시아 및 영국 등 4개 국가이다. 따라서 핵연료 가공 시설을 건설하려는 신규 공급자에 대해서는 국제 사회의 핵사찰 및 핵안전 장치가 필요한 것이다.

그렇지 않으면 실제 신규 원전 건설에 따라 반드시 필요한 핵연료를 공급하려는 국가까지도 예외가 될 수 없기 때문에 실제 원자력 개발 과정에서는 피해를 볼 수 있다. 다시 말해, 핵연료의 대상이 저농축우라늄 핵연료 가공에 국한해야 하며 국제 사찰이 필요하다.

결론적으로 핵연료 가공 시장은 향후 신규 원전의 건설 등으로 경쟁력이 보다 높아지고 있다는 것과 향후 당분간은 핵연료 공급 수요에서 큰 문제점이 없을 것으로 요약할 수 있다. 그 이유는 기존 가공 시설의 비용이 낮고 우라늄광이나 농축우라늄이 경쟁력을 가지고 있으며 더욱이 향후 원전 건설 시장의 전망이 좋기 때문이다.

그리고 신규 원전을 건설하려는 국가는 핵연료 가



우리나라는 핵연료 가공 시설의 기술을 완벽하게 확보하고 있다. 그러나 저탄소 녹색성장에 따른 국내 원전의 점유율의 증대가 예측되고 적극적인 해외 수출의 결과에 따라 핵연료 생산 용량이 대폭 증가할 수 있기 때문에 장기적인 관점에서 추가 대책이 필요하다고 하겠다.

공 공장을 보유하려 할 것으로 판단된다. 단 핵사찰에 대한 안전을 보장하는 것이 전제되어야 한다.

결언

이 자료는 미국 에너지부(DOE)의 재정적 지원을 받아 수행한 것이며 미국 Idaho 연구소 및 미국 원자력학회에 보고된 중요 자료로 2010년 발간된 것이다.

핵연료주기 사업에서 중전 미국이 주축이 되어 세계 핵연료산업을 선도해 왔으나 최근에는 프랑스(AREVA)가 추월하려는 단계까지 왔으며 실제 미국 내의 원전에 AREVA의 핵연료가 32%까지 점유하고 있는 실정이다. 농축 시설의 경우, AREVA와 URENCO의 유럽연합이 50%를 차지하고 나머지를 미국의 USEC, 소련의 TENEX가 양분하고 있다.

핵연료의 가공과 이의 공급 역시 원전의 안정적인 운전에 필수불가결한 부분이라고 할 수 있어 원자력발전소의 건설을 희망하는 국가는 우선 가공 시설을 건

설하려 하고 있는 게 추세이다.

경제적인 관점에서 보면 신규 원전을 건설하려는 국가가 초기 단계에 가공 시설을 건설한다는 것은 부담스러운 초기 투자비 때문에 쉽게 결정할 수 있는 문제는 아닐 것이다. 그러나 이번 우리가 원전을 수출한 UAE 역시 핵연료 가공 공장의 건설을 요구하였고 계약 이외의 사항으로 가공 공장 건설에 합의한 바 있다.

그만큼 핵연료 가공 시설은 경제성을 확인하는 것도 매우 중요하지만 경제성 확보와 동시에 안정적인 핵연료를 공급을 위해 당시 우리나라도 그랬듯이 원전을 보유한 국가들은 가공 시설을 필수적으로 건설하고자 하는 것이다.

원전의 경제성, 즉 원전 발전 단가 측면에서 보면 우리나라의 2008년 원전 발전 단가는 39원/kWh인데 이중 핵연료비가 농축우라늄 가격을 포함하여 약 12%이다. 이 핵연료비 중 가공비는 핵연료비의 25% 정도이기 때문에 가공비 자체는 매우 미미한 수준임을 강조하고 싶다.

그만큼 가공비는 경제성에 크게 영향을 주지 않지만 핵연료의 안정적 공급 면에서는 발전소의 가동률을 제고하는 데 결정적인 역할을 하는 중요한 항목이다.

우리나라는 핵연료 가공 시설의 기술을 완벽하게 확보하고 있다. 이 보고서의 표에 나와 있는 연산 400톤 규모를 2009년 이미 550톤 규모로 확장하였으며 지금이라도 인력과 조직을 효율적으로 운영하면 700톤까지 생산이 가능하여 향후 상당 기간까지는 원전의 핵연료 공급은 차질이 없도록 준비가 되어 있다고 하겠다.

그러나 저탄소 녹색성장에 따른 국내 원전의 점유율의 증대가 예측되고 적극적인 해외 수출의 결과에 따라 핵연료 생산 용량이 대폭 증가할 수 있기 때문에 장기적인 관점에서 추가 대책이 필요하다고 하겠다. ☉

<참조 보고서>

Geoffrey Rothwell, "International light water nuclear fuel fabrication supply: Are fabrication services assured?", Energy Economics, 32(3), 2010, pp.538~544