

Additive 공정을 이용한 미세 피치용 니켈 메탈마스크의 제조 및 특성평가

Fabrication and Characterizations of Nickel Metal Mask with Fine Pitch by Additive Process

박의철¹, 임준형¹, 김규태¹, 박시홍¹, 황수민¹, 심중현¹, 정승부¹, 김봉수², 주진호^{1,a}
(Eui Cheol Park¹, Jun Hyung Lim¹, Kyu Tae Kim¹, Si Hong Park¹,
Soo Min Hwang¹, Jong Hyun Shim¹, Seung-Boo Jung¹, Bong Soo Kim², and Jinho Joo^{1,a})

Abstract

We successively fabricated the Ni metal mask by additive method and evaluated the effects of wetting agents addition on the microstructure, hardness, and friction coefficient. In the process, the additive patterns with fine hole and pitch were made by photolithography technique and subsequently Ni plate was electroformed on the patterns. We found that the microstructure and mechanical properties were significantly varied when the different combinations of the wetting agents were used. When the wetting agents of both SF-1 and SF-2 were added, the microstructure consisted of crystal and amorphous phases, the grain size reduced to 5-40 nm, the RMS value decreased to 11.4 nm, and the wear resistance improved. In addition, the hardness was as high as 638 Hv which is higher than that of commercial stainless steel mask and this improvement is probably due to the presence of amorphous phase and fine grain size. The improvement of the wear resistance can provide a higher reliability and a longer service life.

Key Words : Additive process, Electroforming, Friction coefficient, Metal mask, Wetting agent

1. 서론

현재 PCB(Printed Circuit Board) 위의 반도체 소자 실장기술은 BGA(Ball Grid Array) 방식이 주를 이루고 있다. BGA를 형성하기 위한 방법에는 솔더볼(solder ball) 탑재방법과 크림솔더(cream solder)의 스크린프린팅(screen printing) 방법이 많이 사용되고 있다[1]. 전자의 방식은 PCB 위의 원하는 위치에 플럭스(flux)를 코팅한 후 노즐을 사용하여 솔더볼을 위치시켜 리플로우(reflow)를 통

하여 BGA를 형성하는 기술로서 공정이 단순하여 많이 적용되고 있지만, 장비상의 한계로 인해 미세한 피치(pitch)를 가지는 BGA의 구현이 어렵다. 반면에 후자의 방식은 그림 1에서와 같이 크림솔더를 PCB 위의 원하는 위치에 인쇄한 후 리플로우하여 솔더볼을 형성시키는 방법으로 전자에 비해 미세한 피치를 가지는 BGA를 구현할 수 있다 [2]. 크림솔더를 스크린프린팅 방식으로 도포하기 위해서는 메탈마스크가 필요한데 메탈마스크의 홀직경(hole size)과 피치크기(pitch size)에 따라서 반도체소자 실장의 집적도가 결정되기 때문에 메탈마스크의 패턴이 미세화 될수록 반도체소자의 실장의 집적도를 향상시킬 수 있다.

현재 상용화된 메탈마스크는 SUS 304(Steel Use Stainless 304, 일본공업규격) 기판을 이용하며 주로 다음의 두 가지 방법에 의해 패턴을 구현

1. 성균관대학교 신소재공학부
(경기도 수원시 장안구 천천동 300)

2. 에프앤비테크

a. Corresponding Author : jinho@skku.edu

접수일자 : 2007. 9. 3

1차 심사 : 2007. 10. 11

심사완료 : 2007. 10. 16

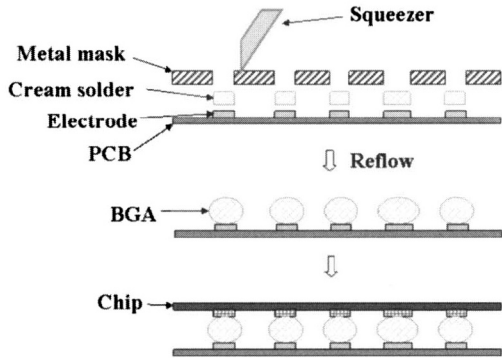


그림 1. 크림솔더의 스크린프린팅 공정 모식도.
 Fig. 1. Schematics of screen printing of cream solder.

한다. 첫째, Nd-YAG 레이저를 사용하는 방식이 가장 많이 사용되며 생산속도가 빠르다는 장점을 가지고 있다[3]. 하지만 레이저의 한정된 분해능으로 인하여 미세한 패턴의 구현이 제한되고, 고열 발생으로 인해 패턴내벽의 불균일도가 증가하는 단점을 가지고 있다. 둘째, 사진식각공정(photo-lithography)을 이용한 패턴식각 공정 즉, photo-etching 공정은 우수한 경제성을 가지고 있지만 불균일한 식각속도로 인하여 패턴내벽에 요철이 발생할 수 있으며 이는 크림솔더의 빠짐성과 밀접한 연관을 가진다. 메탈마스크의 패턴내벽이 균일하지 못하고 거칠게 되면 스퀴징(squeezing) 공정 후 메탈마스크를 탈착할 때 크림솔더가 거친 패턴내벽에 붙게 되어 PCB 전극(electrode) 위의 크림솔더가 부족하게 되는 현상이 나타나게 된다. 이 현상은 리플로우 공정 후 불균일한 크기를 가지는 BGA를 형성하여 반도체소자의 실장에서 불량률을 야기하게 된다. 위 결과들을 근거로 하여 현재 상용화된 메탈마스크의 제작공정은 많은 한계점을 가지며 새로운 공정이 요구되고 있다.

최근 새로운 메탈마스크 제조공정들이 부각되고 있는데 본 연구에서 사용한 방법은 사진식각공정을 이용하여 양각의 패턴을 형성한 후 전주도금(electroforming) 공정으로 음각의 메탈마스크를 제조하는 additive 방식의 제조공정으로서, 사진식각공정에서 미세한 피치를 가지는 양각의 패턴형성이 메탈마스크가 가지는 패턴의 미세함을 결정하기 때문에 미세피치를 가지는 메탈마스크의 구현이 가능하다. 또한 식각공정이 없기 때문에 균일한 패턴내벽을 구현할 수 있으며, 상대적으로 저렴한

도금공정을 사용하기 때문에 경제적인 측면에서도 장점을 가지고 있다.

메탈마스크를 이용한 스크린프린팅 공정에서 스퀴저(squeezer)는 메탈마스크 표면에서 왕복운동을 하여 크림솔더를 메탈마스크의 패턴으로 빠지게 하는 역할을 한다. 스퀴저는 일반적으로 고무나 금속의 재질로 이루어져 있으며 왕복운동으로 인해 메탈마스크의 표면을 마모시키며 수명에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 메탈마스크의 미세조직을 제어하여 경도와 내마모 특성을 향상시키는 연구가 중요하다. 본 실험에서는 SUS 304 기관위에 감광필름을 laminating 공정으로 압착하여 노광과 현상 공정으로 양각의 패턴을 형성한 후 니켈 전주도금공정으로 메탈마스크를 제조하였다. 그리고 전주도금 공정에서 사용할 니켈도금액에 광택제의 첨가유무에 따른 니켈 메탈마스크의 미세조직 변화와 기계적 특성(경도 및 마찰계수)의 변화를 관찰하였으며, 최적의 조건에서 제조된 니켈 메탈마스크를 기존의 Nd-YAG 레이저법으로 제조한 SUS 304 메탈마스크와 비교하여 상용화 가능성을 살펴보았다.

2. 실험

Additive 방법을 이용하여 미세패턴을 가지는 메탈마스크를 제조하였으며, 사진식각공정을 이용하여 양각의 패턴을 형성하고 이 양각의 패턴 위에 전주도금공정으로 음각의 패턴을 가지는 메탈마스크를 만드는 공정순서를 그림 2에 모식화 하였다. 도금공정에서의 음극, 즉 도금기관은 SUS 304(400 mm × 400 mm × 0.1 mm)를 사용하였고 이 기관 위에 감광필름(Dry Film Resist, DFR)을 laminating 공정[4]으로 압착한 후 크롬패턴이 있는 포토마스크를 기관(DFR / SUS 304) 위에 장착하여 접촉투영방식으로 자외선(U.V)을 조사하였다. 자외선이 조사된 영역 외의 부분을 제거하여 양각의 패턴만 형성하는 negative 방식으로 도금공정에서 사용할 음극을 제작하였다.

도금은 탈지, 수세2단, 니켈도금, 수세2단, 탈지, 수세2단 순서로 하였다. 탈지는 음극(SUS 304) 표면의 유기물 제거 및 마지막 공정에서 양각의 DFR 패턴을 제거하기 위해 실시하였고, 60 °C의 온도에서 1시간 탈지처리 하였다. 광택제(LIEBE-LIGHT SF, M.K Chem & Tech. Co.)의 첨가 변수에 따른 니켈도금용액의 조성 및 조건은 표 1에 나타내었으며 니켈전해액에 SF 광택제를 첨가하지 않고 제조한 시편을 'SF-0 시편', SF-1 광택제를

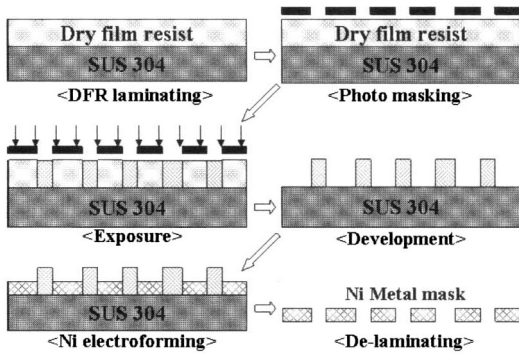


그림 2. Additive 방식의 니켈 메탈 마스크 제조 공정.
Fig. 2. Fabrication of Ni metal mask using additive method.

첨가한 경우 'SF-1 시편', 그리고 SF-1과 SF-2 광택제를 모두 첨가하여 제조한 시편을 'SF-12 시편'으로 명명하였다. 양극은 크라운타입의 니켈을 사용하였고, 음극의 전류밀도는 1 A/dm^2 로 제어하였으며, pH는 4.0으로 제어하였다. 도금용액의 순도를 높이고, 도금층의 내부응력을 제거하기 위해 도금용액의 filtering 과정과 1 A/dm^2 전후의 전류밀도로 불순물도금을 하였다. 그리고 예상되는 도금층의 두께를 제어하기 위해 Faraday 법칙을 이용하여 니켈의 도금시간을 계산하였고 약 $50 \mu\text{m}$ 의 도금두께를 얻기 위해서 4시간의 도금시간이 필요하였으며, 계산된 결과에 따라 도금을 실시하였다.

시편의 미세조직은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, Hitachi-1000)로 관찰하였고, 시편의 표면조도는 원자간힘현미경(Atomical Force Microscopy, APEM-1000)를 사용하여 접촉방식으로 시편 내 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 의 영역에서 측정하였다. 시편의 결정립 크기를 관찰하기 위해 투과전자현미경(Transmission Electron Microscopy, JEM 3010) 관찰을 하였으며 투과전자현미경 시편은 3 mm 직경으로 만든 후 전해연마기(Jet Polisher, Tenupol-3)를 이용하여 얇게 가공하였다. 시편의 경도를 측정하기 위해 마이크로비커스경도계(MVK-H2, Akashi Co.)를 이용하여 하중 3 kg을 작동시켜 10초 동안 압입하였고, 각 시편마다 5회의 경도를 측정하여 평균값과 표준편차를 계산하였다. 내마모 특성분석은 ball-on-disc 방식의 마모 시험기를 이용하여 대기 중 무윤활 조건으로 마모 시험을 행하였다. 마모조건은 상온에서 수직하중 0.1 kgf, 선속도 0.1 %하에서 행하였으며 총 마찰

표 1. 니켈 도금용액의 조성 및 조건.

Table 1. Compositions and conditions of Ni electroforming solution.

	SF-0	SF-1	SF-12
$\text{Ni} \cdot (\text{NH}_2\text{SO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}(\text{ml}/\ell)$	500	500	500
$\text{H}_3\text{BO}_3(\text{g}/\ell)$	45	45	45
Wetting agent(ml/ℓ)	2	2	2
LIEBELIGHT SF-1(ml/ℓ)	-	20	20
LIEBELIGHT SF-2(ml/ℓ)	-	-	2
Temperature($^\circ\text{C}$)	50	50	50
pH	4.0	4.0	4.0

거리는 10,000 m로 하였다. 상대마모 ball재료는 직경 7 mm인 SUS 304 ball을 이용하였고 마모시험이 끝난 후 SUS 304 ball의 체적감소로 무게손실량을 계산하였다[5].

3. 결과 및 고찰

니켈 도금액에서 광택제의 종류 및 첨가 유무에 따른 도금층의 미세조직 변화를 관찰하기 위해 SUS 304 기판의 표면, 니켈도금 시편의 박리면과 외부표면을 주사전자현미경으로 관찰하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)는 SUS 304 기판의 표면이며 조직이 치밀하고 결정립의 형태가 길게 변형되어 있음을 알 수 있는데 이는 압연공정에 의해 기판이 제조되었기 때문이다. 그림 3(b)는 SF-0 시편의 박리면 표면으로써 SUS 304 기판의 표면 형상과 유사하나 그림 3(c)에서 보듯이 외부표면의 미세조직은 전혀 다르게 형성되었음을 알 수 있다. 즉, 외부표면은 미세한 결정립이 존재하며 조직이 치밀하고 미세한 균열이 형성되지 않았으며 전형적인 도금공정에 의한 조직이 형성되었다. SF-1 시편과 SF-12 시편에서는 상대적으로 더 작은 결정립과 미려한 표면을 관찰할 수 있었다[6,7].

니켈 도금한 시편의 표면조도를 관찰하기 위해 원자간힘현미경으로 측정하여 결과를 그림 4에 나타내었다. SUS 304의 표면과 SF-0 시편의 박리면의 표면조도는 각각 RMS(Root Mean Square)값이 70.4 nm와 77.8 nm로 비슷한 경향을 보였으며, SF-0 시편의 외부표면은 121.6 nm로 오히려 증가하였다. 그러나 SF-1과 SF-12의 RMS값은 각각 42.1 nm와 11.4 nm로 감소하여 광택제 첨가에 의해

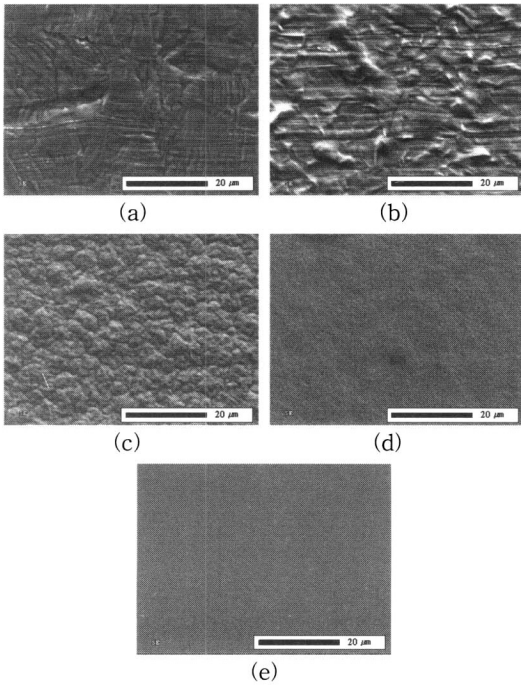


그림 3. (a) SUS 304 기판과 (b) SF-0 시편의 박리면 및 (c) 표면, (d) SF-1 시편의 표면과 (e) SF-12 시편의 표면 SEM 미세조직.

Fig. 3. SEM micrographs of (a) SUS 304 template, (b) rear and (c) front surfaces of SF-0, (d) front surfaces of SF-1 and (e) SF-12.

표면조도가 향상되었음을 알 수 있었다. 이러한 현상은 결정립 크기의 변화와 leveling 효과에 의해 설명될 수 있다[8]. 그림 3에서 보듯이 광택제를 첨가한 시편은 SF-0 시편보다 결정립의 크기가 작으므로 이로 인해 표면조도가 향상될 수 있다[9]. 또한, 광택제와 같은 유기물 첨가제는 일반적으로 음극표면에서 흡착되어 거친 부분의 돌출된 부위(peaks)에서 우선적으로 흡착되어 이 부위에서 도금이 진행되는 것을 방해하고, 따라서 광택제가 흡착되지 않는 계곡(valleys) 부위에서 도금이 상대적으로 잘 진행되도록 하는 역할(leveling)을 하며 이로 인해 표면조도가 향상된 것으로 사료된다.

도금층의 결정립 크기와 결정성을 확인하기 위해 투과전자현미경에서 분석을 하여 그림 5에 그 결과를 나타내었다. SF-0 시편은 결정립 크기가 약 40-200 nm범위로 결정립 간에 편차가 있었으며, SAD(Selected Area Diffraction) 패턴에서 보듯이

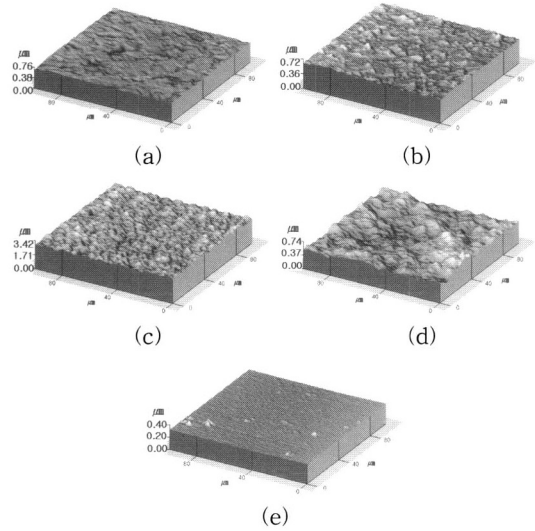


그림 4. (a) SUS 304 기판과 (b) SF-0 시편의 박리면 및 (c) 표면, (d) SF-1 시편의 표면과 (e) SF-12 시편의 표면의 3차원 표면조도.

Fig. 4. AFM 3D surface morphology of (a) SUS 304 template, (b) rear and (c) front surfaces of SF-0, (d) front surfaces of SF-1 and (e) SF-12.

도금조직에서 일반적으로 관찰되는 비정질(amorphous) 영역은 관찰되지 않았다. SF-1 시편은 결정립 크기가 약 10-40 nm로 감소하였으며 비교적 결정화도가 우수하였다. 또한 SAD 패턴에서 결정립의 배열은 무질서함을 확인할 수 있었고, 면지수 확인 결과 (111), (200), (220), (311) 면들이 형성된 것을 알 수 있었다. SF-12 시편의 결정립 크기는 약 5-40 nm로 SF-1과 비슷하고 SAD 패턴에서 산란(diffused)spots의 형성으로 알 수 있듯이 비정질 영역이 존재하며 결과적으로 결정립과 비정질 영역이 혼재하고 있다[10]. 그러므로 광택제인 SF-1 용액은 결정립의 크기를 감소시키는 역할을 하는 것으로 사료되며, SF-1과 SF-2의 광택제를 함께 첨가한 경우에는 결정립의 미세화와 함께 비정질상을 형성시키는 시너지(synergy) 효과가 있는 것으로 판단된다.

광택제를 첨가한 경우에 결정립이 감소하는 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다. 일반적으로 광택제는 C-H-O 기의 유기물로서 표면의 활동도를 높이는 목적으로 첨가되며 성장하는 도금층의 표면에 흡착된다. 도금공정 동안에 형성되는 핵(nucleus)을 코팅하게 되면 핵성장이 제한되어 미세한 결정립

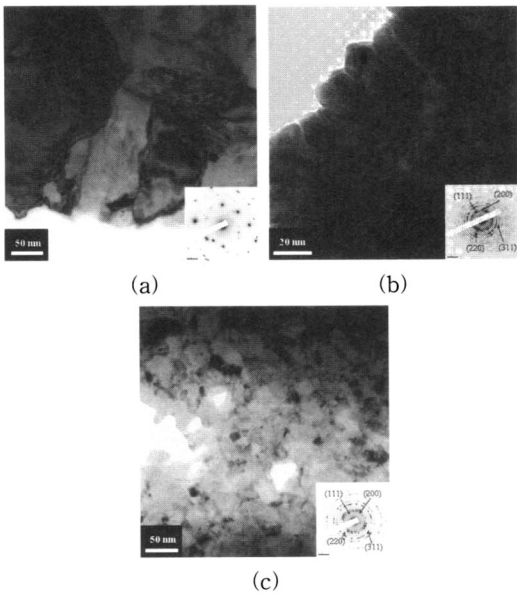


그림 5. (a) SF-0과 (b) SF-1, 그리고 (c) SF-12 시편의 TEM 영상과 SAD 패턴.
 Fig. 5. TEM images and SAD patterns of (a) SF-0, (b) SF-1, and (c) SF-12.

을 유도할 수 있다. 또한 도금공정 중에 니켈수산화물(Ni hydroxide)과 수소가 형성되는데 광택제를 첨가하면 이들의 형성이 촉진되는 것으로 알려져 있으며, 이들 물질도 음극표면에 흡착되어 결정성장을 방해함으로써 결정립을 미세하게 하는데 기여하는 것으로 판단된다(inhibited process)[11]. 광택제를 첨가함으로써 결정화도가 감소하는 이유로 결정립이 수십 nm 정도의 크기로 감소한 것과 일부 연관이 있는 것으로 사료된다.

니켈 도금기판의 기계적인 특성을 평가하기 위하여 도금시편의 경도값을 그림 6에 나타내었으며 상용화된 SUS 304 기판의 경도값도 측정하여 비교하였다. SF-0 시편은 경도값이 227.3 Hv(비커스 경도)로 가장 낮았으며 SF-1 시편은 294.3 Hv로 조금 상승하였다. SF-12 시편의 경도값은 638.2 Hv로써 가장 높으며 SUS 304 기판의 경도값(416.0 Hv) 보다 높은 값으로 측정되었다. 이러한 큰 증가는 미세한 결정립과 비정질 영역의 존재에 의한 것으로 판단되며, 경도값은 결정립의 크기가 감소함에 따라 증가하지만 SF-1과 SF-12 시편에서 결정립의 크기가 큰 차이를 보이지 않음을 감안하면 비정질 영역의 존재가 경도값에 더 크게 기여한 것으로 생각된다[12].

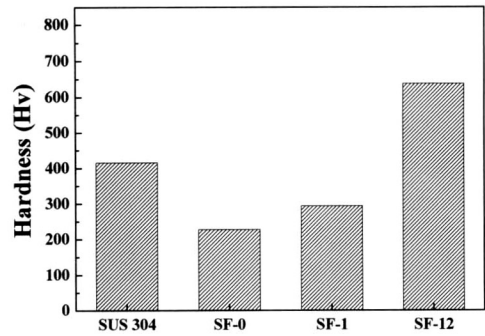


그림 6. SUS 304 기판과 니켈도금기판의 경도.
 Fig. 6. Hardness of SUS 304 template and Ni electroplates.

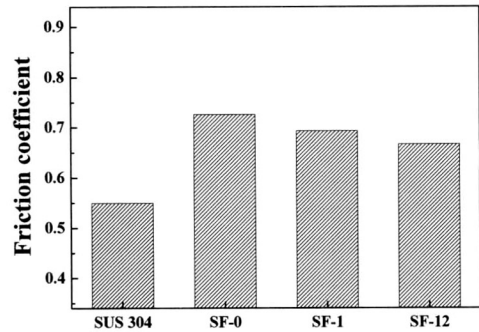


그림 7. SUS 304 기판과 니켈도금기판의 마찰계수.
 Fig. 7. Friction coefficient of SUS 304 template and Ni electroplates.

메탈마스크를 이용한 스크린프린팅 공정에서 스퀴저(squeezer)의 왕복운동으로 인해 메탈마스크를 마모시키고 수명을 감소시키므로 마찰특성을 평가하였다. 동일한 두께의 SUS 304 기판과 니켈 도금기판의 마찰계수값을 측정하여 그림 7에 나타내었다. 마찰계수값은 SUS 304 기판이 0.55로 가장 낮아 니켈 도금시편보다 내마모 특성이 우수하였으며, SF-0 시편은 0.72, 그리고 SF-1과 SF-12 시편은 마찰계수값이 각각 0.69와 0.67로 감소하는 경향을 보였다. 일반적으로 마찰계수값은 시편의 마모량과 비례관계에 있으며 시편의 마모정도가 증가할수록 마찰계수값은 커지고 내마모 특성은 저하된다. 또한 Archard's law에서와 같이 마모량은 마찰계수에 비례하고 경도값에 반비례한다고 알려져 있으며[13,14], 따라서 SF-12 시편은 다른 두 니켈 도금시편에 비해 낮은 마찰계수와 높은 경도값으로 인해 내마모 특성은 향상된 것으로 판단된다.

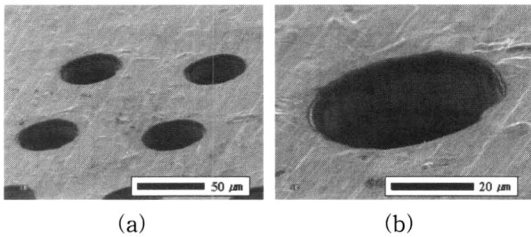


그림 8. SF-12 메탈마스크의 (a) 650 배율과 (b) 2,000 배율 SEM 미세조직.

Fig. 8. SEM micrographs of SF-12 metal mask : (a) $\times 650$ and (b) $\times 2,000$ magnification.

마지막으로 SF-12 메탈마스크의 미세패턴 형상을 그림 8에 나타내었다. X선 회절분석(X-ray Diffraction) 및 에너지분산 X선 분광분석기(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 관찰 결과 순수한 니켈이 형성되었으며 2상은 관찰되지 않았다. 그림에서 보듯이 홀(hole)의 직경은 $50 \mu\text{m}$, 피치크기는 약 $100 \mu\text{m}$ 로 제조되었으며 패턴의 형상 및 간격이 균일하였다. Nd-YAG 레이저법과 photo-etching 방법으로 제조되는 메탈마스크의 홀 내벽에는 불균일한 요철이 형성되는 반면에 그림 8에서는 이러한 결함이 관찰되지 않고 홀 내벽이 미려한 것으로 확인할 수 있었다. 이는 사진식각공정으로 형성된 양각의 감광패턴의 외벽이 미려하기 때문에 니켈 도금이 이 미려한 외벽을 따라서 성장하여 패턴내벽을 형성하였기 때문이다. 그러므로 본 실험에서 제조된 니켈 메탈마스크에서 크립슬더의 빠짐성은 우수할 것으로 판단되며 현재 사용되는 Nd-YAG 레이저법으로 제조된 SUS 304 메탈마스크를 대체할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 실험에서 사진식각공정과 전주도금공정으로 니켈 메탈마스크를 제조하였으며 광택제의 첨가에 따라 미세조직과 기계적 특성의 변화를 연구하였다. 광택제를 첨가함에 따라 시편의 미세조직은 상당히 변화하였으며 SF-1과 SF-2 광택제를 함께 첨가한 시편은 결정성과 비정질 영역이 혼재되어 있으며 결정립 크기가 $5\text{-}40 \text{ nm}$, 표면조도는 RMS값이 11.4 nm 로 관찰되어 다른 시편보다 더 미세하고 우수한 표면특성을 가지는 것으로 관찰되었다. 또한 이 시편의 경도값은 638.2 Hv , 마찰계수값은 0.67 로써 내마모 특성도 우수하였다. 미세한 결정

립이 형성되는 원인으로는 도금공정 동안에 광택제에 의해 핵생장이 억제되었기 때문으로 판단되며 미세한 결정립과 낮은 결정화도에 의해 우수한 경도 및 내마모 특성을 갖는 것으로 사료된다. 이 시편에서 패턴의 홀 직경은 $50 \mu\text{m}$, 피치크기는 약 $100 \mu\text{m}$ 이며, 패턴의 형상 및 간격이 균일하고 홀의 내벽도 미려하게 제조되어 기존의 SUS 304 메탈마스크를 대체하여 상용화 할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-03-04) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] J. Kloeser, K. Heinrich, E. Jung, L. Lauter, A. Ostmann, R. Aschenbrenner, and H. Reichl, "Low cost bumping by stencil printing: process qualification for $200 \mu\text{m}$ pitch", Microelectronics Reliability, Vol. 40, p. 497, 2000.
- [2] C.-W. Ju, S.-J. Kim, K.-H. Pack, H.-T. Lee, B.-S. Han, S.-S. Park, and Y.-I. Kang, "Fabrication of wafer level fine pitch solder bump for flip chip application", J. of KIEEME(in Korean), Vol. 14, No. 11, p. 874, 2001.
- [3] Y. P. Kathuria, "L3: Laser, LIGA and lithography in microstructuring", J. Indian Inst. Sci., Vol. 84, p. 77, 2004.
- [4] Marc J. Madou, "Fundamentals of micro-fabrication", CRC press, p. 35, 2002.
- [5] M. Meozzi, "Special use of the ball on disc standard test", Tribology International, Vol. 39, p. 496, 2006.
- [6] Y. Y. Wu, D.-Y. Chang, D.-S. Kim, and S.-C. Kwon, "Effects of 2-butyne-1,4-diol on structures and morphologies of electroplating Ni-.W alloy", Surface and Coatings Technology, Vol. 162, p. 269, 2003.
- [7] P. Sibley and P. A. Brook, "The effect of addition agents on the electrical resistivity of electrodeposited nickel", Electrodeposition

- and Surface Treatment, Vol. 1, p. 439, 1972.
- [8] N. Kanani, "Electroplating : Basic principles, processes and practice", Elsevier, p. 63, 2004.
- [9] C.-M. Cheng and R.-H. Chen, "Experimental investigation of fabrication properties of electroformed Ni-based micro mould inserts", *Microelectronic Engineering*, Vol. 75, p. 423, 2004.
- [10] David B. Williams and C. Barry Carter, "Transmission electron microscopy : Diffraction", Springer, p. 274, 1996.
- [11] Frederick A. Lowenheim, "Modern electroplating", Wiley, p. 26, 1942.
- [12] K. P. Wong, K. C. Chan, and T. M. Yue, "Influence of spike current in different shaped waveforms on the hardnesses and grain size of nickel electroforms", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 117, p. 97, 2001.
- [13] R. Liu and D. Y. Li, "Modification of Archard's equation by taking account of elastic/pseudoelastic properties of materials", *Wear*, Vol. 251, p. 956, 2001.
- [14] K. Holmberg, "A concept for friction mechanisms of coated surfaces", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 56, p. 1, 1992.