[논문] 열처리공학회지, 제18권 제5호(2005)
J. of the Korean Society for Heat Treatment, *Vol. 18, No. 5, (2005) pp. 288~296*

# 핵연료피복관용 Zr 합금의 제조공정에 따른 미세조직 및 부식거동

**김현길† · 최병권 · 김규태 · 김선두 · 박찬현 · 정용환**
한국원자력연구소 지르코늄신합금 핵연료피복관개발팀
한전원자력연료주식회사

# Microstructure and Corrosion Behavior of Zr Alloys with Manufacturing Process

**H.G. Kim†, B.K. Choi, K.T. Kim, S.D. Kim, C.H. Park and Y.H. Jeong**
*Zirconium Fuel Cladding Team, KAERI, 150 Doekjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea*
*Korea Nuclear Fuel Co., Ltd. Daejeon 305-353, Korea*

**Abstract** The corrosion behaviors of Zr-based alloys were very sensitive to their microstructures which were determined by manufacturing process. The specimens of Zr-based alloy named as HANA-4 for nuclear fuel cladding were investigated in order to get the optimized manufacturing process such as the intermediate annealing temperature and cold working steps after the β quenching. From the microstructural analysis, cold worked microstructure of the samples was changed to the recrystallized microstructure by performed process. The corrosion behaviors of HANA-4 alloy were affected by the different manufacturing process. The β-Zr phase was formed in the matrix and the Nb concentration in the β-Zr phase was increased as progressing the manufacturing process. So, it was found that the corrosion rate of HANA-4 alloy was affected by the Nb concentration in the matrix.
*(Received August 19, 2005; accepted September 17, 2005)*

***Keywords:*** *Zr, Fuel cladding, HANA alloy, TREX, Heat treatment, Microstructure, Corrosion*

## 1. 서 론

지르코늄 합금은 원자력발전소의 핵연료 피복관 재료로 사용되고 있으며 합금의 부식 및 기계적 특성은 발전소의 안전성 및 경제성을 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 원자력발전소의 안정적인 운전을 위해 우수한 성능의 핵연료 피복관용 지르코늄 합금 개발을 위한 연구가 여러 원전 선진국에서 진행되어 왔다. 최근에 보고된 부식저항성이 개선된 여러 지르코늄 합금은 방사선에 안정하고 내식성을 향상시키기 위하여 첨가원소 중에 Sn, Nb 및 Fe를 주요 합금원소로 선택하고 있다[1,2]. Sn은 Zr 합금에 치환형으로 고용되어 인장강도, 크리프 저항성 같은 기계적 특성을 매우 향상시키지만 첨가량이 증가되면 내식성을 감소시키는 합금원소이다[3]. Nb은 Zr 합금의 내식성을 향상시키는 매우 중요한 합금원소로서 기지내에 최대 고용한도로 첨가되면 내식성이 증가되고, 고용도 이상으로 첨가될 경우에는 β-Nb이 생성되도록 공석온도 이하에서 열처리를 수행하는 것이 내식성을 향상시키는 방안으로 알려져 있다[4]. Fe의 첨가는 지르코늄 합금의 내식성을 향상시키는데 약 0.2 wt.% 까지는 첨가량의 증가에 따라 지속적으로 내식성이 향상되지만 그 이상으로 첨가하면 내식성이 크게 향상되지 않는 것으로 보고되었다[5]. 한국원자력연구소에서도 기존 경수로 핵연료피복관인 Zircaloy-4보다 내식성 및 기계적 특성이 매우 향상된 지르코늄 합금을 개발하기 위한 연구를 수 년동안 수행하여 우수한 성능을 갖는 HANA 합금을 개발하였다. HANA 합금에 첨가되는 주 원소는 Nb, Sn, Fe, Cr 및 Cu이며 이들의 첨가량은 방사선 노출에 의한 안정성을 고려하여 약 2.5 wt.% 이내로 첨가하였다. 또한 HANA 합금의 조성은 Nb이 1.0 wt.% 이상으로 첨가되었기 때문에 튜브제조를 위한 가공 및 열처리 조건에 따라 성능이 크게 변하게

†E-mail : hgkim@kaeri.re.kr

된다. 따라서 HANA 피복관은 우수한 성능을 가질 수 있는 최적의 제조공정기술 개발이 필요하다.

지르코늄 핵연료 피복관의 일반적인 제조공정은 합금의 용해로부터 반제품인 TREX(Tube Reduced Extrusion)를 제조하는 상위공정과, 제조된 TREX로부터 지름 9.5 mm, 두께 0.57 mm, 길이 4 m의 튜브로 제조하는 하위공정으로 나눌수 있다. 본 연구는 한국원자력연구소에서 개발된 신형 HANA 합금의 상위제조공정인 TREX의 성능을 최적화 하기 위한 기초연구로서 TREX 제조공정에 도입되는 중간열처리 온도 및 냉간압연의 영향을 평가하여 피복관 제조를 위한 최적의 제조공정 조건을 설정하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

시험에 사용된 합금은 진공 arc로를 이용하여 button 형태를 갖는 400 g의 소형 잉곳으로 용해되었다. 합금의 용해는 Table 1에 제시된 조성을 갖는 HANA-4 합금에 대하여 실시하였고, 합금 용해시 발생하는 특정 합금원소의 손실률은 초기 장입량을 보정하여 제어되었다. 또한 합금의 용해 과정에서 발생할수 있는 합금원소의 편석을 방지하기 위하여 4번의 반복용해가 실시되었으며, 시편의 산화방지를 위하여 용해작업이 수행되기 전 chamber는 $10^{-4}$ torr 이하로 진공상태로 유지하였고, 용해 중에는 고순도의 Ar 가스를 주입하였다.

Table 1. Chemical composition of HANA-4 alloy

| Alloy | Chemical composition wt.% | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Nb | Sn | Fe | Cr | Zr |
| HANA-4 | 1.5 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | Bal. |

용해후 β 열처리는 HANA 합금의 β 영역에 해당하는 1050°C의 온도에서 30분유지 후 수냉 및 공랭의 두 가지 조건으로 냉각하였다. β 열처리된 시편은 Table 2와 같은 다양한 조건의 제조공정을 도입하여 8종의 판재시편으로 제작하였다.

광학관찰용 시편은 각각의 조건으로 열처리된 시편에 대하여 일정크기로 자른 후 mounting 하였다. Mounting 된 시편은 SiC 연마지를 이용하여 단계적으로 연마하였으며 연마 도중에 생길 수 있는 시편의 미세조직 손상을 최소화하기 위하여 high grit의 SiC 연마과정으로 갈수록 시간을 증가하였다. 연마된 시편은 물(40%), 질산(30%), 황산(20%), 불산 (10%)의 혼합용액으로 에칭하고 편광기능을 가진 광학현미경을 이용하여 미세조직을 관찰 하였다.

TEM 관찰용 시편은 각각 공정으로 제조된 HANA 합금을 여러 grit의 SiC 연마지를 이용하여 최종 70 μm 두께가 되도록 한후 지름 3 mm의 원형 시편으로 펀칭하였으며, 펀칭된 시편은 twin jet-polishing하였다. Jet-polishing 과정에서 용액은 에탄올(90%)과 과염소산(10%)의 혼합용액으로 만들고, 온도는 -40°C, 인가전압은 15V가 되도록 하였다. 제작된 TEM 관찰용 시편은 EDS가 부착된 JEOL FX 2000 모델의 TEM 장비로 분석하였다.

부식시험용 시편은 각각의 조건으로 열처리된 시편에 대하여 15×25×1 mm 크기로 방전가공한 후, 시편의 표면은 SiC 연마지를 이용하여 연마하여 방전가공으로 인해 형성된 조직의 변형 부를 모두 제

Table 2. Various manufacturing processes of HANA-4 alloy

| Process | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ingot melting | VAR | | | | | | | |
| Beta annealing | 1050°C×30 min | | | | | | | |
| Beta quenching | Water quenching at 1050°C | | | | | | | |
| Hot rolling | 610°C ×20 min | 580°C ×20 min | 610°C ×20 min | 610°C ×20 min | 610°C ×20 min | 610°C ×20 min | 610°C ×20 min | 610°C ×20 min |
| Vacuum annealing | X | X | 580°C ×3 hr | X | 580°C ×3 hr | X | 580°C ×3 hr | 580°C ×3 hr |
| Cold rolling | X | X | X | 50% | 50% | 50% | 50% | 50% |
| Vacuum annealing | X | X | X | X | X | 580°C ×3 hr | 580°C ×3 hr | 580°C ×3 hr |

거하였다. 부식시험 시편의 표면 영향을 최소화하기 위하여 시편은 물(40%), 질산(30%), 황산(20%) 및 불산(10%)의 혼합용액에서 40초간 pickling을 하였고, static autoclave를 이용하여 400°C, 10.3 MPa 조건에서 부식시험을 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

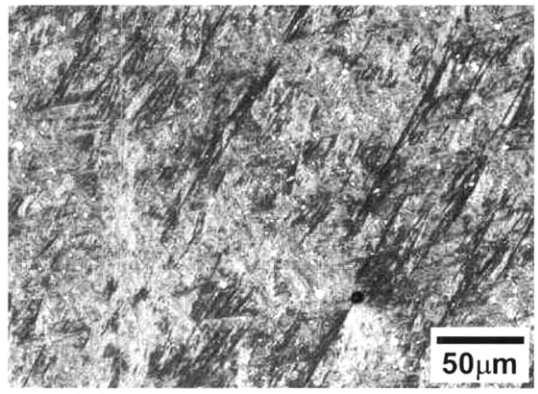
### 3.1 합금의 제조공정 변수

Table 2는 지르코늄에 고용도 이상[6]의 Nb이 첨가된 HANA-4 합금의 상위 제조공정에 대한 최적의 열처리 및 가공조건을 알아보기 위하여 여러가지 공정 변수를 제시한 것이다. 합금의 용해후 수행되는 β 열처리는 기존의 지르코늄 합금의 제조에 적용되는 조건으로 합금내에 첨가원소의 균질화를 목적으로 수행하며, β 열처리 이후에 합금의 제조에 수행되는 기본 공정은 열간압연, 진공열처리, 냉간압연 그리고 진공열처리의 순이다. 공정조건의 변수를 위해 열간압연전 전처리 온도는 Process 1 및 2와 같은 610°C 580°C로써, 이는 Zr-Nb 합금의 공석변태온도가 585°C[7] 이기 때문에 공석온도 이상과 이하의 열처리특성을 파악하고자 한 것이다. 580°C 전처리 후 열간압연을 수행한 경우에는 시편주위에 크랙이 형성되어 추가공정은 수행되지 않았다.

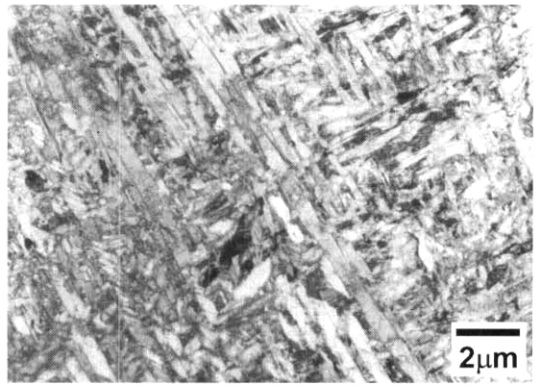
열간압연후의 중간 진공열처리는 Process 3, 5, 7, 8에 대하여 공석온도 이하인 580°C에서 수행하였고, Process 4, 6에 대해서는 수행하지 않았다. 이는 열간압연 이후에 진공열처리의 수행이 미세조직 및 부식에 어떠한 영향을 미치는가 평가하기 위해서 수행된 것이다. Process 4~8의 조건에서는 진공열처리 후에 50%의 냉간압연을 수행하였고, 냉간압연된 시편 중에 Process 6~8의 조건은 최종적으로 공석온도 이하, 이상인 580°C와 650°C에서 각각 재결정 열처리를 수행하였다. 중간 및 최종 열처리 온도조건의 설정은 Nb 첨가 지르코늄 합금의 부식이 공석온도 이하에서 수행되어 β-Nb이 생성되는 경우에 내식성이 향상되는 점을 인용하였고[4], Process 8과 같이 최종열처리온도를 650°C에서 수행한 것은 상위공정이후 하위공정에서 수행되는 냉간가공공정에서 발생할 가능성이 있는 가공성의 결여를 보완하고자 설정하였다. 이와 같이 본연구에 적용된 가공공정은 총 8가지로 구성되며 가공공정 중의 열처리 및 냉간가공의 수행여부와 열처리 온도에 따라 미세조직의 변화와 부식거동을 평가하여 최적의 공정을 파악하고자 하였다.

### 3.2 제조공정에 따른 미세조직

Fig. 1은 HANA-4 합금의 β 열처리후의 미세조직 특성을 OM 및 TEM으로 관찰한 것이다. β 열처리는 1050°C에서 30분간 유지되었고 냉각은 수냉방법에 의한 급랭을 적용하였다. Fig. 1의 (a)는 미세조직을 광학으로 관찰한 결과로서 미세한 판상의 plate가 형성된 것이 확인되었고, Fig. 1의 (b)에서 나타나는 TEM 관찰결과는 조직의 형태가 판상형의 plate가 존재하고 plate 내에 twin과 dislocation이 혼합된 형태로 나타났다.




(a) OM microstructure




(b) TEM microstructure

Fig. 1. Microstructure observation of HANA-4 alloy after water quenching at 1050°C.

지르코늄 합금은 β 상 영역에서 급랭시키면 고온 안정상인 BCC 구조가 마르텐사이트 변태를 일으키기 때문에 미세한 침상구조가 형성되는 것으로 알려져 있다[8-10]. 마르텐사이트 변태는 확산을 수반하지 않는 무확산 변태로서, 마르텐사이트 변태가 일어나기 위해서는 모상의 자유에너지보다 마르텐사이트의 자유에너지가 낮아야한다. 마르텐사이트 상으로 변태하기위해서 모상의 자유에너지는 여분의 에너지(즉 변태의 구동력)를 필요로 한다. 이러한 구동력은 모상과 마르텐사이트 상이 평형을 이루는 온도보다 낮은 온도로 과냉되어야 얻어질 수 있다. 또한 TEM 미세조직상에서 plate 계면이나 내부에 석출상이 관찰되지 않는 것으로 볼 때, HANA-4 합금에 첨가된 합금원소는 1050°C, β 상 영역에서 열처리하면 모두 기지조직 내에 과포화 고용되는 것으로 사료된다.

Fig. 2는 각각의 제조공정(Process 1-8)에 의하여 얻어진 시편의 미세조직을 광학현미경을 이용하여 관찰한 것이다. 용해된 잉곳을 1050°C에서 β 열처리를 수행한 다음 610 및 580°C의 두 가지 열간압연(Process 1, 2) 후 미세조직은 모두 가공조직의 형태로서 광학사진 상으로는 조직을 명확하게 분류하기

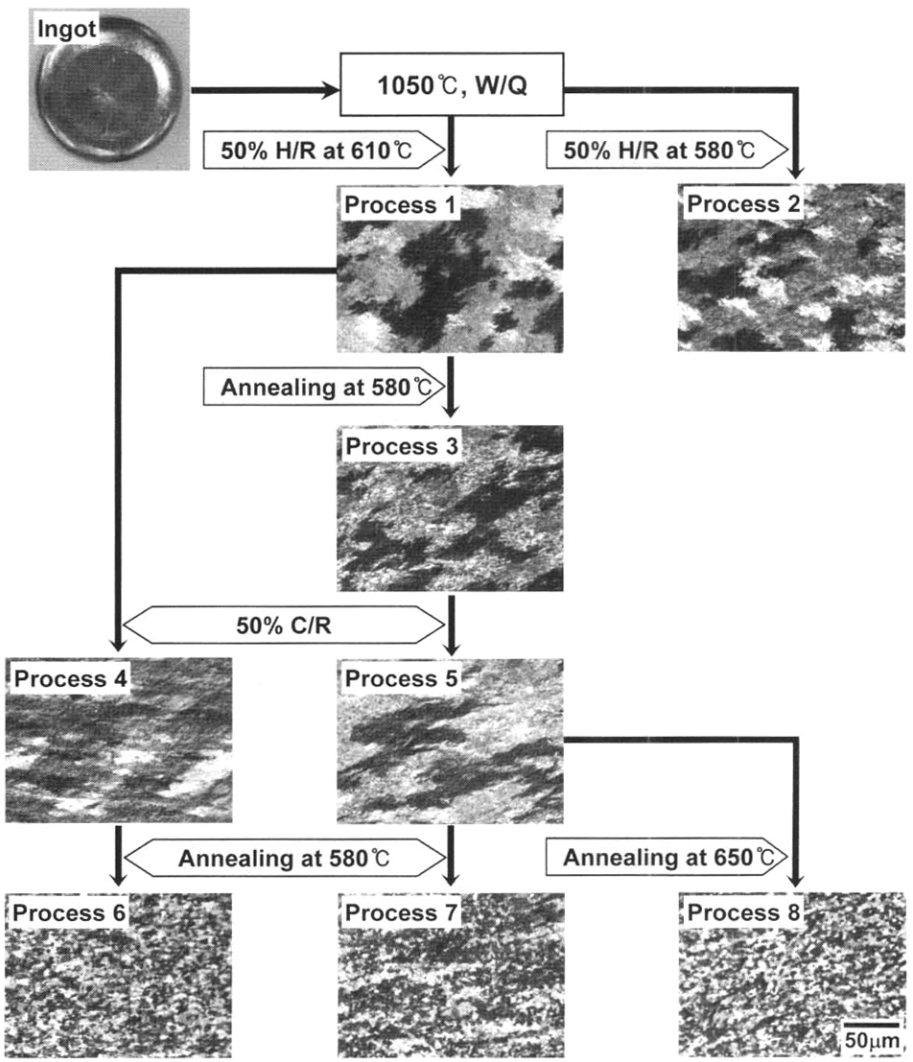



Fig. 2. Microstructure observation of HANA-4 alloy with different manufacturing.

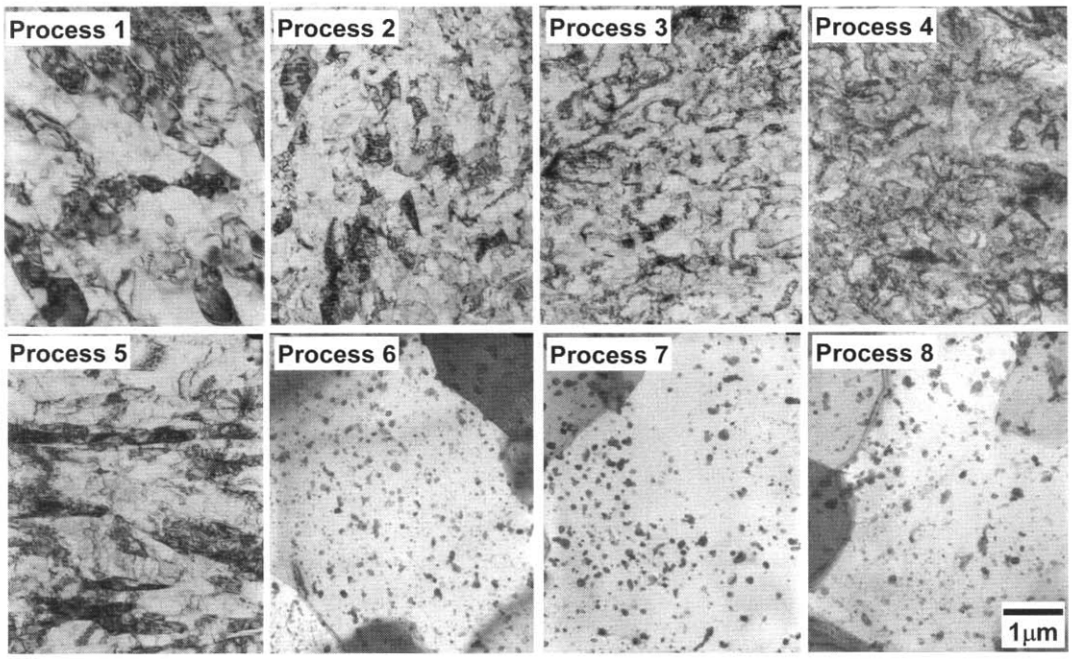



Fig. 3. TEM microstructure observation of HANA-4 alloy with different manufacturing.

가 어려웠다. 610°C의 열간압연 이후에 50% 냉간 압연한 시편의 미세조직은 Process 4에서 보여지는 바와 같이 가공조직 상태로 유지되고 있었으며, 이 시편을 580°C에서 진공열처리 하면 Process 6과 같이 재결정된 조직이 형성되었다. Process 1과 같이 610°C의 열간압연 이후에 580°C에서 진공열처리 하면 시편은 Process 3과 같은 가공조직이 형성되었는데, 이는 610°C의 열간압연 후에 580°C의 진공열처리는 재결정을 위한 온도와 시간이 되지 못하기 때문에 가공조직 상태로 존재하는 것으로 사료된다. Process 3의 시편을 추가적으로 50%의 압하율로 냉간가공하면 Process 5와 같은 가공조직이 형성되었고, Process 5에 의해 가공조직이 형성된 시편은 각각 580°C와 650°C의 온도에서 진공열처리를 수행하면 Process 7 및 Process 8과 같은 재결정 조직이 형성되었다. 이와 같은 결과로 제조 방법중에 Process 1~5의 조건으로 수행되면 가공조직이, Process 6~8의 조건이 수행되면 재결정 조직이 형성되는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 각각의 가공공정을 적용한 Process 1~8의 시편의 미세조직을 TEM을 이용하여 관찰한 것이다. 광학관찰결과에서 나타났듯이 Process 1~5의 공정을 적용하면 기지내에 전위가 도입된 가공조직이 형성되었고, Process 7~8의 공정에 의해서는 기지내에 미세한 석출상이 분포된 완전재결정 조직이 형성되었다. Process 1과 2에서는 열간압연 온도에 의한 미세조직의 차이를 나타내고 있는데, 열간압연 전의 열처리온도가 낮은 580°C에서 수행하면 도입된 전위가 많고 sub-cell의 크기도 작은 것으로 확인되었다. Process 3은 610°C에서 열간압연한 Process 1의 시편을 580°C에서 진공열처리를 수행한 것으로 광학관찰결과와 같은 결과로서 가공조직이 형성된 것이 확인되었다. Process 5는 Process 3 이후에 50% 냉간가공한 시편으로서 미세조직이 압연으로 인해 조직이 길게 변형된 것으로 나타났다. Process 6, 7 및 8은 가공조직의 시편을 580 및 650°C의 온도로 진공열처리 한 것으로서 재결정된 조직 내에 미세한 석출상이 결정립 내부에 고르게 분포된 것이 확인되었다.

### 3.3 부식특성에 미치는 가공공정의 영향

Fig. 4는 각각의 공정으로 제조된 HANA-4 합금을 400°C, steam 분위기의 static autoclave를 이용하여 부식시험을 수행한 결과이다. 지르코늄 합금

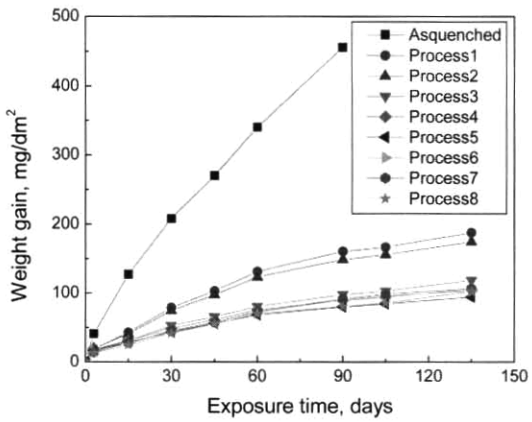



Fig. 4. Corrosion behaviors of HANA-4 alloy as a function of weight gain and exposure time.

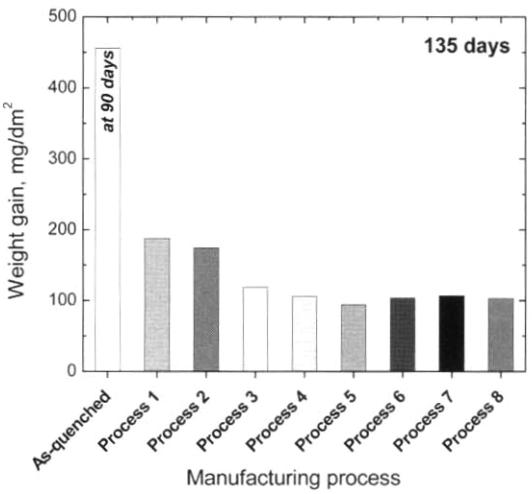



Fig. 5. Corrosion behaviors of HANA-4 alloy as a function of weight gain and different manufacturing process.

의 부식거동은 부식시간에 따른 무게 증가량으로 나타내는데 무게증가량의 증가폭이 클수록 합금의 내식성이 감소되는 것으로 평가된다. 여러 공정에 따른 HANA-4 합금의 무게증가량은 부식시간의 증가에 따라 증가되었으며 부식시험 중에 부식속도가 급격하게 가속되는 천이 현상은 관찰되지 않았다. 부식시간에 따른 무게증가량의 변화와 공정과의 상호관계는 Fig. 5와 같은 결과로서 파악된다. 최대 135일의 부식기험결과 합금의 무게증가량은 공정에 따라 차이가 발생하였다. β 열처리에 의한 HANA-4 합금의 무게증가량은 90일의 부식시험 기간에 450 mg/dm$^2$ 이상으로 매우 급속하게 증가하였으며, 90일 이후에는 산화막의 일부가 훼손되는 현상이 관찰되었다. 이러한 합금의 시편은 Process 1 및 2와 같이 열간압연공정 이후에는 무게 증가량이 매우 감소되는 현상이 관찰되었으며, 열간압연 이후에 냉간압연 및 진공열처리를 수행하면 내식성이 향상되는 것으로 나타났다. 이러한 무게증가량이 감소되는 내식성의 증가현상은 기지 조직의 특성과 연관이 있는 것으로 판단된다.

### 3.4 부식특성과 미세조직의 상호관계

Fig. 6은 HANA-4 합금의 가공공정에 의한 미세조직 특성이 부식성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 TEM을 이용하여 석출상의 특성을 관찰한 결과이다. HANA-4 합금은 고용도 이상의 Nb이 첨가되어 있는데, 지르코늄 합금에서 Nb의 첨가는 내식성을 향상시키는 것으로 알려져 있으나 Nb이 기지내에 과포화 되거나 β-Zr 상으로 형성되면 내식성을 감소시킨다[11-13]. 내식성이 가장 나쁜 β 열처리에 의한 미세조직상에서는 Fig. 1의 (b)에서 확인된 바와 같이 마르텐사이트 조직이 형성됨으로써 합금내부에 Nb이 과포화된 상태로 존재하게 된다. 이 합금을 Process 2와 같은 열간압연을 수행하면 Fig. 6의 (a)에서 관찰되는 바와 같이 BCC 구조를 갖고 Nb의 함량이 약 10% 미만인 β-Zr 상이 형성되는 것으로 나타났다. β-Zr 상의 생성은 기지조직내에 과포화된 Nb의 감소와 연관성이 있다. 즉 기지내에 과포화된 Nb이 β-Zr 상을 형성함에 따라 과포화된 Nb의 농도가 감소되고 이로 인하여 부식특성이 향상되는 것으로 파악된다. Fig. 6의 (b)는 Process 5를 수행한 이후의 미세조직에서 석출상을 관찰한 것으로서 가공조직 내에 석출상이 형성된 것이 관찰되었고 이 석출상은 Nb 량이 12.9%인 β-Zr 상으로 분석되었다. 이때 관찰되는 석출상에 Fe 및 Cr 원소가 분석되는데 이는 이들 원소 역시 지르코늄 내에서 β-Zr 상을 안정화 시키는 원소로서 β-Zr 상에 존재하는 것으로 알려져 있다[12]. Fig. 7은 최종적으로 진공열처리를 570 및 650°C에서 수행한 Process 7과 8에 대한 석출상의 분석결과이다. 구형의 석출상은 결정립계 및 내부에 균질하게 분포되어 있었으며 분석결과 보든 석출상은 β-Zr 상인 것으로 나타났다.

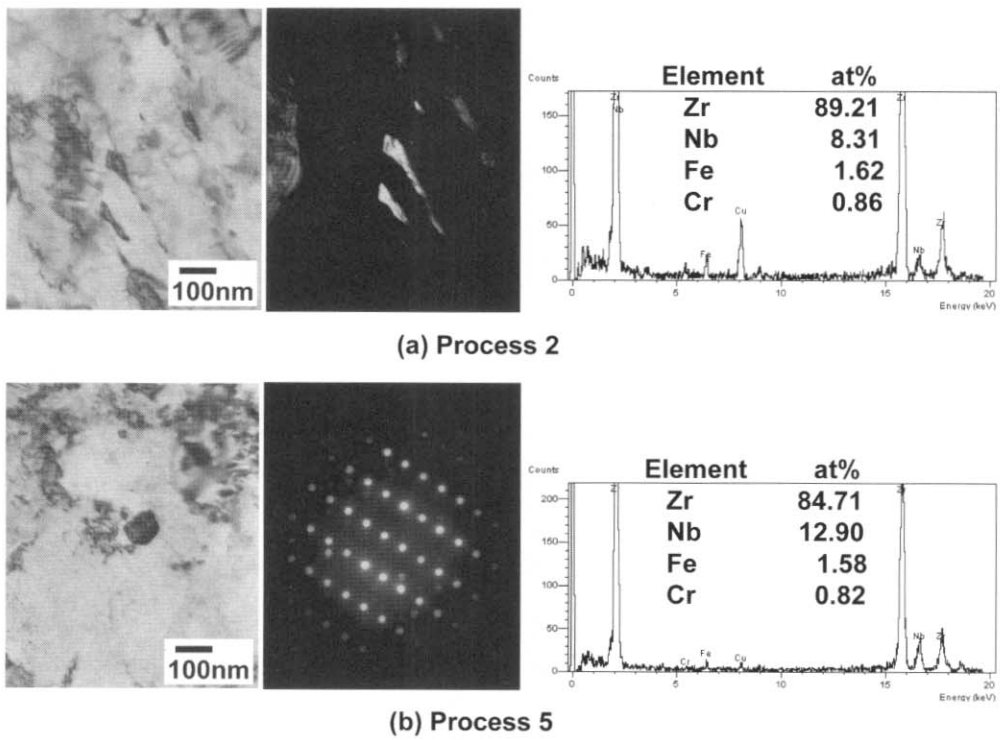



Fig. 6. Precipitates analysis of HANA-4 alloy at the manufacturing process of 2 and 5.

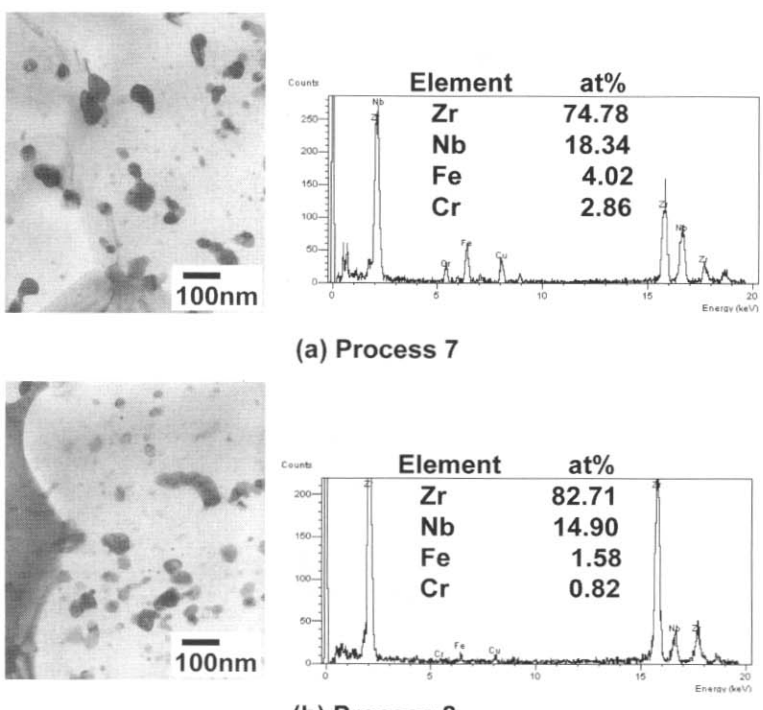



Fig. 7. Precipitates analysis of HANA-4 alloy at the manufacturing process of 7 and 8.

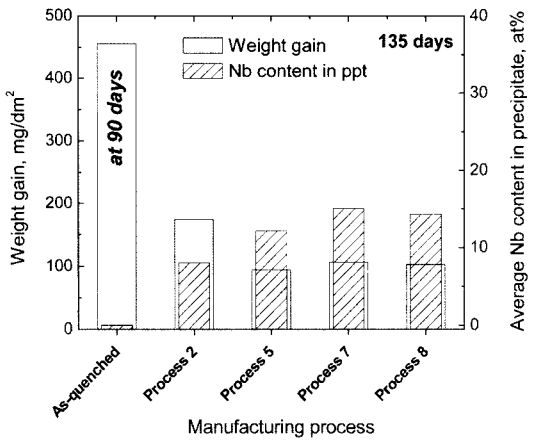



Fig. 8. Correlation between corrosion behaviors and average Nb content in precipitate of HANA-4 alloy with different manufacturing process.

Process 7은 열간압연 이후 중간 진공열처리를 공석온도 이하인 570°C에서 수행한 것이지만 공석온도 이하에서 형성되는 β-Nb 상은 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 지르코늄 합금에 첨가되는 Nb이 매우 느린 확산속도를 갖기 때문에 장시간의 열처리가 수행되어야 β-Nb 상이 형성될 수 있다는 연구결과와 일치하였다[13].

Fig. 8은 TEM에 의한 석출물 분석결과에 의한 석출상에서의 평균 Nb 농도와 부식과의 상호 관계를 나타낸 것이다. 각각의 Process에 의한 석출상에 대한 정보는 모두 파악하기 어렵지만 일부 공정에서 관찰된 석출상을 분석한 결과 BCC 구조의 Nb 함량이 8~19%로 분석되는 β-Zr 상으로 나타났다. 이들 β-Zr 상의 크기는 30~100 nm의 크기로 열간압연 이후에 형성되는 것으로 나타났으며, Process에 따른 기지조직이 가공조직 및 재결정조직으로 나타났기 때문에 전체적인 분률의 파악은 어려웠다. 하지만 관찰된 β-Zr 상의 조성적인 특성을 파악하면 Fig. 8에서 나타난 바와 같이 Process의 진행에 따라 β-Zr 상 내에 Nb의 농도가 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 특성이 기지내에 과포화된 Nb의 농도 감소를 가져온 것으로 사료되며, Process에 따라 β-Zr 상 내에 Nb이 증가되는 결과가 내식성의 감소를 유발시킨 것으로 판단된다. 최종열처리에 따른 합금의 재결정화 보다는 석출상의 특성이 내식성에 매우 민감한 영향을 미치는 것으로 사료되나 최종열처리에 의한 합금의 재결정은 조직내에 내부에너지를 감소시켜, 추후 지르코늄 피복관 튜브을 제조하기위하여 수행되는 하위공정 과정에서 크랙의 생성을 감소시키고 우수한 가공성을 가져올 것으로 사료되며, 이에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

국산 HANA 피복관 제조에 사용될 중간조재인 TREX에 대한 성능을 최적화 하기위한 기초연구로서 피복관의 성능에 TREX 제조고정에 대한 영향을 평가하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. HANA-4 합금의 합금조성 균질화는 β 열처리를 수행함으로써 얻을 수 있었고, β 열처리에 의해 마르텐사이트 조직이 형성되었다.

2. β 열처리 이후에 수행되는 열간압연, 냉간압연 그리고 진공열처리 공정은 HANA-4 합금의 내식성을 향상시켰다.

3. β 열처리 이후에 수행되는 열간압연, 냉간압연 그리고 진공열처리는 HANA-4 합금에 첨가되어 과포화로 존재하는 Nb이 β-Zr 상을 형성되도록 하여 내식성이 향상된 것으로 나타났으며, β-Zr 상 내의 Nb 농도와 부식특성과의 상호관계가 성립되는 것으로 생각된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발 사업인 "지르코늄신합금 핵연료피복관 개발" 과제의 일환으로 수행되었으면 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. A. V. Nikulina, J. Nucl. Mater., **238** (1996) 205.
2. R. J. Comstock, G. Schoenberger and G. P. Sabol, Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP **1295** (1996) 710.
3. K. Takeda and H. Anada, Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP **1354** (2000) 592.
4. Y. H. Jeong, H. G. Kim and T. H. Kim, J. Nucl. Mater., **317** (2003) 1.
5. F. Garzarolli, H. Stehle and E. Steinberg, Zirconium

in the Nuclear Industry, ASTM STP **1295** (1996) 12.
6. C. E. Lundin and R. H. Cox, USAEC Report, GEAP-4089, **1** (1962) 9.
7. Y. S. Kim, H. G. Kim and Y. H. Jeong, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **40**(8) (2002) 819.
8. R. A. Holt, J. Nucl. Mater., **35** (1970) 322.
9. Z. Nishiyama, "Martensite Transformation". Academic Press, New York, (1978) 6.
10. D. A. Porter and K. E. Resterling, Phase Transformation in Materials, (1997) 424.
11. Y. H. Jeong, K. O. Lee and H. G. Kim, J. Nucl. Mat., **302** (2002) 9.
12. Y. H. Jeong, H. G. Kim and T. H. Kim, J. Nucl. Mat., **317** (2003) 1.
13. H. G. Kim, Y. H. Jeong and T. H. Kim, J. Nucl. Mat., **326** (2004) 125.