



AREVA 연료사업부의 연료 제작과 검사

Pierre Mollard · Dieter Kreuter · Achim Beisiegel

Framatome ANP

연료 제작

1. 전 세계를 대상으로 이루어지는 연료 제작

AREVA 연료사업부(Framatome ANP 연료부)의 연료 제작 라인은 프라마톰 ANP, 미국의 Inc, 프랑스 FBFC, 벨기에 FBFC인터내셔널과 독일 ANF(Advanced Nuclear Fuels GmbH)의 연료제작부로 이루어져 있다.

제조 조직간의 통합을 강화하는 일반 관리(common line management)와 일반 공정(common process)을 채택함으로써 연료 제작 라인에 일차적인 시너지 효과가 발생하였다.

주요 일반 공정은 숙지되고, 묘사되었으며, 라인의 책임이 소개되었다. 각각을 통합한 후 종합적인 프로그램을 시작하여 수행하였다.

공정과 기술의 표준화와 같은 최적의 사례들을 전세계적으로 적용

함으로써 품질 개선과 비용 절감을 이루었다. 전 계열이 자원을 공동으로 활용함으로써 공급의 신뢰성도 향상되었다.

서로 다른 활동 및 자원은 국제적 차원에서 관리된다. 예를 들어, 일반 운송 컨테이너 플리트는 각각의 운송 타입-예; 연료 집합체, 파우더와 펠렛 등-에 맞도록 IEAO 규정 ST-1에 따라 인가를 마쳤다.

이는 고객이 공급받는 데 있어 높은 수준의 신뢰성이 유지됨을 의미하고, 컨테이너 개발과 이용 계획 최적화를 통한 비용 최적화가 가능함을 의미한다.

R&D 활동 또한 국제적 차원에서 관리되고 있다. 자동화된 펠렛 검사(직경/길이 레이저 측정, 표면(surface)/dishing 이미징 시스템) 또는 능동/수동 로드 스캐너 소프트웨어를 포함한 여러 가지 사례가 있다.

제작 라인이 방대하기 때문에 기

술 책임을 집중화시켜 기술적 노하우를 집적하는 것이 각 제작 공장 간 경쟁을 유도하고, 중복 투자 방지, 품질 향상의 효과를 가져왔다.

라인 추적 기능(Line Purchasing function)의 개발은 승인된 공급자의 라인 리스트, 일반 용역 공급자 평가와 같은 라인 전략 추적 계획(line strategic purchasing planning)으로부터 얻을 수 있는 각종 이득을 가져왔다.

이는 더 나은 공급자를 통해 공급 신뢰도가 높아지고, 단일/다중-자원 결정 최적화를 이룰 수 있음을 의미한다. 또한 추적 비용 절감을 이룰 수 있다.

앞으로 언급될 연료 제작 라인을 통한 최적 사례의 수행은 우리의 제작 톨의 국제적인 최적화에 크게 기여하고 있다.

무엇보다도, 앞으로 언급할 서로 다른 생산물에 대한 교차 품질 보증 프로그램의 개발은 공급 신뢰도를

크게 높였다.

마지막으로, 지르코늄 튜브 제작에 선도적 위치를 차지하고 있는 AREVA 연료사업부의 지르코늄 라인으로 연료 집합체 제작 라인은 이익을 보고 있다.

2. 융통성을 가지는 연료 집합체 제작 틀

미 동부 해안에 위치한 Lynchburg 연료 제작 시설은 가압경수로(PWRs)형 연료 집합체를 생산하고 있다. 현재 변환 설비나 펠렛화 설비는 없고, 연간 600개의 연료 집합체를 생산할 수 있다.

이 공장은 5.0wt% 이하로 농축된 U235를 이용하여 연료 집합체를 생산하는 설비로 인가받았다.

가연성 독물질봉 집합체, 노내 계측기, 축방향 출력 형성 봉, 특수 기기와 B4C 펠렛 또한 이 공장에서 생산되고 있다.

인접한 연료 시설은 2개의 48,000 ft² 시설로 수리, 연마(refurbishing), 시험, 오염 장비 저장 시설로 사용된다.

미 서부 해안에 위치한 Richland 연료 제작 공장은 가압경수로와 비등경수로용 연료 집합체뿐 아니라, UO₂ 분말, 펠렛과 연료봉 기기(fuel lod component)를 생산한다. U235를 5.0wt%까지 농축하는 화학 공장으로 인가받았으며, 연간 1,800MTU의 변환 용량을 가지고

있다.

독일 Lingen 공장은 UO₂ 분말, 펠렛, 가압경수로와 비등경수로에 사용하는 연료봉과 연료 집합체를 생산한다.

Lingen은 5.0wt% U235를 인가받은 화학 공장으로 변환 및 펠렛 생산 용량은 현재 500tU/yr이다.

추가적으로 연료 펠렛 150tU/yr(농축된 재처리 우라늄을 포함하여)에 대한 인가를 받음으로써 연료봉과 연료봉 집합체에 대한 처리 용량을 늘릴 수 있었다.

1997년 운영을 시작한 이래로 Lingen은 340만 개 이상의 연료봉으로 구성된 20,000개 이상의 연료 집합체를 제작하였다.

독일 Karlstein 공장은 연료 집합체에 사용되는 스페이서, 상·하부 결합관과 BWR용 수로와 같은 부품을 생산한다.

뿐만 아니라, 연료봉 마개, 링, 스크루와 RCCAs와 같은 작은 하드웨어 등 연료봉에 사용되는 다양한 부속을 생산한다.

Karlstein에서 생산된 부품은 FANP의 유럽 연료 제조 공장들에서 연료 제작에 사용된다.

프랑스의 Romans 공장은 UO₂ 분말, 펠렛, 노즐과 가압경수로용 연료 집합체를 생산한다. 5.0wt% U235에 대하여 인가받은 화학 공장으로 연간 변환 용량은 분말로는 1,200MTU이고, 연료 집합체 제작

으로는 820tU/year이다.

프랑스의 Pierrelatte 공장은 PWR 연료 집합체용 스페이서를 생산하여 프라마톱 ANP 유럽 연료 제작 공장에 공급한다. 이 공장의 또 다른 작업은 Harmoni RCCA를 생산하는 것이다.

벨기에의 Dessel 공장은 프랑스 Romans 공장과 Lingen 공장에서 공급받은 UO₂ 분말을 이용해 가압경수로형 연료 집합체를 생산한다.

5.0wt% U235에 대하여 인가받은 연료 제조 공장으로 750MTU/yr의 용량을 가지고 있다.

분리된 건물에서는 프랑스 Melox와 벨기에 Belgonucleire로부터 온 연료봉을 가지고 MOX 연료 집합체를 생산한다.

이 공장이 허가받은 최대 Pu량은 연료봉에 대하여 12wt%, 연료 집합체를 위한 평균치는 10wt%이며, 기술적 용량은 200MTU/yr이다.

가돌리늄 펠렛과 봉의 생산은 UO₂ 공장과 완전히 분리된 다른 건물에서 이루어지고, 기술적 용량은 40tU/yr이다.

프라마톱의 ANP 3개 유럽 연료 공장에서 사용될 봉단 마개와 스프링과 같은 연료봉용 작은 부품 대부분이 봉단 마개 3백만개와 스프링 150만개의 생산 용량을 가진 이 공장에서 생산된다.

세계 각지의 이러한 생산 설비는 어떤 고객의 요구에도 부응할 수 있



는 융통성과 가용성을 가지고 있다. 일반 최적 사례(general best practice)와 교차 품질 점검 프로그램(cross-qualification program)의 개발은 이러한 능력에 더욱 기여하고 있다.

3. 베스트 프랙티스 프로그램을 이용한 연료 제작 톨 최적화

생산품 공급의 안정성을 높이고, 제작 공장에서의 작업 부하를 최적화하기 위해서 연료 제작 라인은 베스트 프랙티스 프로그램을 시작하였다.

이 프로그램은 기술 라인 Function에 의해 베스트 프랙티스 공유를 포함하는 세 개 영역을 아우르고 넓은 범위를 포괄한다.

이는 기술적 문제를 해결하기 위해 서로 다른 유닛의 폐기(disposal)에 있어 재량권을 가지고 현재와 미래의 산업적 톨을 적용한다.

연료 장전 기술로 말하자면, 여러 연료 제작 라인 간의 차이점들 중에 베스트 프랙티스의 분석 결과 다중 농축(multiple enrichment)과 다중 연료 장전(multiple rod loading) 사이에는 요동이 있음이 밝혀졌다.

이는 부스러기(chipping)와 장전시 장애(hard loading)를 최소화하여 품질을 개선하고 생산성을 높였다. 아직 장비를 갖추고 있지 않은 다른 발전소에도 적용할 계획

이다.

연료봉 용접, 골격 용접(skleton welding), 분말 운송과 준비, 스페이서 용접, 상부 결합판 제작 공정은 베스트 프랙티스 선택을 위한 분석이 완료되어 향후 단계적으로 베스트 프랙티스를 적용하여 개선할 기술 분야이다.

미국에서는 연료 제작을 위한 비동경수로 베스트 프랙티스 라인이 2004년 여름 Richland에 설치될 예정이다.

베스트 프랙티스 공정들로는 현재 FBFC에서 사용하고 있는 펠렛을 연료봉에 장입하기 위해 사용하는 진동 장비와 ANF Lingen에서 이미 사용되고 있는 봉단 마개 용접법(upset shape welding process)이 될 것이다.

유사한 가압경수로 베스트 프랙티스 라인이 같은 시기 Lynchburg에 설치되어 2005년에 업무를 시작할 것이다.

연료 집합체 벤치(fuel assembly bench)(pushing type)는 HTP 번들을 제작하기 위해 Lynchburg에 설립될 것이다.

4. 교차 품질 점검 프로그램

2003년은 연료 집합체 제작에 대한 유럽 연료 제작 공장간의 교차 품질 보증 활동이 최초로 시작된 해이다.

프라마툼 ANP 연료 독일

(Framatom ANP Fuel Germany)이 설계하여 ANF Lingen에서 조립한(fabricated) 32개의 17×17 HTP 연료 집합체의 최초 재장전이 2003년 3/4분기 FBFC Romans 이 제조(manufacturing) 공급하던 EDF Chinon B 2호기에서 이루어졌다.

프라마툼과 지멘스 KWU의 합병 이후 1년 만인 2002년에 시작된 이 프로젝트는 특별 프로젝트 팀 내에 프라마툼 ANP의 서로 다른 지역 사무소를 포함하였다. 이 프로젝트에 기여한 곳은 FBFC Romans, ANF Lingen, Erlangen에 있는 프라마툼 ANP 연료 독일, Lyon에 있는 프라마툼 ANP 연료 프랑스이다.

FBFC Romans의 작업 범위는 펠렛의 제조, 연료봉/골격과 ANF Lingen에서 생산하여 조달한 기기로 연료를 조립하는 것이다.

스페이서와 결합 판은 보통 ANF Karlstein에서 생산되고, 튜브는 ANF Duisburg에서, 연료봉 단마개는 FBFC Dessel에서 생산된다.

프라마툼 ANP 연료 독일(Framatome ANP Fuel Germany)과 연료 프랑스(Fuel France)는 HTP 기술 문서의 특수성을 FBFC 제조 공정에 적용하기 위해 필요한 기술 문서 변경을 수행하였다.

가능한 한 이러한 변경은 FBFC와 ANF 제조 공장 모두의 기술 문

서를 활용하여 수행되었다. FBFC Romans는 기술 문서상의 제작 지침과 장비들을 적용하였다. FBFC Romans와 Dessel, ANF Lingen 실험실은 펠렛과 연료봉의 품질 보증에 참여했다.

프라마툼 ANP 연료 독일(Framatome ANP Fuel Germany)은 제조 공정을 보증하고, 프라마툼 ANP 연료 프랑스(Framatome ANP Fuel France)는 선택된 제작 변수의 품질을 EDF를 통해 확인(demonstration)하는 것을 지원하고, 프라마툼 ANP와 EDF를 통해 참여한 사람들을 조율하는 역할을 수행했다. 이 프로젝트의 주요 목적은 현재 생산품 설계를 유지하고, 제작 공정 변경을 최소화하는 것이다.

연료봉 용접에 있어서, 현재 FBFC 레이저 공정은 ANF Lingen에서 사용되던 Upset Shape Welding(USW) 공정 대신 사용되고 있다.

봉단 마개의 지오메트리만을 변경하여 연료봉의 실제 길이를 늘리지 않고 봉 내 공간(void volume)을 유지하였고, 안전 파일 기준을 만족할 수 있었다.

특히 펠렛에 있어서 HTP 기술 파일의 요건을 만족시키기 위해 제조 공정을 그대로 적용하였다.

이러한 변경의 성공으로 프로젝트 팀과 관련자간의 협력이 증대되

고 사기가 고양되었을 뿐 아니라, 고객인 EDF의 협력을 유발할 수 있었다. EDF는 촉박한 일정으로 수행된 이 프로젝트의 종료일을 맞추는 데 큰 도움을 주었다.

게다가 이는 기술 파일 표준화를 향한 첫 단계로 프라마툼 ANP의 각 지역 사무소에서 수행된 베스트 프랙티스의 범주 안에서 서로 다른 생산물 설계와 제조 공정의 지식 수준을 한 단계 높일 것이다.

Areva 연료 사업부 제작 라인의 교차 품질 보증 프로그램에서 두 번째 교차 품질 보증은 2004년 AFA3G 연료 집합체를 FBFC가 아니라 ANF Lingen에서 제작하던 최초의 작업과는 반대 방향으로 이루어졌다.

2005년부터 HTP와 AFA3G 설계 모두 FBFC Romans 또는 ANF Lingen에서 제작될 것이다. 이는 제작하는 입장에서 공장 내의 작업 부하를 최적화할 뿐만 아니라, 더 큰 가용성을 가지고 공급의 신뢰도를 높일 수 있을 것이다.

검사 설비

1. 재료 개발용 복합 설비

연료 부서로서, 우리는 새로운 상품과 이와 관련된 서비스 장비를 개발하고, 소프트웨어와 방법을 설계하고, 지르코늄 합금, 펠렛, 봉과 다른 부품 및 집합체의 제작과 검사

기술을 향상시키고 있다.

프랑스 Ugin과 독일 Erlangen에 있는 지르코늄 합금 개발용 실험실은 지르코늄 야금학(metallurgy), 공정 시뮬레이션과 최적화를 가능하게 했다.

Ugin의 Cezus 연구센터는 VAR(Vacuum Arc Remelting)과 LCF(Levitation Cold Furnace), 용광로, 광학, SEM(Scanning Electron) TEM(Transmission Electron) 현미경, X-ray 분광 스펙트로미터, 시뮬레이션 센터 등을 갖추고 있다.

Erlangen과 Dessel에 위치한 우라늄 연료와 세라믹 기술 연구소는 미래의 재료개발을 수행하고 있다.

2. 기기 특성 결정과 기술 센터의 지원 업무

기기 저동 특성을 위해 우리는 다른 실험 시설과 프라마툼 ANP의 책임자로 전 세계적으로 조직된 기술 센터를 가지고 있다.

기술 센터는 프랑스와 독일 파트를 병합한 것이다. 프랑스 기술 센터는 용접, 비파괴 검사, 유체와 구조 공학 분야에 특화되었고, 독일 기술 센터는 재료 기술, 사고 분석, 방사화학, 분석 화학, 방사선 계측학, hot cells, 열유체, 유체 역학, 기기와 계통 시험 분야에 특화되어 있다.



기술 센터는 특수한 필요에 초점을 맞춘 기초 기술로 연료부를 지원할 수 있고, 항상 실제 문제들을 해결하기 위한 공학적 방안을 모색한다. 또한 회사에서 숙련된 사람을 위한 훈련의 장소 역할을 하기도 한다.

여기서는 연료 부품과 집합체에 대한 정적·동적 시험을 수행한다. 또한 이는 RCCA와 연료봉의 마모 시험을 위해 필수적인 시설이다.

기술적 영역에서 기술 센터는 기기의 최적화 특성화, 품질 향상에 도움을 주고 있고, 설계 컴퓨터 코드 검증에 위한 실험적 접근을 제공한다.

세관 파단과 동적 버클링 시험 벤치, 정적/동적 인장-압축 기계, 특수 장비들, 다양한 설비(vibration exciters, hadraulic cylinders), 시험 벤치(sloshing, structural dynamics, shocks, rotation...), dynamic acquisition과 분석 설비, 형태 분석 등으로부터 자료를 취득한다.

마모와 마찰 평가를 위해 pin-on-disk tribometer와 마모 현상을 모사하기 위해 PWR 상태로 운전되는 특수 모의 설비(specific mockups)(flux thimbles, 증기발생기 세관, 제어봉, 가이드 관, 연료봉)를 이용한다.

열수력학적 평가를 위해 사용하는 Karlstein의 프라마툼 ANP

flow loop Kathy는 세계적으로도 매우 독창적인 설비로 다음에 좀 더 자세히 설명하겠다. 이 설비는 고객의 국가 안전 규제 기관이 요구하는 열속을 다양한 형태로 시험할 수 있는 임계 열속(Critical Heat Flux ; CHF) 시험이 가능하다.

3. 열수력학적 평가 : 임계 열속 시험

유체와 접촉하는 표면이 받는 열속이 계속해서 증가하면, 어떤 지점에서 가열 표면과 유체와의 접촉이 불충분해지게 된다. 이러한 현상을 일컬어 임계 열속(CHF)이라 한다.

원자로에서 임계 열속은 열전달 매커니즘이 갑자기 왜곡되어 피복재의 온도 폭주를 야기하는 것으로 설명할 수 있다. 이는 연료봉의 파손을 야기할 수 있기 때문에 반드시 피해야만 하는 것이다.

가. Multifunction Thermal Hydraulic Test Loop KATHY, Karlstein(독일)

각 연료 집합체 설계는 스페이스 설계에 따라 달라지는 자체적인 CHF 특성을 가지고 있다.

현재까지도 원자로 냉각재가 연료 집합체를 흐를 때 발생하는 열수력학적 과정을 필요한 수준으로 정확하게 모사하는 것이 불가능하기 때문에 실험을 통한 검증이 매우 중요하다.

프라마툼 ANP는 PWR과 BWR

연료 집합체의 CHF와 다른 수력학적 특성을 조사하기 위해 1986년부터 Karlstein에 있는 Multifunction Thermal Hydraulic Test Loop를 성공적으로 이용하고 있다.

빠르게 반응하는 조작부는 원자로 과소상태시 CHF 안전 여유도를 확인하기 위해 펌프 트립이나 열 제거원 상실과 같은 시뮬레이션 원자로의 과소 상태를 일으킨다.

특히 BWR 연료 집합체 인허가에 필요한 상황을 별도로 조성하기도 한다.

또한 BWR 연료 집합체의 수력학적 안정성을 시험하기 위해 특수한 자연 순환 루프를 시험 루프에 연결할 수 있다.

모든 시험은 순차적인 상황에서 수행된다. BWR 연료 집합체에 있어서 세 개의 서로 다른 비균일 축방향 출력 프로파일에 대한 전 범주 시험은 표준으로 수행된다.

PWR용으로는 8피트부터 14피트까지 길이를 포괄하는 CHF 시험에 통상 5×5 연료 element section이 사용된다. 시험 루프의 전력에 따르면, 7×7까지 시험할 수 있다.

시험 루프의 핵심은 시험용 번들에 따라 적용 가능한 시험로이다. 연료봉을 모사한 시험용 번들의 가열봉은 15MW DC 정류기를 이용하여 직접 가열된다.

실험실의 25 MW HP 보일러가

전 원자로 상황에서 단열 2상 (two-phase) 압력 강하 시험을 가능하게 한다.

130kW HP 원심 펌프가 냉각수를 순환시킨다. 300kW 전기 가열 가압기는 시스템 압력을 보여주고, 또한 자동적으로 시험 루프를 가열한다.

현대적인 자동 제어 계측 시스템이 2명 정도의 최소 인원으로 시험 루프 운전이 가능하도록 했다.

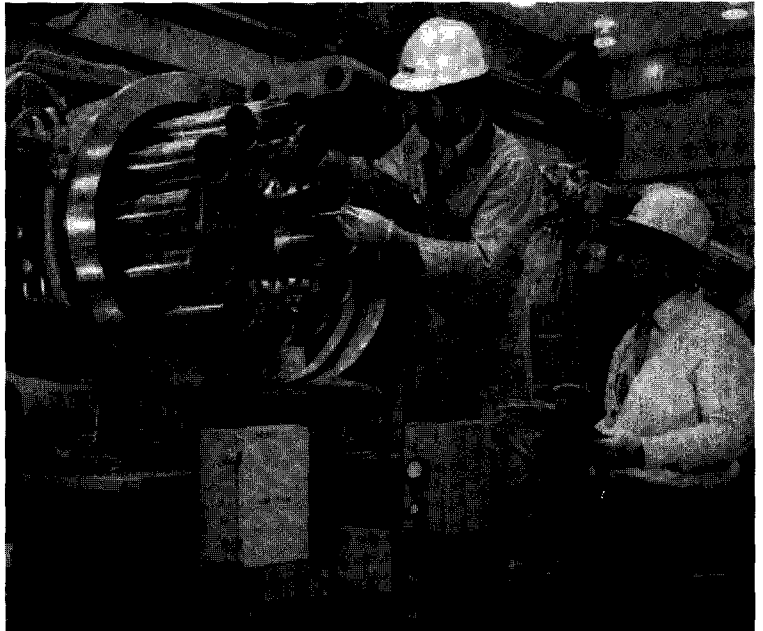
나. KATHY의 임무

KATHY는 다음 측정을 수행할 수 있는 기술적 환경을 제공한다.

- 전 범주 BWR 연료 집합체의 임계 열속 실험
- PWR 연료 집합체의 임계열속 실험
 - BWR과 PWR 연료 집합체의 단상 압력 강하 측정
- 시험용 번들의 단열 2상 압력 강하 측정
- 단열 2상 압력 강하 측정
- 감마 레이 밀도 측정기로 Void 비율 측정
 - BWR 연료 집합체에 원자로 과도 현상 시뮬레이션(예, 펌프 트립, 터빈 트립)
 - BWR 연료 집합체의 수력학적 안정성 평가

다. 검증

Karlstein 연구소는 DIN EN ISO 9001인증을 받았고, DIN EN ISO/IEC 17025를 근거로 인가받



AREVA 연료사업부(Framatome ANP 연료부)의 연료 제작 라인인 프라마툼 ANP, 미국의 Inc, 프랑스 FBFC, 벨기에 FBFC인터내셔널과 독일 ANF(Advanced Nuclear Fuels GmbH)의 연료제작부로 이루어져 있다.

았다.

다른 루프들과 비교 검증하는 등 KATHY 루프의 검증에 각별한 주의를 기울였다. 공장이 운전되기 시작한 이후, 최초의 측정이 수행되어 얻어진 열수력학적 데이터는 GE ATLAS 루프와 비교하였다.

후에 PWR을 위한 CHF 측정의 성능을 위해 KATHY를 벤치마크 하려는 막대한 측정 프로그램이 시작되었다.

이러한 시험 프로그램을 통해 프랑스 Grenoble에 있는 OMEGA 루프에서 이미 수행된 측정과 뉴욕 콜롬비아 대학에서 운영중인 HTRF 루프의 측정이 반복되었다.

모든 교차 비교 결과는 훌륭하였

으며, 다른 실험 루프에 비하여 KATHY 루프의 열수력학적 기술적 능력이 충분함이 입증되었다.

최신 기술을 반영하여 끊임없는 업그레이드가 이루어지고 있다. 그 예로 2차 PWR 시험부의 업그레이드를 들 수 있는데, 감마선을 이용한 밀도 측정 장비와 제어 계통, 새로운 데이터 취득 등을 업그레이드 하였다.

KATHY는 연구 분야의 변화, 연료 성분 설계의 개발에 준비가 되어 있다.

독창적인 장점을 바탕으로 우리의 제작과 기술력은 고객을 만족시키고, 미래를 대비하려는 전략에 따라 끊임없이 진보하고 있다. ☞