

프랑스의 維持補修活動 現況과 展望

프랑스의 原子爐 제조업체인 Framatome社는 현재 신규 원전에 대한 발주가 줄어드는 반면에 운전중인 발전소에 대한 서비스 요청이 증가하고 있다. 따라서 Framatome社는 대규모 維持補修活動에 대한 경험을 구축하고 있다.

프랑스의 49기 가압경수로형 원자력발전소중 최초의 원자력발전소가 상업운전을 시작한지 10년에 도달함에 따라 원자력산업에 있어서 유지보수분야가 주된 성장분야로 주목받게 되었다. 현재 전체생산의 75%를 차지하고 있는 프랑스와 같은 대규모 원자력프로그램에서는 한기의 원자력발전소에서 어떤 고유의 결함이 발견되면 다른 여러 발전소의 정지기간이 동시에 연장될지도 모른다는 우려가 존재하게 된다. 반면에 프랑스에서의 높은 수준의 표준화는 특수한 유지보수에 대한 기술과 기구에 많은 투자를 할 수 있게 할 뿐만 아니라, 처음으로 적용된 기술을 다른 발전소에도 신속하게 적용할 수 있게 한다.

한편 프랑스가 대규모 원전을 도입할 시기에는 서구에서 42기의 원자로가 상업운전을 하면서 축적한 경험을 활용할 수 있었는데, 프랑스가 최초로 보유한 Fessenheim발전소는 이러한 시기에 도입된 것이었다. 또한 벨기에의 Tihange-1프로젝트에 참여한 경험도 프랑스의 유지보수 산업에 큰 도움이 되었는데, 이 프로젝트는 Fes-

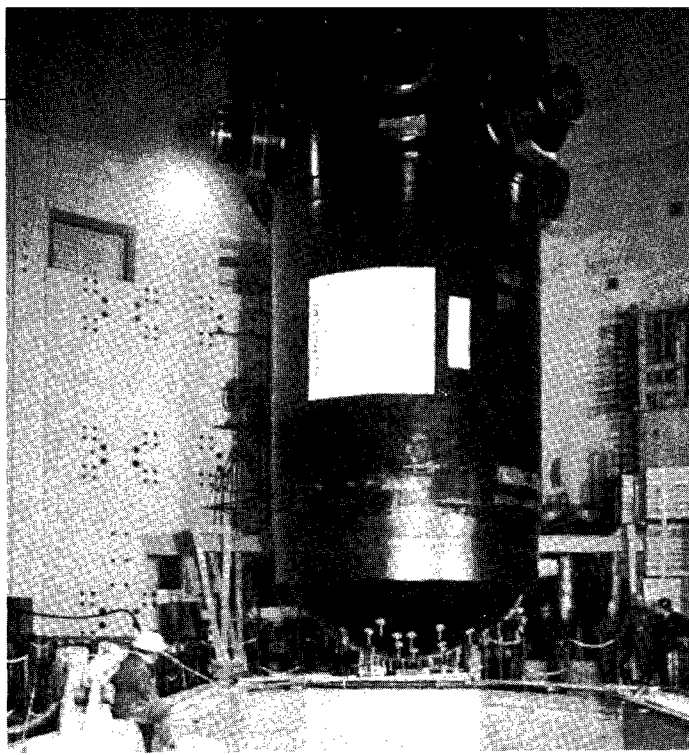
senheim-1 프로젝트 보다 1년반 앞섰었다.

Tihange-1 발전소는 그후 프랑스의 3루프 가압경수로에 대한 특수한 유지보수작업의 참조발전소로 이용되었다.

1. 維持補修産業의 成長

Framatome Nuclear Services社는 프랑스의 원자력프로그램과 더불어 성장하였으며, 현재는 세계에서 가장 큰 원자력서비스사로서 EdF에 대한 독점적인 계약자인데, 전세계적인 유지보수산업의 확장으로 인해 성장 가능성이 매우 큰 회사로 지목받고 있다.

현재 이 회사의 전체 직원은 400명의 엔지니어를 포함하여 총 1,000명에 달하며, 그 수입은 일반적인 유지보수 및 특수작업분야에서 5억프랑, 설비개선분야에서 3억프랑, 새로운 건설부지에서 주배관설치작업으로 2억프랑 등 10억프랑(1억6,000만 달러)에 달하고 있다. 또한 1988년의 영업실적은 약 150만M/H를 기록하고 있으며, 그 시장도 프랑스 국내에서 부터 해외 10



여개국으로 확대되고 있다.

이 회사의 본사는 Lyon에 위치하고 있는데, 여기에는 일반관리 및 영업부서와 주요 유지보수엔지니어링부서가 있다. Lyon교외의 Villeurbanne에는 특수한 공구와 기술의 개발 및 평가를 전담하는 연구소가 있다. 또한 Chalon에는 대형 증기발생기 제작공장 근처에 유지보수작업을 전담하는 부서가 있으며, 보수요원들의 훈련 및 자격평가를 위한 특수한 설비가 있다.

그밖에 Framatome社는 특수공구의 제염, 유지보수, 저장을 위한 새로운 설비를 Chalon에 설치하기 위해서 3천만프랑을 투자할 계획인데, 이 설비는 지금까지 특별히 제어봉 안내관의 분리핀을 교체하는 대규모 프로그램에 사용되어온 Tricastin의 작업소를 보강하기 위한 것이다. EdF가 소유하고 있는 또 다른 유지보수공구센터도 Tricastin에 위치하고 있다.

2. Split Pin의 交替

가압경수로의 상부노심판에 있는 제어봉 안내관을 지지하는데 사용되는 분리핀의 응력부식 균열문제는 EdF가 봉착한 최초의 고유결함이

었다. 이러한 문제는 1978년 일본의 원자로에서 발견된 이후 프랑스, 미국, 일본 등 여러 원자로의 검사를 통해 광범위하게 발견되었다. 프랑스에서의 첫번째 핀파손은 1982년 1월에 Gravelines-1 발전소에서 발견되었으며, 3월에는 Fessenheim-1 발전소의 증기발생기에서 핀의 파손으로 인한 파편이 발견되었다. 이러한 일련의 사건으로 인해 EdF는 900MWe급 가압경수로형의 모든 분리핀을 개량된 핀으로 교체할 것을 결정하였다. 이러한 교체작업을 시행한 처음 4기의 원자로에서는 각 원자로의 전체 안내관치를 제거하고 개량된 핀을 갖춘 새로운 안내관을 설치하였다.

한편 1983년 1월에 Framatome社는 Fessenheim-2 원자로 저수조 안내관의 핀을 교체하는 동안 작업자들을 방사선으로부터 보호할 수 있는 새로운 설비를 개발하여 사용하였다. 그런데 이러한 교체작업은 정상적인 연료장전작업과 병행하여 수행될 수 없었으므로 정지기간이 불가피하게 연장되었다. 그 후 새로운 기술이 개발되었는데, 이는 상부내장품을 수중에서 이동가능한 탱크로 이송한후 이를 작업대까지 상승시켜 핀교체작업을 수행하도록 함으로써 이 작업

을 연료장전작업과 병행하여 수행할 수 있게 하였다.

1983년 3월에는 Framatome社가 Tricastin 작업장에 4개의 연속적인 작업대를 설치하여 제거된 제어봉 안내관을 차폐된 용기에 넣어 이곳으로 수송하여 핀교체작업을 수행하도록 하였다. 이러한 방식은 표준화된 원자로 설계의 이점을 크게 활용할 수 있었는데 이것은 앞서의 원자로에서 제거된 안내관을 다른 원자로에 설치하는 것이 가능하였기 때문이다. 이로 인해 안내관을 제거하고 교체하는데 사용되는 시간을 단축시킬 수 있었다.

1982년과 1983년 사이에 분리핀에서의 문제점이 발견되었을때 운전중이었던 21기의 모든 가압경수로에 대해 분리핀이 교체되었으며, 1983년 부터는 이 작업으로 인해 더 이상 정지기간이 연장되지 않았다. 그러나 이러한 개량된 핀의 사용에도 불구하고 동일한 문제가 계속 발생하였다. 새로운 분리핀으로 부터 파손된 지지볼트가 1987년에 Tricastin 발전소에서, 그리고 1988년에 Gravelines-1 발전소에서 연료장전후 재가동준비 중에 발견되었다. 결국 Gravelines-1 발전소는 전과 동일한 설계의 핀으로 다시 한번 분리핀을 교체하여야 하였다.

다른 후속호기들의 핀교체를 위해서 새로이 설계된 분리핀이 개발되었는데 지금으로서는 이 핀이 이러한 문제점을 완전히 해결해 줄 것으로 기대하고 있다.

3. 上向流路의 改造

노심내에서 배럴(Barrel)을 통과하는 상향유로를 형성하기 위한 유럽 원자로의 첫번째 개조작업이 1986년 벨기에의 Tihange-1 발전소에서 성공적으로 수행되었다. 이 작업은 Framatome Industrial Services社에 의해 계획대로 26일만에 수행되었다. 이와 동일한 개조작업이 EdF 6기의 원자로에서 필요로 하고 있는데, 이들중

첫번째로 Burgey-2 원자로가 1989년 7월까지 개조될 예정이며, 다른 원자로에 대한 작업은 그후 3년 내에 모두 수행될 예정이다.

상향유로의 개조는 노심사각에 있는 연료핀에 매우 심각한 손상을 유발할 수 있는 노심배럴판 사이의 분사현상을 극복할 수 있게 한다. 노심배럴은 원자로 용기내의 원형공간에 위치하는 정방형의 연료집합체를 둘러싼 상자형 구조물이다. 1973년 이전에 웨스팅하우스사가 설계한 원자로에서는 노심배럴을 지지하는 원주형 포머(Former)의 구멍을 통해 하향유로가 형성되도록 되어 있었다. 이러한 원자로중 많은 호기들의 배럴판이 가장자리에서 단단히 불팅되어 있지 않았기 때문에 원자로의 입구측 냉각수와 출구측 냉각수 사이의 압력차이로 인하여 사각을 통하여 노심영역으로 냉각수가 분사될 수 있었다.

상향유로의 개조는 냉각수가 구조물로 주입되는 노심배럴의 상부 끝에 있는 24개의 구멍을 플러징하고 상향유로가 노심위로 흘러나올 수 있도록 노심배럴의 상부 끝 포머주위에 24개의 구멍을 뚫음으로써 이루어진다. 이 플러징작업은 노심배럴이 스테인레스강으로 된 열차폐벽에 둘러싸여 있어 그 사이의 작업공간이 매우 좁았기 때문에 상당히 어려웠다. 따라서 먼저 노심배럴의 구멍과 나란히 열차폐벽에 구멍을 뚫고 난후 이 양쪽의 구멍을 동시에 막을 수 있는 특수 설계된 플러징으로 이 구멍을 메우는 기법이 사용되었다.

구멍을 뚫는데는 전자방출기계기법(Electron discharge machining technique)이 사용되었는데, 이것은 이 기법이 물을 주입함으로써 쉽게 수집할 수 있는 매우 미세한 분말형태의 부스러기만을 생산하기 때문이다. 이 방법은 70mm 두께의 열차폐벽의 구멍을 뚫는데 4시간이 걸리는 비교적 느린 작업이지만, 이 도구가 수평 및 수직 방향으로 기계적 진동없이 동작되기 때문에 원자로 상부저수조로 부터의 가벼운 중량의

긴 지지대 위에 설치하는데 적합하다.

4. 蒸氣發生器

프랑스의 가압경수로형 원자력발전소들은 1960년대 및 1970년대 초에 운전해 들어간 다른 나라의 운전경험을 설계에 반영하였기 때문에 증기발생기에 있어서 다른 대부분의 나라보다 훨씬 적은 문제점을 가지고 있다. Chalon에 있는 Framatome社에서 제작된 증기발생기는 그 시작단계에서부터 많은 설계변경사항들이 반영되었다. 그러나 Inconel-600 튜브와 관련된 튜브의 근본적인 부식문제는 어쩔 수 없이 현재의 모든 운전중인 발전소에서 발견되고 있다. Framatome Nuclear Services社는 이와 관련된 문제에 다양한 방법의 대응책은 제공할 뿐만 아니라 증기발생기 튜브의 검사, 플러깅, 세척, 처리시에 작업자의 피폭을 줄일 수 있는 로봇을 갖추고 있다.

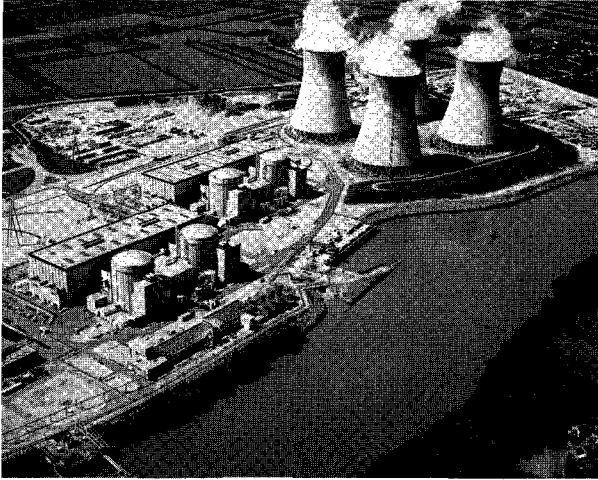
1986년에 프랑스 및 다른 나라에서 튜브보수 작업의 절정기를 맞이하게 되었다. 주로 핀닝(Pinning)작업이 튜브와 튜브판 결합부위의 응력을 감소시키기 위해 수행되었다. 이 핀닝작업의 결과 응력부식을 확실하게 지연시킬 수 있었으며, 따라서 앞으로 더 많은 튜브 핀닝작업이 요구될 것으로 전망된다.

한편 튜브의 부식면에 니켈로 도금하는 새로운 기법이 개발되어 벨기에의 Doel-3 증기발생기에서 시험되었다. 이 기법은 균열이 더 이상 커지는 것을 방지하고 새로운 응력부식이 생기는 것을 억제하기 때문에 핀닝작업보다는 더 장기적인 해결책인 것처럼 보인다. 그러나 니켈은 그 자기적 성질이 와류탐상시험의 사용을 금하고 있기 때문에 이 기법을 사용하기 위해서는 새로운 초음파탐상시험방법을 개발하여야 한다. 와류탐상시험은 지금까지 증기발생기 튜브의 검사에서 가장 빠르고 확실한 방법으로 널리 사용되어 왔다.

5. 컴퓨터專門家시스템

증기발생기의 교체라는 최악의 사태를 방지하기 위하여 증기발생기에 대해 이미 실시되었거나 새로이 실시하려고 하는 수많은 방법이 있다. 가압경수로형 원자력발전소의 운전원 입장에서는 증기발생기에서의 결함을 파악하고, 그 진전상황을 추적하며, 필요시 가능한 수많은 방법중 어떤 방법을 선택하여야 하는가에 있어서 점점 더 큰 어려움을 가지게 되었다. Framatome Nuclear Services社는 이러한 종류의 문제를 해결하는 컴퓨터전문가시스템을 개발하고 있다. 이 시스템은 운전원이 어떤 방법을 선택하여 증기발생기를 검사하고, 그 손상정도를 파악하며, 그에 따른 적절한 처리방법을 결정하는 것을 도울 뿐만 아니라 유지보수작업을 계획하고, 각종 문제의 예방을 위한 프로그램 수행을 돕도록 설계되어 있다. 이 전문가시스템은 190개 이상의 증기발생기에 대한 상세한 제작 및 운전정보를 포함하고 있는 Framatome社의 증기발생기 데이터베이스 외에도 전세계의 증기발생기 튜브문제에 대한 광대한 데이터베이스를 이용한다. 예를 들어, 모델 51 증기발생기의 경우 각 튜브에 대해 150개의 데이터를 가진 200,000개 이상의 튜브에 대한 정보를 이용할 수 있다.

이 시스템은 수많은 상호교환되는 프로그램 모듈을 사용하여 지금까지 파악된 20여개의 화학적, 기계적손상메카니즘 중에서 가장 가능성 있는 손상메카니즘을 파악하고, 그 튜브의 전체 운전경험을 조사하여 손상의 진행을 억제하거나 가속화시킬 수 있는 요인들을 파악하며, 적절한 방안을 강구하기 위해 검사에서 수리까지의 가능한 조치들을 조사하고, 그 조치 수행전까지의 이용가능한 기간을 제시하는 등의 기능을 수행한다. 이 시스템은 Sun Workstation에서 CDC 835 메인프레임 컴퓨터의 데이터베이스를 사용하여 분석을 수행하고 결과를 제시한다.



▲ 프랑스 Bugey 원자력발전소 전경.

이 시스템은 1989년 3월에 原型의 개발이 끝날 예정이며, 1989년 9월까지의 이용가능하도록 추진중에 있다.

6. 蒸氣發生器의 交替

증기발생기의 부식문제에 대한 근본적인 해결방안이 제시되기를 기대하는 희망들이 여전히 지속되고 있지만, 실제적인 관점에서는 증기발생기를 결국에 가서는 교체하여야 할 것으로 보인다.

몇몇 조치들이 증기발생기 교체까지의 기간을 연기시킬 수는 있으나, 발전소의 잔여 수명기간 동안 증기발생기가 효과적으로 운전되게 하거나 또는 발전소의 수명연장에 기여할 수 있도록 하기 위해서는 결국 교체하여야 한다. 이러한 것들은 Ni-Cr-Fe 합금으로 제작된 증기발생기 튜브나 Inconel-690으로 제조된 튜브의 경우에 있어서도 마찬가지이다. 스테인레스합금강으로 만들어진 튜브에 대한 개선책으로 유럽의 원자로에 광범위하게 채택된 Inconel-600이 처음 제시되었을때 이것이 증기발생기 튜브에 대한 완전한 해결책으로 받아들인 사람들이 많았으나, 이도 결국 근본적인 해결책이 되지 못한 것이다.

Framatome Nuclear Services社는 EdF의 3루프 발전소 2기의 증기발생기에 대한 교체를 준비중에 있다. 이것은 6기의 교체용 증기발생기 제작과 상세한 교체의 준비에 관해 EdF와 1985년에 체결된 계약에 따른 것이다. 현재는 Dampierre-1과 Bugey-5 발전소가 첫번째 증기발생기 교체 대상 발전소로 간주되고 있으나, 그 실제 결정은 1987년의 검사와 가장 최근의 검사와의 비교검토결과가 나와야 내려질 것으로 보인다.

현재 이 회사는 종합적인 예비연습과 제염정도 등에 관한 몇가지 사항을 제외하고는 모든 기술적인 검토 및 평가, 도구 등을 완전히 준비하고 있다. 또한 주배관의 원격용접기법도 4루프 1,300MWe 발전소인 Catterom과 Nogent 발전소의 증기발생기 설치에 적용되어 성공적으로 수행된바 있다.

7. 앞으로의 展望

프랑스 가압경수로들의 상업운전기간이 10년에 도달함에 따라 앞으로 수년간 유지보수산업계는 매우 바빠질 것으로 전망되고 있다. 이는 규제요건에 따라 10년째의 원자로 정지기간중에 압력용기 및 주냉각배관의 완전한 검사와 냉각계통의 수력학적 시험이 수행되어야 하기 때문이다. 이러한 검사 및 시험은 정상적인 연료장전에 소요되는 5~6주 보다 훨씬 많은 15~20주의 정지기간을 요한다. 따라서 이 기간은 다른 대규모의 유지보수 및 개량작업을 병행할 수 있는 좋은 기회가 될 것이다.

이미 프랑스는 1986년에 벨기에의 Tihange-1 발전소의 10년째 정지기간에 참여한 경험을 가지고 있다. 1989년에는 Bugey-2 및 Fessenheim-1 발전소가 10년째 정지기간에 도달할 예정이며, 1990년과 1993년 사이에는 4~6기의 원자로가 매년 10년째 정지기간에 도달할 예정이다.