

일방향 탄소나노섬유 강화 Cu 기지 나노복합재료용 중간재 제조에 관한 연구

백영민*·이상관*·엄문광*

The study on the manufacturing intermediary materials for the carbon nanofiber reinforced Cu matrix nanocomposite

Y.M. Baik, S.K. Lee, M.K. Um

Abstract

Cu have been widely used as signal transmission materials for electrical electronic components owing to its high electrical conductivity. However, it's size have been limited to small ones due to its poor mechanical properties. Until now, strengthening of the copper alloy was obtained either by the solid solution and precipitation hardening by adding alloy elements or the work hardening by deformation process. Adding the alloy elements lead to reduction of electrical conductivity. In this aspect, if carbon nanofiber is used as reinforcement which have outstanding mechanical strength and electric conductivity, it is possible to develop Cu matrix nanocomposite having almost no loss of electric conductivity. It is expected to be innovative in electric conducting material market. The unidirectional alignment of carbon nanofiber is the most challenging task developing the copper matrix composites of high strength and electric conductivity.

In this study, the unidirectional alignment of carbon nanofibers which is used reinforced material are controlled by drawing process in order to manufacture the intermediary materials for the carbon nanofiber reinforced Cu matrix nanocomposite and align mechanism as well as optimized drawing process parameters are verified via experiments and numerical analysis. The materials used in this study were pure copper and the nanofibers of 150nm in diameter and of 10-20 μ m in length. The materials have been tested and the tensile strength was 75MPa with the elongation of 44% for the copper. it is assumed that carbon nanofiber behave like porous elasto-plastic materials. Compaction test was conducted to obtain constitutive properties of carbon nanofiber. Optimal parameter for drawing process was obtained by experiments and numerical analysis considering the various drawing angles, reduction areas, friction coefficient, etc. Lower reduction areas provides the less rupture of cu tube is noticed during the drawing process. Optimal die angle was between 5 degree and 12 degree. Relative density of carbon nanofiber embedded in the copper tube is higher as drawing diameter decrease and compressive residual stress is occurred in the copper tube. Carbon nanofibers are moved to the reverse drawing direction via shear force caused by deformation of the copper tube and alined to the drawing direction.

Key Words: carbon nanofiber, Cu, copper tube, drawing, die angle, reduction area, friction coefficient, intermediary materials, residual stress, yield stress, elongation

1. 서론

* 한국기계연구원

나노 복합재료는 탄소나노섬유, 탄소나노튜브, SiC 등의 나노 입자를 강화재로 사용하는 복합재료를 말한다. 이러한 나노 강화재는 기존 복합재료에 사용

하는 강화재보다 기계적, 열적, 전기적 특성 등이 월등히 우수하기 때문에 다양한 기능을 구현할 수 있는 새로운 재료로서 주목을 받고 있다. 기지 금속인 Cu는 높은 전기 전도도로 인하여 기존의 전기 전자부품에 있어서 신호전달용 소재로 널리 사용되고 있지만, 소재 자체의 열악한 기계적 물성이 소자 및 부품의 소형화에 걸림돌로 작용하고 있다. 지금까지 동합금 소재의 고강도화는 합금원소 첨가에 의한 고용 및 석출경화와 소성가공에 의한 가공경화에 의존하고 있는데, 합금원소의 첨가는 필연적으로 전기 전도도의 감소를 야기한다. 이러한 측면에서, 기계적 강도와 전기전도도가 우수한 탄소나노섬유[1]를 활용하면 전기 전도도의 손실이 거의 없는 신소재인 Cu 기지 나노복합재료의 개발이 가능하며, 도전성 소재분야의 혁신을 유발하게 될 것으로 기대된다. 나노복합재료를 개발하기 위해서는 탄소나노섬유의 배열이 기술적으로 가장 중요한 관건이라고 할 수 있다. 현재까지 탄소나노튜브의 분산 및 배열 기술에 대해서 몇몇 연구자들[2]에 의해서 보고된 바가 있지만 탄소나노섬유의 분산 및 배열기술에 관한 연구는 전무한 실정이다. 특히 인발공정을 이용하여 탄소나노섬유를 배열한 사례는 현재까지는 없으며, 유사한 연구로써 초전도체 와이어 제조 기술과 관련된 연구[3]가 수행된 적이 있기는 하나 나노섬유의 특성상 초전도 분말과는 재료의 거동이 판이하게 다르므로 추후에 많은 연구자들에 의해서 많은 연구들이 진행되어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 탄소나노섬유의 일방향 배열기술을 확보하고 인발공정을 활용하여 나노 금속복합체 제조용 중간재를 제조하기 위해서 인발실험과 유한요소 해석을 통해서 최적의 공정변수를 확보함으로써 일방향 배열된 탄소나노섬유가 장입된 Cu 미세관 제조기술에 관한 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 실험 방법

나노 강화재로는 일본 Showa Denko 사의 vapor grown carbon nanofiber(직경: 150nm, 길이:10-20nm)를 이용하였으며, 기지 금속으로는 순동을 사용하였다. 나노섬유를 초기외경이 8mm이고 튜브 두께가 0.6mm, 0.9mm, 1.25mm인 3가지 Cu 튜브에 장입하여 인발용 시편을 제작하였다. Fig. 1은 나노섬유가 장입된 Cu 튜브의 인발공정 개략도를 나타낸 것이다.

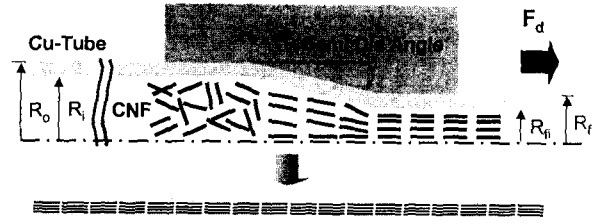


Fig. 1 Schematic outline of the drawing process.

다단 패스(multi-pass) 인발 실험은 3가지 두께 조건에 대해서 출구쪽 바깥 외경($D_f=2R_f$)이 7.8mm에서 1.26mm까지 연속과정으로 수행되었다. 다이반각에 따른 인발거동을 알아보기 위해서 $D_f=3.5mm$ 일 때 4가지 다이반각($\alpha=3.4^\circ, 5.2^\circ, 10.2^\circ, 20.1^\circ$)에 대해서 단일 패스 인발을 수행하였다. 또한 단면감소율의 영향을 알아보기 위해서 $D_f=3.5mm$ 에서 3가지 단면감소율(5.48%, 15.17%, 23.44%)에 대해서 단일 패스 인발을 수행하였다. 인발속도는 1.6m/min이었으며 인발실험 중에 인발력과 연신율을 측정하였다. 실험 후에 시편을 절단하여 연마한 후에 SEM을 이용하여 단면에 대해서 두께를 측정하였다. 또한 다음 식들을 이용하여 인발응력과 단면감소율을 계산하였다.

$$\sigma_d = \frac{F_d}{\pi(R_f^2 - R_r^2)} \quad (1)$$

$$R_A(\%) = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100 \quad (2)$$

여기서 F_d =인발력, σ_d =인발응력, R_A =단면감소율, A_0 =인발 전 튜브 외경으로 계산된 면적, A_f =인발 후 튜브 외경으로 계산된 면적이다.

유한요소해석에 적용될 소재의 구성물성 실험을 수행하였다. Cu 튜브는 탄-소성을 하는 등방성 재료로 가정하였으며 인장물성을 위해서 일축 인장시험을 수행하였다. 탄소나노섬유는 다공질 탄성-소성 재료로 가정하였으며 해석에 사용된 구성식은 Drucker-Prager 모델이었다. 또한 1축 압축시험을 수행하여 나노섬유의 물성데이터를 확보하였다.

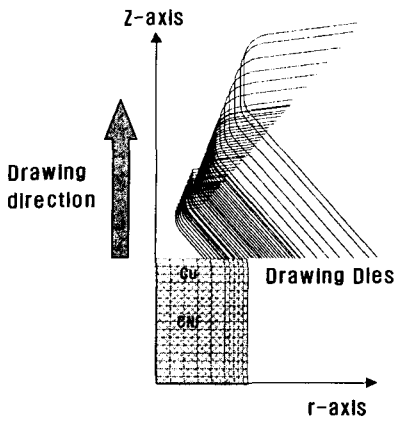


Fig.2 FEM model of the multi-pass process

Fig. 2는 해석에 사용된 모델을 나타낸다. Cu 튜브 안에 탄소나노섬유가 장입되고 양쪽 끝단은 Cu로 막혀있는 형상으로 요소는 160개, 절점은 187개 이었으며, 다이 수는 41개 이었다. 해석은 상용 패키지 ABAQUS 6.2를 이용하여 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 인발실험

Cu 튜브 소성변형 해석에 적용될 물성을 얻기 위해 인장실험을 수행하여 인장물성을 확보하였다. 항복강도(σ_0)와 인장강도는 각각 75MPa과 203MPa이었으며, 연신율은 44%이었다. Fig. 3은 다만 인발에서 사상 선경(d_0)에 따른 상대 인발응력의 변화를 3가지 두께에 대해서 나타낸 것이다. 사상 경이 줄어들수록 인발응력이 증가함을 알 수 있다. 인발응력은 인발의 초기에는 Cu의 유동응력보다 작다가 이후부터는 σ_0 보다 큰 경향을 보임을 알 수 있다. Fig. 4는 사상선경이 3.5mm이고 초기 Cu 튜브의 두께가 1.25mm일 때의 단면감소율에 따른 인발력의 변화를 3가지 다이 반각에 대해서 그린 것이다. 단면감소율이 감소함에 따라 인발력이 줄어들음을 알 수 있다. 그림에서 다이 반각이 5.2도일 때 단면감소율이 15% 부근에서 인발력이 급격히 증가하는 하는 것은 Fig. 5에서 알 수 있다. Fig. 5는 사상선경이 3.5mm이고 초기 Cu 튜브의 두께가 1.25mm일 때의 단면감소율에 따른 인발력의 변화를 3가지 다이 반각에 대해서 그린 것이다. 동일한 다이 반각에 대해서 두께가 증가할 수록 인발력이 증가함

을 알 수 있으며 각각의 두께에 대해서 다이 반각이 포물선 형태로 최소값이 존재함을 알 수 있다. 즉 최적의 다이 반각이 존재하며 5도에서 12도 사이의 값을 보임을 알 수 있다.

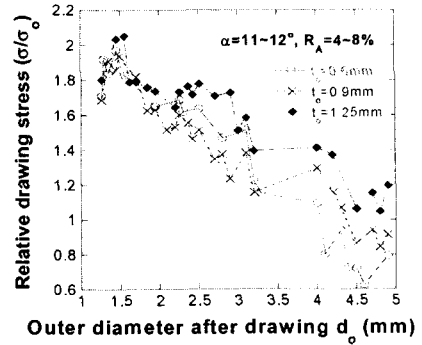


Fig.3 Relative drawing stress with outer diameter after multi-pass drawing step.

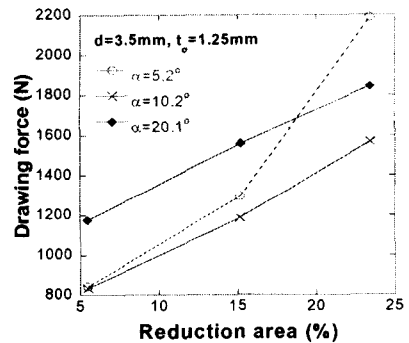


Fig.4 Drawing force with reduction area after single-pass drawing step.

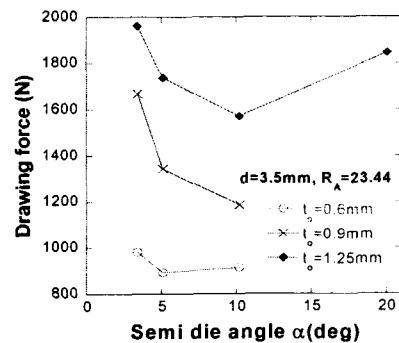


Fig.5 Drawing force with semi die angle after single-pass drawing step.

single-pass drawing step.

3.2 유한요소해석

Fig. 6은 다이 사상 선경이 7.2mm에서의 해석결과를 응력, 소성변형을, 상대밀도에 대해서 나타낸 것이다. 인발의 페이스수가 증가함에 따라 튜브변형에 의해서 탄소섬유가 압축되며 이에따라 상대밀도가 증가한다. 인발방향으로의 튜브 변형에 기인한 튜브내벽에서의 전단력에 의해서 튜브의 선단에서 후미쪽으로 섬유의 이동이 생기며 섬유의 배열이 인발방향으로 배열된다. 또한 튜브의 소성변형과 내부에서의 탄소섬유에 작용하는 압축응력으로 인해 튜브에 잔류응력이 발생하게 된다.

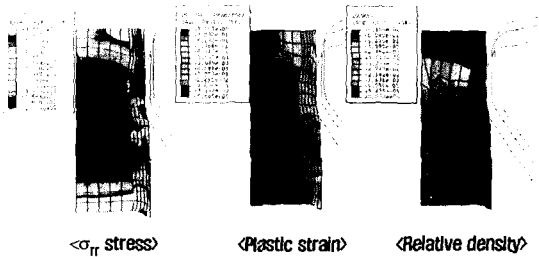


Fig.6 Distribution of Radial stress, plastic strain and relative density in Cu tube during drawing process.

3.3 나노복합재용 중간재 제조

Fig. 7은 인발공정을 통해서 제조된 나노복합재용 중간재로써 탄소나노섬유가 장입된 Cu 미세 튜브(외경: 0.5mm, 내경: 0.22~0.26mm)를 나타낸다.

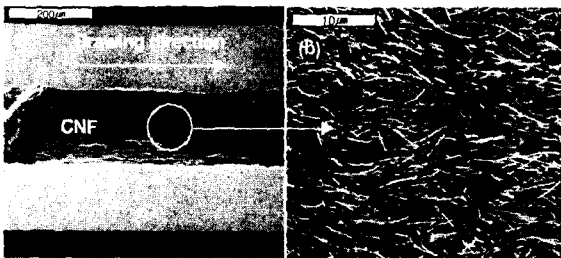


Fig.7 SEM photographs of the unidirectional aligned carbon nanofiber in the Cu tube.

그림에서 인발방향으로 탄소나노섬유들이 일방향으로 균일하게 배열되어있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 인발공정을 이용하여 일방향으로 배열된 탄소나노섬유가 장입된 나노복합재료용 중간재를 제조하기 위한 연구를 수행하였으며 결론은 다음과 같다. 첫째, 단면감소율이 작을수록 인발력이 줄어들며 최적의 다이반각은 5도에서 12도 사이임을 확인하였다. 둘째, 인발이 진행됨에 따라 튜브내의 탄소나노섬유의 상대밀도는 증가하고 Cu 튜브에는 압축 잔류응력이 발생한다. 셋째, Cu 튜브의 변형으로 인한 전단력에 의해서 튜브내의 탄소나노섬유의 재배열이 발생하여 인발방향으로 일방향 배열이 잘 이루어 줌을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 과학기술부가 지원하는 나노소재기술개발사업단의 연구비를 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) M. Endo, Y.A. Kim, et al, "Vapor-grown carbon fibers : Basic Properties and Their Battery Applications," Carbon, Vol.39, 2001, pp 1287-1297.
- (2) P. Poulin, B. Vigolo and P. Launis, "Films and fibers of oriented single wall nanotubes," Carbon, Vol.40, 2002, pp. 1741-1749.
- (3) R. Shah, S. Tangrila, S. Racchakonda, and M. Thirukkonda, "Finite element modeling of the powder-in-tube process for manufacture of BSCCO-2212 superconducting wires," J. Electronic Matr., Vol. 24, No.12, 1995, pp. 1781-1787.