

고성능 신소재 핵연료 피복관

정 용 환

한국원자력연구소

지르코늄신합금 핵연료피복관 개발과제책임자



핵 연료의 경제성을 증가시키기 위한 장주기/고연소도 운전, 열효율을 향상시키기 위한 고온 가동, 발전소 1차 계통의 방사선량을 감소시키기 위한 고pH 운전 등으로 운전 조건이 변함에 따라 30여년 전에 개발된 Zircaloy 합금은 핵연료 피복관으로서 더 이상 사용이 어렵게 되었다.

따라서 이와 같은 운전 조건에서도 원자로 가동중에 핵연료의 건전성을 유지하기 위해서는 피복관의

노내 성능이 개선되어야 한다. 이 중에서 고연소도에서 가장 심각하게 대두되는 문제점은 피복관의 부식이다.

연소도가 증가함에 따라 산화막의 두께가 점차 두꺼워져서 피복관의 건전성을 유지할 수 없을 뿐 아니라 열전도도의 감소로 인해 운전 효율도 떨어지게 된다. 또한 피복관에서는 부식이 일어나면서 반드시 수소 흡수 현상이 수반되는데, 수소 흡수량이 일정량 이상이면 수소화물이 형성되고 이로 인해 핵연료 피복관은 취화된다.

부식 현상과 더불어 고연소도에서 심각하게 대두되는 또 다른 문제점은 피복관의 크립 변형이다. 피복관 크립은 주로 반경 방향으로 일어나 피복관의 직경을 감소시킨다.

이러한 경우 지지 격자 내 스프링이 본래의 역할을 제대로 하지 못하게 되므로 연료봉의 진동을 발생시켜 연료봉 프레팅 마모로 인한 피복관 파손의 원인이 된다. 아울러 연

료봉은 중성자 조사에 의해서 연료봉 길이 방향으로 성장을 일으켜 핵연료 상단부와 접촉이 이루어지지 않아야 한다.

따라서 원자력 선진국에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 내부식성과 크립 저항성이 우수한 지르코늄 신소재 핵연료 피복관을 개발하기 위한 많은 연구를 수행해 오고 있으며, 특히 일부 신합금 핵연료 피복관은 이미 노내 성능이 검증되어 상용 원자로에서 연소중이다.

전세계적으로 고연소도 핵연료 피복관용 신합금 개발 연구가 활발히 추진되고 있는 상황에서 국내에서도 1997년부터 한국원자력연구소를 중심으로 국내 독자 소유권을 갖는 신합금 개발을 시작하여 현재 시제품 피복관을 제조하여 노외 성능을 평가하는 단계에 이르렀다.

본고에서는 현재 개발하고 있는 국산 신합금 핵연료 피복관의 개발 경위, 개발 내용, 향후 전망에 대해

여 간략하게 논술하고자 한다.

신소재 피복관 개발 국외 기술 수준

1. 미국

미국의 Westinghouse사는 1970년 초부터 신소재 피복관 개발을 시작하여 새로운 핵연료 피복관용 신합금 개발 연구를 수행하였다. 가공성, 기계적 성질, 물과 수증기에서 장시간의 부식성 등의 노외 특성 평가로부터 최종 선정된 몇 종의 후보 합금들을 BR-3 연구로(벨기에)에서 1976년부터 10년 동안 조사 시험을 수행하였다.

이 조사 시험에서 얻은 결과를 바탕으로 ZIRLO(Zr-1.0Nb-1.0Sn-0.1Fe) 합금을 차세대 피복관으로 선정하였다. ZIRLO 합금은 Zircaloy-4에 비하여 열처리 온도를 낮추고 열처리 시간을 늘려 석출물을 미세하게 분포시키는 제조 공정을 도입하여 미국의 상용 원자로(North Anna 1 및 V. C. Summer)에서 부식·크립·조사 성장 등의 조사 특성을 평가하였다.

노외 부식 시험 결과에서 ZIRLO 피복관은 Zircaloy-4 보다 우수한 부식 특성을 나타냈다. 특히 ZIRLO 피복관은 LiOH 조건에서 부식 저항성이 우수한 것으로 보고되고 있다.

North Anna 1호기에서 3주기(55 GWD/MTU) 시험한 결과에서

도 연소도가 증가함에 따라 ZIRLO의 내식성은 Zircaloy-4에 비하여 우수하였으며 조사 크립 및 조사 성장 측면에서 ZIRLO 연료봉의 치수 안정성은 Zircaloy-4 보다 우수한 것으로 나타났다. V.C. Summer 원자로의 노내 조사 시험 결과에서도 ZIRLO의 부식 및 치수 안정성은 우수하다는 것이 검증되었다.

현재 Westinghouse사는 내식성을 향상시키고자 ZIRLO의 조성 중에서 Sn 함량을 약간 줄인 Low Sn ZIRLO 개발에 연구를 치중하고 있다.

2. 독일

독일의 Siemens사는 1980년 초부터 신소재 피복관 합금 개발에 착수하였는데, 처음 단계에서는 ASTM 규격을 벗어난 대체 Zr 후보 합금을 선정하였으며 부가적으로 Nb이 첨가된 신합금을 고려하였다. 여러 가지 신합금에 대한 고온/고압의 물과 수증기 분위기와 LiOH 분위기에서 노외 시험을 실시하였고 Gösgen 원자로에서 노내 시험을 수행하였다.

노외 시험에서 Sn 함량을 ASTM 규격 이하로 줄였을 때 내식성이 크게 향상됨을 발견하였다. 즉 Sn을 1.0% 이하로 첨가하였을 때 내식성은 Sn량이 감소함에 따라 급격히 증가하였다.

그러나 많은 합금들은 물 분위기

에서 우수한 성능을 보였지만 LiOH 분위기에서는 오히려 Zircaloy-4 보다 더 나쁜 내식성을 나타냈다. 그리고 LiOH 분위기에서 부식 특성은 신합금이 어떤 열처리 과정을 거쳤는가에 따라서 아주 민감한 결과를 보였다.

노내 조사 시험에서 신합금 피복관들의 내식성은 기존의 Zircaloy-4나 PCA에 비하여 월등히 향상됨을 알 수 있었다. 신합금의 중성자 조사 특성은 Zircaloy-4와 비슷한 경향을 보였으며 부식 거동이 우수한 신합금들이 기계적 거동에 있어서는 매우 나쁜 거동을 보였다.

이런 단점을 보완하기 위하여 Zircaloy-4 피복관 외부층에 신합금을 입혀서 내식성과 크립성이 동시에 우수한 「Duplex」 피복관을 사용하면 극복할 수 있다고 판단하였다.

따라서 낮은 Sn을 함유한 합금에서 발생하기 쉬운 조사 크립 문제를 ELS 0.8 Duplex tube를 사용하여 극복하였다. Duplex는 LOCA 조건에서도 기존의 Zircaloy-4와 거의 유사한 거동을 보였다.

3. 러시아

러시아에서 개발한 E635 합금은 Zr에 Nb·Sn·Fe를 각각 0.9~1.1%, 1.0~1.4%, 0.3~0.5% 첨가한 합금으로서 합금의 조성이 미국에서 개발된 ZIRLO 합금과 매우

유사하다. 옛 소련이 붕괴되기 전에 이미 러시아는 이런 조성의 E635 합금을 개발하여 발표한 바 있다. 아이러니컬하게도 비슷한 조성의 ZIRLO 합금이 미국에서 태어나서 현재 세계 피복관 시장을 장악하려고 시도하고 있다.

E635 합금은 α 결정립과 Zr·Nb·Fe로 구성된 제2상으로 이루어져 있으며 피복관 제조시 반경 방향으로 집합 조직이 잘 발달된 특징을 가지고 있는 것으로 노의 부식 시험 결과 E635 합금의 산화막은 항상 검은색의 치밀한 형태였으며 금속 내의 수소 흡수량도 크지 않았다.

LiOH 수용액에서도 E635 합금의 내식성은 Zircaloy 합금에 비하여 매우 우수하였으며 LiOH 수용액에서 내식성이 매우 우수하다고 알려진 ZIRLO 합금보다도 우수한 것으로 나타났다.

E635합금은 노내 부식 저항성과 중성자 조사시 높은 치수 안정성이 입증되어 차세대 핵연료 피복관 재료로 주목받고 있으며, 특히 상용 원자로에서 장기간 운전하였을 때 제반 특성이 기존의 상용 피복관들보다 매우 우수하였다.

따라서 E635 합금은 동구권 및 서방 원자로의 핵연료 피복관·안내관·지지 격자 등의 노심 내의 부품 재료로 사용될 것으로 기대되고 있다.

4. 프랑스

프랑스의 Framatome사는 고연소도 운전 조건에서 연료봉의 부식, 크립 및 조사 성장에 관한 요구 조건을 충족시키기 위하여 1980년대에 핵연료 피복관용 Zr 신합금 개발 계획을 수립하였다. 65 GWD/MTU 이상의 고연소도를 달성할 수 있는 Zr 신합금 개발을 목표로 연구된 합금들 중에서 4종의 합금을 상업용 원자력발전소에서 조사 시험 후 1990년대 초에 제반 특성이 가장 우수한 M5(Zr-1Nb-0.12O) 합금을 제안하였다.

프랑스가 개발한 M5 합금은 공교롭게 러시아에서 30년 이상 피복관으로 사용되는 E110(Zr-1.0Nb) 합금과 조성이 매우 유사하다. 단지 산소의 조성을 0.12 중량%로 증가시켰다는 것을 강조하나 일반적으로 Zircaloy 합금에서는 항상 이 정도의 산소가 첨가되고 있다.

M5 피복관이 러시아의 E110 합금과 크게 다른 점은 조성보다는 제조 공정을 크게 변형시킴으로써 강도의 손실에도 불구하고 부식과 크립 저항성 향상에 중점을 두고 개발되었다는 것이다.

M5 피복관의 노외에서 부식 및 크립 특성을 평가한 결과, 부식 특성에 중요한 영향을 미치는 제조 변수로서 중간 열처리 횟수를 늘리면 부식 속도가 증가하였으며, 중간 열처리 온도를 높이면 크립 저항성이

현저히 상승되나 부식 저항성은 반대로 저하되었다.

M5 피복관에 대한 노내 시험에서 산화막 두께는 Zircaloy-4에 비하여 매우 얇았으며, 63 GWD/MTU의 연소도에서 최대 산화막 두께가 27 μ m 정도로 부식이 가속되지 않음을 알 수 있었다. M5의 수소 흡수량은 연소도 증가에 관계없이 매우 낮은 것으로 나타났다.

5. 일본

일본의 미쯔비시사는 기존의 핵연료 피복관로 이용되고 있는 Zircaloy-4에 Nb를 0.5% 첨가하여 MDA 합금을 개발하였다.

MDA는 360 $^{\circ}$ C 물에서 노의 부식 저항성이 Zircaloy-4에 비해 40% 향상된 결과를 나타냈다.

MDA는 Vandellos 2 원자로에서 3주기(45 GWD/MTU) 연소 후 최대 산화막 두께는 약 30 μ m으로 Zircaloy-4보다 낮은 값을 나타냈다. 이와 같은 MDA의 부식 저항성의 향상은 고연소된 연료봉에서 확연하게 나타났다.

MDA의 조사 성장은 Zircaloy-4의 50% 정도이고 조사 크립 성질도 Zircaloy-4 보다 우수할 것으로 예측되고 있다. 판재 형태 4종류의 MDA 시편은 1998년부터 Halden 원자로에 장전되어 현재 조사 시험중에 있으며, 약 50 GWD/MTU까지의 연소도를 얻을

수 있도록 2002년까지 조사 시험을 수행할 예정이다.

또한 일본의 NFI(Nuclear Fuel Industries)와 SMI(Sumitomo Metal Industries, Ltd.)는 공동으로 핵연료 집합체의 연소도를 55 GWD/MTU까지 확장하고 부식 특성이 우수한 핵연료 피복관을 개발하기 위하여 NDA 합금을 개발하여 노내의 특성을 평가하고 있다.

NDA의 노외 부식 특성 및 수소 흡수성은 Zircaloy-4 보다 우수한 것으로 보고되었다. 인장·크립·파열을 포함한 기계적 특성도 Zircaloy-4와 거의 유사한 것으로 나타났다.

NDA 피복관에 대한 연구로 노내 시험은 BR-2 연구로(벨기에)에서 30 GWD/MTU의 연소도까지 수행되었다. 산화막 두께는 15 μ m 이하였고 Zircaloy-4와 거의 같은 수준으로 핵연료 건전성에는 영향이 없는 수준으로 나타났다.

NDA 피복관은 McGuire 1 상용 원자로와 Kansai Ohi 4 원전에서 노내 시험한 경우에서도 부식과 조사 성장량이 Zircaloy-4에 비하여 낮은 수준으로 나타났다.

국내 신소재 핵연료 피복관 개발 현황

한국원자력연구소에서는 독자 소유권을 가지며 국제 경쟁력을 갖춘 고연소도 핵연료용 신합금 핵연료

피복관을 개발하기 위하여 1997년부터 정부 지원 중장기 과제의 일환으로서 신합금 피복관 개발에 관한 일련의 연구를 체계적으로 추진하여 왔다.

1. 예비 합금 설계 및 성능 평가

고연소도 핵연료 피복관용 신합금 설계를 위해서 먼저 외국의 신합금 개발 현황을 면밀히 분석하고 철저한 특허 조사를 통해서 신합금이 개발된 후에도 특허 분쟁을 방지할 수 있는 방안을 도출하였다.

신합금의 성능은 합금의 조성뿐만 아니라 제조 공정에 의해서도 상당한 영향을 받으므로 합금의 용해 시 성분 원소를 제어하는 것은 매우 중요하였다. 따라서 여러 번의 반복 용해 및 분석을 통해서 원하는 조성을 $\pm 5\%$ 이내에서 제어할 수 있는 기술을 수립하였다.

또한 시편 내에서 합금 성분이 균일하게 분포되지 않으면 최종 성능에 악영향을 미치므로 이를 극복하기 위하여 최적의 용해 조건을 확립하였다.

예비 신합금의 조성 및 제조 공정을 최적화하려는 연구를 병행하여 기존의 상용 피복관 보다 우수한 부식 특성과 기계적 특성을 가진 후보 신합금을 3년이라는 빠른 시간에 선정할 수 있었다.

가. 부식 성능 평가

예비 합금의 부식 특성을 평가하

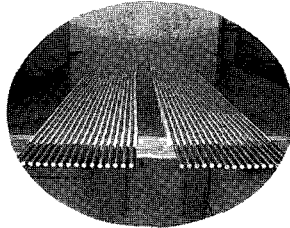
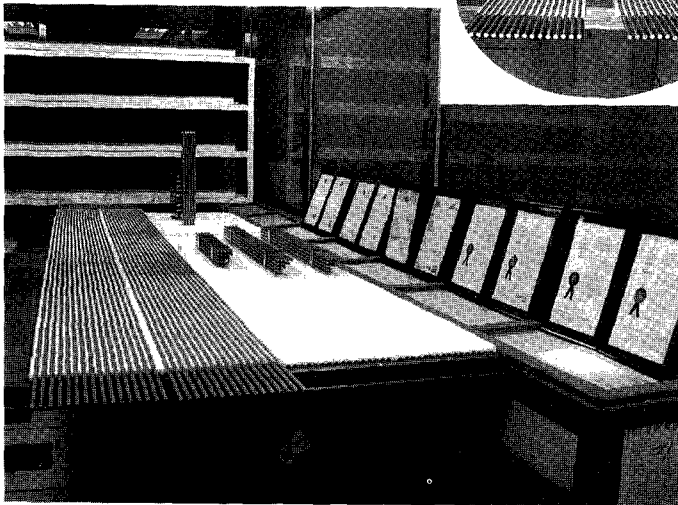
기 위해서 ASTM 기준에 따라서 360 $^{\circ}$ C water와 400 $^{\circ}$ C steam 분위기에서 내식성을 평가하였으며, 원자력발전소 내에서 내식성을 평가하는 기준인 LiOH 조건에서도 부식 시험을 동시에 수행하였다.

1, 2, 3차 시험에서 우수한 내식성을 보였던 일부 합금들은 4차, 5차에서 다시 제조하여 부식 성능을 반복해서 정확히 재평가하고자 하였다. 그 결과 처음에 우수한 내식성을 보였던 합금들은 계속해서 우수한 부식 특성을 나타냈다.

이와 같은 방법으로 총8회에 걸쳐서 약 700종의 시편을 제조하여 부식 특성 평가 시험을 실시하였다. 또한 부식 저항성을 보다 향상시키기 위하여 첨가되는 합금 성분에 따라 제조 공정을 조금씩 변화시켜 최적의 조건을 찾으려고 시도하였다.

새로이 개발한 신합금들의 내식성을 외국에서 개발한 ZIRLO 피복관 및 기존의 피복관인 Zircaloy-4와 비교하여 평가함으로써 신합금의 개발 방향과 가능성을 파악할 수 있었으며, 일부 신합금들은 ZIRLO 및 Zircaloy-4 보다 우수한 노외 부식 특성을 나타냈다.

내식성이 우수한 합금들 중에서 기존의 특허 범위를 피할 수 있는 20종의 신합금을 1차적으로 선정하였는데, 이들 합금에 대해서 집중적으로 연구를 수행하여 2차 후보 합금 10종을 선정할 수 있었다.



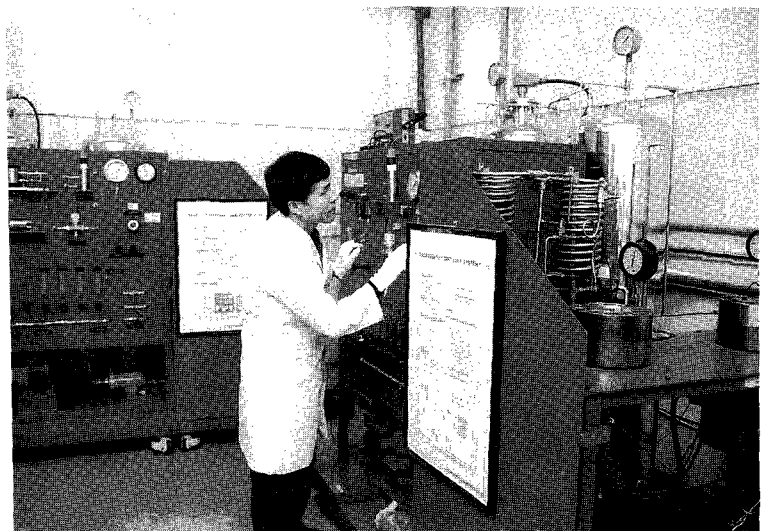
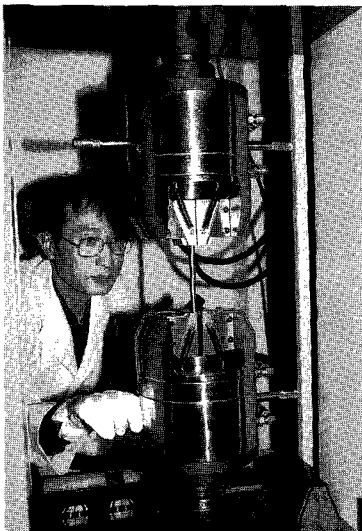
고연소도 국산 신합금 핵연료 피복관

나. 기계적 성능 평가

부식 시험을 실시하여 내식성이 우수하다고 평가된 합금들에 대해서만 상온과 고온에서 인장 시험을 실시하였다. 인장 시험 결과 대부분의 합금들은 ASTM 시방값 보다 매우 우수한 기계적 강도를 나타냈다.

그러나 기계적 특성은 시편의 제조 공정에 따라서 크게 달라질 수 있으므로 피복관 제조시에 열처리 공정을 충분히 제어하여 최적의 강도를 유지할 수 있는 조건을 수립하였다.

크립 시험은 긴 시험 시간이 소요되기 때문에 시험편의 선정은 이미 수행된 부식 시험 결과와 인장 실험 결과로부터 내식성이 우수하면서도



고연소도 국산 신합금 핵연료 피복관 특성 평가

강도 및 연신률이 우수한 합금을 우선적으로 선정하였다.

다. 미세 조직 분석

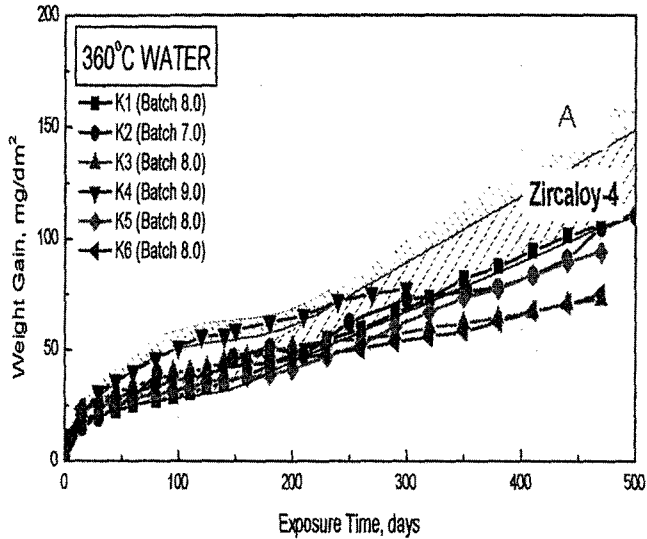
각각의 신탐금에 대하여 제조 단계 별로 광학 현미경을 이용하여 미세 조직을 관찰하였으며, 특히 관심을 두는 합금에 대해서는 전자 현미경(TEM) 분석을 통해서 석출물의 조성이나 크기 등을 면밀히 관찰하여 부식 및 기계적 특성에 미치는 미세 조직의 영향을 분석하는 데 활용하였다.

2. 후보 합금 선정 및 공정 최적화

150여종의 예비 합금을 8회에 걸쳐서 판재 시편으로 만든 후 부식·인장·크립 시험을 실시하여 Zircaloy-4 보다 내식성이 우수한 20여종의 합금을 1차적으로 선정하였다.

이들 1차 후보 합금은 설계 및 가공을 재실시하여 부식 시험과 기계적 특성 평가를 통해서 성능을 검증하는 시험을 실시하였다. 또한 20여종 합금을 그룹별로 분리하여 공정을 최적화하는 연구를 동시에 수행하여 성능을 최대한 향상시키는 연구를 수행하였다.

이러한 일련의 성능 평가를 통해서 내식성과 기계적 특성이 ZIRLO 보다 우수한 최종 후보 합금을 선정하게 되었다(그림 1). 이 신탐금들은 미국·일본·중국·한국에 특허를 출원하여 미국·일본·한국에서



〈그림 1〉 최종 후보 합금들의 부식 특성

9건의 특허가 등록되어 합금 조성 및 공정에 대한 독자 소유권을 확보하였다.

가. 중간 열처리 영향 평가

본 신탐금의 주요 관심 대상인 Nb 첨가 합금의 열처리 변수와 부식 특성과의 상호 관계를 규명하기 위하여 Nb의 첨가량 및 열처리 변수가 부식 저항성에 미치는 영향을 평가하였다. 일반적으로 Zircaloy-4에서는 열처리 변수가 증가함에 따라 내식성이 증가하는 것으로 알려져 있으나 Nb 첨가 합금에서는 열처리 변수가 적을수록 내식성이 증가하는 결과를 나타냈다.

따라서 시제품 피복관 제조시 가능한 낮은 온도에서 열처리를 실시하여 내식성을 향상시킬 수 있을

것으로 평가하였다.

나. 재결정 조건 평가

신탐금 개발시 각 제조 공정에서 열처리 조건은 재료의 모든 성능을 좌우하기 때문에 매우 중요하다. 이러한 열처리 조건을 확립하기 위해서는 재료가 갖고 있는 재결정 특성을 파악하기 위한 연구는 반드시 수행되어야 하므로 신탐금의 재결정에 미치는 합금 원소의 영향을 평가하였다.

Sn량이 증가함에 따라서 재결정 온도는 증가하였으며 재결정의 결정립 크기는 감소하였다. 냉간 가공재의 재결정은 500℃~700℃에서 완료되었으며 경도 변화는 미세 조직 변화와 잘 일치하는 경향을 보였다.

다. 최적 제조 공정 확립

신합금이 실제로 상용화되기 위해서는 내식성이나 기계적 성질을 최대한 향상시키도록 최적의 제조 공정이 확립되어야 한다. 특히 신합금의 열처리에 따른 상변태 특성을 파악하는 것이 선행되어야 하므로 신합금의 합금 조성과 열처리의 변화에 따른 미세 조직의 변화로 인한 부식 특성을 평가하였다.

신합금 모두 베타 열처리와 냉간 가공을 연이어 수행하고 마지막 열처리를 수행한 공정이 베타 열처리 후에 바로 마지막 열처리를 수행하는 공정에 비하여 비교적 미세한 Nb 함유 석출물이 형성되어 내식성 향상에 기여하였다.

라. 마지막 열처리 공정 최적화 연구

신합금의 내식성과 기계적 특성은 최종 열처리에 매우 민감하게 나타냈다. 최종 열처리 온도가 높을수록 후보 합금의 내식성이 향상되는 경향을 보였다.

한편 기계적 특성은 최종 열처리 온도가 상승함에 따라 항복 강도 및 최대 인장 강도가 감소하였으나 연신율은 반대의 현상을 나타내었으며, 첨가 원소의 함량이 많을수록 우수한 기계적 특성을 보였다.

3. 시제품 피복관 제조 및 성능 평가

피복관 제조를 위해서 먼저 피복관 제조의 중간 제품인 TREX

(Tube Reduced Extrusion)를 제조한 다음 이를 여러 가지 열/기계적 공정을 거쳐 tube 상태의 완제품을 생산한다.

Westinghouse · Siemens /KWU · Zircotube · Sumitomo · Sandvik 등 기존 피복관 제조 회사들의 Zircaloy-4 및 개량 피복관들에 대한 제조 공정을 분석하고 국산 후보 합금들에 대한 판재 제조 경험을 부과하여 TREX 제조 공정을 도출한 후 TREX 제조사인 WahChang사와 기술 협의하여 최종 제조 공정을 확정하였다.

그 후 TREX 제조를 위한 제조 시방서를 작성하여 2종(K1, K2)의 TREX 제조를 WahChang사에 의뢰하였다. 제조된 TREX는 추후 국산 피복관의 제조 공정을 최적화하기 위해 각 합금별로 서로 다른 4가지 조건의 진공 열처리를 도입하여 중간 열처리 온도 변화가 최종 피복관 성능에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

TREX 제조 공정과 마찬가지로 tube 제조에 대한 해외 현황 분석 및 판재 시편 제조 경험을 바탕으로 일본의 ZircoProducts사와 협의하여 tube 제조 공정을 확정하고 tube 제조에 필요한 제조 시방서를 작성하였다.

또한 국산 신합금 피복관의 중간 열처리 온도 및 최종 열처리 온도를 최적화하기 위해 서로 다른 24개의

열처리 공정을 도입하여 제조하도록 하였다.

시제품 피복관의 품질은 상용 피복관과 동일한 엄격한 기준을 적용하여 검사하도록 하였으며 제조 후 품질 검사뿐만 아니라 부식·기계적 특성·집합 조직·수소화물·결정립 크기 등 여러 가지 시험을 Zirco Products사와 국내에서 병행함으로써 시험 결과의 신뢰성 향상을 확보하고자 하였다.

가. 중간 소재(TREX) 특성 평가

시제품 피복관을 제조하는 중간 소재인 TREX를 포함한 중간 가공된 반제품을 입수하여 각 제조 단계에서 미세 조직·집합 조직·경도, 부식 특성을 평가하였다.

TREX의 방향에 따른 미세 조직을 관찰한 결과, 열처리 온도가 580℃에서 640℃로 증가함에 따라 결정립이 성장하는 것으로 나타났으며, K2가 K1보다 결정립 크기가 불균일한 부분들이 다소 존재하는 것으로 관찰되었으나 전체적으로 K1 TREX보다는 미세한 조직을 갖는 것으로 나타났다.

TEM 미세 조직 관찰에서 580℃와 640℃의 열처리 온도 범위에서는 모든 합금들이 재결정 조직을 가지고 있는 것으로 나타났다. 재결정 입자 내에 다수 석출물이 분포하고 있는 것으로 관찰되었다. 또한 제조 단계가 증가함에 따라 결정립은 미세화되는 경향을 나타냈다.

부식면의 f_n 지수가 높을수록 내식성이 우수한 것으로 나타났으며, basal pole이 부식면의 수직 방향에 가까울수록 내식성이 향상되는 것으로 확인되었다 <그림 2>. K1과 K2 tube의 제조 공정 단계에 따른 경도 값은 냉간 가공 회수가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며 경도 값이 증가하는 경향은 K1과 K2 합금 모두 유사하였다. TREX의 부식 특성은 열처리 온도에 관계없이 K2 TREX의 내식성이 K1 TREX보다 우수한 것으로 나타났는데, 이는 K2 TREX의 경우가 K1 TREX에 비하여 제조 공정 동안 열처리를 적게 받았기 때문인 것으로 판단된다.

나. 시제품 피복관 특성 평가

신합금 피복관(K1, K2)에 대한 부식 시험을 수행하여 내식성을 평가하였다. 부식 시험에서 신합금 피복관은 ZIRLO 및 Zircaloy-4 등의 외국 피복관보다 내식성이 최고 30% 정도 우수한 것으로 확인되었고 K2 시제품 피복관이 K1에 비하여 우수한 내식성을 가지고 있는 것으로 나타났다 <그림 3>.

또한 K2 시제품 피복관에 대하여 내식성에 미치는 최종 열처리 온도에 대한 부식 특성을 살펴보았을 때, 응력 이완 열처리가 수행된 시편이 부분 재결정 열처리된 것에 비하여 내식성이 향상되는 것으로 확인되었다.

ASTM 요건에 따라 상온 및 400℃에서 신합금 피복관(K1, K2) 인장 특성을 평가하였을 때, 2가지 시험 조건에서 인장 강도는 기존의 Zircaloy-4 보다 높거나 비슷했으며 연신율은 Zircaloy-4와 대등하였다.

제조 공정 중의 TREX 열처리 및 중간 열처리 온도의 변화는 크립 강도에 거의 영향을 미치지 않았으며, 최종 열처리가 520℃에서 수행된 경우가 470℃에서 수행된 경우에 비해 크립 강도가 우수하였다 <그림 4>.

크립 저항성은 $M5 \approx K2(520^\circ\text{C}) > K1(520^\circ\text{C}) > K2(470^\circ\text{C}) \approx \text{Zry-4} > K1(470^\circ\text{C}) > \text{ZIRLO}$ 피복관의 순위를 보였다.

K1과 K2 피복관 모두 470℃에서 열처리한 시편이 520℃에서 열처리한 시편에 비하여 파열 강도는 높았으나 연신율은 낮았다. 470℃에서 열처리한 두 신합금 피복관 시편의 파열 강도는 Zircaloy-4 보다 높았고 ZIRLO 보다 낮았다. 그리고 470℃에서 열처리한 시편의 원주 방향 연신율은 Zircaloy-4와 비슷했지만 ZIRLO보다 우수하였다.

향후 추진 계획

고연소도 신합금 핵연료 피복관은 궁극적으로 노내 성능이 우수해

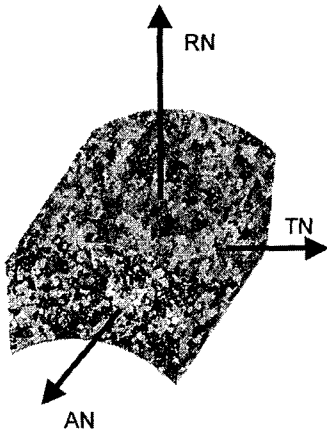
야 한다. 노내 성능을 검증하기 위해서는 상용로에서 시험을 수행하는 것이 최선이지만 여러 가지 문제가 있으므로 우선적으로 연구로를 이용하여 노내 성능을 검증한다.

원자력연구소의 하나로는 저비용으로 쉽게 활용할 수 있는 장점이 있지만 Loop가 설치되지 않았기 때문에 노내 부식 성능 등의 핵연료와 관련된 시험을 할 수가 없는 단점이 있다. 따라서 Loop를 이용한 국산 신합금 피복관의 노내 시험은 외국의 연구로를 활용하여 추진하는 것이 효율적이라 판단하고 있다.

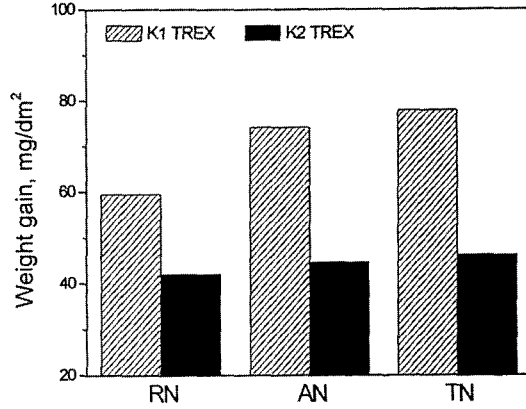
연구로를 이용한 국산 신형 피복관 노내 시험을 준비하기 위하여 단기간에 저렴한 비용으로 조사 시험이 가능한 방법과 수단을 모색하기 위한 사전 준비와 함께 가능성 있는 노르웨이(Halden) · 스웨덴(R2) · 벨기에(BR2) · 체코(LVR-15)를 방문하여 조사 시험과 관련된 시설을 확인하고 신합금 핵연료 피복관 조사 시험 방안을 협의하였다.

각 연구로의 시험 시설 및 검사 시설을 방문하고 각 설비의 조사 특성을 확인하였고 국산 신합금 피복관의 조사 시험 가능성 및 시험 일정을 협의하였다. 그리고 가능한 경우 개략적인 조사 시험 예상 비용 파악을 시도하였다.

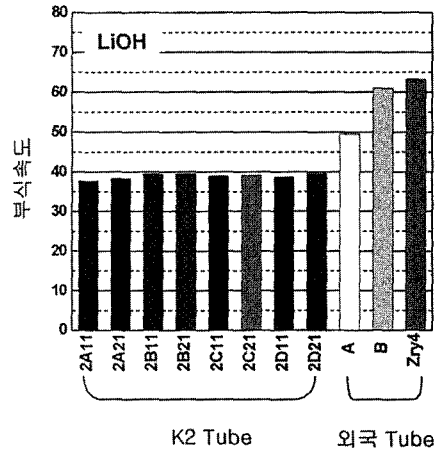
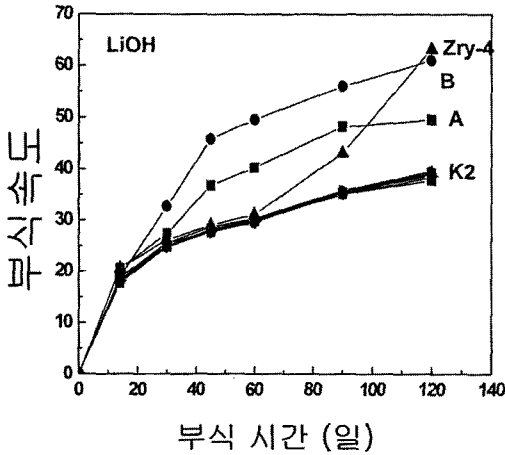
그 결과 연구로별 연간 가용 연소도 및 조사량, 신합금 핵연료 피복관에 대한 Loop 조사 시험 가능성,



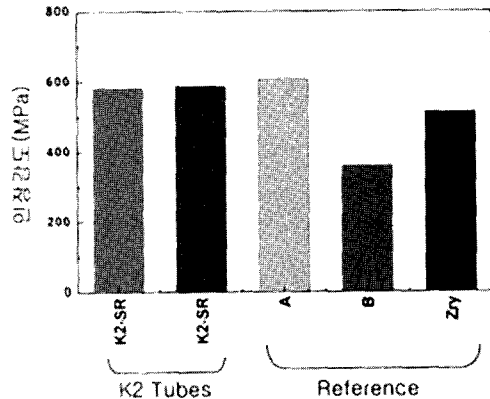
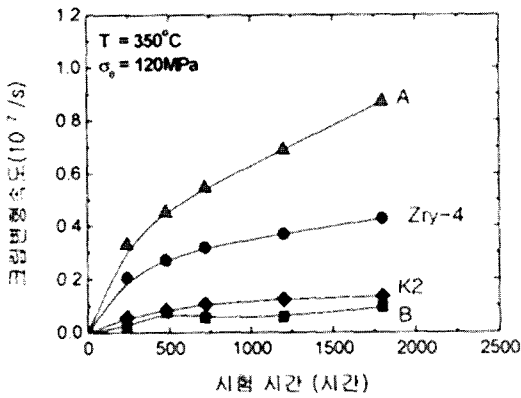
RN : Radial Normal
 AN : Axial Normal
 TN : Tangential Normal



(그림 2) TREX의 방향에 따른 미세 조직 및 부식 특성



(그림 3) 신합금 핵연료 피복관의 부식 특성



(그림 4) 신합금 핵연료 피복관의 크리프 특성

〈표〉 신합금 핵연료 피복관 노내 시험을 위한 연구로 평가

Hot-cell 검사역량, 연료봉 조사 시험 경험, 조사 시험 예상 비용, 연료봉 PIE 방법 등에 대한 정보를 수집하였다.

신합금 핵연료 피복관에 대한 조사 시험 방안과 관련하여 벨기에 BR-2를 제외하고 기본적으로 본 연구소가 제시한 시험 조건을 수용하는 시험 방안을 제시하였으나, 체코(LVR-15)는 사실상 연료봉 조사 시험에 성공한 경험이 없는 것으로 평가되고 BR-2의 경우는 연구로 운전 일수의 제한으로 연료봉 조사 시험에 많은 시간이 소요되는 것으로 평가되었다.

이에 반해 노르웨이(Halden)나 스웨덴(R2)은 많은 경험과 나름대로 노하우가 많이 축적된 것으로 평가되어 우호적인 측면에서 노르웨이(Halden)나 스웨덴(R2)과 접촉하여 구체적인 시험 조건과 시방을 수립하면 비교적 저렴한 비용으로 단기간의 조사 시험으로 신합금 피복관의 노내 성능을 검증할 수 있을 것으로 판단되었다(표).

향후 전망

핵연료 피복관은 핵연료 부품 단가의 약 60%를 차지하는 경제적으로 매우 중요한 부품임에도 불구하고 국산화되지 못하고 있는 실정이다. 국내 원전에는 불행히도 세계 각국의 피복관 제조 회사가 공급하

항목	HBWR (25MW) (노르웨이, HRP)	R-2 (50MW) (스웨덴, Studsvik)	BR-2 (100MW) (벨기에, SCK-CEN)	LVR-15 (100MW) (체코, NRI)
조사 시험 시설	<ul style="list-style-type: none"> • 시험 및 NDT 시설 우수 • 운전 일수 : 200일 • Flux 낮아 Booster 사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 시험 및 PIE 시설 우수 • 운전 일수 : 200일 	<ul style="list-style-type: none"> • PIE 시설 우수 • 운전 일수 : 약105일 • 고연소도 시험 곤란 	<ul style="list-style-type: none"> • 시설 취약 • 운전 일수 : 약200일
협의 내용	<ul style="list-style-type: none"> • KAERI안대로 시험 방안 5년 내에 70GWD/MTU • 시험 방안 재제출 예정 	<ul style="list-style-type: none"> • 조사 시험 전략 제시 • 연구로/상용로 병행안 	<ul style="list-style-type: none"> • 60GWD/MTU : 11년 • BR2에서 tube 시험 후 유럽의 상용로 장입 제안 	<ul style="list-style-type: none"> • 전기 가열 방식 제안 • 안전성과 신뢰성 의문
협조성	• 협조적이나 상업적임	• 매우 협조적임	• 매우 상업적임	• 매우 협조적임
종합 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 시설 및 경험이 우수하므로 시험 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 시설 및 경험이 우수하므로 시험이 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 시설과 경험은 우수하나 운전 일수 부족으로 정기간이 소요되어 시험 곤란 	<ul style="list-style-type: none"> • 시설 및 경험 부족으로 연료봉 시험 불가
예비 선정	○	○	×	×

는 매우 다양한 피복관이 사용되고 있다.

이러한 국내 실정을 고려할 때 국내 독자 소유권을 갖는 신형 피복관이 개발된다면 국내의 핵연료산업에 미치는 파급 효과는 상당할 것으로 예상된다.

또한 원자력 산업은 대기 오염이 없는 깨끗한 에너지임에도 불구하고 그 고유의 방사성 물질의 수반으로 항상 안전성 문제가 대두된다.

그러나 핵연료의 노내 건전성에 가장 큰 영향을 미치는 성능이 매우 우수한 신합금을 개발함으로써 원자로의 안전성을 제고하고 원자력에 대한 사회적 지지 기반을 확대할 수 있을 것이다.

따라서 새로이 개발된 신합금이

피복관이 노내 시험에서 우수한 성능이 재확인될 경우에 국내 핵연료 피복관의 수입 대체 효과는 매우 클 것으로 기대된다.

매년 핵연료 피복관을 수입하기 위하여 수백억원을 외국에 지출하는 현실정에서 국내 독자 소유권을 갖는 피복관이 개발되면 로열티 관점에서 상당한 외화 절감 효과를 가져올 수 있으며, 국내에 피복관 제조 설비가 갖추어질 경우에 제조 단가를 상당히 절감할 수 있기 때문에 국제 경쟁력이 매우 높게 된다.

그리고 국내에서도 자체적으로 독자 소유권을 가진 고성능 피복관을 개발함으로써 피복관의 국제 시장으로 진출도 모색할 수 있을 것으로 전망한다.