

Field and Strain Dependence of the Critical Current and the n -value for an Internal-tin Processed Nb₃Sn Strand

Sangjun Oh*, Heekyung Choi, Chulhee Lee, Keeman Kim

National Fusion Research Institute, Daejeon, Korea

Received 31 March 2008

내부확산법으로 제조된 Nb₃Sn 초전도 선재의 임계전류 및 n -값의 자장, 변이 의존성

오상준*, 최희경, 이철희, 김기만

Abstract

Detailed field and strain dependence of the critical current and the n -value for an internal-tin processed Nb₃Sn strand have been measured. Both the compressive and tensile strain is applied reversibly using Walter spiral probe made of BeCu up to 0.73 %. There is a correlation between the critical current and the n -value for the Nb₃Sn strand studied in this work and the field dependence of the n -value is in agreement with a recent empirical formula. It was further shown that the critical current can be reasonably well fitted by the scaling law based on strong-coupling theory of superconductivity using the relation between the critical current and the n -value.

Keywords : the n -value, Activation energy, the Kramer model, Scaling law for flux pinning

I. Introduction

초전도 선재의 임계전류는 로렌츠 힘과 정적인 핀닝 힘의 균형에서 결정된다. 그러나, 실제의 측정에서는 IV 특성곡선에서 보통 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 정도의 전압기준에 해당되는 전류 값으로 정의되며, 실제의 임계전류는 동적인 핀닝 힘과 로렌츠 힘의 균형에 의해 결정된다고 할 수 있다

[1]. 이 때, IV 특성곡선은 $I = \alpha V^n$ 형태의 멱함수 (power law)를 만족함이 알려져 있고, n -값은 선재의 특성을 나타내는 지표의 하나로 이해되고 있다. 최근 우리는 그 동안 보고된 내부확산법 (internal-tin process), 브론즈법 (Bronze process) 등 여러 방법으로 제조된 Nb₃Sn 초전도 선재의 측정자료 분석을 통해 n -값의 자장 의존성이 매우 간단한 함수로 기술될 수 있음을 보인 바 있다 [2]. 나아가 n -값과 핀닝 힘의 상호관계를 확인하였고, 보다 실제적인 응용 영역에서의 적용에 적합한 자속 핀닝에 관한 스케일링 법칙을 제안

*Corresponding author. Fax : +82 42 870 1939
e-mail : wangpi@nfri.re.kr

한 바 있다. 더욱 흥미로운 것은, n -값과 핀닝 힘의 상호관계식은 고온초전도 선재(coated conductor)에도 적용이 가능하다는 것이었고, 이를 바탕으로 임계전류의 각도 의존성 분석 결과를 보고한 바 있다 [3]. 본 논문에서는 n -값의 자장 의존성 관계식이 내부확산법으로 제조된 다른 Nb₃Sn 초전도 선재의 경우에도 적용이 가능한지, 그 외 n -값과 핀닝 힘의 상호관계 및 이를 바탕으로 한 스케일링 법칙과 기존의 스케일링 법칙과의 분석 결과를 비교해 보고자 한다. II 절에서는 측정방법 등에 관해 간단히 기술하고, III 절에서는 측정 및 분석 결과를 논하였다.

II. Experimental

실험에 사용된 Nb₃Sn 초전도 선재는 고려제강(Kiswire Advanced Technology, KAT)에서 내부 확산법 방법으로 제작된 다심 선재로, 210 °C에서 50 시간, 340 °C에서 25 시간, 450 °C에서 25 시간, 575 °C에서 100 시간, 650 °C에서 100 시간 열처리 되었다. 열처리 전-후의 광학 현미경 사진 및 FM-SEM 사진은 참고문헌 [4]의 그림 3과 같다. 열처리된 시료는 베릴륨동으로 만들어진 월터 스프링(Walter spiral)[5] 이라고 일컬어지는

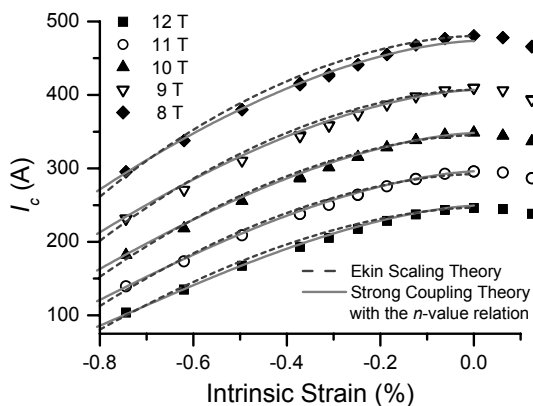


Fig. 1. The strain dependence of the critical current for the internal-tin processed KAT Nb₃Sn strand. Solid lines were calculated with the scaling law based on strong coupling theory using the n -value relation and dotted lines were calculated with the Ekin's scaling law for comparison.

시료 홀더로 조심스럽게 이송되었다. 실험에 사용된 월터 스프링은 외경 22 mm, 높이 64 mm, 대략 4.5 mm 두께의 4.5 회전 스프링으로, 스프링의 위-아래 부분의 뒤틀림에 의해 선재에 최대 $\pm 0.73\%$ 의 변이를 인가할 수 있도록 되어 있다. 이송된 35 cm 길이의 시료는 베릴륨동으로 만들어진 월터 스프링에 납땀 되었으며, 전압단자 사이의 거리는 15 cm 이다. 최대 700 A의 전류가 크로마 사의 전류공급기(Chroma 6230K-8)를 이용하여 인가되었으며, 전압은 케이틀리 사의 정밀 전압측정기(Keithley 2182 nano-voltmeter)를 이용하여 측정되었다. 임계전류는 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준으로 정의되었고, n -값은 0.1 ~ 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 구간의 측정결과와 멱함수(power law) 분석으로 구해졌다. 보다 상세한 측정 방법은 이미 발표된 논문에 상술되어 있다 [6].

III. Results and Discussion

4.2 K에서의 고려제강 내부확산법 Nb₃Sn 다심 선재의 자장 및 변이에 의한 임계전류의 변화는 그림 1과 같다. 모든 자장에서 임계전류는 외부 인가 변이(ϵ_{app})가 +0.372%일 때 최대 값을 보이고, 그림 1은 임계전류가 최대가 되는 변이(ϵ_{max})에 대해 정의된 내재 변이($\epsilon = \epsilon_{app} - \epsilon_{max}$)의 함수로 임계전류의 변화를 보여주고 있다. 그

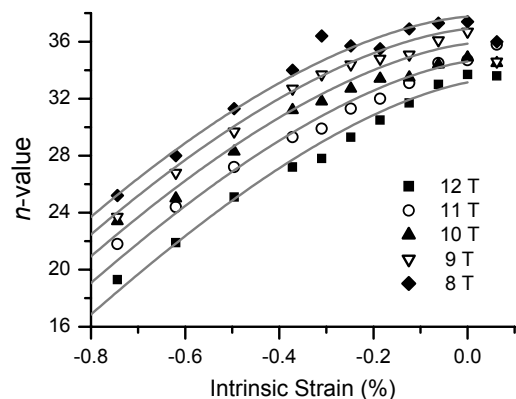


Fig. 2. The strain dependence of the n -value for the internal-tin processed KAT Nb₃Sn strand. Solid lines were calculated with the n -value relation.

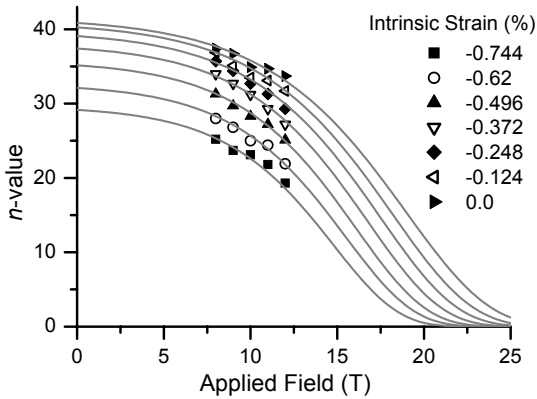


Fig. 3. The field dependence of the n -value for the internal-tin processed KAT Nb_3Sn strand. Solid lines were calculated with the n -value relation.

동안의 다른 연구진의 발표 결과와 유사하게 [7], -0.744%의 내재 변이의 변화에 의해 자장에 따라 최대 50% 이상의 임계전류 감소가 측정되었다. 그림 2는 임계전류 측정 시 함께 구해진 n -값의 자장 및 변이에 의한 변화를 나타내고 있으며, n -값의 전체적인 변화의 양상은 임계전류의 자장 및 변이 의존성과의 유사성을 보이고 있다.

최근 내부확산법 (internal-tin process), 브론즈법 (Bronze process) 등 여러 방법으로 제조된 Nb_3Sn 초전도 선재의 n -값의 자장 의존성은 아래와 같은 실험식으로 기술될 수 있음을 보인다 [2].

$$n(B, T, \varepsilon) = n_0 e^{-\exp(-a(T, \varepsilon) \{1 - B/B_n(T, \varepsilon)\})} \quad (1)$$

그림 3은 여러 변이 값에서 고려제강 내부확산법 Nb_3Sn 다심 선재의 n -값의 자장 의존성으로, 위의 식(1)을 이용하여 기술하는 것이 가능함을 알 수 있으며, 분석 결과는 실선으로 표시된 바와 같다. 측정결과와 가장 잘 일치하는 결과는 변수 $a(\varepsilon)$ 는 변이와 관계없는 상수인 4.0의 값을 사용하고 변수 $n_0(\varepsilon)$ 및 $B_n(\varepsilon)$ 는 그림 4에 나타내어진 것과 같은 값을 사용한 경우에 얻어졌으며, 변수 $n_0(\varepsilon)$ 및 $B_n(\varepsilon)$ 의 변이 의존성은 그림 4에 표기한 바와 같이 간단한 함수로 기술할 수 있었다. 이를 이용하면, 그림

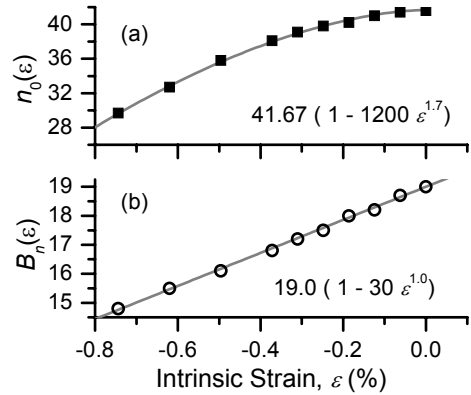


Fig. 4. The strain dependence of the parameters used for the calculation of the field dependence of n -value for the internal-tin processed KAT Nb_3Sn strand. Solid lines were calculated with the equations shown in the inset.

2의 실선으로 표시한 바와 같이, n -값의 변이 의존성도 계산이 가능하였고 실험결과와 잘 부합함을 알 수 있었다. 시료의 n -값의 변화는 자속 핀닝 힘 혹은 시료 단면적의 불균일성에 의한 것으로 이해되고 있다. 그러나 n -값이 $I = \alpha V^m$ 형태의 특성곡선에서 정의되고, 이러한 특성 곡선은 $U(j) = U_0 \ln|j/j_c|$ 형태의 활성화 (activation) 에너지와 연관이 있는 것을 고려하면 $n = U_0/k_B T$ 로 표현할 수 있음을 알 수 있으며 [3], 위와 같은 n -값의 자장 의존성은 활성화 에너지의 자장 의존성과의 연관 하에서 이해되어야 한다.

활성화 에너지의 변화는 자속 핀닝 힘을 변화시킬 수 있다. 이러한 가정 하에 활성화 에너지의 변화, 혹은 n -값의 변화와 임계전류 사이의 아래와 같은 관계식을 제안하였고, 이는 그 동안의 여러 실험결과와 잘 일치함을 보고한 바 있다 [2].

$$I_c \times B = \left(1 - \exp \left[- \frac{n(B, \varepsilon) - 1}{n(0, 0) - 1} \right] \right) / (1 - e^{-1}) \cdot F_m(\varepsilon) f(b) \quad (2)$$

여기서 $F_m(\varepsilon)f(b)$ 는 활성화 에너지의 변화에 의한 효과가 없는 절대온도 0도에서의 핀닝 힘이 며, 통상의 경우는 $F_m(\varepsilon)f(b)$ 과 로렌츠 힘이 같

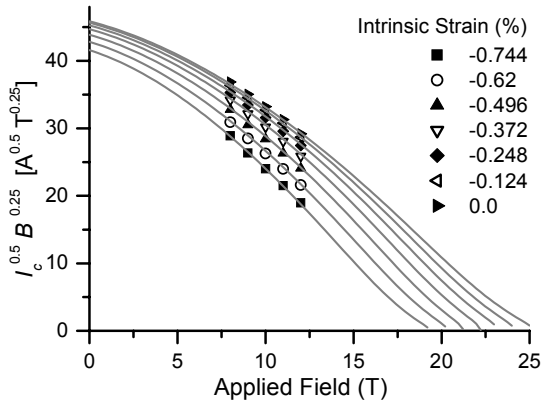


Fig. 5. The field dependence of the critical current for the internal-tin processed KAT Nb₃Sn strand represented in the form of Kramer plot. Solid lines were calculated with the scaling law based on strong coupling theory using the n -value relation.

아지는 경우로 임계전류가 정의된다. b 는 외부자장과 임계자장의 비로 정의되며 ($b = B/B_{c2}$), $f(b)$ 는 핀닝 모델에 따라 조금씩 모양이 달라진다. 널리 쓰이는 Kramer 모델의 경우는 $f(b) = b^{1/2}(1-b)^2$ 이나 [1], 여기서는 개개의 핀닝 힘 (individual pin-breaking pinning force)의 포아즌 함수 형태의 확률분포를 고려한 본래의 Kramer 모델을 사용하였다 [8].

$$f(b) = b^{1/2} \left[g(1-b)^{-2} \left\{ 1 - \left(1 + (1-b)^4 / g \right) \cdot e^{-(1-b)^4 / g} \right\} + (1-b)^2 \cdot e^{-(1-b)^4 / g} \right] \quad (3)$$

g 는 개개의 핀닝 힘(individual pin-breaking pinning force)과 자속격자 전단 핀닝 힘(flux line lattice shearing pinning force)의 비로 정의된 값이며, 내부확산법 Nb₃Sn 선재에 대해 보고된 결과와 유사한 1.5의 값이 사용되었다 [8].

그림 5는 소위 Kramer plot 형태로 나타내어진 고려제강 Nb₃Sn 다심 선재의 임계전류의 자장 의존성으로, 그림 3과 비교하여 보면, 자장 의존성에서도 그림 1, 2와 같이 n -값과 임계전류 변화 사이의 연관성을 볼 수 있으며, 실선은 위의 식 (2)를 이용하여 분석한 결과이다. 분석에 사용된 변수인 임계자장(B_{c2}) 및 최대

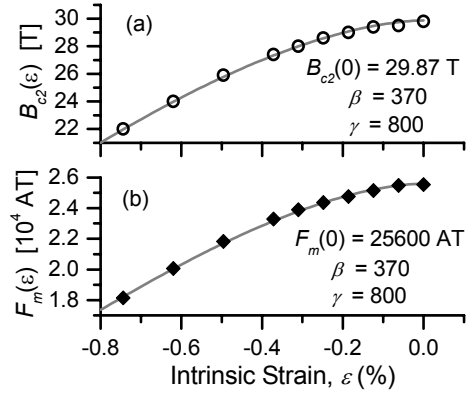


Fig. 6. The upper critical field and the pinning force maximum used for the calculation of the field dependence of the critical current for the internal-tin processed KAT Nb₃Sn strand. Solid lines were calculated with the relations based on strong coupling theory.

핀닝 힘(F_m)은 그림 6과 같다. 최근 보고된 강상관관계 이론(strong coupling theory)에 근거한 스케일링 법칙(scaling law)에 따르면 [9], 4.2 K에서의 임계자장(B_{c2}) 및 최대 핀닝 힘(F_m)의 변이 의존성은 아래와 같이 근사적으로 기술할 수 있다.

$$B_{c2}(\epsilon) \approx B_{c2}(0)(1 - \beta|\epsilon|^{1.7})(1 - \gamma|\epsilon|^{1.7})$$

$$F_m(\epsilon) \approx F_m(0) \cdot (1 - \beta|\epsilon|^{1.7})^{5/2} (1 - \gamma|\epsilon|^{1.7})^{1/2} \quad (4)$$

그림 6의 실선은 식 (4)를 이용하여 계산된 것으로, 가장 좋은 결과는 그림에 표시된 $\beta = 370$, $\gamma = 800$ 일 때 얻어졌다. 이를 이용하여 그림 1의 실선과 같이 임계전류의 변이 의존성도 실험결과와 부합하는 결과를 얻을 수 있었다.

이를 기존의 변이에 관한 임계전류의 스케일링 법칙과 비교하여 보았다. 기존의 스케일링 법칙의 경우는 n -값의 변화는 고려하지 않고 있으며, 대표적인 Ekin의 스케일링 법칙은 다음과 같다 [10].

$$I_c \times B = F_m^*(\epsilon) \cdot b^p (1-b)^q$$

$$B_{c2}^*(\epsilon) = B_{c2}^*(0)(1 - a|\epsilon|^{1.7})$$

$$F_m^*(\epsilon) \propto (B_{c2}^*(\epsilon))^m \quad (5)$$

그림 1의 점선은 Ekin의 스케일링 법칙을 이용하여 분석한 결과로, 사용된 변수는 각각 $n = 0.9$, $B_{c2}^*(0) = 27.3$ T, $F_m(0) = 14200$ AT, $p = 0.5$, $q = 2$ 그리고 $a = 1200$ 이다. 본 실험에서 측정된 영역에서는 n -값과 임계전류의 상관관계를 고려한 스케일링 법칙이 기존의 스케일링 법칙에 비해 실험결과와 조금 더 부합하는 계산결과를 보이고 있으며, 기존의 결과에 따르면 [2], 보다 고자장 혹은 변이가 큰 영역에서는 n -값과 임계전류의 상관관계를 고려한 스케일링 법칙의 필요성이 더 부각되고 있다.

IV. Conclusion

4.2 K에서의 고려제강 내부확산법 Nb₃Sn 다심 선재의 임계전류 및 n -값의 자장, 변이 의존성에 관한 상세한 측정이 수행되었다. n -값의 자장의존성은 기존에 보고된 $n(B, \varepsilon) = n_0 e^{-\exp[-a(B/B_m)]}$ 형태의 실험식으로 분석이 가능함을 확인하였고, 분석에 사용된 변수 $n_0(\varepsilon)$, $a(\varepsilon)$ 및 $B_m(\varepsilon)$ 의 변이 의존성으로부터 실험결과와 부합하는 n -값의 변이 의존성 계산이 가능하였다. n -값의 변화는 활성화 에너지의 변화와 연관이 있으며, 이러한 연관 관계로부터 제안된 자속 핀닝과 n -값의 상관 관계식으로 고려제강 Nb₃Sn 선재의 임계전류의 자장 의존성 분석이 가능하였다. 임계전류와 n -값의 상호관계를 고려하지 않는 기존의 변이에 관한 Ekin의 스케일링 법칙에 비해, 새로이 제안된 강상관관계 이론에 근거한 스케일링 법칙은 측정결과와 보다 부합하는 계산결과를 보이고 있으며 자장 및 변이가 큰 영역에서 더욱 효과적이라 기대된다.

Acknowledgments

This work was supported by the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) project and by the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) grant funded by the Korean Government (MOST) (No. R01-2007-000-20462-0).

References

- [1] E.J. Kramer, "Scaling laws for flux pinning in hard superconductors", *J. Appl. Phys.*, vol. 44, 1360 (1973).
- [2] Sangjun Oh, Chulhee Lee, K. W. Cho, Keeman Kim, D. Uglietti, and R. Flukiger, "Field dependence of the n -value and its relation with the critical current of Nb₃Sn strands," *Superconductor Science and Technology*, vol. 20, 851 (2007).
- [3] Sangjun Oh, Heekyung Choi, Chulhee Lee, Sangmoo Lee, Jaeun Yoo, Dojun Youm, H. Yamada, and H. Yamasaki, "Relation between the critical current and the n value of ReBCO thin films: A scaling law for flux pinning of ReBCO thin films," *Journal of Applied Physics*, vol. 102, 043904 (2007).
- [4] Sangjun Oh, Chulhee Lee, Heekyung Choi, Kyungmo Moon, Keeman Kim, Jiman Kim and Pyeong-Yeol Park, "A Variable Temperature Walters Spiral Probe for the Critical Current Measurement of Superconducting Strands," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* (in press).
- [5] C. R. Walters, I. M. Davidson and G. E. Tuck, "Long sample high sensitivity critical current measurements under strain", *Cryogenics*, vol. 26, 406 (1986).
- [6] S. Oh, S. H. Park, C. Lee, Y. Chang, K. Kim, and P.-Y. Park, "A strain dependence of critical current in internal Tin process Nb₃Sn strands," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, 3462 (2005).
- [7] A. Godeke, B. ten Haken, H. H. J. ten Kate, and D. C. Larbalestier, "A general scaling relation for the critical current density in Nb₃Sn," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 19, R100 (2006).
- [8] Sangjun Oh and Keeman Kim, "A Consistent Description of Scaling Law for Flux Pinning in Nb₃Sn Strands Based on the Kramer Model," *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 16, 1216 (2006).
- [9] S. Oh and K. Kim, "A scaling law for the critical current of Nb₃Sn stands based on strong-coupling theory of superconductivity," *J. Appl. Phys.*, vol. 99, 033909 (2006).
- [10] J. W. Ekin, "Strain scaling law for flux pinning in practical superconductors. Part I: Basic relationship and application to Nb₃Sn conductors", *Cryogenics*, vol. 20, 611 (1980).