

KSTAR 초전도자석 코일 성형을 위한 전산 및 실험적 연구

서영성* · 김용진** · 박갑래** · 방성근** · 박현기** · 백설희**

Computational and Experimental Studies on the Forming of KSTAR Superconducting Magnet Coil

Yeong Sung Suh, Yongjin Kim, Kaprai Park, Sungkeun Baang,
Hyunki Park and Sulhee Baek

Key Words : CICC(Cable-in-conduit coil), Forming(성형), Spring Back(스프링 백), Virtual Manufacturing(가상생산).

Abstract

The plastic deformation behavior of formed CICC for the superconducting Tokamac fusion device was examined and appropriate manufacturing information was provided. A relation between travel of the bending roller and spring back displacement was obtained via virtual manufacturing. The radius of CICC after forming was expressed as a function of the bend-roll travel. The maximum von Mises stress after spring back was also monitored for the SAGBO prediction. Next, the variation of the CICC cross-sectional area was examined during the first turn and during conduit bending with the largest curvature. Finally, the coil radius was measured and compared with the data generated from the virtual manufacturing. The measured data showed similar pattern as predicted one. Using the mapping function found to match with the real data, the data from the virtual manufacturing may facilitate accurate manufacturing.

1. 서 론

CICC(Cable-In-Conduit Coil)는 초전도 토카막 핵융합 장치에 사용되는 중앙 솔레노이드 모델 코일이다. Fig. 1에 KSTAR 자석 시스템의 형상을 나타내었다. KSTAR 시스템에 적용되는 몇 가지 코일의 형상을 Fig. 2에 보인다. CICC를 만들기 위해서는 Fig. 3에 보인 3를 굽힘 가공기(3-roll bending machine)를 이용하여 코일을 연속적으로 감는다. 3를 굽힘 가공은 곧은 파이프를 환형으로 굽히는데 손쉬운 방법이다. 그러나 소성가공에서 반드시 비롯되는 스프링 백 때문에 코일을 설계된 대로 정확한 곡률 반경에 맞춰 가공하기가 매우 어렵다. 따라서 정확한 수치를 확보하기 위

해서는 시행 착오를 거쳐야 한다. 최근 들어 컴퓨터와 소프트웨어 기술이 급속히 진보함에 따라 가상생산(virtual manufacturing)을 수행함으로써 이러한 어려움이 상당히 줄어들게 되었다. 가상생산은 컴퓨터를 활용하여 제품의 구조해석 시뮬레이션을 수행하는 것 뿐만 아니라 제조과정, 그 자체를 시뮬레이션 하는 것이다. 통상, 가상생산에서는 제조성, 최종형상, 잔류응력 및 수명예측과 같은 영역에서 최적 인자를 찾기 위하여 비선형 유한 요소해석을 활용한다. 이 논문에서는 상업용 비선형 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 3를 굽힘가공 공정을 시뮬레이션 함으로써 최소의 노력으로 CICC의 최종형상을 가능한 한 정확히 얻을 수 있는 정보를 확보코자 하였다. Fig. 4는 3를 굽힘가공 공정의 개략도를 나타낸다. 구동롤러(drive roller)가 CICC를 앞으로 밀어내면서 성형가공이 시작된다. 굽힘롤러(bend roller)는 일정한 곡률반경을 확보하며 CICC를 원형으로 성형하도록 한다. 토카막 장치에서는 반지름이

* 회원, 한남대학교 기계공학과
E-mail: suhy@mail.hannam.ac.kr
TEL: (042)629-7999 FAX: (042)629-8043
** 삼성종합기술원 에너지랩

431mm(PFI-4)로부터 3850mm(PF7)까지인 다양한 크기의 CICC를 사용한다. 금힘롤러의 하향이송에 따른 스프링 백 이후 CICC의 최종형상을 관측하였다. 계산에서는 CICC의 재료로써 Incoloy 908과 SUS 304 두 가지를 채택하였다. 실제로 토카막 장치에서는 Incoloy 908을 사용하나 시험 단계에서는 SUS 304를 활용한다.

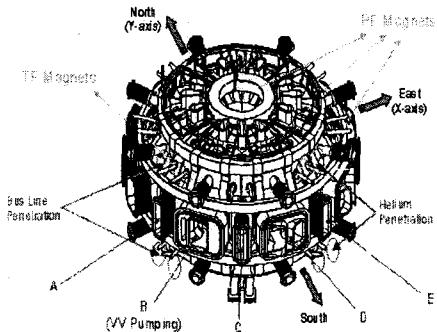


Fig. 1 KSTAR magnet system configuration

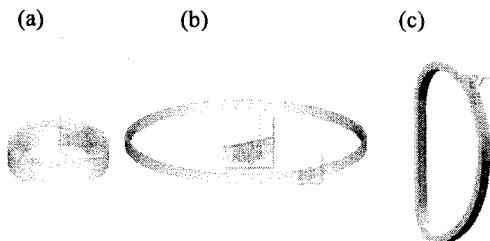


Fig. 2 PF coils configuration and winding scheme used in the KSTAR superconducting magnet:

(a) PF1 coil (b) PF7 coil (c) TF coil

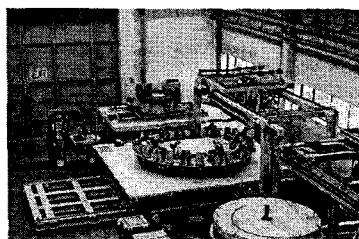


Fig. 3 KSTAR Magnet winding machine using 3-roll bending process (Energy Lab, SAIT, Taejon)

추가적으로 실제 성형공정에서 최소곡률 반경의 코일을 가공할 때 일어날지도 모르는 단면의 축소에 대해서도 검토하였다. 단면이 너무 감소되면 CICC 안에 가득 들어찬 초전도 스트랜드

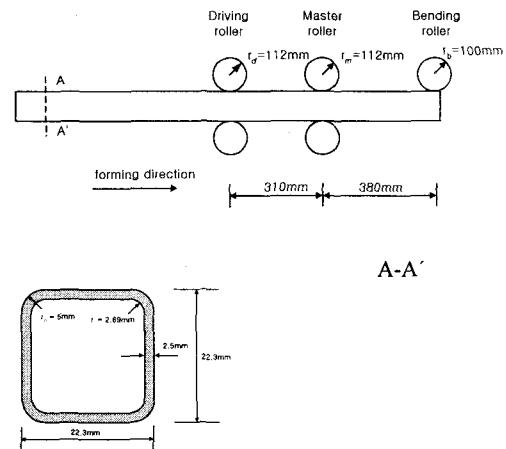
(strand)가 손상을 입을 수도 있기 때문이다. 설계 규정에서는 단면의 감소가 5% 이상을 초과하지 않도록 되어 있다. 또한, 코일에 SAGBO(응력가속 입자경계산화 : Stress Accelerated Grain Boundary Oxidation)가 일어날 가능성을 확인하기 위하여 최대 폰미세스(von Mises) 응력을 관측하였다.

SAGBO는 다음과 같은 세가지 조건이 동시에 만족될 때 일어난다⁽¹⁾.

- 주위온도 : 550°C~800°C
- 인장강도 : 200Mpa 이상
- 산소압력 : 10^{-5} torr(1 기압, 0.14ppm 일 때) 이상

최종적으로, 프로토타입(prototype) 시험을 수행하여 코일의 반경을 측정하였다. 여기서 측정된 데이터를 가상생산 데이터와 비교하여 보다 정확한 생산관련 설계정보를 구축하고자 하였다.

(a) Before forming



(b) During forming

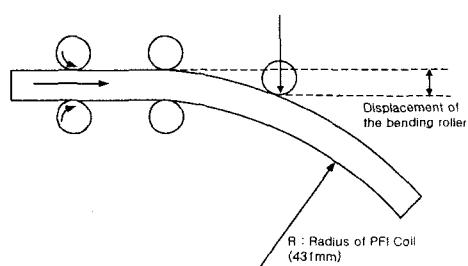


Fig. 4 Schematics of three-roll bending process to form CICC: (a) Before and (b) during forming

2. 접근방법

가상생산을 위해서 상업용 비선형 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 를 Compaq-Digital 워크스 테이션 433AU 와 SGI Origin 2000 에서 사용하였다. 계산시간을 절약하기 위하여 길이 방향의 반쪽 CICC 만을 모델링 하였다. 솔리드 요소보다는 셀 요소를 사용하였는데, 이는 전자가 굽힘에 의한 두께 방향의 전단변형을 수용하는데 충분하지 않기 때문이다. 따라서, CICC 를 모델링 하기 위해 S4R 요소를 채용하였다. 굽힘변형 중 적절한 전단 변형을 계산해 내기 위해 두께 방향으로 5 개의 적분점을 할당하였다. 률러는 강체로 가정하여 *RIGID SURFACE 옵션을 활용하였다. 표면조건에 관해서는 구동롤러와 CICC 간에만 마찰을 고려하였다. 주요 계산과정은 다음과 같다.

1 단계 : 상부 률러(upper roller)의 중앙에 집중하중 10kN 을 가한다. 하부 률러(lower roller)는 이 때 고정되어 있다.

2 단계 : 굽힘롤러가 CICC 를 굽히기 위하여 아래로 이동하기 시작한다. 주어진 거리까지 이동한 후 멈춘다.

3 단계 : 상부 구동롤러는 반시계 방향으로, 하부 구동롤러는 시계 방향으로 회전함으로써 CICC 가 앞으로 전진하게 된다.

4 단계 : 상부 주 률러(master roller)와 굽힘 률러를 제거하여 스프링 백 거동을 허용한다.

스프링 백 이후에는 CICC 의 적절한 세 지점을 선정하여 좌표 값을 측정하였다. 계산결과로부터 굽힘롤러의 이송 대 CICC 의 반지름을 추출하였다. 최소 곡률 반경에서 CICC 의 단면변화와 폰미세스 응력도 관측하였다.

3. 결과 및 토론

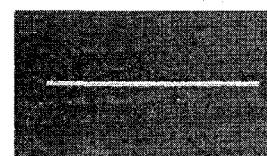
3.1 굽힘롤러의 수직변위 대 스프링 백 후의 최종 CICC 반경

사용된 두 재료의 기계적 성질을 Table 1 에 수록하였다. 대부분의 초기 계산은 재료를 Incoloy 908 로 가정하여 수행하였다. 스프링 백 데이터를 얻은 후에 SUS 304 의 경우를 추가하였다. 따라서 이 절에서의 대부분의 계산의 결과는 별도의 언급이 없다면 Incoloy 908 로 가정하여 얻은 것이다.

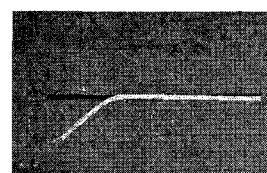
Table 1 Mechanical Properties of Incoloy 908⁽²⁾ and SUS 304 (measured)

Young's modulus	180 GPa (Incoloy 908) 195 GPa (SUS 304)
Poisson's ratio	0.3 (same for both materials)
Yield stress [MPa]	848 MPa (Incoloy 908) 321 MPa (SUS 304)
Uniaxial Stress [MPa] - Plastic strain relation	$\sigma = 1848.3(0.00334 + \varepsilon^P)^{0.137}$ (Incoloy 908) $\sigma = 1525.5(0.03978 + \varepsilon^P)^{0.483}$ (SUS 304)

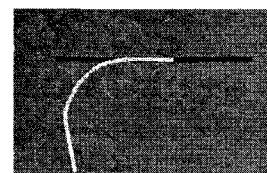
굽힘롤러의 수직이송 변위가 250mm 일 때 단계별 CICC의 변형 거동을 Fig. 5에 보였다.



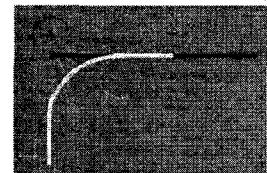
STEP 1 (clamping)



STEP 2 (bending)



STEP 3 (continuous forming)



STEP 4 (spring back)

Fig. 5 Stepwise-deformed shape of CICC with downward bending roller travel of 250mm (red: undeformed)

구동롤러는 CICC를 450mm 만큼 전진 이동시키기 위하여 4.02rad 만큼 회전하도록 입력하였다. 계산에 적용된 굽힘롤러의 수직이송 변위는 SUS 304의 경우 50, 75, 100, 150 및 200mm이며, Incoloy 908의 경우 50, 75, 100, 125, 150, 180, 200, 220, 240 및 250mm이나 대략적으로 한 경우 당 15시간 정도의 계산 시간이 소요되었다. 스프링 백 후의 반경을 계산하기 위해서는 실제 PF 코일에 가깝게 곡률반경을 예측하기 위해서 롤러를 임의로 후진 시키지 않아도 연속적으로 스프링 백이 일어나는 굽힘롤러 근처 세 점을 관측 점으로 지정하였다. 이 지역에서 폰 미세스 응력과 길이 방향 응력 분포는 Fig. 6, 7에서 보듯이 굽힘롤러를 하강 시켜 성형했을 때와 접촉처리를 풀어 주어 스프링 백을 일으킬 때를 비교하면, 길이 방향으로 그 응력의 분포와 크기가 거의 유사함을 관찰할 수 있다.

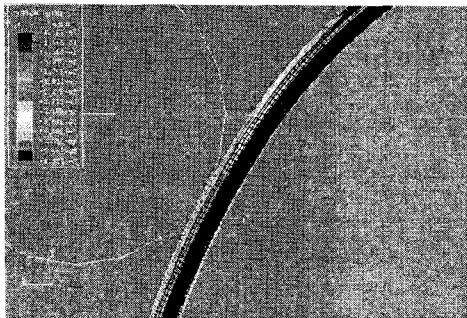


Fig. 6 Contour of longitudinal stress near the bending roller after spring back (step 3)

Material: Incoloy 908; Bending roller travel=250mm

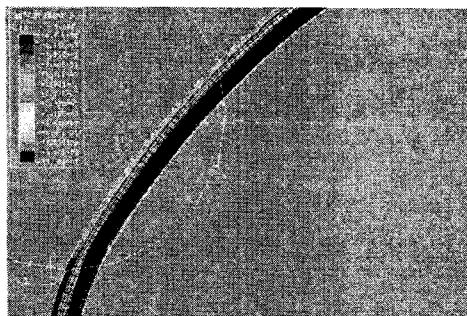


Fig. 7 Contour of longitudinal stress near the bending roller after spring back (step 4)

Material: Incoloy 908; Bending roller travel=250mm

Fig. 8에는 Incoloy 908과 SUS 304의 경우, 스프링 백 이후의 CICC 반경 예측치 대 굽힘롤러의 수직이송 변위를 보여준다. 이는 참고문헌⁽³⁾에서 보인 수치적 예측 결과와 일맥상통한다. 굽힘롤러의 변위가 작을수록 즉, 소성변형의 축적이 적을수록 스프링 백이 큼을 가리킨다.

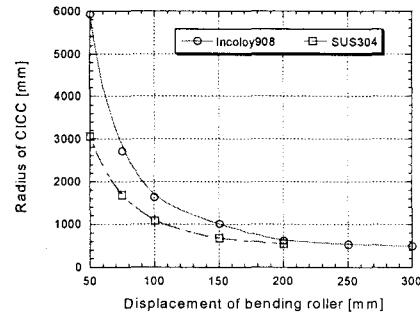


Fig. 8 Predicted radius of formed CICC after spring back vs. distance of the bending roller for both Incoloy 908 and SUS304. Monitored nodes were located near bending rollers.

하중을 제거한 후의 최대 폰 미세스 응력은 Fig. 9에 보듯이 대략 500-600Mpa 이었고 최대 인장응력은 500Mpa 이었는데, 이는 SAGBO 기준을 초과하는 것이다. 이미 운전 온도는 SAGBO 기준을 초과하므로 SAGBO 를 피하려면 산소압력을 제어하는 수밖에 없음을 나타낸다.

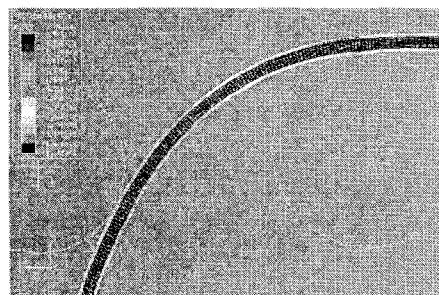


Fig. 9 Contour of von Mises stress when the bending roller traveled by 250mm (Material: Incoloy 908)

3.2 CICC의 두께변화

성형중의 두께 변화는 무시할 만 하였음을 확인하였다. 성형 전 CICC 백 두께는 2.5mm 였는데 성형 후 2.40mm 부터 2.59mm 까지 변화하였다. (Incoloy 908, 굽힘롤러 이송거리=250mm 일때)

3.3 최소반경에서 CICC의 단면적 변화

$$f(Y) = 3.0000 \times 10^6 Y^{-1.6607} \quad (1)$$

전술한 바와 같이 CICC의 단면적이 성형 중 과도하게 변화하면 CICC 안의 초전도 스트랜드가 손상을 입게 되므로, 최대 곡률을 갖는 부분의 단면 변화를 검토하였다. Fig. 2(a)에서 보듯이 CICC가 최소 곡률반경을 갖는 곳은 코일이 거의 90° 로 굽어지는 부분이며, 이 지점에서의 반경을 250mm로 가정하였다. 최악의 조건에서 단면적 변화를 검토하기 위하여 보다 작은 반경을 얻도록 FEM 모델링에 변화를 주었다. 즉, 주 률러(master roller)는 스프링 백 이후에 CICC가 250mm의 반경을 갖게 하기 위해 그 반경을 200mm로 증가시켰다. 측정 절점 좌표는 하부 주 률러 근처에서 선택하였다. 굽힘 률러의 변위는 250mm였다. Incoloy 908의 경우, 스프링 백 전후의 반경은 각각 198mm와 234mm였다. 따라서 스프링 백 전의 경우를 검토하였다. 여기서 면적은 두께 방향의 중앙선으로 둘러싸인 부분을 가리킨다. 줄어든 면적은 375.6mm^2 였고 이는 원래 면적 378mm^2 에서 0.63%의 감소만을 나타낸다. 따라서 성형 후의 면적 감소는 무시할 만하다. SUS 304로부터도 유사한 결론을 얻었다. Incoloy 908의 경우, 최대 폰 미세스 잔류응력은 546Mpa이며 최대 인장응력은 487Mpa였다.

3.4 프로토타입 생산 및 스프링 백 측정

삼성중합기술원에 설치되어 있는 CNC 롤 굽힘 가공기(Fig. 3)로 초전도 스트랜드가 없는 SUS 304 CICC를 성형한 후 스프링 백 후의 반경을 측정하였다. Fig. 10은 가상생산과 실제 생산에서 추출된 데이터를 보여준다. 약간의 차이가 특히 굽힘 률러 변위가 적은 영역에서 있지만 전반적인 변형거동은 유사함을 보여준다. 오차는 코일의 반경이 커질수록 증가한다. 이는 소성변형이 적게 축적된 경우, 간과한 계산 가정 조건들이 확대되어 나타남을 가리킨다. 이러한 차이는 CICC의 초기 직선도, 률러와 코일의 접촉 조건, 초기코일의 자켓팅(jacketing)시에 내재된 잔류응력의 정도등에서 비롯될 수 있다. 이러한 정보들은 수치적으로 정확히 파악될 수 없는 것들이다. 또한, 계산 시간을 줄이기 위하여 CICC의 길이를 충분히 길게 하지 못함으로써 스프링 백의 거동을 정확히 계산하지 못한 오차도 있을 것이다. 이러한 오차들은 Fig. 10에 보인 데이터를 이용하여 개략적으로 보상할 수 있을 것으로 보인다. 즉 실험 데이터를 수학적으로 표현하면

가상생산결과는

$$g(Y) = 3.9299 \times 10^5 Y^{-1.2594} \quad (2)$$

$g(Y)$ 를 $f(Y)$ 로 매핑하려면(mapping), 매핑함수 $h(Y)$ 는 다음과 같이 가정한다.

$$f(Y) = h(Y) g(Y) \quad (3)$$

이것을 풀면, $h(Y)$ 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$h(Y) = 7.6398 Y^{-0.4013} \quad (4)$$

물론 두 종만의 데이터로써 이 매핑함수의 정확도를 보장하기는 어렵다. 좀 더 많은 실험을 통해서 보정을 해야 할 것이다. 그러나 이러한 매핑함수를 활용하면 가상생산데이터를 좀 더 정확히 실제 생산에 적용할 수 있을 것으로 보인다. 이러한 매핑함수는 실험 아니고는 파악하기 어려운 간과된 수치적 가정을 보상하는데 유용할 것으로 보인다.

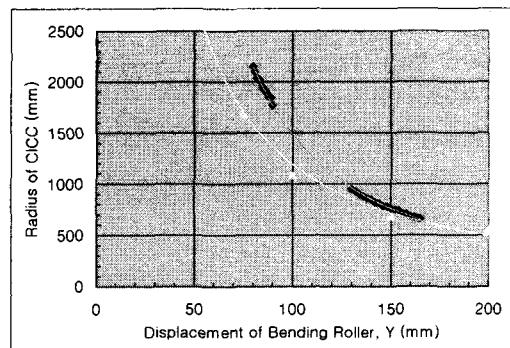


Fig. 10 Data from the experiment(upper) and virtual manufacturing(lower).

4. 결 론

가상 생산을 활용하여 3를 굽힘 가공지원 정보를 얻기 위하여 굽힘 률러와 스프링 백 이후 CICC 반경의 관계를 확보하였다. 성형 후 CICC의 반경을 굽힘 률러 변위의 함수로 표현하였다. 계산에 적용된 재료는 Incoloy 908과 SUS 304이다. 스프링 백 이후의 최대 폰 미세스 응력은 SAGBO

기준을 초과하였다. 다음으로 최대 곡률을 갖는 CICC 단면의 면적 변화를 검토하였는데, 최대 곡률에서도 단면적의 변화를 무시할 만하였다. 프로토타입 생산으로부터 실제와 계산 데이터를 비교하여 수정함수를 얻었다. 이러한 방법으로 수치 계산에서 간과된 가정을 보상함으로써 보다 정확한 가공정보를 제시할 수 있게 된다.

후기

이 연구는 삼성종합기술원에서 지원한 것입니다.

참고문헌

- (1) 김상호, 1999, “Nb₃Sn Cable-in conduit (CIC) 초전도체를 이용한 초전도 토카막 핵융합 장치의 Central Solenoid(CS) 모델 코일 개발에 관한 연구,” 박사학위논문, 서울대학교.
- (2) L. S. Toma, M. M. Steeves, R. P. Reed, 1994, “Incoloy Alloy 908 Data Handbook,” PFC/RR-94-2, Superconducting Magnet Development Group, Plasma Fusion Center, MIT.
- (3) 김용완, 김종인, 김동옥, 허형, 김지호, 박진석, 장문희, 1999, “SMART 증기발생기 나선형 전열관의 스프링백 해석을 위한 모델 개발,” KAERI/TR-1406/99, 한국원자력연구소.