Progress in Superconductivity Vol.3 No.2 pp218-223 30 April 2002

Study on the unidirectional compaction of terminal cables in the CICC joint

H. I. Nam*, H. J. Lee+, J. H. Park*, G. W. Hong#
*Chungbuk National University, Cheongju, Korea
+Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon, Korea
#Korea Polytechnic University, Shihung-City, Kyonggi-Do, Korea
Received 20 August 2001

CICC(도관케이블도체)접합부에서 단말부의 일축압축에 관한 연구

남현일*, 이호진+, 박재학*, 홍계원#

Abstract

The void volume fraction of cables is one of the effective parameters to characterize the joints of superconducting magnet. Because electrical resistance and cooling stability in the CICC (Cable-in-Conduit Conductors) joint are governed by the void volume fraction, it should be controlled constantly in the termination of cable. The change of cross-section shape in the cable was found during the unidirectional compaction of terminal sleeve. The non-uniform thickness of the sleeve after compaction is expected because the loading is not axi-symmetric, and the plastic flow is also not axi-symmetric. The CICC was compacted from 45% void volume fraction to 15% by using two-piece compaction jig, which could be pressed uni-directionally. Commercial code, ABAQUS, was used to analyze the plastic flow in the sleeve during the unidirectional compaction. The increment of radius of curvature of compaction jig could minimize the change of the deformed shape of cables. The calculated results were agreed with the experimental observations.

Keywords : CICC joint, sleeve-compaction, void volume fraction, plastic flow

1. 서 론

대형초전도자석은 경제성 및 작업성을 고려하여 여러 개의 코일을 전자기적으로 연결하여 제작하며 여기에 사용되는 도관 케이블 도체(CICC: Cable-in-Conduit Conductors)는 통전전류 및 냉각효과가 좋도록 설계되어 있다. 초전도 코일을 연결하기 위한 접합방법에는 랩(lap)접합 또는 맞대기(butt)접합이 많이 사용되고 있다.

맞대기접합은 랩접합에 비해 크기가 작으므로 교류손실을 최소화시킬 수 있는 방법으로 생각되고 있다. 맞대기접합부는 내부의 케이블을 보호하고 케이블의 공극부피분율(void volume fraction)을 유지하기 위하여 구리와 같

*Corresponding author. Fax : +82 42 862 5496
e-mail : hinam1@dreamwiz.com

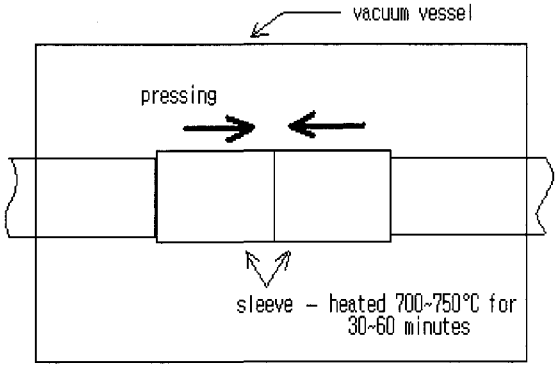

Fig. 1. Schematic drawing of diffusion bonding

이 전기전도도가 좋은 재질로 가공된 슬리브를 사용하여 케이블을 압축(compaction)한 뒤 700~750°C의 진공상태에서 30MPa의 압력을 양 단말부에 30~60분동안 가하여 Fig. 1과 같이 고상접합(diffusion bonding)시킨다.[1],[2],[3]

이 방법을 사용하여 접합된 접합부의 건전성을 판단하는 중요한 변수중의 하나로 압축된 단말부의 공극부피분율을 들 수 있다.

공극부피분율은 전기저항성과 냉각효과, 그리고 소선(strand)들의 손상정도에 큰 영향을 미치므로 케이블의 단말부에서 설계된대로 공극부피분율을 얻을 수 있어야 한다.[4] 현장에서 단말부작업을 수행하는 경우 장비의 크기 및 작업공간으로 인하여 Swaging장비 혹은 인발작업과 같이 축대칭 형태의, 즉 반경방향으로의 변형을 줄 수 있는 장치는 사용하기가 어렵다. 따라서 2 조각의 일축하중을 줄 수 있는 간단하고 소형인 장치를 사용한다. 그러나 이 경우 단말부 슬리브의 압축과정에서 케이블의 단면형상의 변화가 발생하여 공극부피분율의 감소현상이 관찰되었다. 이 같은 현상은 일축방향 압축을 행하는 과정에서 슬리브에 가해지는 비대칭적 하중으로 인한 소성흐름(plastic flow)의 비대칭에서 발생한다고 생각된다.[5]

본 연구에서는 ABAQUS 코드를 사용한 역학적 접근을 통해 압축과정을 묘사하여 슬리브 내의 케이블 형상변화를 알아보았으며 초기에 예상한 공극부피분율의 변화에 대하여 계산한 후 비교하였다.[6]

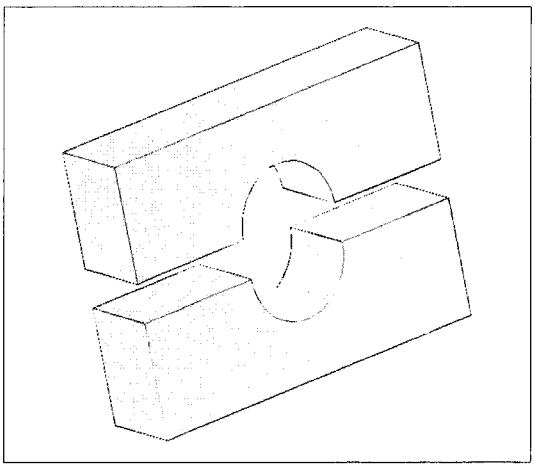

Fig. 2. Shape of unidirectional compaction jig

2. 실험방법

외경 32.5mm, 내경 27.5mm의 슬리브를 압축하기 위하여 Fig. 2와 같은 압축지그(compaction jig)를 제작하였다. 압축지그의 상하면에서 포터블 프레스(portable press)로 하중을 가하였다.

본 실험에서는 45%, 30% 그리고 15%의 공극부피분율이 나오도록 직경이 29mm, 26mm, 그리고 24mm가 되는 3개의 압축지그를 제작하였다.

압축을 가하기 위해서는 슬리브의 직경보다 작은 직경의 압축지그를 사용하게 된다. 이 때 원형태의 슬리브를 그대로 사용할 경우 압축지그의 모서리와 닿는 부분에서 집중하중이 가해진다. 따라서 압축을 수행하기 전에 원형태의 슬리브를 각 압축지그의 직경에 맞게 타원형으로 만들어 슬리브에 가해지는 하중이 최대한 균일하게 가해질 수 있도록 하였다.

두 가지 경우에 대하여 일축압축을 수행하였다. 첫째는 공극부피분율이 45%에서 30%가 되도록 하였고, 두번째는 45%에서 15%가 되도록 하였다. 압축을 하고 난 단말부를 반경방향으로 절단하였다. 절단부에 대하여 저배율광학현미경을 이용해 두 경우에서 나타나는 케이블의 불균일변형 및 슬리브의 두께변화 등을 관찰하였다.

저배율광학현미경에서 촬영한 절단단면을 Image analyzer를 이용해 실제 공극부피분율을

측정하였고 이를 초기에 예상한 공극부피분율과 비교하였다.

3. 케이블 변형의 해석

압축과정에서 나타나는 케이블의 불균일 변형을 해석하기 위하여 ABAQUS 코드를 사용하였다. 해석시간과 해석의 효율성을 고려하여 전체 모델의 1/2만을 모델링하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 모델은 Fig. 3에 나타내었다.

슬리브와 케이블은 평면변형 2차원요소를 사용하였고, 압축지그는 강체요소를 사용하여 일축방향하중을 슬리브에 가하였다. 슬리브 내부에 위치하는 486개의 구리 케이블은 각각의 케이블을 묘사하기가 용이하지 않으므로 케이블 전체를 하나의 연속체로 가정하였다...

연속체로 가정한 케이블의 물성치는 케이블 재료의 물성치에서 공극부피분율에 맞추어 조절하였다 즉, 공극부피분율이 45%인 경우엔 연속체의 물성치를 케이블재료의 물성치의 55%로 가정하여 공극부피분율을 고려하였다 해석모델에서는 압축지그와 슬리브, 슬리브와 케이블을 묘사한 연속체 사이에서 접촉이 일어

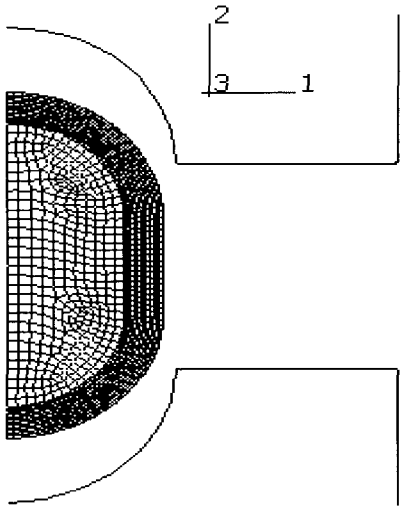

Fig. 3. Finite element model for unidirectional compaction analysis

Table 1. Material Properties for compaction analysis

탄성계수		115 GPa
포아송비		0.31
밀 도		8920 kg/m^3
마찰계수	지그와 슬리브	0.3
	슬리브와 케이블	0.1

나는 것으로 하였다. 전자의 경우에 후자의 경우보다 접촉에 따른 마찰계수를 더 크게 주어 슬리브의 소성흐름에 대해 중요한 영향요소로 작용하도록 하였다.

케이블의 불균일변형을 발생시킬수 있는 여러 변수, 즉 압축지그와 슬리브 사이의 마찰계수, 압축지그의 곡률반경 등,들을 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 물성치는 Table 1에 정리하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 공극부피분율 45%에서 30%로의 압축

실제 압축을 행한 슬리브의 변형형상과 해석을 통하여 얻은 변형형상을 Fig. 4과 Fig. 5에 각각 나타내었다. 두 경우가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

압축 전 슬리브의 두께는 2.6mm였고 압축이 끝난 후에는 2.8mm가 되어 0.2mm가 증가하였다. 슬리브의 형상은 Fig. 4에서 보듯이 슬리브의 안쪽과 바깥쪽으로 부풀어 올랐다. 이러한 현상은 압축을 하는 과정에서 압축지그와 접촉을 하지 않는 슬리브의 중간부에 소성흐름이 집중됨으로써 발생하는 것으로 생각된다. Table 2는 초기에 예상한 공극부피분율을 실제 실험 결과 및 해석 결과와 비교한 것이다.

예상 공극부피분율은 슬리브의 불균일변형 및 두께의 증가를 고려하지 않고 압축 후에도 슬리브가 완전 구형을 이룰 것이라는 가정하에서 설계하였기 때문에 실제 및 해석 결과와 차이가 발생하였다.

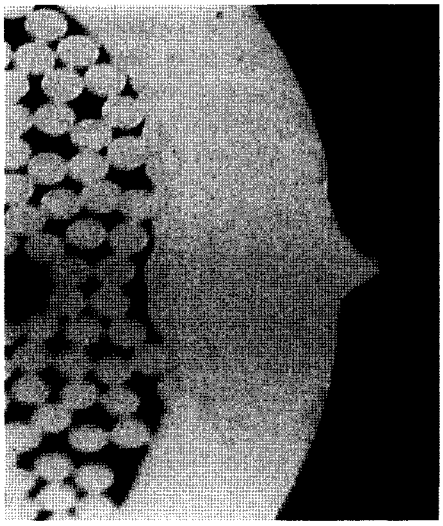

Fig. 4. Deformed shape of joint in the experiment when joint is compacted from void volume fraction 45% to 30%

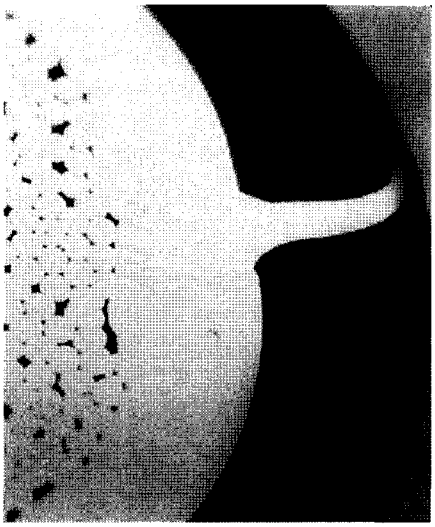

Fig. 6. Deformed shape of joint in the experiment when joint is compacted from void volume fraction 45% to 15%

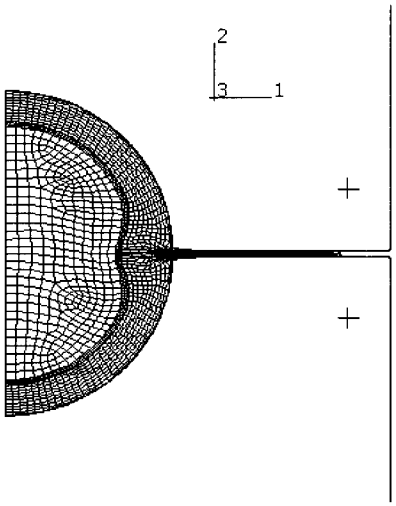

Fig. 5. Deformed shape of joint, which was simulated by ABAQUS when joint is compacted from void volume fraction 45% to 30%

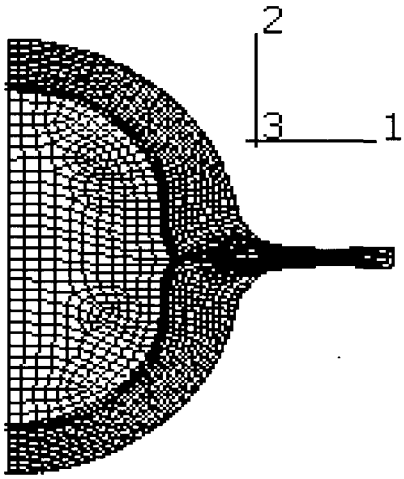

Fig. 7. Deformed shape of joint, which was simulated by ABAQUS when joint is compacted from void volume fraction 45% to 15%

Table 2. Comparison of void volume fraction when joint is compacted from void volume fraction 45% to 30%

nominal	실제	해석
30%	28%	29%

Table 3. Comparison of void volume fraction when joint is compacted from void volume fraction 45% to 30%

nominal	실제	해석
15%	13%	14%

4.2 공극부피분율 45%에서 15%로의 압축

Fig. 6과 Fig. 7은 실제 압축 및 시뮬레이션에서의 변형형상을 나타낸 것이다. 앞의 경우와 마찬가지로 비교적 잘 일치하고 있다. 압축을 하고 난 뒤 슬리브의 두께는 2.9mm로 압축 전과 비교하여 0.3mm가 증가하였다.

슬리브의 변형양상을 보면 슬리브의 두께 증가 보다는 슬리브 중간부에서의 변형이 두드러짐을 알 수 있다. 이는 슬리브 내부의 케이블이 슬리브에 가하는 힘이 커짐에 따라 발생한 것으로 생각된다. 또한 앞의 경우와는 달리 좌굴(buckling)현상이 압축과정에서 발생하였으며 이는 해석에서도 확인할 수 있었다.

슬리브의 변형량이 증가함에 따라 내부의 소선에서 부분적인 변형이 관찰되었다. 소선의 변형은 통전전류 및 공극부피분율을 감소시킬 수 있으므로 여기에 대한 연구가 필요하다.

Table 3은 초기에 예상한 공극부피분율을 실제 실험결과 및 해석 결과와 비교한 것이다.

4.3 압축지그의 곡률반경의 변화

슬리브의 불균일변형을 최소화할 수 있는 변수로서 압축지그의 곡률반경(radius of curvature)을 변화시켰다. 압축지그의 곡률반경을 0.2mm, 0.5mm, 1.0mm, 2.5mm 그리고 3.0mm로 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 곡률반경 0.5mm와 2.5mm에 대한 슬리브의 변형형상을 Fig. 8, 9에 나타내었다.

Fig. 8, 9에서 보듯이 압축지그의 곡률반경이 증가함에 따라 케이블의 불균일 변형이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 곡률반경의 증가에 따라 압축지그와 슬리브사이의 공간이 늘어났기 때문인 것으로 생각된다. 즉 슬리브 외부쪽으로의 변형이 증가하여 상대적으로 내부쪽으로의 변형을 감소시켰다.

Fig. 10는 각 곡률반경에 따른 x방향 변위량을 정리한 것이다.

따라서 압축지그의 곡률반경을 증가시킴으로써 공극부피분율의 감소를 최소화할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

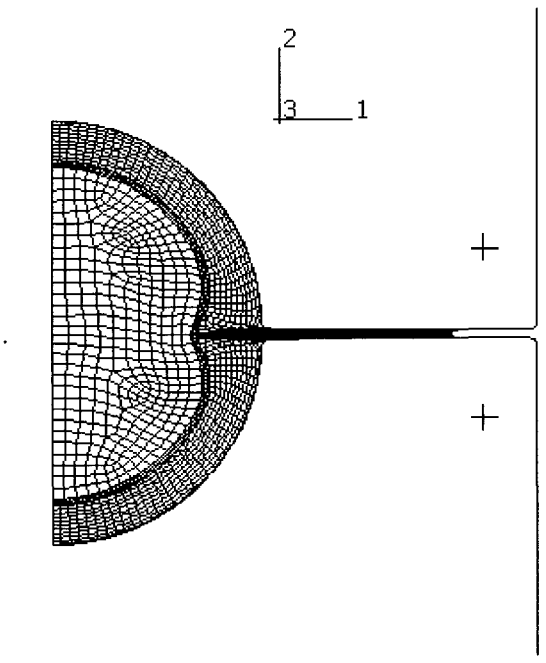

Fig. 8. Deformed shape of cables when radius of curvature was 0.5mm, which was simulated by ABAQUS

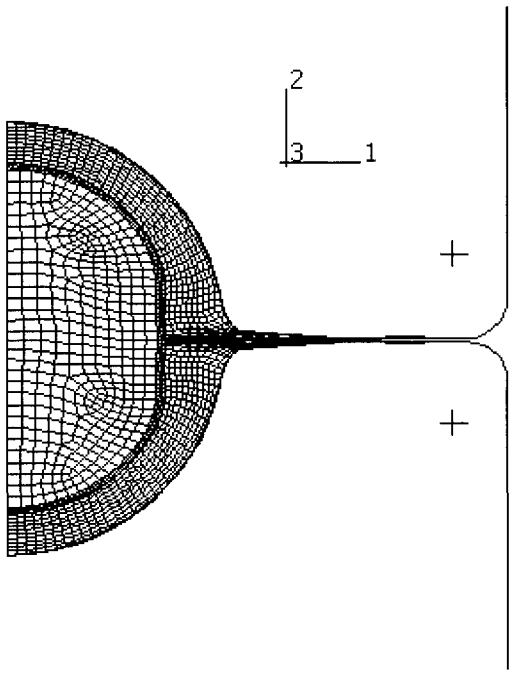

Fig. 9. Deformed shape of cables when radius of curvature was 2.5mm, which was simulated by ABAQUS

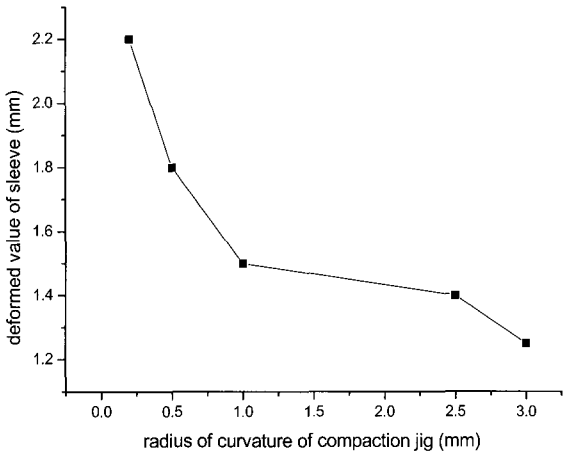

Fig. 10. Deformed value of cables with change of radius of curvature, which was simulated by ABAQUS

5. 결 론

맞대기(butt)접합부의 슬리브를 일축압축하는 과정에서 케이블의 불균일 변형이 발생하였다. 그 결과 슬리브 내부에 위치하는 케이블의 공극부피분율이 감소하게 된다. 이를 ABAQUS 코드를 사용하여 각 압축과정에서 발생하는 케이블의 불균일변형을 해석하였다. 해석 결과 압축지그의 곡률반경의 증가가 케이블의 불균일변형을 최소화할 수 있는 가장 효과적인 변수임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 KSTAR 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Yoshihito, et al., "Development of 46kA layer to layer joint for ITER-CS model coil"

[2] C.Y. Gung, et al., "Design and Manufacture of the US-ITER Pre Protype Joint Sample" IEEE Transactions on applied superconductivity, vol.7, No. 2, June, 1997

[3] K. Okuno, et al., "Development of 46-kA Nb_3Sn Conductor Joint for ITER Model Coils" IEEE Transactions on applied superconductivity, vol.10, No. 1, March, 2000

[4] P. Bruzzone, et al., "Design and R&D results of the Joints for the ITER Conductor" IEEE Transactions on applied superconductivity, Vol.7, No. 2, June, 1997

[5] Chakrabarty, "Theory of plasticity , second Edition", McGraw Hill, 145-154,

[6] HKS, "ABAQUS User's Manual"