

동피복 강 선재 인발 공정의 유한요소해석

김현수¹, 김병민[#], 조형호², 조훈²

Finite Element Analysis of Copper Clad Steel Wire Drawing Process

H. S. Kim, B. M. Kim, H. H. Jo, H. Jo

(Received September, 22, 2004)

Abstract

The objective of this study is to develop an optimal drawing die for the clad wire drawing process. Cu-clad wire, which has the advantages of the high strength of a steel core and the electro-conductivity, corrosion resistance of a copper layer, is widely being used in the field of the telecommunications, electric-electronic and military technology industries. It is important to obtain uniformly coated rate when producing clad wires. Drawing process of clad wire will be influenced on damage and coated rate of core and sleeve for process variables such as semi-die angle and reduction in area. Therefore, in this study, the finite-element result obtained in this study was analyzed to the effect of the various forming parameters, which included the semi-die angle and reduction in area. The coated rate will be predicted with observation of copper coated rate variation according to total reduction in area and the optimal pass schedule will be set up through proper reduction in area and semi-die angle variation.

Key Words: Clad Wire, Coated Rate, Work Hardening, Steel, Core, Copper, Sleeve, FEM

1. 서론

클래드선재는 서로 다른 소재가 결합된 바이메탈(bi-metal)구조로서 일반선재의 제조에 비해 어려운 점이 많이 존재하고 있다. 서로 다른 소재의 특성을 지니고 있으므로 두 소재의 특성을 같이 포함 시키기 위해 여러 종류의 복합선재가 제조되어지고 있다. 여러 복합 선재 중, 심재(core)는 강, 피복재(sleeve)는 동으로 구성된 동피복 강 선재는 심재와 피복재의 특성들을 상호 보완함으로써, 단일 동선과 강선에서는 불가능한 특성을 발휘하고 있다. 이러한 클래드선재는 전도성, 고강성, 경량성, 내식성, 합금성, 열팽창 등의 특성을

지니고 있어 송전선, 통신선, 전자부품의 리드선, 초전도 마크네티용 선재 등 전기 전자 분야에 많이 사용되어지고 있다. 다양한 용도로 사용되어지는 복합선재는 용도에 적합하게 다양한 피복율(coated rate)을 가져야 한다. 뿐만 아니라 피복율이 일정하게 되어야 하며, 생산성을 고려한 제조 공정을 설계하여야 한다[1~4].

본 연구의 목표는 동피복 강 선재의 인발 공정 시 인발 공정 변수들의 영향을 파악하여, 적절하지 못한 공정 조건으로 발생하는 각종 인발 결함을 억제하는 것이다. 또한, 동 피복율에 따른 적절한 다이스 패스를 설계함으로써 각종 결함이 없고 일정한 동 피복율을 가지는 동피복 강 선재

1. 부산대학교 정밀기계공학과
2. 한국생산기술연구원 나노소재연구팀
교신저자: 부산대학교 정밀정형및금형가공연구소
E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

의 인발 및 생산성 향상에 기여하는데 있다. 따라서 본 연구에서는 강소성 유한 요소 해석을 이용하여 동피복 강 선재의 결합에 영향을 미치는 심재와 피복재 손상(damage)의 최소화와 일정한 동 피복율을 확보하기 위한 두 가지 요건에 대하여, 다이 반각과 단면감소율 등의 인발 공정 변수를 변화시켜 가면서 두 가지 조건을 만족하는 적절한 인발 공정 조건과 이를 기준으로 설정한 패스 스케줄을 제안하였다.

2. 유한요소해석 모델 및 조건

2.1 재료의 기계적 성질

동피복 강 선재의 인발공정 해석을 수행하기 위해서, 소재로 사용되어진 심재(AISI 1010)와 피복재(OFHC)의 유동응력식은 인장실험으로 구하였으며, 심재와 피복재의 사이의 마찰거동은 연주재이므로 완전접촉으로 설정하였다. 다이와 소재의 마찰상수를 직접 측정하는 것은 현실적으로 매우 어려우므로 일반적인 건식인발공정에 사용되는 마찰상수를 사용하였고, 마찰조건은 다음과 같다[5].

- ① 심재와 피복재 사이의 마찰상수(m) = 1.0
- ② 다이스와 피복재 사이의 마찰상수(m) = 0.1

2.2 해석 모델

본 연구에서 사용된 동피복 강 선재의 유한요소해석 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 해석 모델은 축대칭 형상으로 심재와 피복재로 구성되어 있고, 다이스를 통과함으로써 인발공정이 이루어 지게 된다. 본 연구는 유한요소해석을 수행하기 위해서 강소성 전용 프로그램인 DEFORM-2D를 사용하였다[6~7].

2.3 인발 공정 조건에 대한 유한요소해석

동피복 강 선재의 최적 다이스 설계는 심재와 피복재의 결합을 억제하여야 하고, 동 피복율의 변화를 최소화 하여야 한다. 그러므로 본 해석에서는 각 인발 공정 조건(다이반각, 단면감소율)들에 대해서 심재와 피복재의 손상값 영향을 분석

Table 1 Material properties of steel and copper

Clad Materials		Flow Stress [MPa]
Core	Steel (AISI 1010)	$\bar{\sigma} = 715.37(\bar{\epsilon})^{0.22}$
	Copper (OFHC)	$\bar{\sigma} = 532.02(\bar{\epsilon})^{0.41976}$

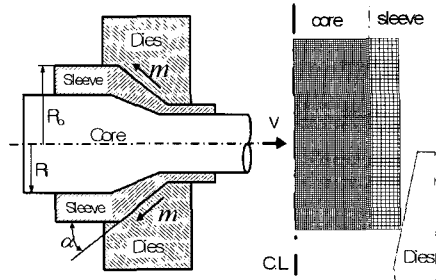


Fig. 1 Process variables and FE analysis model

Table 2 Process conditions of clad-wire drawing

Drawing conditions	Values
Initial outer radius = R_o	5
Initial coated rate(%) = $(R_o^2 - R_i^2) / R_o^2$	30
Core radius(mm) = R_i	4.2
Sleeve thickness(mm)	0.8
Semi-die angle = α (°)	5, 7, 10, 13
Reduction in area = R.A (%)	10, 15, 20, 25

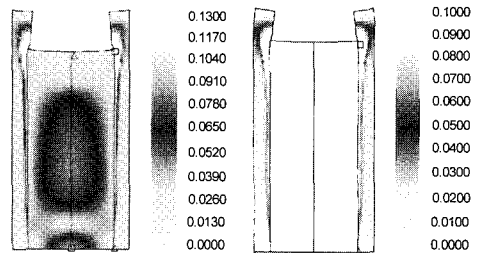


Fig. 2 Distributions of damage in core and sleeve

하였다. 동 피복율의 변화를 관찰하였다. 해석에 사용되는 공정조건은 Table 2에 나타내었다.

3. 해석 결과

일반적으로 유한요소해석을 통하여 단선 발생 가능성을 평가하는 기준은 손상값과 정수압 응력의 분포와 크기로 판단할 수 있다. 손상값을 산정하는 방법은 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 얻기 위한 값은 Cockcroft & Latham 이 제안한 모델을 사용하였다.

$$c = \int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\epsilon \quad (1)$$

여기서, $\bar{\epsilon}_f$ 는 파단시의 유효변형률, σ^* 는 최대 인장응력이다.

Fig. 2는 단면감소율 25%, 다이 반각 5°에 대하여 동피복 강 선재의 손상값 분포를 나타낸 그림이다. 심재와 피복재의 손상값은 모두 중심부에서 높음을 확인할 수 있다. 하지만, 피복재의 손상값은 심재와 다르므로 피복재와 심재의 손상값을 각각 분석할 필요가 있다.

3.1 다이 반각의 영향

Table 2에서 주어진 인발공정 조건으로 다이 반각에 대한 영향을 평가하기 위해서, 본 해석에서

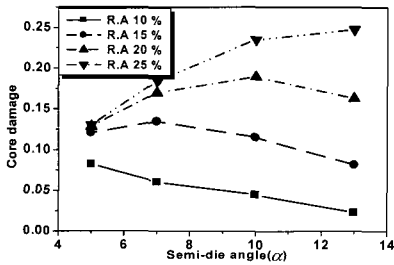


Fig.3 Relationship between semi-die angle and core damage on reduction in area

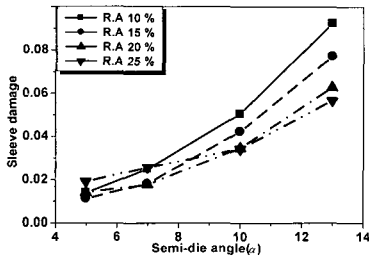


Fig. 4 Relationship between semi-die angle and sleeve damage on reduction in area

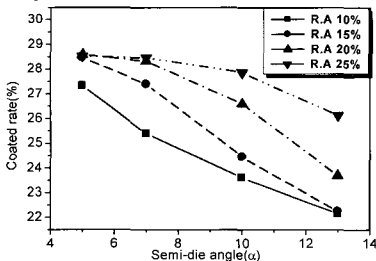


Fig. 5 Relationship between semi-die angle and coated rate on reduction in area

는 네 가지 단면감소율에 대해 고정시키고 다이 반각을 변화에 따른 손상값과 동 피복율의 변화를 관찰하였다[8].

Fig. 3과 Fig. 4는 다이 반각에 대한 심재 및 피복재의 손상값 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 3에서 단면 감소율이 작은 경우(10, 15%)에서는 다이 반각이 증가할수록 심재의 손상값이 감소하는 경향을 보이고, 단면 감소율이 큰 경우(20, 25%)에서는 다이 반각이 증가할수록 심재의 손상값이 증가하는 경향을 보이고 있다. Fig. 4에서 피복재의 손상값은 다이 반각이 증가할수록, 특히 단면감소율이 작은 경우에 급격하게 높아지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 5는 다이 반각에 대한 동 피복율의 변화를 나타낸 그림이다. 다이 반각이 증가할수록 단면감

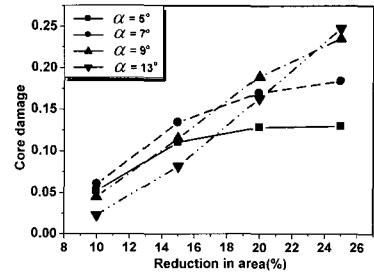


Fig. 6 Relationship between reduction in area and core damage on semi-die angle

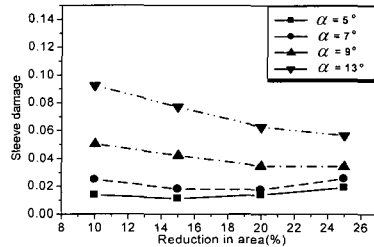


Fig. 7 Relationship between reduction in area and sleeve damage on semi-die angle

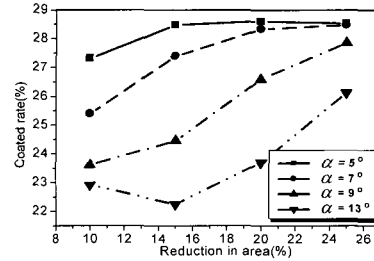


Fig. 8 Relationship between reduction in area and coated rate on semi-die angle

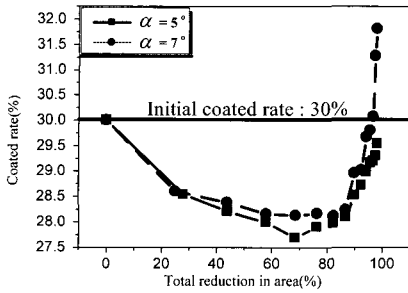


Fig. 9 Relationship between total reduction in area and coated rate on semi-die angle (5 and 7°)

소율에 상관 없이 동 피복율은 감소함을 나타내고 있으며, 단면감소율이 클수록 동 피복율의 감소는 상대적으로 적음을 알 수 있다.

3.2 단면감소율의 영향

단면 감소율에 대한 영향 평가를 하기 위해서, 3.1절과 동일한 공정 조건들로 네 가지 다이 반각에 대해 단면감소율을 변화 시켜가면서 손상값과 동 피복율의 변화를 관찰하였다.

Fig. 6와 Fig. 7은 단면감소율에 대한 피복재 및 심재의 손상값 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 6에서 심재의 손상값은 단면감소율이 증가할수록 높아지는 경향을 보이고 있다. 또한, 다이 반각이 작은 경우(5, 7°)에서는 단면 감소율이 증가할수록 손상값의 증가율이 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7에서 일정한 단면감소율에 대해 다이 반각이 증가할수록 피복재의 손상값이 커질 수 있다. 다이 반각이 큰 경우(10, 13°)에서는 단면 감소율이 증가할수록, 피복재의 손상 값은 감소하는 경향을 보이고, 다이 반각이 작은 경우(5°, 7°)에는 단면 감소율이 증가할수록 손상 값은 증가한다.

Fig. 8은 단면 감소율에 대한 동 피복율의 변화를 나타낸 그림으로, 일정한 다이 반각에 대해 단면 감소율이 증가할수록 동 피복율이 증가하는 경향을 볼 수 있고, 단면 감소율이 클수록 동 피복율의 감소는 상대적으로 적음을 알 수 있다. 그러므로 DEFORM-2D 를 통해서 심재와 피복재의 결합, 그리고 동 피복율의 변화 대한 공정 조건의 영향을 평가해본 결과, 다이 반각이 작고 단면감소율이 큰 경우에 동피복 강 선재의 인발 공정에서 발생할 수 있는 결합 즉, 단선 등의 내부 결합 그리고 동 피복율의 불균일 등을 최소화 할 수 있는 공정 조건이라고 볼 수 있다.

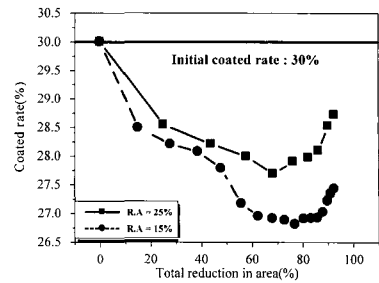


Fig.10 Relationship between total reduction in area and coated rate on reduction in area (15 and 25%)

3.3 연속 인발 공정의 유한요소해석

본 절에서는 동피복 강 선재에 대한 연속 인발 공정의 유한요소해석을 수행하여 패스가 진행됨에 따라 초기 동 피복율의 변화를 알아보았다. 이를 위해 초기 직경 5mm에서 최종 선재 직경 1 mm 까지 등단면 감소율로 패스를 진행시켰다. 또한, 인발 공정 조건에 대한 영향을 평가하기 위해 다이 반각과 단면감소율을 변화시켜 동 피복율의 변화를 관찰하였다[5~6].

3.3.1 다이 반각에 대한 피복율 평가

Fig. 9는 초기 동 피복율이 30%인 경우에서 25%의 일정 등단면 감소율, 다이 반각 5, 7° 인 공정 조건들로 해석을 수행한 후, 동 피복율의 변화를 나타낸 그림이다.

다이 반각이 큰 경우(7°)에는 최종 선재의 동 피복율이 32%로 초기 동 피복율(30%)보다 크게 나타나고 있고, 다이 반각이 작은 경우(5°)에는 최종 선재의 동 피복율이 29.7%로 초기 동 피복율(30%)보다 작게 나타나고 있다. 또한, 위의 그래프에서 총 단면감소율이 85% 이하에서는 동 피복율이 감소하고, 85% 이상에서는 동 피복율이 증가하는 것을 나타내고 있다. 따라서, 총 단면감소율로써 통한 최종 선재의 동 피복율을 조절할 수 있고, 다이 반각이 작은 경우에는 동 피복율의 변화가 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

3.3.2 단면 감소율에 대한 피복율 평가

Fig. 10은 초기 동 피복율이 30%인 경우에 대해서 일정한 다이 반각 5°와 15%, 25%의 등단면 감소율로 해석을 수행하여, 단면 감소율의 변화에 대한 동 피복율의 변화를 나타내고 있다. 단면 감소율이 작은 경우(15%)가 단면 감소율이 큰 경우

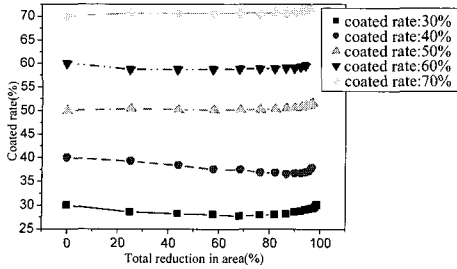


Fig.11 Relationship between total reduction in area and coated rate on coated rate (30, 40, 50, 60, 70%)

(25%)보다 동 피복율의 변화가 크게 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 단면 감소율이 작을수록 접촉 면적이 커지면서, 피복재가 변형이 많이 되기 때문이다. 또한 총단면감소율 85% 이상인 경우에서 동 피복율이 증가하는 것을 알 수 있다.

3.3.3 초기 동 피복율의 변화에 대한 평가
본 해석에서는 초기 동 피복율을 30, 40, 50, 60, 70%로 변화시켜 가면서, 25%의 등단면 감소율과 5°의 다이 반각에 대한 등단면 패스 스케줄로 해석을 수행하였다.

Fig. 11은 위의 등단면 패스 스케줄로 초기 동 피복율과 총단면 감소율에 따른 동 피복율의 변화를 그래프로 나타내고 있다. 초기 동 피복율 30, 40, 50, 60% 경우의 변화 경향을 분석하면, 동 피복율은 총 단면 감소율 85%까지는 감소하는 경향을 보이고 있으나, 총단면 감소율이 85% 이상인 경우에서부터는 동 피복율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 하지만 초기 동 피복율이 70%인 경우에는 총 단면감소율이 85%이전까지는 동 피복율이 초기 동 피복율이 유지되는 경향을 나타내고 있고, 총 단면감소율85%에서 부터는 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러므로 Fig. 10을 통해 총 단면 감소율에 대해 동 피복율의 변화시점을 파악할 수 있으므로, 용도에 맞는 최종 선재의 동 피복율을 예측 및 제조할 수 있다.

3.4 가공 경화의 영향

앞에서 언급된 동 피복율의 변화는 피복재의 가공 경화에 의한 것으로 설명을 할 수 있다. 이에 대한 구체적인 검증을 위해 연구를 수행하였다. 즉, 만약 초기 동피복 강 선재를 가공 경화가 되어 있는 것으로 가정하여 인발 한다면 피복재가

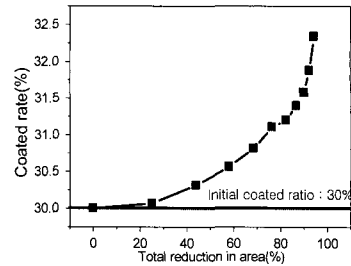


Fig.12 Relationship between total reduction in area and coated rate

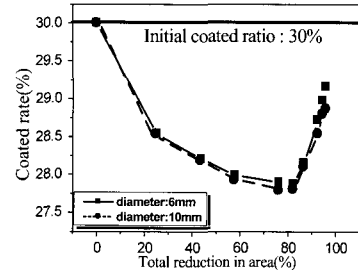


Fig.13 Relation between coated rate and total reduction on initial diameter(6 and 10mm)

심재보다 더욱 가공 경화되어 동 피복율은 증가하게 될 것이다. 가공 경화에 대한 동 피복율의 변화를 알아보기 위해서 초기 피복재에 총 단면 감소율 85%의 변형률 값(2.09)을 임의로 미리 주어 가공 경화를 받은 것으로 가정하였고, 가공 경화에 대한 동 피복율의 변화를 알아보기 위해서 초기 피복재에 총 단면 감소율 85%의 변형률 값(2.09)을 임의로 미리 주어 가공 경화를 받은 것으로 가정하였고, 다이 반각 5°, 단면 감소율 25%인 등단면 패스 스케줄로 해석을 수행한 결과를 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 12에서 실제로 초기 동 피복율에 대해 총 단면감소율이 증가할수록 동 피복율이 증가하고 총 단면감소율이 85%이상일 때 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이로써 실제 동피복 강 선재에서 총 단면감소율이 증가할수록 동 피복율이 증가하는 것은 피복재로 사용된 구리(OFHC)의 가공 경화에 의한 것임을 확인할 수 있다. 이는 본 논문에서 확인하였던 동 피복율은 총 단면감소율에 의해 일정한 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 따라서, 총 단면감소율을 통한 가공 경화를 예측하여 최종 선재의 동 피복율을 예측하는 것은 가능하다고 판단된다.

3.5 직경 변화에 따른 동 피복율의 예측

초기 동피복 강 선재의 직경에 따른 동 피복율의 예측은 다양한 제품의 생산을 위해 필요하다. 초기 동피복 강 선재의 직경 차이에 따른 동 피복율의 변화가 어떻게 나타나게 되는 것을 분석함으로써, 향후 다양한 공정에 대해 예측할 수 있는 자료가 될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 초기 동 피복 강 선재의 직경을 6mm 와 10mm 의 두 직경에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 13은 초기 동 피복율 30%, 단면 감소율 25%, 다이 반각 5°의 공정 조건으로 동 피복 강 선재의 직경 6mm 와 10mm 에 대해 등단면 패스 스케줄을 적용한 후, 총 단면감소율에 대한 동 피복율의 변화를 나타낸 그림이다. 초기 동 피복 복합선재의 직경이 6mm 와 10mm 로 한 경우에 대해 총 단면감소율에 대한 동 피복율의 변화는 총 단면감소율이 85% 이전에는 감소하나 이후부터는 증가하는 양상으로 두 경우가 유사하게 나타남을 볼 수 있다. 동 피복 복합선재에 있어서, 동 피복율은 초기 동 피복 복합선재의 직경보다는 총 단면 감소율의 함수이다. 즉, 초기 동 피복 복합선재의 직경에 상관없이 총 단면감소율이 85% 이상인 부분에서 피복재의 가공경화 현상이 두드러지고 이로 인해 동 피복율의 변화도 비슷한 양상을 보인다. 따라서, 최종 제품의 직경 및 동 피복율의 변화는 총 단면 감소율로 계산될 수 있고, 이에 따라 적절한 동 피복 복합 선재의 직경을 선택할 수 있다.

4. 결론

유한요소해석을 통한 동피복 복합 선재 인발공정의 주요 공정 변수인 다이 반각과 단면감소율에 따른 동 피복율 평가를 수행하였으며, 이를 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 다이 반각에 의한 영향은 다이 반각이 증가할수록 심재와 피복재의 손상 값이 증가하고 피복율은 감소한다.

(2) 단면감소율에 의한 영향은 단면감소율이 증가할수록 심재의 손상값은 증가하지만 피복재의 손상값과 동 피복율은 감소한다.

(3) 동 피복율은 총단면 감소율은 약 85% 이전까지는 감소하나 총단면 감소율이 약 85% 이후부터는 초기 동 피복율보다 커지게 된다. 이는 연한 재료인 구리가 먼저 가공경화를 많이 받으면서 상대적으로 동 피복율이 감소하다가 어느 일정이상의 가공경화 후 다시 심재에 그 영향을 미

치기 때문에 동 피복율이 상승하게 된다.

(4) 인발 공정 조건에 대해서 동 피복율의 변화는 다이 반각이 작고 단면감소율이 클수록 최종 동피복 복합 선재의 동 피복율 조절과 예측에 유리하다.

(5) 동 피복 복합선재의 초기 직경 변화에 따른 동 피복율의 변화는 총 단면 감소율에 대하여 유사한 경향을 나타내고 있다. 동 피복 복합선재의 초기 직경에 상관없이 총 단면 감소율을 조절하여 동 피복 복합선재의 전체적인 동 피복율 예측 그래프를 작성할 수 있었다.

이상의 연구 결과에서는 동피복 복합 선재 인발 공정 변수의 영향 평가를 보았으며, 이를 바탕으로 처음에 목적함수로 설정한 손상 값의 최소화와 일정한 피복율을 얻기 위한 적절한 인발공정 조건을 선택할 수 있었고, 실제 동피복 복합 선재의 인발 공정 설계에 유용하게 할 수 있는 기초 데이터를 예측할 수 있게 되었다.

참고문헌

- [1] K. Yoshida, 1997, Technology of manufacture and application on clad, Journal of the JSTP, vol.38, no.441, pp. 45~47.
- [2] H. Dyja, J. W. Pilarczyk, W. Szulc, Z. Smolarczyk, Drawing of bimetal wires-draw stresses and wires properties.
- [3] Z. Muskalski, J. W. Pilarczyk, S. Wiewiorowska, B. Golis, September 2001, Modelling the drawing of bimetallic rods with Forge-2 software, Wire Journal Interantional, pp.108~112.
- [4] W. Szulc, M. Pietrzyk, H. Dyja, J. W. Pilarczyk, 1994, Theoretical and experimental analysis of drawing of steel rods covered with copper, JMPT, vol.45, pp. 401~406.
- [5] H. Dyja, B. Garbarz, R. Molenda, 1982, Examination of the regions of the joint of sheets bonded by explosive welding technique, Hutnik, vol. 49, p. 9.
- [6] B. Avitzur, Aug 1970, The production of Bi-metal Wire, The Wire Journal, vol.3, No.8, pp. 42~49.
- [7] D. H. Sansome, H. T. Chia, 1980, The drawing of bi-metal combination-tube on rod", Wire Industry, No. 6, pp. 519~522.
- [8] 박동인, 김병민, 오상수, 2004, 유한요소법에 의한 Bi2223 고온 초전도 선재의 다심 인발에 대한 연구, 한국소성가공학회지, 제13권, 제1호.