

Optimization of extrusion process for long-length multi-filaments of BSCCO 2223 superconductor tape

고온초전도 BSCCO 2223 장선재 제조를 위한
압출공정의 최적화

Ki-Hyun Cho, Jongung Choi*, Jaimoo Yoo, Jae-Woong Ko, Hai-doo Kim

조기현, 최종웅*, 유재무, 고재웅, 김해두

66, sangnam-dong, changwon, Kyungnam-do Korea 641-010, Ceramic Materials Group,
Korea Institute of Machinery and Materials,

* Institute for Metal Forming Aachen University, Intzestr. 10, D-52056 Aachen, Germany.

경남 창원시 상남동 66, 한국기계연구원, 요업재료그룹
* 소성가공 연구소, 아헨공대, 독일

The extrusion process for long-length multi-filaments of BSCCO 2223 superconductor tape has been investigated with aids of Finite Element Method and experimental inspection. Since the arrangement of filaments in matrix material has characteristic of rotational symmetry, a 2-dimensional commercial FEM package, DEFORM-2D, was adopted to simulate extrusion process with different variables such as hardness of sheath material, lengths of each filament and arrangement. From the FEM analysis, since the inner filaments move faster than the outer one, distribution of filaments is needed to be optimized. In the case of pure Ag matrix, undesirable non-uniform distribution of filament was obtained due to low hardness of sheath material. Dummy sample (brass (sheath) and talc powder (filament)), however, which has relatively high hardness of sheath material, had been produced with desirable results. Therefore, it is necessary to optimize hardness of sheath material, extrusion temperature and billet design.

1. 서론

고온 초전도 선재제조 방법중에 하나인 PIT (powder in tube) 공정을 이용하여 장선재화가 용이한 Bi계 고온 초전도 선재제조에 대한 많은 연구와 성과가 보고되고 있다[1-2]. 그러나 1km급 이상 제조시 제조원가의 고비용과 제조과정상의 복잡성 등이 초전도 선재제조의 상용

화에 많은 장애요인이 되고있다. 이를 개선하기 위해 Ag를 대체할 수 있는 Ag-Mg, Ag-Au-Mg, Ag-Mn/Ni 등 다양한 합금의 개발과 제조공정의 단순화를 통한 저 비용화가 요망된다. 다심선재를 제조하기 위해서는 은피복을 사용한 PIT법을 수차례 인발과정을 거쳐 적당한 길이로 절단한다. 그런 다음 원하는 필라멘트 수만큼 삽입한 후 다시 여러번의 인발공정과 압연 그리

고 열처리 과정을 거쳐야 하기 때문에 제조시간이 길고, 또한 장선화를 위해선 장비가 대형화되어야 하므로 대량생산에 문제점이 있다.

본 연구에서는 제조시간을 단축하기 위하여 수차례 인발공정을 생략할 수 있고, 인발된 선재들을 다시 튜브안에 적층시키는 공정들을 생략할 수 있는 압출공정을 도입하여 초전도 선재를 제조하고자 하였다. 고온 초전도 BSCCO 2223 장선재 제조를 위하여 압출 및 인발공정에 의해 성형할 경우 결함없이 성형가능한 빌렛설계를 위해 압출공정을 유한요소법과 실험을 통하여 조사하였다. 압출 후 필라멘트 배열과 변형된 모양을 관찰하기 위해 피복재의 강도와 필라멘트의 배열, 길이 등의 변화를 주며 모사실험을 하였다. 모사실험의 결과를 바탕으로 Brass/Talc 빌렛과 Ag/BSCCO 2223 빌렛을 각각 제작하여 압출실험을 수행하였다.

2. 실험

2-1. 소재 물성 실험

해석에 필요한 피복재 (Sheath) 와 심재 (Filament) 의 기계적 물성치는 단순 압축시험을 통하여 구하였다. 실험에 사용한 피복재의 소재는 Pure Ag, Ag-0.1atm%Mg, Ag-0.2 atm%Mg, Ag-0.5atm%Mg 등 4가지 종류이다. 압축시험을 위한 소재는 직경 6.0 mm, 길이 6.0 mm 인 원통형 형상이며, 최대 50%까지 압축하였다(Fig. 1). 압축시험에서 구한 하중-변위 선도로부터 소재의 응력-변형률 선도를 구하고 이를 이용하여 유동응력식을 계산하였다. 각 소재에 대한 유동응력식의 K 및 n 값은 Table 1과 같다. Table 1의 K와 n을 이용하여 응력-변형률 선도를 Fig. 2에 나타내었다. Pure-Ag의 경우 초기 항복응력은 낮으나 변형의 진행에 따라 극심한 가공경화 현상을 보인다. 또한, Mg의 함유량이 증가할수록 K값이 증가하는 것을 볼 수 있어 초기항복응력은 증가하지만

일정크기의 변형률 이상에서는 오히려 반대로 가공경화 지수 n이 작아 Mg의 증가에 따라 후속항복응력의 크기가 감소함을 볼 수 있다.

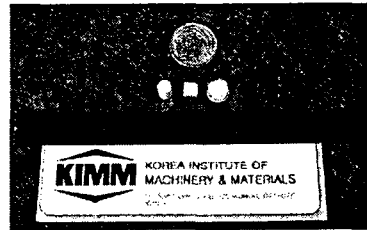


Fig. 1 The specimen of compression test.

Table 1 K and n values for Ag-alloys.

소재	K [MPa]	N
Pure Ag	334.27	0.5530
Ag-0.1atm% Mg	345.75	0.4420
Ag-0.2atm% Mg	347.31	0.3938
Ag-0.5atm% Mg	439.67	0.2557

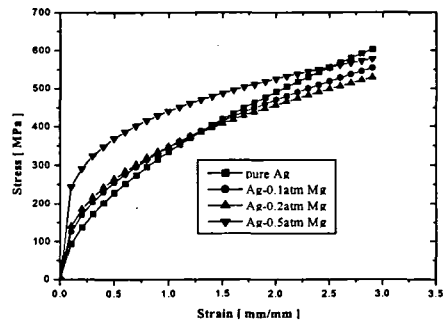


Fig. 2 Stress - true strain curve for different Ag-alloy billets

2-2. 압출용 빌렛 제작 및 압출 실험

본 실험에서 성형하고자 하는 초전도 장선재는 초기 직경에 대한 최종직경의 변형률 값을 구하면 약 1.09이다. 이 경우 Fig. 2에서와 같이 초기 항복응력의 크기가 전체 응력의 크기를

결정하므로 초기항복응력의 크기가 낮고, 선행 연구결과[3]에 기초하여 심재인 분말의 정도에 대한 피복재의 정도의 비가 크지 않은 Brass (Hv:105, 직경 75mm, 높이 85mm)와 선재제조에 많이 쓰이고있는 순수 Ag(Hv:30, 직경 75mm, 높이 130mm)를 피복재로 선정하였다. 초전도 분말재를 포함하고 있는 Ag빌렛은 압출시 단면적이 감소함에 따라 분말재가 압축되어 분말의 상대밀도를 증가시키게 되어 경도가 증가하고 증가된 분말재의 정도는 피복재인 Ag소재에 영향을 준다.

본 실험에서는 압출빌렛 전체 단면적에 대한 심재 단면적의 비율인 충전률(Fill factor)을 약 40%로 하기 위해 정육각형의 배열을 선정하였다. 육각형의 정점(Apex)에 위치한 분말 원주의 외각에서 빌렛의 외경사이의 간격이 압출성형시 발생하는 높은 압축압력에 의해 초전도 분말재의 터짐에 관계되므로 이를 방지하기 위해 충분한 간격을 두었고, 각각의 간격은 압출시 분말간의 혼합과 같은 결함을 방지할 수 있도록 설계하였다(Fig 3). 또한, 압출의 초기에 빌렛의 유동을 원활히 하기 위해 소재의 끝에 모따기를 하였다. 압출실험에 사용된 프레스는 550ton 용량의 유압 프레스이며 Fig. 4에 외관사진을 나타내었다.

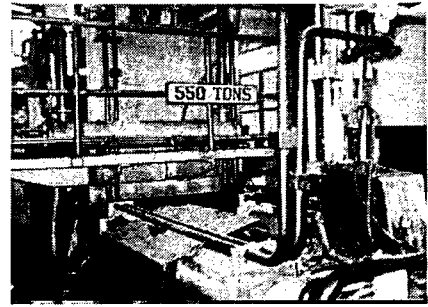


Fig. 4 Extrusion machine of 550-tonnage.

3. 결 과

3-1. 압 출 해 석

해석에 사용된 유한요소 프로그램은 강-소성 유한요소 상용 코드인 DEFORM-2D를 사용하였다. 실제 피복재와 심재로 구성된 초전도체를 해석하기 위해서는 3차원 해석을 수행하여야 하지만, 해석의 시간적인 면에서 또한 피복재내에 배열된 Filament의 Rotational Symmetry 특성에 의해 2차원 해석을 수행하였다. Filament의 형상이 압출 성형에서 제품의 품질에 미치는 영향을 평가하기 위해 Filament의 선단형상을 여러 가지로 변화시켰다.

심재 분말의 선단 형상을 압출방향에 수직인 형상으로 하였을 경우 소재의 격자구조를 Fig. 5 a)에 나타내었다. Fig. 5 b)에는 Fig. 5 a)와 같은 심재의 형상을 이용하여 압출하였을 경우 압출 후 심재의 피복재의 형상을 나타내었다. 심재의 선단에 그림과 같이 초기 crack이 발생 성장하는 것을 볼 수 있다. 이러한 crack은 압출이 더 진행될 경우 인접한 심재까지 전파되어 심재인 분말이 서로 혼합되는 결과를 초래하게 된다.

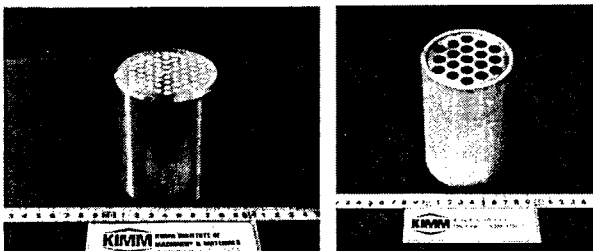
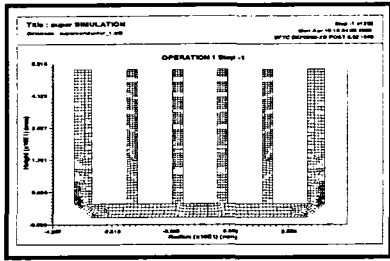
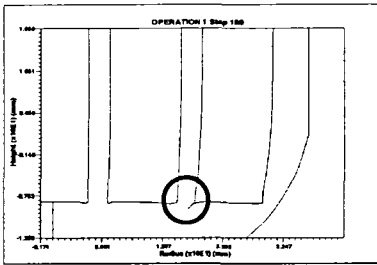


Fig. 3 The billet for extrusion experiments

- a) Brass/Talc(직경75mm,높이85mm)
- b) PureAg/BSCCO2223(직경75mm,높이130mm)



a) initial state.



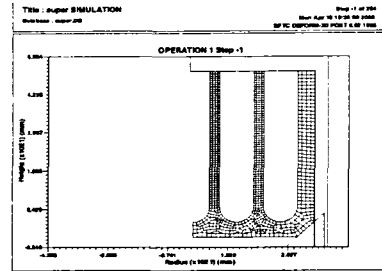
b) final state.

Fig. 5 Mesh system of billet a)with 0 corner radius at the end of powder, and b) Crack initiation at the end of powder filament after extrusion.

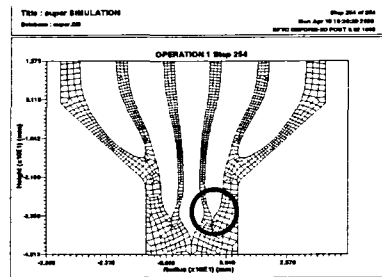
심재 선단의 crack발생을 방지하기 위하여 심재의 선단형상을 Fig. 6 a)와 같이 심재의 직경과 동일한 직경의 원호형상으로 하여 해석을 수행한 결과 Fig. 6 b)와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 심재의 선단이 원호형상인 경우 직각인 형상과 마찬가지로 압출된 심재의 끝단에 crack이 관찰되지만 이 경우는 직각인 경우와 달리 crack의 방향이 압출방향과 평행하게 형성되어 있어 압출이 진행되어도 인접 분말과 혼합되는 현상을 방지할 수 있을 것이라 예측된다.

일반적인 압출공정에서 금형 벽면의 마찰에 의한 저항으로 인해 소재 중심부가 외각보다 먼저 압출[4]되어 압출된 제품의 선단은 반구형의 형태를 갖는다. 내부에 심재가 삽입된 초전도 선재의 압출에서는 이러한 속도차에 의한 압출품 선단에서의 심재의 위치 차이는 외부 심재의 미압출의 원인이 될 수 있으므로 되도록 심재가 선단에서 동일한 속도로 압출

되는 것이 바람직하다.



a) initial state.

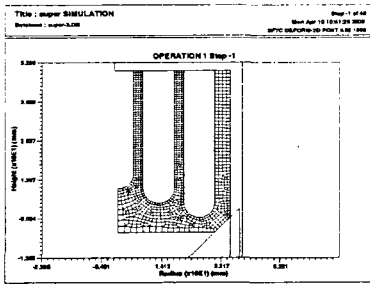


b) final state.

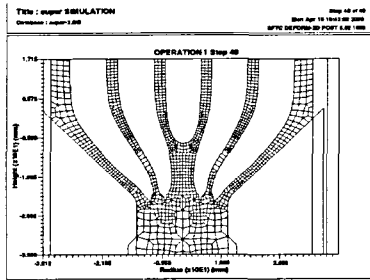
Fig. 6 Mesh system of billet a)with rounded at the end powder, and b) final state after extrusion

Fig. 7 a)에서는 끝이 원호형태로 가공된 심재를 이용하여 중심부, 중앙부 및 외부 심재의 길이차이를 각각 5mm씩 두어 심재의 끝이 동일한 순간에 금형을 빠져 나오도록 하였다. Fig. 7 b)는 심재의 길이차이가 5mm인 경우의 금형을 빠져나가는 양상을 나타낸 것이다. 중심부 심재를 제외하고 중앙부 및 외부 심재는 거의 동일한 순간에 금형을 빠져 나오는 것을 볼 수 있으며, 중앙부 및 외부 심재가 혼합되지 않고 압출되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7의 b)결과에서 중앙부 심재와 표면부 심재의 길이차이를 두는 것이 압출시 내부 결함 및 압출 후 초전도 분말인 심재가 동일한 길이로 성형하는데 유리함을 알 수 있었다. 그러나, 이 경우 중앙부 심재가 늦게 압출되는 결함이 발생한다.



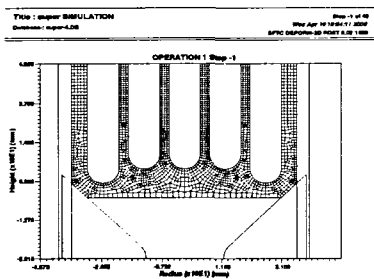
a) initial state.



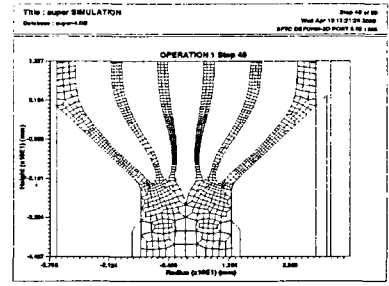
b) final state.

Fig. 7. Mesh system of a) initial state for modified stepped powder filament, and b) final state after extrusion.

Fig. 8에는 중심부 심재와 중앙부 심재의 길이차이를 없애고 표면부 심재만 5 mm 정도 길게 가공한 경우 압출결과를 나타내었다. 외부 심재와 중심부 및 중앙부 심재가 거의 동일한 순간에 압출 금형을 통과하고 있으며 filament 선단에서의 crack도 관찰되지 않고 있다. 따라서 내부에 이종(異種)의 심재를 여러 개 포함하는 이종재(bi-material) 압출의 경우 filament의



a) initial state.



b) final state.

Fig. 8 Mesh system of a) initial state for modified stepped powder filament, and b) final state after extrusion.

위치에 따라 압출속도가 다르므로 원관형상의 심재의 길이차이를 둠으로써 더 양호한 형상의 제품을 얻을 수 있을 것이다[5-6].

3-2. 압출 결과

Fig. 9는 Brass와 순수 Ag빌렛의 압출된 제품에 대한 내부 사진이다. Brass의 경우 내부심재가 규칙적으로 배열되어 있는 것을 볼 수 있었으나, 피복재의 경도 및 강도가 상대적으로 훨씬 낮은 Ag의 경우 내부의 심재가 서로 혼합되어 있고 또한 압출방향에 대하여 균일하지 않음을 관찰할 수 있었다.

Brass/Talc와 Ag/BSCCO 2223의 경우 제품의 외관은 양호하나 내부의 경우 Ag/BSCCO 2223인 경우가 완전히 성형되지 않았다. 이것은 Brass/Talc의 경우보다 Ag/BSCCO 2223의 경우가 심재와 피복재의 유동성 및 경도차가 크기 때문이라 생각된다. 이상에서와 같이 심재와 피복재의 경도 및 유동성 차이를 감소시킬 수 있는 피복재 합금을 개발하면 더 양호한 제품을 얻을 수 있을 것이다.

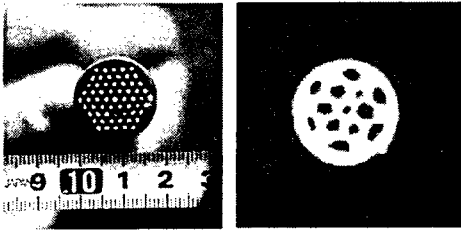


Fig. 9 The photographs of extruded
 a) Brass/Talc(직경:18mm)
 b) Ag/BSCCO 2223(직경:25mm)

4. 결 론

초전도 장선재를 km급 이상 길이로 대량제조하기 위하여 압출에 의한 성형에 대하여 해석 및 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 내부에 분말심재를 삽입하여 압출할 경우 분말재의 선단형상은 직각이 아닌 원호형상이 내부 결함의 발생을 억제할 수 있다.
2. 심재의 위치에 따라 압출속도의 차이로 인하여 심재의 길이차이를 두는 것이 더 양호한 형상의 제품을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
3. 심재와 피복재의 경도차가 적을수록 더 양호한 제품이 성형 가능하다.

4. 압출용 빌렛 매트리스 재료인 순수 Ag경우 경도 및 강도 등 기계적 특성이 낮아 압출에 의한 선재제조용 빌렛으로 적합하지 않으며, 미량의 Mg가 첨가된 Ag합금을 빌렛으로 사용하는 것이 효과적일 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Luciano Martini, Supercond. Sci. Technol. 11, 231- 237, (1998).
- [2] R. zeng, T. P. Beales, H. K. Liu and S. X. Dou, Supercond. Sci. Technol. 11, 299-303, (1998).
- [3] J. M. Yoo, H. S. Chung, J. W. Ko, H. D. Kim, Advances in Supercond., VIII Vol. 2, p835 (1996)
- [4] George E. Dieter, "Mechanical Metallurgy" 3'rd Edition
- [5] J. M. Story, B. Avitzur, W. C. Hahn, Jr. The American Society of Mechanical Engineers, August (1976).
- [6] S. M. Byun, S. M. Hwang, J. of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, 143-150(1997)