

‘95 춘계학술발표회  
한국원자력학회

Zr-2.5%Nb 합금의 강도에 미치는 집합조직의 영향

김성수, 김영석, 국일현  
한국원자력연구소

요 약

Zr-2.5 % Nb 합금 압력관에서 집합조직이 강도에 미치는 영향을 조사하여 기저면 성분(F)의 강화 효과를 분리하였으며 아울러 온도에 따른 강도의 변화를 조사하였다. As-received 압력관 재료의 상온 항복 강도는 인장 응력에 수직인 면에서 측정된 기저면 성분(F)에 대하여  $\sigma_{ys} = 600 + 410 F$ 의 관계를, annealing 처리한 등축정 재료의 상온 항복 강도는  $\sigma_{ys} = 410 + 310 F$ 의 관계를 따르는 것으로 나타나 기저면 성분이 주도적인 강화 효과를 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 Zr 합금의 항복 강도는 인장 응력에 수직인 면에서의 기저면 성분(F)에 따라 좌우되며, Zr-2.5% Nb 압력관에서 길이 및 원주 방향에서의 항복 강도의 차이는 주로 기저면 성분(F)에 의한 것이라고 결론지을 수 있다.  $\alpha$ -Zr 에서 <a> 슬립과 쌍정의 임계 전단 응력 및 온도에 따른 변형 기구의 변화에 대하여 논의 하였다.

1. 서론

원자로 재료로 사용되고 있는 Zr 합금은 주로 HCP 결정 구조의  $\alpha$ -Zr 으로 구성되어 있으며, Zr 합금 부품들은 성형 과정에서 집합조직이 형성된다. 월성형 원자로에 사용되고 있는 Zr-2.5% Nb 압력관은 원주 방향으로 <c> 축이 집중된 집합조직을 가지고 있는 데 원주 방향의 항복 강도가 <a> 축이 집중되어 있는 길이 방향의 항복 강도보다 높게 나타나는 것으로 알려져 있다[1].

그러나 이 재료에서는 결정립이 압력관의 길이 방향으로 길게 늘어나 있는 상태이므로 원주 방향과 길이 방향의 인장 성질 차이가 순수히 기저면 성분(F)에 의한 것인지, 또는 결정립 크기의 강화 효과를 내포하고 있는지, 그 성분의 크기는 얼마나 되는지 명확하지 않은 상태이다.

압력관 재료의 항복 강도는 설계 근거 자료로 중요할 뿐만 아니라 균열 선단의 소성역형성 및 재료내 수소의 확산에 영향을 미쳐 수소 지연 파괴(DHC) 균열 전파 속도를 변화시키는 것으로 알려져 있으므로[2,3], <c> 축 성분이 항복 강도에 미치는 영향을 분리하는 것은, DHC 거동 해석, 집합조직에 따른 항복강도의 예측에 유용할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 인장 시험편을 여러가지 각도로 제작하여 인장 응력의 축에 대하여 재료의 집합조직을 변화시킴으로써 여러 가지 집합조직의 인장 시험편을 만들고 항복 강도에 미치는 온도 및 집합조직의 영향을 조사하였으며, 재결정 처리한 등축정 재료의 강도와 비교함으로써 기저면 성분(F)의 강화 효과를 정량적으로 평가하고자 하였다.

2. 실험

실험에 사용한 Zr-2.5% Nb 압력관은 캐나다의 Nu-Tech precision 사에서 제조하여 공급한 것으로, 화학 조성은 table 1에 보였다.

인장 시험편은 Fig.1 에 보인 바와 같이 인장축이 원주 방향으로 부터 0° (T), 30° , 45° , 90° (L) 회전된 방향으로 변화되도록 가공되었다. 인장 시험에 사용한 시험편은 gage length 10mm, 직경 2.5mm 정도이다. 인장 시험은  $5 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ 의 초기 변형률로 실시하였으며, 항복 강도는 0.2% offset 값을 사용하였다. 일부 시험편은 길이 및 원주 방향에서 나타날 수 있는 결정립 크기의 강화

효과를 제거하기 위해 750°C-2시간 열처리를 수행하여 결정립 모양을 등축정으로 변화시킨 후 시험하였다.

미세 조직을 관찰하기 위하여 투과 전자 현미경 및 광학 현미경이 사용되었다. 집합조직은 Cu K $\alpha$  radiation 으로 부터 측정된 자료와 Zr 합금 분말로 부터 구한 random 값을 사용하여 inverse pole figure 를 작성하여 측정하였으며, 이로 부터 기저면 성분 (basal pole component, F)은 식 (1)에 따라 계산 되었다[4].

$$F_i = \frac{\sum_{\alpha=1}^n V_{\alpha} \cos^2 \alpha}{\sum_{\alpha=1}^n V_{\alpha}} \quad (1)$$

여기서  $F_i$  는 L, T, N 방향과 같은 관심의 대상이 되는 방향에서의 기저면 성분

$\alpha$  는 L, T, N 방향과 같은 방향으로 부터 기울어진 각도

$V_{\alpha}$  는 L, T, N 방향으로 부터 각도  $\alpha$  만큼 기울어진 결정립의 부피이다.

### 3. 결과

As-received 압력관 및 재결정 처리된 재료의 미세조직은 Fig. 2에 보인 바와 같다. As-received 압력관에서는 결정립이 길이 방향으로 연신되어 있으며, 두께 방향으로 약간 얇은 형태로 나타났다. 재결정 처리된 재료에서는 거의 등축정에 가까운 것으로 나타났다.

압력관의 집합조직은 Fig. 3에 보인 바와 같으며, as-received 압력관의 집합조직은 기저면이 압력관의 원주 방향에, (1010) 면은 길이 방향에, (1120) 면은 직경 방향으로 집중되어 있다. 각 방향에 대한 기저면 성분은  $F_R=0.27$ ,  $F_T=0.67$ ,  $F_L=0.06$  으로 나타났다.

원주 방향으로 부터 30°, 45°, 60° 회전된 시편의 집합조직은 Fig. 4에 보인 바와 같다. 원주 방향으로 부터 30° 기울어진 시편의 경우 (1013), (1124) 면이, 45° 기울어진 시편의 경우 (1012) (2023), (1122) 면이, 60° 기울어진 경우 (1011) 면이 집중되어 있다. 기저면 성분은 30° 기울어진 경우  $F=0.42$ , 45° 기울어진 경우  $F=0.30$  으로 측정되었다.

4 가지 집합조직의 시편에서 온도에 따른 항복 강도의 변화를 Fig. 5에 함께 비교하여 나타내었다. 모든 시편에서 온도의 증가에 따라 항복 및 인장 강도가 공통적으로 감소하였으며,  $F$  의 증가에 따라 항복 강도는 증가하였다. 온도의 증가에 따른 감소 경향은 일정하지 않으며, 특히 원주 방향에서는 약 350°C 까지 항복 강도가 서서히 감소하다가 그 이상의 온도에서 급격히 감소하였다. 그림에는 나타내지 않았지만 원주 방향에서는 상온에서 항복 및 인장 강도의 차이가 거의 없다가 온도의 증가에 따라 약간 증가하는 것으로 나타났다. 반면 길이 방향에서는 온도의 증가에 따라 차이가 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

재결정 처리된 4 가지 집합조직의 시편에서 온도에 따른 항복 강도의 변화를 Fig. 6에 함께 비교하여 나타내었다. 온도의 증가에 따라 서서히 감소하지만 길이 방향에서는 감소하는 경향이 완만하여 약 230°C 부근에서 45° 기울어진 시편보다 높은 강도를 가지는 것으로 나타났다.

As-received 압력관 재료에서  $F$  에 따른 상온 항복 강도를 Fig. 7에 나타내었으며,  $F$  의 증가에 따라 직선적으로 증가하여 다음과 같은 관계를 갖는 것으로 나타났다.

$$\sigma_{ys} = 600 + 410 F \quad (2)$$

여기서  $\sigma_{ys}$ 는 상온 항복 강도 [MPa],  $F$ 는 기저면 성분이다. 재결정 처리를 통하여 등축정으로 변화시킨 재료의  $F$ 에 따른 항복 강도는 Fig. 7에 함께 나타내었으며 이 재료의 항복 강도는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\sigma_{ys} = 410 + 310 F \quad (3)$$

재결정 처리에 의하여  $\sigma_{ys}$ 는 항복 강도는 약 200 MPa 정도 감소하였다.  $F$  의 증가에 의한 항복 강도의 변화는 As-received 시편의 경우 410, 재결정 시편의 경우 310 MPa로 약간 다르게 나타났다.

#### 4. 고찰

Fig. 4에 나타난 바와 같이 기울어진 시편에 대한 inverse pole figure 는 원주 방향으로 부터 30° 회전시킨 재료의 경우 주로 (10 $\bar{1}$ 3), (11 $\bar{2}$ 4), 45° 회전시킨 경우 주로 (10 $\bar{1}$ 2), (11 $\bar{2}$ 2), (20 $\bar{2}$ 3), 60° 회전 시킨 경우 주로 (10 $\bar{1}$ 1) 면의 밀도가 높다는 것을 보여 주고 있다. 이것은 압력관의 원주 방향에 (0002) 면이 주로 집중되어 있다는 것, (0002)로 부터 (10 $\bar{1}$ 3), (11 $\bar{2}$ 4) 면은 약 30°, (10 $\bar{1}$ 2), (11 $\bar{2}$ 2), (20 $\bar{2}$ 3) 면은 약 45°, (10 $\bar{1}$ 1) 면은 약 60° 정도 기울어져 있다는 것, 또한 시편을 원주 방향으로 부터 각각 30, 45, 60° 정도 기울여서 가공했다는 점을 고려한다면 주어진 압력관 집합조직을 회전시킨 것과 같으므로 예측되는 결과와 잘 일치한다.

원주 방향, 길이 방향 등과 같은 주 방향으로 부터 각도  $\alpha$  만큼 회전된 방향에서 F를 변화시키는 영향은 각 기저면 성분에  $\cos^2\alpha$  및  $\sin^2\alpha$ 를 곱한 형태로 기여하므로 원주 방향에서 길이 방향으로 각도  $\alpha$  만큼 회전되는 경우 F는 다음과 같이 변화한다.

$$F_{\alpha} = F_T \cos^2\alpha + F_L \sin^2\alpha \quad (4)$$

여기서  $F_{\alpha}$  는 원주 방향으로 부터  $\alpha$  만큼 기울어진 방향에서의 기저면 성분,  $F_T$ 는 횡 방향으로의 기저면 성분  $F_L$ 은 길이 방향에서의 기저면 성분,  $\alpha$  는 원주 방향으로 부터의 각도이다. 이 관계로 부터 구한 F와 실측치는 table 2에 비교되어 있으며, 잘 일치하는 것으로 보인다.

재결정 시편과 as-received 재료의 항복 강도 차이는 재결정 처리중 감소한 격자 결함과 결정립 크기의 증가에 의한 것으로 설명될 수 있을 것이다. 750°C의 재결정 및 노냉 처리에 의하여 집합조직은 변화되지 않는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 재결정 처리된 재료에서  $F_R=0.17$ ,  $F_T=0.81$ ,  $F_L=0.02$  로 약간 다르게 나타났으며 이것은 냉각 과정의 차이에 의한 것으로 생각된다. 그러나 등축정 재료와 연신된 결정립의 재료에서 F에 따른 항복 강도의 변화가 310 및 410 MPa로 나타난다는 것은 결정립 크기의 강화 효과보다는 F의 증가 효과가 주도적인 강화 효과라는 것을 의미하며, 압력관 재료의 원주 방향과 길이 방향의 항복 강도 차이는 기저면 성분의 차이에 의한 것이 주도적이라고 결론지을 수 있다.

F 에 따른 항복 강도의 변화는 냉간 가공되고 응력 제거 처리된 Zr-2.5% Nb 판재에 대하여 측정된 다음의 결과와 유사하다[5].

$$\sigma_{ys} = 630 + 300 F \quad (5)$$

이 결과는 결정립의 크기가 약 2  $\mu\text{m}$  정도인 재료에서 얻어진 것이며 본 연구의 재결정 시편과 유사하다. 이와 같이 F에 의한 강화 효과가 차이가 나는 것은 집합조직 이외에 결정립 크기, 결정립 내부의 전위 배열, 제 2상의 분포에 따라서 약간 영향을 받기 때문인 것으로 보인다.

As-received 재료에서 쌍정계의 작용에 대한 임계 응력의 차이를 유추할 수 있을 것으로 보인다. 원주 방향에서는 (10 $\bar{1}$ 2) 쌍정계에 대한 Schmid 인자가 가장 크므로 [6] (10 $\bar{1}$ 2) 쌍정 변형 기구가 작용할 것이며 이 쌍정계의 작용에 필요한 추가적인 응력은  $873-624 = 248$  [MPa] 이다. 이 값은  $F_T=0.67$  및  $F_L=0.06$  인 시편에서 얻어진 값이므로  $248/(0.67-0.06)=404$  MPa 가 된다. 30° 기울어진 as-received 시편의 경우 (11 $\bar{2}$ 1) 쌍정계에 대한 Schmid 인자가 최대이며 (11 $\bar{2}$ 1) 쌍정계의 작용에 필요한 추가적인 응력은  $763-624 = 139$  [MPa] 이다. 이 시편의 경우 전체 부피가 (11 $\bar{2}$ 1)쌍정계의 작용에 적합한 경우에도 이론적인 최대 기저면 성분은  $F=0.707$  이므로  $139 \times 0.707 / (0.42-0.06)=272$  MPa 로 된다. 따라서 (11 $\bar{2}$ 1) 및 (10 $\bar{1}$ 2) 쌍정계의 작용에 필요한 추가적인 전단 응력( $\Delta\tau$ )은 각각 약  $272/2=136$  및  $404/2=202$  MPa 라고 유추 할 수 있다. 그러나 이 값은 주어진 집합조직을 가진 압력관에서 구해진 값이며, 이 값에 영향을 주는 인자들에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

Fig. 6에 보인 바와 같이 45° 기울어진 시편의 항복 강도는 약 230°C 부근에서 길이 방향 시편 보다 낮은 것으로 나타났으며 이것은 이 온도 부근에서 임계 전단 응력이 프리즘 슬립에 대한 것 보다 낮은 새로운 변형 기구가 작용하기 때문인 것으로 보인다. 이와 같은 변형 기구로는 <a+c> 슬립계로 알려진 (10 $\bar{1}$ 1) <11 $\bar{2}$ 3> 슬립계[6] 등이 포함 될 수 있을 것이다.

## 5. 결론

- 1) Zr-2.5% Nb 압력관 재료에서 항복 강도는 집합조직(기저면 성분, F)에 크게 의존하며, 길이 및 원주 방향에서의 항복 강도 차이는 주로 기저면 성분의 차이에 의한 것이다.
- 2) As-received Zr-2.5% Nb 압력관 재료에서 F 에 따른 항복 강도는 다음과 같다.  

$$\sigma_{YS} = 600 + 410 F$$
- 3) As-received Zr-2.5% Nb 압력관 재료에서  $\alpha$ -Zr의 (10 $\bar{1}$ 2) 및 (112 $\bar{1}$ ) 쌍정계의 작용에 필요한 추가적 전단 응력( $\Delta\tau$ )은 상온에서 각각 약 140 및 200 Mpa 이다.
- 5)  $\alpha$ -Zr 으로 구성된 Zr-합금의 항복 강도는 여러 가지 미세조직의 효과를 고려하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_{YS} = \sigma_i + \Delta\sigma_F + \alpha Gb \sqrt{\rho} + K_Y / \sqrt{d}$$

## 6. 참고 문헌

1. Ibrahim, E. F. and Cheadle, B. A., Canadian Metallurgical Quarterly Vol .24, pp.273-281
2. Coleman, C. E., S. Sagat, and Amouzouvi, K. F., AECL-9524 (1987)
3. Amouzouvi, K. F. and Clegg, L. G., Metall. transactions A 18A(1987), pp. 1687-1694
4. Evans, W. M., Gessner, R. F. and Goodwin, J. G., Metal. Transactions Vol.3 (1972), pp. 2879- 2887
5. 김성수, unpublished wok
6. Ballinger, R. G., "The Anisotropy Mechanical Behavior of Zircaloy-2", Garland Publishing, 1979

Table 1. Chemical composition of Zr-2.5% Nb billet used to manufacture of pressure tube

elements	Nb	H	C	N	O	Fe+Cr	Hf	Zr+Hf
specification maximum [wt%]	2.0-3.0	0.005	0.05	0.025	0.18	0.2	0.005	Bal.
top	2.66	0.0003	0.0086	0.0027	0.114	<0.054	0.0045	Bal.
bottom	2.52	0.0006	0.0079	0.0025	0.105	<0.056	0.0045	Bal.

Table 2. Comparison of measured and calculated basal pole component

	$F_{0^\circ} = F_T$	$F_{30^\circ}$	$F_{45^\circ}$	$F_{60^\circ}$	$F_L$	$F_R$
measured F	0.67	0.42	0.30	0.23	0.06	0.27
calculated F		0.46	0.33	0.19		

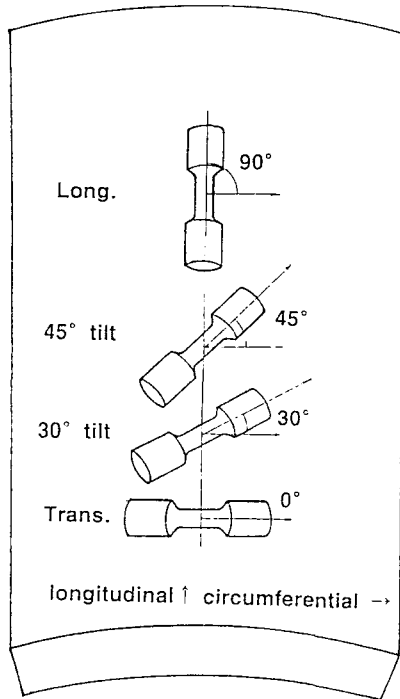


Fig. 1. Spatial Geometry of various textured tensile specimen in Zr-2.5% Nb pressure tube.

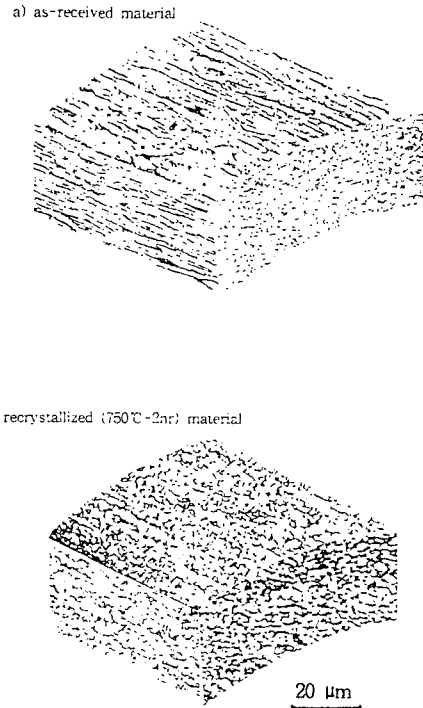


Fig. 2. Optical micrograph for a) as-received and b) recrystallized (750°C-2hrs) pressure tube

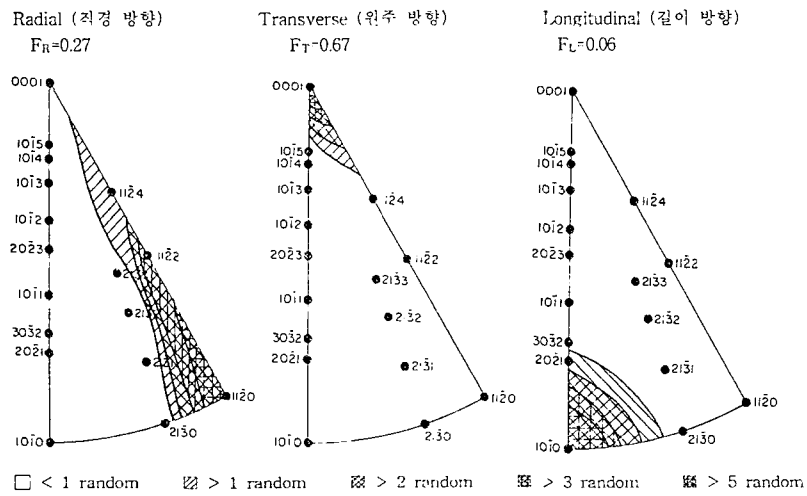


Fig. 3. Inverse pole figure for as-received pressure tube

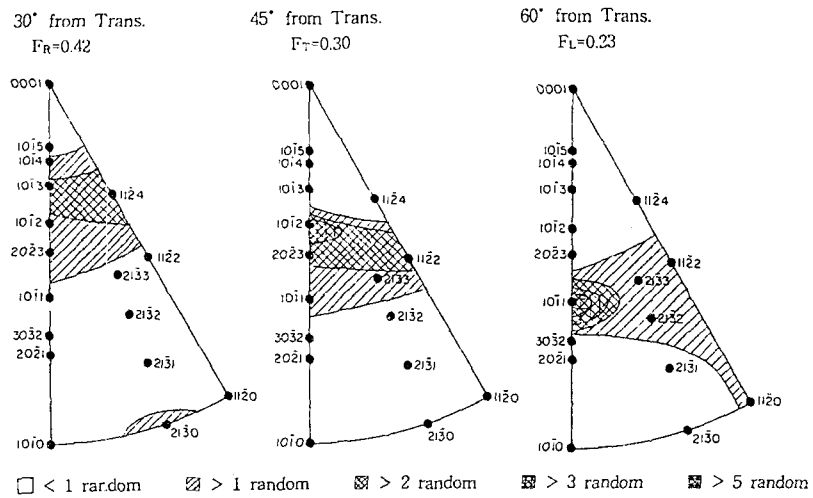


Fig. 4. Inverse pole figure for tilted specimen

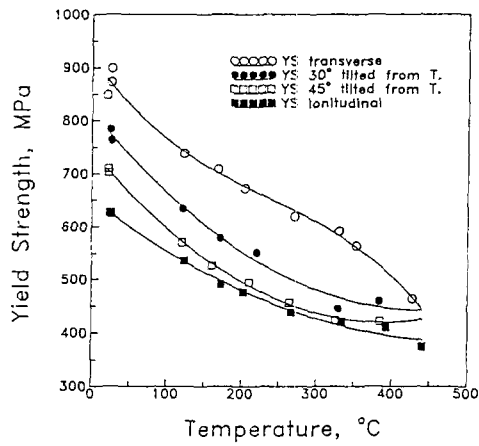


Fig. 5. Comparison of yield strength for as-received pressure tube in the various textured specimen

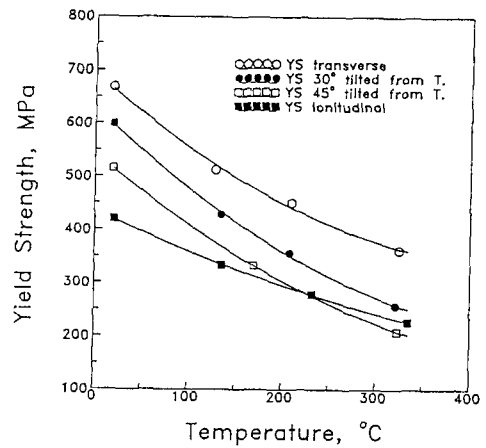


Fig. 6. Comparison of yield strength for recrystallized (750°C-2hrs) pressure tube in the various textured specimen

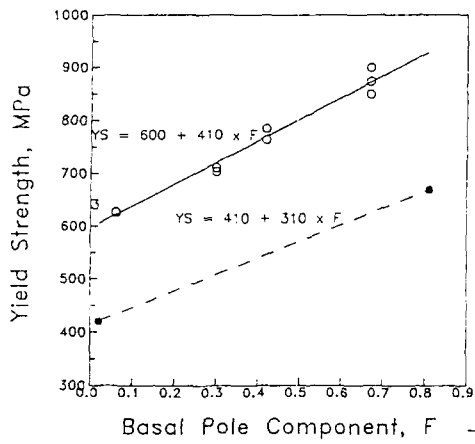


Fig. 7. Basal pole component dependency of as-received and recrystallized (750°C-2hrs) pressure tube