

로듐 미세 와이어 인발공정 설계

이인규¹ · 이성윤¹ · 김다혜¹ · 이재욱¹ · 이상곤[#]

Wire Drawing Process Design for Fine Rhodium Wire

I. K. Lee, S. Y. Lee, D. H. Kim, J. W. Lee, S. K. Lee

(Received May 4, 2018 / Revised July 5, 2018 / Accepted July 10, 2018)

Abstract

Rhodium is a representative platinum group material. Rhodium is used in several industrial fields including jewelry, chemical reaction catalyst, electric component etc. In recently, ultra-fine rhodium wire has been applied to the pins of probe card used to test a semiconductor. In this study, in order to produce a fine rhodium wire with the diameter of $50\mu\text{m}$, a fine rhodium wire drawing process was designed. After design of the fine wire drawing process by using a uniform reduction ratio theory, finite element analysis was performed. Finally, fine wire drawing experiment was performed to verify the effectiveness of the designed process.

Key Words : Wire Drawing, Rhodium, Process Design, Finite Element Analysis, Drawing Experiment

1. 서론

로듐(rhodium)은 전기적/기계적 특성이 우수한 희소금속(platinum materials)의 하나로 최근 미세한 전자부품으로 적용이 확대되고 있는 소재다. 로듐은 전 세계 시장의 80% 이상을 남아프리카 공화국에서 생산 및 공급하고 있으며, 이를 미국, 독일, 일본 등에서 고부가가치 산업소재로 전환하여 세계시장에 공급하고 있다. 특히, 미세 로듐 와이어의 경우 미세한 반도체나 PCB 선폭에 접촉하여 전기적 특성을 측정하는 핀(pin) 소재로 그 수요가 증대되고 있다. Fig. 1의 프로브 카드(probe card)는 반도체 칩(chip)의 작동을 검사하기 위해 반도체 칩과 테스트 장비를 연결하는 장치이다. Fig. 1에서 보듯이 프로브 카드에는 미세한 프로브 카드 핀이 장착되어 있으며, 이 핀이 웨이퍼(wafer)와 접촉하며 전기를 보내고, 그때 돌아오는 신호에 따라 불량 반도체 칩을 선별한

다[1]. 최근 프로브 카드 핀으로 미세 로듐 와이어의 적용이 확대되고 있다. 그러나, 미세 로듐 와이어의 경우 현재까지 전량 수입에 의존하고 있기 때문에 국산화를 통한 수입대체가 절실한 실정이다.

최근까지 인발 공정설계, 다이 마모 특성평가, 내부 불순물 영향 등 인발공정에 대한 다양한 연구들이 수행되었으나, 로듐 미세 와이어 인발에 관한 연구 내용들은 공개되고 있지 않다[2~10]. 따라서, 본 연구에서는 프로브 카드 핀으로 사용되는 직경 $50.0\mu\text{m}$ 인 미세 로듐 와이어 제조를 위한 인발공정을 설계하였다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저, 균일 단

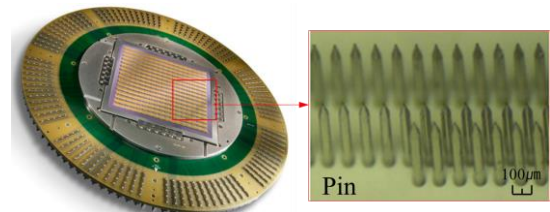


Fig. 1 Probe card and probe card pins

1. 한국생산기술연구원 극한가공기술그룹
Corresponding Author : Extreme Fabrication Technology Group, Korea
Institute of Industrial Technology, E-mail : sklee@kitech.re.kr

Table 1 Wire diameter at each pass

Pass No.	Wire diameter (mm)
1	0.075
2	0.071
3	0.067
4	0.063
5	0.060
6	0.056
7	0.053
8	0.050

Table 2 Conditions for FE analysis

Items	Value
Flow stress curve	$\bar{\sigma} = 2506.9\bar{\epsilon}^{0.037}$ [MPa]
Young's modulus	359.0 [GPa]
Poisson's ratio	0.26
Yield strength	1790.0 [MPa]
Tensile strength	2190.0 [MPa]
Friction Coeff.(μ)	0.05
Semi-die angle	8.0 °

면 감소율(uniform reduction ratio)를 적용하여 다단 인발 패스 스케줄을 설계하였다[11,12]. 이 후 유한요소해석을 통해 설계된 패스의 인발하중, 유효 변형률 등을 평가하였으며, 마지막으로 인발실험을 통해 설계된 공정의 타당성을 검증하였다.

2. 패스 스케줄

미세 와이어는 일반적으로 다단 인발공정을 통해 제조된다. 다단 인발공정 설계를 위해서는 패스 수와 각 패스의 단면감소율이 설정되어야 한다. 본 연구에서는 식(1)의 균일 단면감소율 이론을 적용하여 패스 수와 단면감소율을 설정하였다.

$$r_{avg} = [1 - (1 - r_{total} / 100)^{1/n}] \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

여기서, r_{avg} 는 각 패스의 평균 단면감소율, r_{total} 은 총 단면감소율(total reduction ratio), 그리고 n 은 총 패스 수이다.

본 연구에서 적용된 로듐 와이어의 초기 및 최종 직경은 각각 80.0 μm 와 50.0 μm 이다. 따라서, 총 단면감소율은 60.94%이다. 균일 단면감소율 적용 시 모든 패스의 감면율은 일정하게 설정되며, 총 단면감소율이 결정되면 패스 수에 의해 평균 단면감소율이 설정된다. 본 연구에서는 총 패스 수를 8로 설정하였으며, 이 때 평균 단면감소율은 약 11.09%이다. Table 1에 설계된 패스 스케줄에 대한 각 패스의 와이어 직경을 나타내었다.

3. 인발공정 유한요소 해석

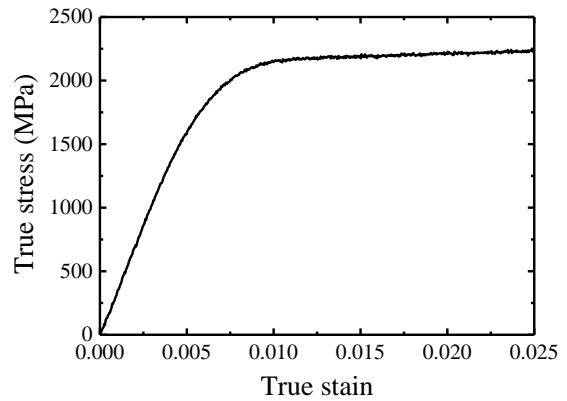


Fig. 2 Flow stress of initial wire

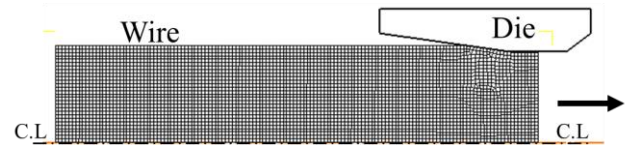


Fig. 3 Initial FE analysis model

3.1 유한요소해석 조건

본 연구에서는 균일 단면감소율 이론을 적용하여 설계된 패스 스케줄에 대하여 탄소성 유한요소해석을 통해 타당성을 평가하였다.

적용된 초기 와이어인 직경 80.0 μm 로듐 와이어의 유효변형률-유효응력 곡선은 미세인장시험기(model: Instron 5566A)를 이용한 단축인장시험(KS B 0801)을 통해 확보하였다. Fig. 2에 유효응력 곡선을 나타내었으며, Table 2에 확보된 유효응력 곡선식 및 마찰계수 [13]를 포함하여 성형해석을 위한 조건들을 나타내었다.

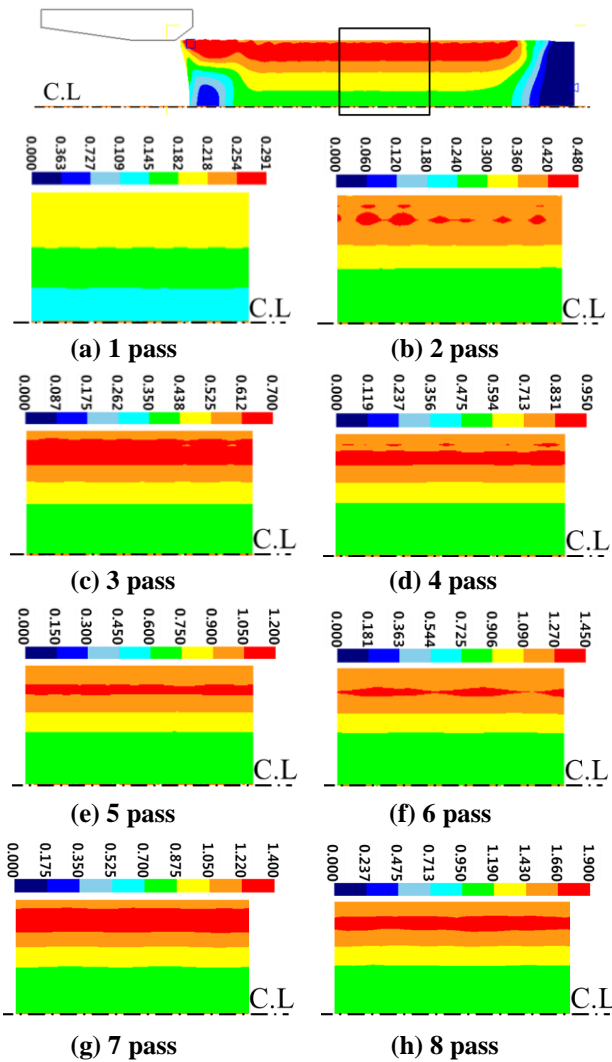


Fig. 4 Distribution of effective strain

Fig. 3 은 탄소성 유한요소해석을 위한 초기 유한요소해석 모델을 나타내었다. 해석은 상용 해석 소프트웨어인 DEFORM 2D Ver 11.1 로 수행되었으며, 와이어의 유한요소 및 절점 수는 각각 3931 개와 4101 개이다.

Fig. 4 는 유한요소해석결과 각 패스의 와이어 내부 유효변형률 분포를 나타낸 것이다. 와이어가 각 패스 별 인발 다이를 완전히 통과한 후의 변형률 분포이다. 결과에서 알 수 있듯이 다이와 접촉되는 와이어 표면부의 변형률이 상대적으로 높음을 알 수 있으며, 패스가 증가할수록 소성변형 증가로 인해 변형률이 높아짐을 알 수 있다.

Table 3 은 유한요소해석결과 각 패스의 와이어 직경과 인발응력을 나타낸 것이다. 인발응력은 식(2)로

Table 3 Drawing load and stress of FE analysis

Pass No.	Load (N)	Stress (MPa)
1	2.96	670.0
2	2.60	657.3
3	2.42	656.8
4	2.18	695.4
5	1.93	691.8
6	1.72	693.4
7	1.56	706.8
8	1.49	758.9

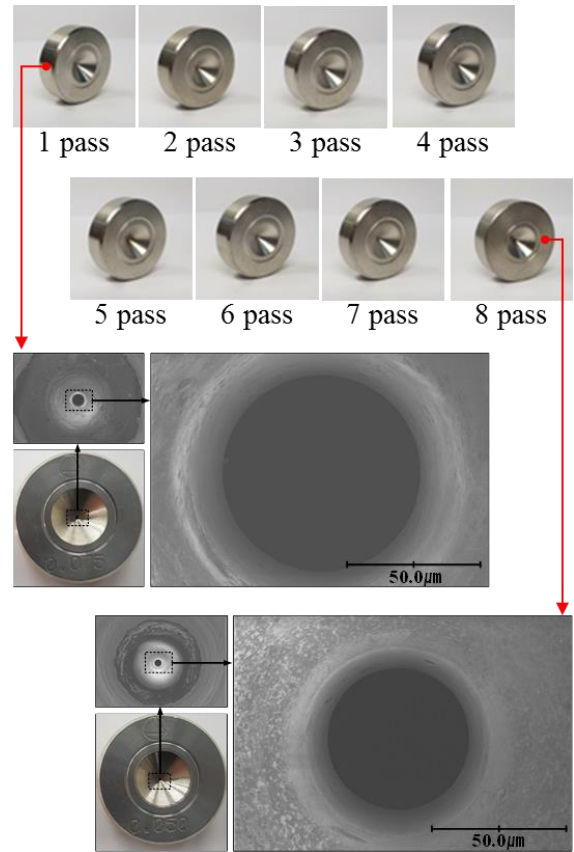


Fig. 5 Wire drawing dies

계산하였다.

$$\sigma_{D,i} = L_i / A_i \quad [\text{MPa}] \quad (2)$$

$\sigma_{D,i}$ 는 인발응력, L_i 는 인발하중, 그리고 A_i 는 인발된 와이어의 단면적이다. 인발하중은 패스가 진행될

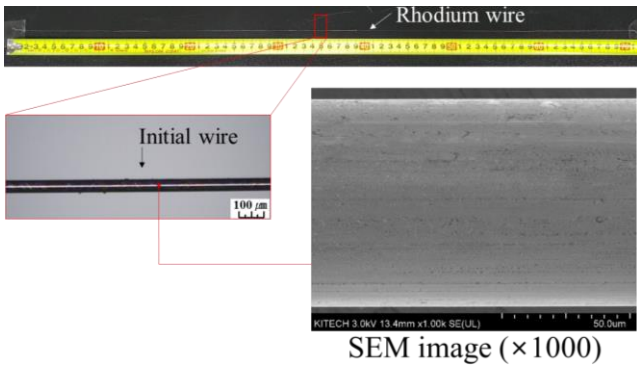


Fig. 6 Initial rhodium wire

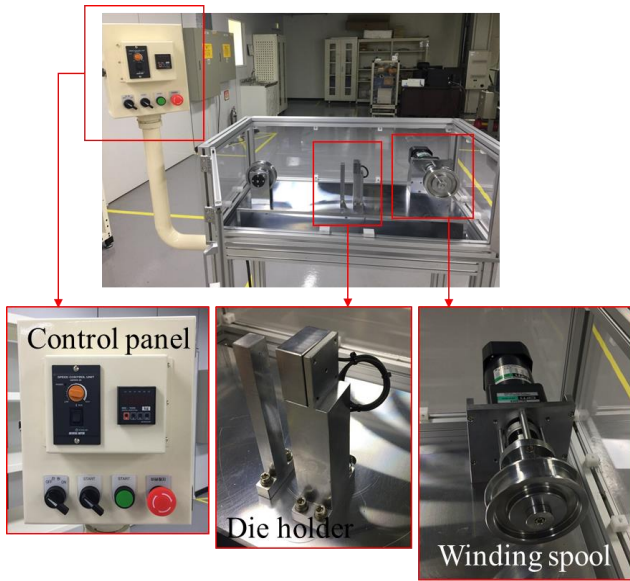


Fig. 7 Wire drawing machine

수축 와이어 직경감소로 인해 감소함을 알 수 있다. 해석결과 인발응력은 약 657~759MPa 사이 값을 나타내었으며, 후반부 패스에서 상대적으로 높음을 알 수 있다. 또한, 모든 패스의 인발응력은 초기 와이어의 항복응력인 1790MPa 이하임을 알 수 있다.

4. 인발 실험

설계된 미세 로듐 와이어 인발공정에 대한 타당성 검증을 위해 인발실험을 실시하였다.

먼저, 미세 로듐 와이어 인발을 위해 미세 와이어 인발용 다이를 제작하였다. Fig. 5에 제작된 인발 다이를 나타내었다. 다이 케이스(case)는 일반 탄소강이며, 와이어와 접촉하는 다이 팁(tip)은 천연 다이아몬드로 제작되었다.

Table 4 Drawn wire and diameter at each pass

Pass No.	Surface	Diameter(mm)
1		0.0747
2		0.0714
3		0.0672
4		0.0630
5		0.0600
6		0.0562
7		0.0529
8		0.0501

Fig. 6은 초기 80.0 μ m 로듐 와이어와 표면 SEM (Hitachi SU8020) 이미지를 나타낸 것이다. 초기 와이어도 인발공정으로 제조되었기 때문에 길이 방향으로 인발가공 흔적 및 미세한 크랙(crack)이 존재함을 알 수 있다.

Fig. 7은 인발실험을 위해 제작된 정밀 인발기이다.

와이어 포인팅 작업 후 다이 홀더(holder)에 장착된 다이를 통과한 와이어를 와인딩 스푼(winding spool)로 인발하게 된다. 제작된 인발기는 단패스(single pass) 인발기로 다이를 순차적으로 교체하며

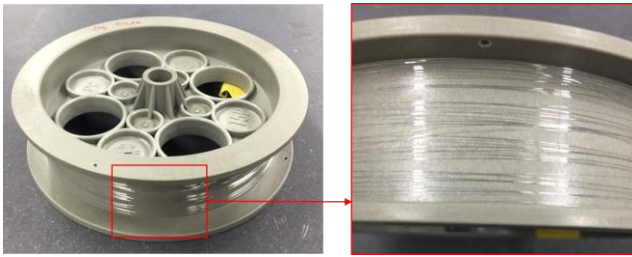


Fig. 8 Wire drawing

인발실험을 수행하였다. 인발속도는 30.0 mm/s로 설정하였으며, 윤활제는 적용되지 않았다.

Table 4에 3차원 디지털 현미경(model: KH-7700)으로 관찰한 각 패스 별 와이어 표면상태와 직경을 나타내었다. 실험결과에서 알 수 있듯이 각 패스 인발 후 와이어 직경은 각 패스 다이 직경과 유사함을 알 수 있다. 실험에 의한 최종 인발 와이어의 직경은 50.1 μ m였다. 실험결과 인발 중 단선 등의 결함은 발생하지 않았으며, 표면상태도 양호함을 알 수 있었다.

Fig. 8은 인발실험을 통해 제조된 최종 50.0 μ m 로뎀 와이어이다.

5. 결론

반도체 검사용 프로브 카드 핀으로 사용되는 로뎀 미세 와이어는 전기적 특성 및 기계적 특성이 우수한 고부가가치 와이어이다. 본 연구에서는 프로브 카드 핀으로 사용되는 직경 50.0 μ m 미세 로뎀 와이어 제조를 위한 인발공정을 설계하였으며, 이를 통해 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 균일 단면감소율을 적용하여 초기 80.0 μ m에서 최종 50.0 μ m 로뎀 와이어 인발공정 패스 스케줄을 설계하였다. 총 8패스로 설계되었으며, 이 때 평균 단면 감소율은 11.09%였다.

(2) 설계된 공정에 대한 탄소성 유한요소해석결과 각 패스의 유효변형률은 다이와 접촉되는 표면부가 중심부 보다 상대적으로 높았으며, 최대 인발응력은 약 790MPa로 초기 와이어의 항복응력보다 낮았다.

(3) 설계된 공정을 적용하여 인발실험 수행 후 각 패스의 와이어 직경을 측정된 결과, 모든 패스의 와이어 직경은 설계된 직경과 거의 동일한 값을 나타내었다. 또한, 최종 인발된 와이어 직경은 약 50.1 μ m

였다.

후 기

본 연구는 산업기술혁신사업(벤처형전문소재기술개발사업(10067248))의 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

- [1] Y. Zhang, Y. Zhang, R. B. Marcus, 1999, Thermally actuated microprobes for a new wafer probe card, *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 8, No. 1, pp. 43~49.
- [2] S. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, 2010, Process design of multi-stage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0.72wt%C steel wire, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 210, pp. 776~783.
- [3] S. B. Son, Y. K. Lee, S. H. Kang, H. S. Chung, J. S. Cho, J. T. Moon, K. H. Oh, 2011, A numerical approach on the inclusion effects in ultrafine gold wire drawing process, *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 18, pp. 1271~1278.
- [4] A. Haddi, A. Imad, G. Vega, 2011, Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process, *Mater. Des.*, Vol. 32, pp. 4310~4315.
- [5] A. Skolyszewski, M. Paćko, 1998, Back tension value in the fine wire drawing process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 80-81, pp. 380~387.
- [6] O. M. Ogorodnikova, E. M. Borodin, 2016, Computer analysis of the deformation mode of the drawing tool for platinum alloys, *Russian J. Nonferrous Met.*, Vol. 57, No. 2, pp. 92~94.
- [7] T. Massé, L. Fourment, P. Montmitonnet, C. Bobadilla, S. Foissey, 2013, The optimal die semi-angle concept in wire drawing, examined using automatic optimization techniques, *Int. J. Mater. Forum*, Vol. 6, pp. 377~389.
- [8] S. K. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim, 2008, Effect of abrasive particle size on wear and fracture of WC drawing die for brass coated high carbon steel cord wire, *Steel Research Int.*, Vol. 79, pp. 20~27.
- [9] L. Filice, G. Ambrogio, F. Guerriero, 2013, A multi-objective approach for wire-drawing process, *Procedia*

- CIRP, Vol. 12, pp. 294~299.
- [10] Y. N. Loginov, A. E. Pervukhin, N. A. Babailov, 2017, Evolution of surface defects in platinum alloy wire under drawing, Proc. the 11th Int. Conf. Mech. Resour. Diagn. Mater. Struct., E. S. Gorkunov et al. (Ed.), Russia, Dec. 11-15, pp. 040032.
- [11] Jpn. Soc. Technol. Plast., 1990, Drawing process, Corona. p. 44.
- [12] S. K. Lee, S. Y. Lee, I. K. Lee, D. H. Kim, M. S. Jeong, J. W. Lee, S. K. Hwang, K. J. Cha, 2017, Wire drawing process design for ultra fine rhodium wire, Autumn Conf. of KSPE, C. H. Park et al. (Ed.), GyeongGi, Dec. 13-15, p. 101.
- [13] US Synthetic Wire Die, <http://www.usswiredie.com>