

# Nb<sub>3</sub>Sn 도관 케이블 도체의 굽힘변형 해석

남현일\*, 이호진\*\*, 박재학\*  
\* 충북대학교 안전공학과  
\*\* 한국원자력연구소 기능성재료

## The analysis of bending processes in Nb<sub>3</sub>Sn Cable-in-Conduit Conductors

Hyun-Il Nam\*, Ho-Jin Lee\*\*, Jai-Hak Park\*  
\* Chungbuk National University, Cheongju, Korea  
\*\* Korea Atomic Energy Research Institute, Taejeon, Korea

e-mail : hinam1@hanmail.net

**Abstract** - Cable-in-Conduit Conductors (CICC) have been used for fabrication of nuclear fusion magnets. Bending process is included in fabrication of superconducting magnet such as termination of conductors. Because of plastic deformation by bending process, there can be a large residual stress and change of shape in bent conductors. Void volume fraction in conductors is also changed by bending process. In this study, Commercial code was used to analyze the bending process at various bending curvature radius. The calculated residual stress of conductors bent at less than about 40cm curvature radius exceeded the allowable stress.

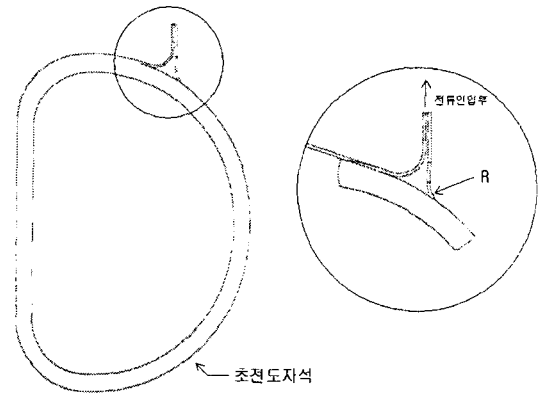


Fig. 1. The Schematic view of winding and bending of CICC type superconducting magnet

## 1. 서 론

도관케이블 도체(CICC, Cable-in-Conduit Conductors)는 스테인리스 스틸 혹은 Incoloy 와 같은 금속재료로 도관(conduit)을 만들고, 내부에 케이블을 넣은 후 소성가공 및 용접작업을 하여 제작되며 핵융합용 자석이나 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)장치와 같은 대규모 초전도자석의 제작에 사용되고 있다.

도관케이블 도체를 사용하여 제작한 초전도자석을 그림 1에 간략하게 나타내었다. 초전도자석의 전력공급은 그림 1에서와 같이 도관케이블 도체의 단말부를 통하여 이루어지는데 전류인입부와 접합을 위해 단말부는 굽힘공정을 거치게 된다[1].

굽힘공정에 의해 소성변형을 일으킨 도관케이블 도체는 소성변형에 의한 잔류응력의 발생이 예상

된다. 잔류응력은 재료의 사용수명 및 건전성에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 20cm에서 50cm사이의 곡률반경에서 도관케이블 도체의 굽힘공정을 ABAQUS 코드를 이용하여 해석하였다[2].

## 2. 본 론

### 2.1 굽힘 변형의 모델링

ABAQUS 코드를 사용하여 도관케이블 도체의 굽힘변형공정에서 발생하는 응력 및 도관케이블 도체 단면의 형상변화를 해석하였다.

도관케이블 도체의 가로와 세로 길이는 2.56cm이며, 각 모서리는 0.5cm의 곡률을 가지고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 3차원요소를 사용하여 실제의 도관케이블 도체의 형상을 모델링하였고, 강체요소를 사용하여 도관케이블 도체를 굽히기 위한 두개의 롤러를 모델링하였다.

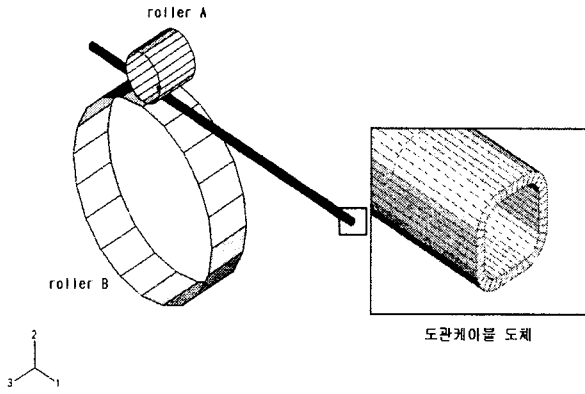


Fig. 2. The finite element model of CICC and rollers

도관케이블 도체와 롤러 사이는 contact surface를 지정하여 접촉(contact)이 발생하는 것으로 하였다. 롤러 A는 반경을 10cm로 고정하였고 롤러 B의 주위를 따라 회전변위를 주어 도관케이블 도체에 변형을 주도도록 하였다. 롤러 B의 반경을 20cm, 30cm, 40cm, 50cm로 변화시킴으로써 굽힘공정시의 곡률반경변화를 나타내었다.

도관케이블 도체의 내부에는 케이블이 존재하고 있지만 굽힘공정시의 응력발생에 대해 내부의 케이블이 큰 영향을 미치지 않는다고 가정하여 모델링에서는 내부가 비어있는 것으로 단순화시켰다. 그리고 도관케이블 도체와 롤러사이의 마찰계수는 0으로 하여 굽힘에 의한 응력발생만을 고려하였다.

도관케이블 도체의 자켓팅(jacketing)재료로 사용된 Incoloy 908의 재료물성치를 해석모델의 재료물성으로 사용하였다[3]. Table 1은 해석에 사용한 Incoloy 908의 재료물성치를 정리한 것이다.

변형이 탄성영역을 지나 소성영역으로 들어가게 되면 재료물성치중에서 소성영역을 정의하는

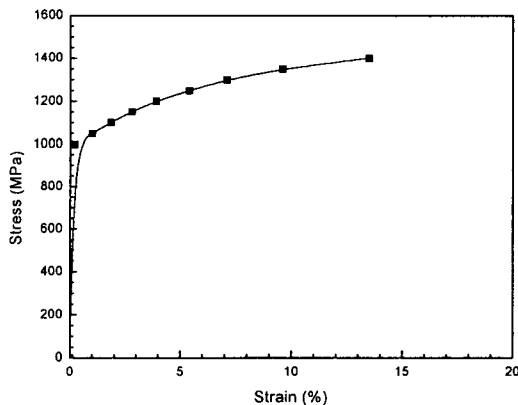


Fig. 3. Stress-Strain curve of Incoloy 908 at 298K

Table 1. Material Properties for Incoloy 908 at 298K

탄성계수	187.7GPa
포아송비	0.297
밀도	8128 kg/m <sup>3</sup>
항복강도	1020 MPa

물성이 필요하다. 이러한 소성물성은 그림 3의

응력-변형률곡선을 사용하였다.

그림 4는 굽힘공정을 개략적으로 나타낸 것이다. 롤러를 A 에서 B 로 이동시킴으로써 도관케이블 도체에 굽힘변형을 주었다. 각 곡률반경으로 도관케이블 도체를 굽힘변형시켰을 때 발생하는 응력의 크기 및 단면형상의 변화 등을 알아보았다.

## 2.2 해석 결과

도관케이블 도체의 굽힘 곡률반경을 변화시켜가며 해석을 행하였다. 각 경우에 대한 잔류응력 및 단면의 형상변화에 대하여 다음과 같이 정리하였다.

### 2.2.1 곡률반경에 따른 잔류응력의 변화

곡률반경을 20cm에서 50cm까지 변화시켜가며 각각의 곡률반경에서의 잔류응력을 알아보았다. 그림 5에서는 각 곡률반경에 따른  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 의 변화를 나타내었다. 곡률반경이 20cm인 경우에는 길이방향(x)으로 매우 큰 응력이 생김을 알 수 있었으며 곡률반경이 40cm이상 이 되면 발생하는 응력의 크기가 현저히 감소함을 알 수 있다.

변형 후의 잔류응력이 재료의 허용응력내에 존재하는지의 여부를 알아보기 위하여 Von Mises stress를 각 곡률반경에 대하여 구한 뒤 최고값을 그림 6에 나타내었다. 허용응력은 항복강도(yield strength)의 2/3의 응력과 극한강도(ultimate strength)의 1/2의 응력 중에서 작은

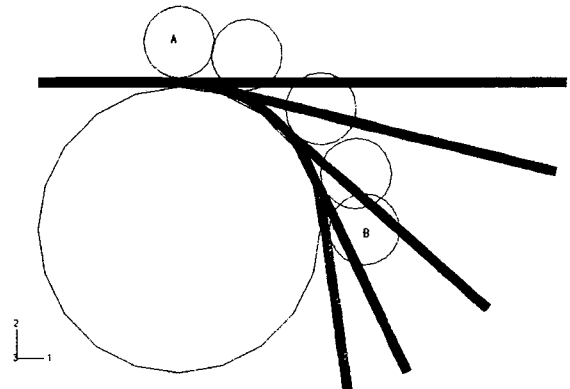


Fig. 4. The overlapped view of bending processes

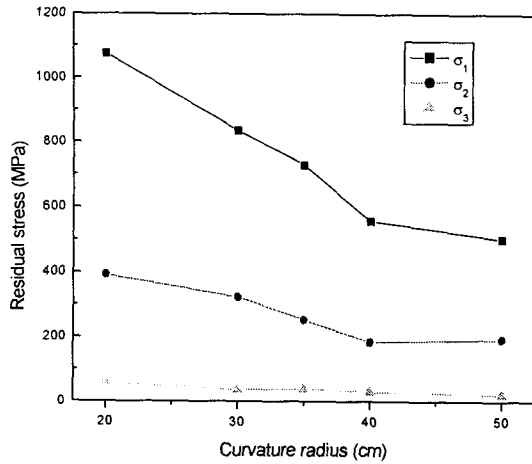


Fig. 5. The calculated residual stresses of bent Cable-in-Conduit Conductors at various curvature radius

응력값으로 취하였다[4]. Incoloy 908의 항복강도는 1034MPa이고, 극한강도는 1433MPa이므로 허용응력은 690MPa이다.

그림 6을 보면 곡률반경 40cm보다 작은 경우에는 굽힘변형이 발생하고 난 후 허용응력을 초과하는 잔류응력이 남아 있음을 알 수 있었으며 50cm의 곡률반경에서는 Von Mises응력이 허용응력인 690MPa보다 훨씬 적었다.

### 2.2.2 곡률반경에 따른 단면형상의 변화

도관케이블 도체 내부의 공극부피분율(void volume fraction)은 전기저항성과 냉각효과, 그리고 소선(strand)들의 손상정도에 큰 영향을 미치므로 설계된 공극부피분율을 유지해야 한다[5]. 그러나 굽힘공정에 의하여 소선변형을 일으키게 되면 도관케이블 도체의 단면형상이 변하게 되어 내부의 공극부피분율에 변화가 발

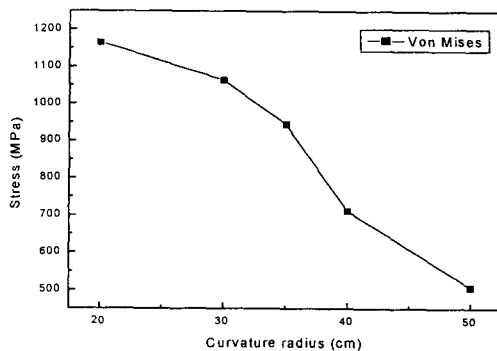


Fig. 6 . The variation of calculated Von Mises stresses in bent Cable-in-Conduit Conductors at various curvature radius

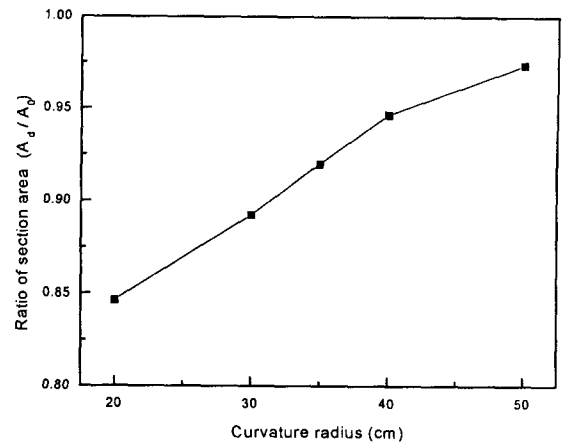


Fig. 7. The variation of calculated ratio ( $A_d/A_0$ ) of cross section area bent at various curvature radius

생하게 된다.

굽힘변형을 하기 전의 단면적( $A_0$ )과 굽힘변형이 가해진 후에 굴곡부에서의 단면적( $A_d$ )을 각 곡률반경에 대하여 Image analyser를 이용하여 측정하였다. 측정된 두 단면의 면적비( $A_d/A_0$ )를 통하여 굽힘변형을 하고 난 뒤 공극부피분율이 얼마나 변하였는가를 간접적으로 알아보았다. 그림 7은 곡률반경에 따른 면적비의 변화를 나타내고 있다.

곡률반경이 50cm일 때는 단면적의 변화가 거의 없지만 곡률반경이 40cm이하가 되면 단면적의 변화량이 점차 커진다는 것을 그림 7을 통하여 알 수 있다. 즉, 곡률반경이 20cm일 때는 굽힘변형을 받고 난 뒤의 단면적이 굽힘변형을 하기 전의 단면적의 85%로 감소하였다.

## 3. 결 론

도관케이블 도체의 굽힘변형을 상용 유한요소 해석코드를 이용하여 해석하였다. 굽힘 곡률반경을 20cm, 30cm, 40cm, 50cm로 변화시키면서 해석한 결과 곡률반경이 작을수록 잔류응력의 변화가 큰 것을 확인할 수 있었다. 곡률반경을 너무 작게 할 경우 허용응력을 초과하는 잔류응력이 남게 되었고 단면에서의 공극부피분율 감소가 증가함을 알 수 있었다. 해석결과, 곡률반경이 약 40cm이상에서 허용응력보다 적은 잔류응력을 얻을 수 있었다.

본 연구는 KSTAR 사업의 지원으로 수행되었습니다.

## [참 고 문 헌]

- [1] KSTAR, "KSTAR ASER drawings", National Fusion R&D Center, September, 1998
- [2] HKS, "ABAQUS User's Manual"
- [3] L.S. Toma, M.M. Steeves, R.P. Reed, "In-copoly Alloy 908 Data Handbook", Superconducting Magnet Development Group PI-asma Fusion Center, March, 1994
- [4] KSTAR, "Preliminary Analysis of the thermal contraction: TF Bus-Lines inside the Cryostat", Korea Basic Science Institute, January, 2000
- [5] P.Bruzzone, et al., "Design and R&D results of the Joints for the ITER Conductor", IEEE Transaction on applied superconductivity, Vol.7, No.2, June,1997