

Effect of surface roughness of AlN substrate and sintering temperature on adhesion strength of Ag thick film conductors

Bon Keup Koo[†]

Department of Materials Science and Engineering, Hanbat National University, Daejeon 34158, Korea

(Received May 4, 2020)

(Revised May 15, 2020)

(Accepted May 18, 2020)

Abstract The effect of substrate surface roughness and sintering temperature on the adhesion strength of Ag-based thick film conductors formed on AlN substrates with excellent thermal conductivity was studied. The adhesion strength of the thick-film conductor manufactured using an AlN substrate having a surface roughness (R_a) of 0.5 was higher than that of a thick-film conductor manufactured using a substrate having a surface roughness greater or smaller than this. In the case of a substrate with a surface roughness of less than 0.5, the contact area between the Ag thick film conductor and the substrate was relatively smaller than that of a substrate with a surface roughness of 0.5, resulting in a lower adhesive strength. On the other hand, when a substrate having a surface roughness of more than 0.5 was used, it was found that the conductor film was not completely adhered to the substrate, and as a result, it was found that the adhesive strength was small. In addition, it was found that the surface smoothness of the Ag-based thick film conductor film obtained by sintering at 850°C was the best compared to the smoothness of the conductor film obtained by sintering at different sintering temperatures, and as a result, it was found that the adhesive strength of the conductor film was the highest.

Key words Thick film technology, AlN substrate, Ag conductor, Glass frit, Surface roughness, Sintering temperature, Adhesion strength

AlN 기판의 표면조도 및 소결온도가 Ag 후막도체의 접착강도에 미치는 영향

구본규[†]

한밭대학교 공과대학 신소재공학과, 대전, 34158

(2020년 5월 4일 접수)

(2020년 5월 15일 심사완료)

(2020년 5월 18일 게재확정)

요약 열전도성이 우수한 AlN 기판에 형성되는 Ag계 후막도체의 접착강도에 미치는 기판 표면조도 및 소결 온도의 영향을 연구하였다. 표면조도(R_a)가 0.5인 AlN 기판을 사용하여 제조한 후막도체의 접착강도가 이보다 표면조도가 크거나 또는 작은 기판을 사용하여 제조한 후막도체의 경우보다 높게 나타났다. 표면조도가 0.5보다 작은 기판의 경우 Ag 후막도체와 기판 사이의 접촉면적이 표면조도가 0.5인 기판보다 상대적으로 작아 접착강도가 작게 나타났다. 한편, 표면조도가 0.5보다 큰 기판을 사용한 경우에는 도체막이 기판에 완전히 접착되지 못하는 현상이 나타났고, 이로 인해서 접착강도가 적게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 850°C에서 소결하여 얻어진 Ag계 후막도체 막의 표면 평활도가 다른 소결 온도에서 소결하여 얻어진 도체막의 평활도에 비해 가장 우수하였고, 이로 인해 도체막의 접착강도가 가장 높게 나타남을 알 수 있었다.

1. 서론

최근 증계기 등의 이동통신 기기에 많이 사용되는 고주파 부품인 감쇠기(attenuator) 등이 크기가 작은 칩 형

태의 부품이 요구되면서 이동통신용 고주파 저항 부품 제조에 있어 후막기법(thick film technology)이 널리 이용되고 있다[1-3]. 이러한 후막기법은 제조공정이 간편하고 생산 속도가 빠르며 비교적 저렴한 설비를 이용할 뿐만 아니라 마스크의 패턴 형태에 따라 다양한 모양의 막을 제조할 수 있다는 장점이 있어 오래전부터 혼성집적회로(HIC, hybrid integrated circuit)와 적층세라믹커패시터

[†]Corresponding author
E-mail: koobk@hanbat.ac.kr

(MLCC, multi layer ceramic capacitor) 등의 칩부품 제조에 널리 활용되고 있다[4-7].

후막기법은 일반적으로 인쇄성이 있는 페이스트(paste) 형태의 도체, 저항체, 유전체 등의 물질을 Al_2O_3 나 AIN 등과 같은 세라믹 기판이나 $BaTiO_3$, LTCC(Low temperature cofired ceramics) 등과 같은 전자세라믹 소재 위에 스크린 인쇄기(screen printer)를 이용하여 인쇄하여 막을 형성한 후 벨트로(belt furnace) 등에서 소성하여 다양한 막을 제조하는 방법을 말한다. 이러한 후막기법에서 사용되는 장비는 다양한 공정변수를 정밀하게 제어할 수 있는 스크린 인쇄기와 유기물 결합제(organic vehicle)의 연소와 구성물질의 소결을 동시에 할 수 있는 벨트로 등이 주로 사용된다. 이때 소결은 특수한 성분 소재의 경우를 제외하고는 대부분 대기 분위기에서 행하여진다[8,9].

고출력 초고주파 저항인 감쇠기 등은 열이 많은 발생하는데 이 열은 고주파 저항부품 뿐 아니라 모듈 전체에 좋지 않은 영향을 미치므로 사용 중 발생하는 열을 효과적으로 방출하는 것은 매우 중요하다. 따라서 최근에는 고주파 저항 부품을 Al_2O_3 기판보다 고열전도성 기판으로 알려진 AIN 기판을 사용하여 제조하고 있다. 이때 기판을 통해 열을 잘 발산하기 위해서는 도체막과 기판의 접착이 잘 이루어 져야 한다. 도체 페이스트는 은(Ag) 등의 금속분말과 저융점의 프릿트 등의 고체 분말의 물질을 유기 vehicle에 혼합하여 제조한다. 도체 페이스트는 세라믹 기판에 인쇄하여 소성하는 과정에서 유리상의 프릿트가 먼저 녹아 기판에 금속막을 접착시키는 역할을 하는데 이때 프릿트의 용착 상태에 따라 막의 접착강도가 크게 차이가 나게 된다[10]. 특별히 후막 기법은 일정한 온도로 유지된 벨트로를 이용하여 매우 빠른 속도로 소성이 일어나므로 프릿트의 유동 특성이 매우 중요하다. 따라서 기판의 표면상태가 용착에 중요한 변수가 된다. 또한 소결후 도체막의 상태 역시 저항 및 접착강도에 영향을 미치므로 이에 관한 체계적인 연구가 필요하다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 AIN 기판의 표면조도와 소결온

도가 Ag 도체막의 접착 특성에 미치는 영향을 연구하기 위하여 표면조도가 다른 기판에 Ag 도체막을 인쇄한 후 벨트로와 고온 머플로에서 소결온도를 달리하여 막을 제조한 후 도체막의 접착강도를 측정하므로써 최적의 AIN 기판의 표면조도와 소결온도를 밝히는데 목적을 가지고 연구를 하였다.

2. 실험 방법

2.1. AIN 기판 선정

Ag 후막도체막의 AIN 기판에 대한 접착강도에 미치는 AIN 기판의 표면조도와 소결온도의 영향을 연구하기 위해 제조회사인 중국 W사에서 제시한 표면조도(R_a)가 각각 0.3, 0.5, 0.7인 3종류의 기판을 선택하여 실험하였다. 이들 기판 표면의 미세구조를 전계방출주사전자현미경(FE-SEM)으로 관찰하였다. 또한, 표면조도 값을 확인하기 위해 표면조도측정기(JP/SV-524, Mitutoyo사, 일본)로 기판의 표면조도(R_a)값을 측정하였다.

2.2. 도체 페이스트

실험에 사용한 도체 페이스트는 독일 H사 제품으로 도전성 금속이 은(Ag)인 도체 페이스트를 사용하였다. 페이스트에 포함된 조성을 확인하기 위해 에너지분광형 분산분석법(EDS)을 이용하여 성분을 분석하였고, 시차 주사열량계(DSC)와 열중량분석기(TGA)를 이용하여 페이스트의 열적 거동을 확인하였다.

2.3. 인쇄 및 소결

AIN 기판에 스크린 프린터를 이용하여 Ag 도체막을 인쇄한 후, 인쇄막의 평활도 유지를 위해 대기중에서 10분간 유지하였다. 그 후 이 시편을 최고온도가 800~900°C

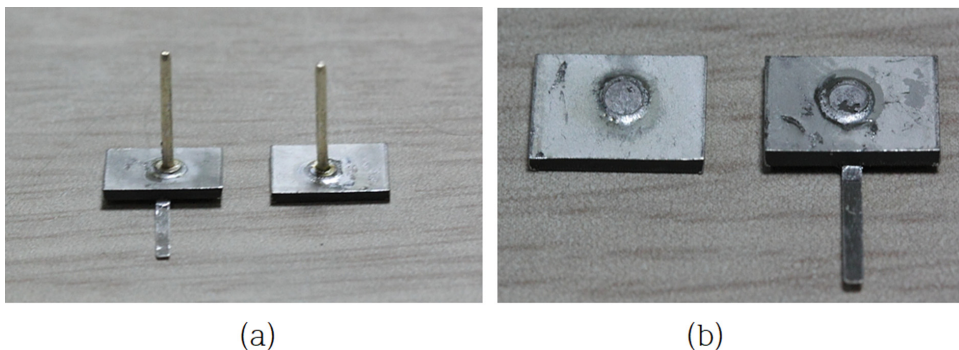


Fig. 1. View of specimen before (a) and after (b) adhesion test.

로 유지된 벨트로에서 처음부터 마지막까지의 시간이 30분 걸리는 속도로 소결하였다. 이때 시편은 최고온도 구간을 10분에 통과하도록 자동 설정하여 소결하였다. 한편, 소결 온도까지의 승온속도가 도체막의 특성에 미치는 영향을 비교하기 위해 머플로에서도 소결하여 시편을 제조하였다. 이 경우 10°C/min의 승온속도로 상온에서 600°C까지 올린 후 10분간 유지하여 유기물질을 완전연소한 후 동일한 승온속도로 소결 온도까지 승온하였고 최고온도에서 10분간 소결한 후 로냉하였다.

2.4. 물성측정

벨트로에서 소결하여 얻은 도체 막의 표면과 단면을 FE-SEM으로 관찰하였고, Tensile Strength Tester(DFM-100)를 이용하여 접착강도를 측정하였다. 접착강도 실험 방법은 다음과 같은 순서로 하였다. 먼저 도체막 위에 solder 크립을 바른 후, 핀(pin)을 도체막의 중앙에 올려서 납땜(soldering)을 한 후(Fig. 1(a)) 인장강도 시험기에 연결하여 접착강도를 측정한다. 이때 측정 단위는 kg로 설정하였다. 측정 후 시편의 모습을 Fig. 1(b)에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. AlN 기판의 분석결과

Figure 2는 실험에 사용한 표면조도가 다른 3종류의 기판 표면을 FE-SEM으로 관찰한 미세구조 사진이다. 표면조도(R_a)가 0.3인 기판의 경우 표면이 많이 연마되어 요철이 크지 않다는 것을 알 수 있었으며, 이 보다 표면조도가 큰 기판에서는 표면조도가 클수록 요철이 큰 것을 알 수 있었다. 한편 Fig. 3은 표면조도를 확인하기 위해 표면조도를 표면조도측정기로 직접 측정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 제조사에서 제시한 기판의 표면조도 값과 거의 유사한 결과가 나왔으며 표면조도가 0.7인 기판의 경우 표면조도가 작은 경우보다 표면에 좁고 깊은 요철이 많다는 것을 알 수 있었다.

3.2. 도체 페이스트의 분석결과

Table 1은 실험에 사용한 Ag 페이스트의 EDS로 분석한 조성분석의 결과이다. 표에서 보는 바와 같이 도체페이스트의 금속 성분은 Ag이며 프릿트의 주성분은 CoO,

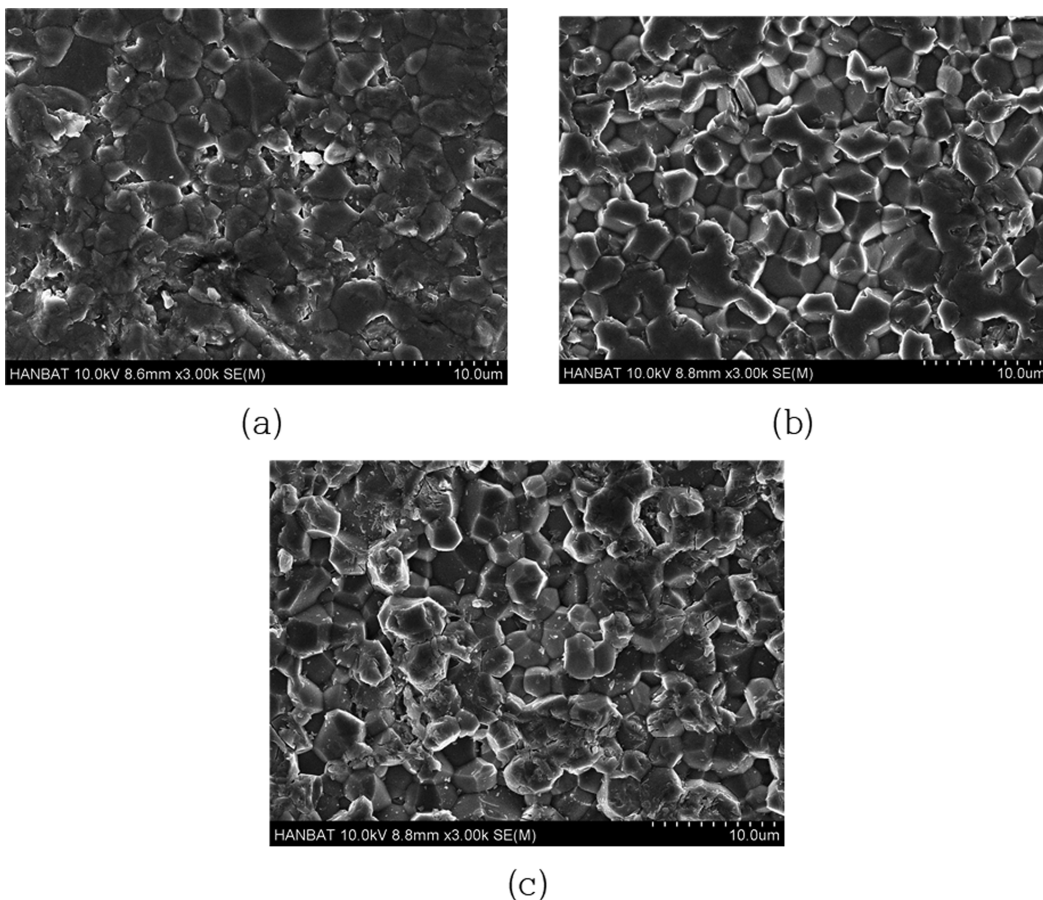


Fig. 2. The surface morphology of AlN substrates. (a) $R_a = 0.3$, (b) $R_a = 0.5$, (c) $R_a = 0.7$.

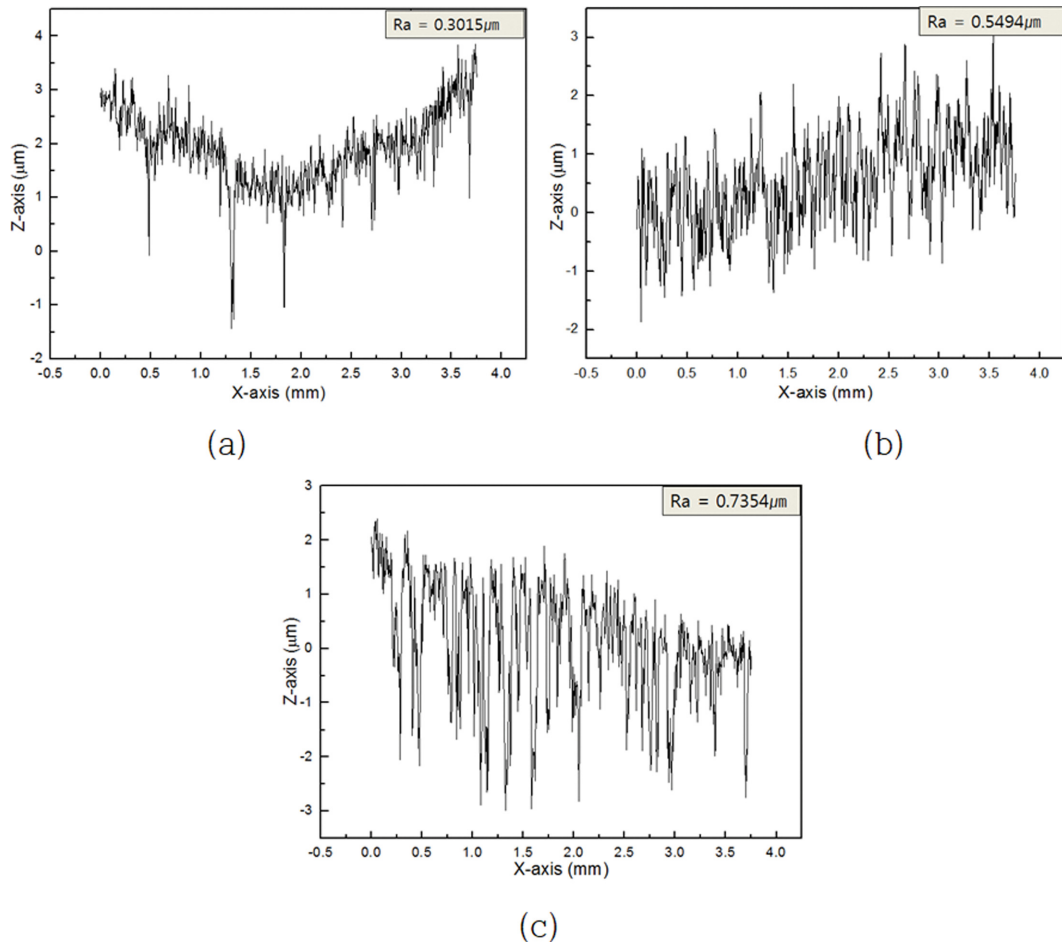


Fig. 3. Surface roughness of AlN substrates. (a) $R_a = 0.3$, (b) $R_a = 0.5$, (c) $R_a = 0.7$.

Table 1
Compositions of Ag paste by EDS analysis

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| O K | 1.58 | 9.20 |
| Mg K | 0.36 | 1.36 |
| Al K | 1.10 | 3.78 |
| Ti K | 1.53 | 2.97 |
| Co K | 0.44 | 0.69 |
| Ag L | 95.00 | 82.00 |
| Totals | 100 | 100 |

MgO, Al₂O₃, TiO₂가 포함되어 있었으나 유리 형성물질로 널리 사용되는 SiO₂가 검색되지 않은 것으로 보아 B₂O₃가 유리 형성물질로 사용되었을 것으로 예측되었고, PbO가 없는 무연계프리트(Lead free glass frit)를 사용한 페이스트임을 알 수 있었다.

Figure 4는 페이스트의 열분석 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 vehicle 물질인 유기물질은 400°C 이하에서 모두 연소가 일어났으며 DSC 그래프의 형상으로 관측한 결과 유리상인 프리트의 전이온도는 500°C 근방임을 알 수 있었다. 따라서 이를 바탕으로 프리트의 용융 온도는

약 700°C 정도일 것이라는 것을 예측할 수 있었다.

3.3. AlN 기판 표면조도에 따른 접착강도 실험 결과

Figure 5는 3종류의 기판의 표면조도가 다른 AlN 기판에 Ag 도체막을 인쇄한 후 벨트로에서 소결한 시편의 접착강도 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 표면조도 (R_a)가 0.5인 기판을 이용하여 850°C에서 소결한 시편의 접착강도가 가장 높게 나타났으며, 800°C 이상의 다른 모든 온도에서 소결한 경우에서도 이와 유사한 결과를 얻었다. 이는 다음과 같이 해석 할 수 있다. 기판의 표면조도가 작은 경우($R_a = 0.3$)는 도체막과 기판의 접촉면적이 작아 접착강도가 낮게 나타났으며, 한편, 기판의 표면조도가 큰 경우($R_a = 0.7$)에는 기판에 대한 유리상의 접촉 면적이 커서 접착강도가 클 것으로 예상할 수 있지만 벨트로에서 소결할 경우에는 승온속도가 빠르므로 프리트가 용융되어 낮은 점도의 상태인 액상의 유리상이 기판의 틈새 깊은 곳까지 충분히 스며들지 못할 것으로 생각되며 이로 인해 기판이 미세한 틈에 유리상이 완전히 접촉되지 못하는 부분이 생길 것으로 예측된다. 따라서

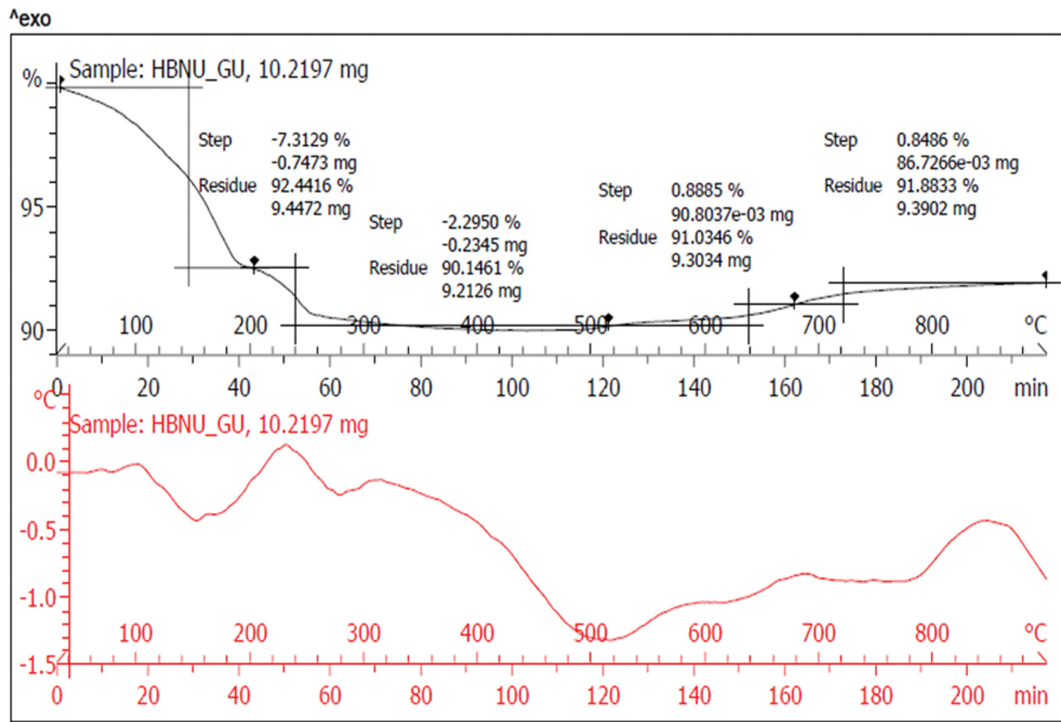


Fig. 4. DSC/TGA curves of Ag paste.

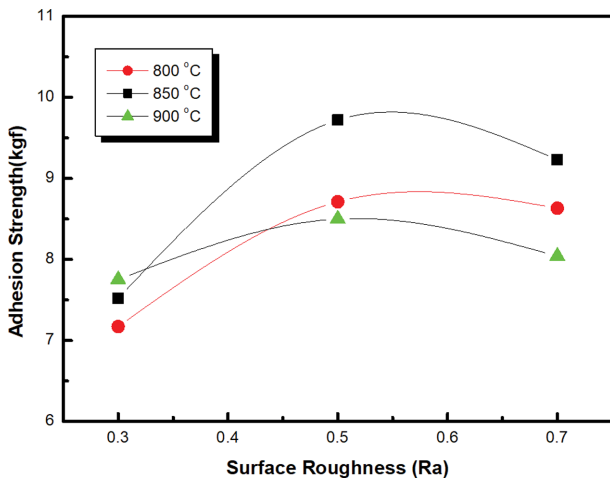


Fig. 5. The influence of surface roughness on the adhesion strength of the thick film Ag sintered in a belt furnace.

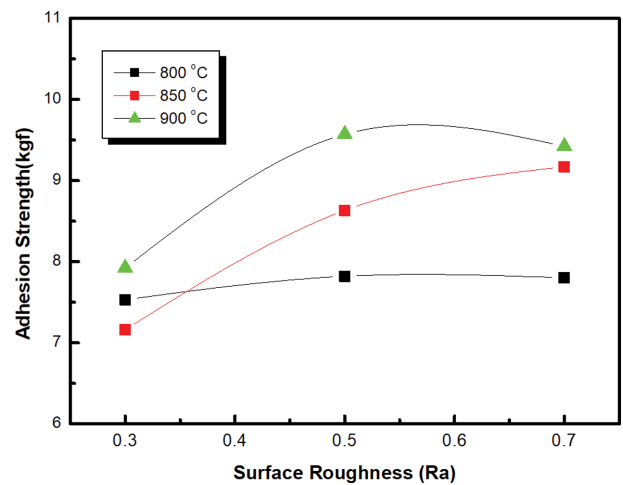


Fig. 6. The influence of surface roughness on the adhesion strength of the thick film Ag sintered in a muffle furnace.

유리상과 기판의 접촉면적이 표면조도가 0.5인 경우보다 작을 수 있어 나타나는 현상으로 해석된다.

반면, Fig. 6은 Fig. 5에서 사용한 것과 동일한 시편을 머플로에서 소결한 경우의 기판의 표면조도에 따른 접착 강도의 결과이다. 앞의 Fig. 4와 다르게 기판조도가 클수록 접착강도가 높게 나타남을 알 수 있었는데 이는 머플로의 경우 승온속도가 느려 유리상이 충분히 용융되어 기판의 깊은 곳까지 도달하여 접촉면적이 커져서 나타나는 결과라고 생각된다. Figure 7에 표면조도가 다른 기판에 인쇄한 후 850°C에서 소결한 도체막과 기판 사이

의 단면을 전자현미경으로 관찰한 미세구조를 나타내었다. R_a 가 0.3인 경우(a)와 0.5인 경우(b) 도체막이 기판에 완전히 용착되어 있음을 확인할 수 있었으나 R_a 가 0.7인 기판을 사용한 경우(c) 도체막의 기판에 대한 밀착도가 원형 선으로 표시한 바와 같이 약간 떨어지는 부분이 있음을 관찰되었다. 따라서 이러한 부분으로 인해 접착강도가 낮게 나타난 것으로 판단되었다.

이와 같은 결과를 통해 후막도체는 벨트로에서 소결하는 것이 일반적이므로 기판의 조도 R_a 가 0.7 이상으로 높거나 0.3 이하로 낮은 것 보다는 0.5 정도의 기판이

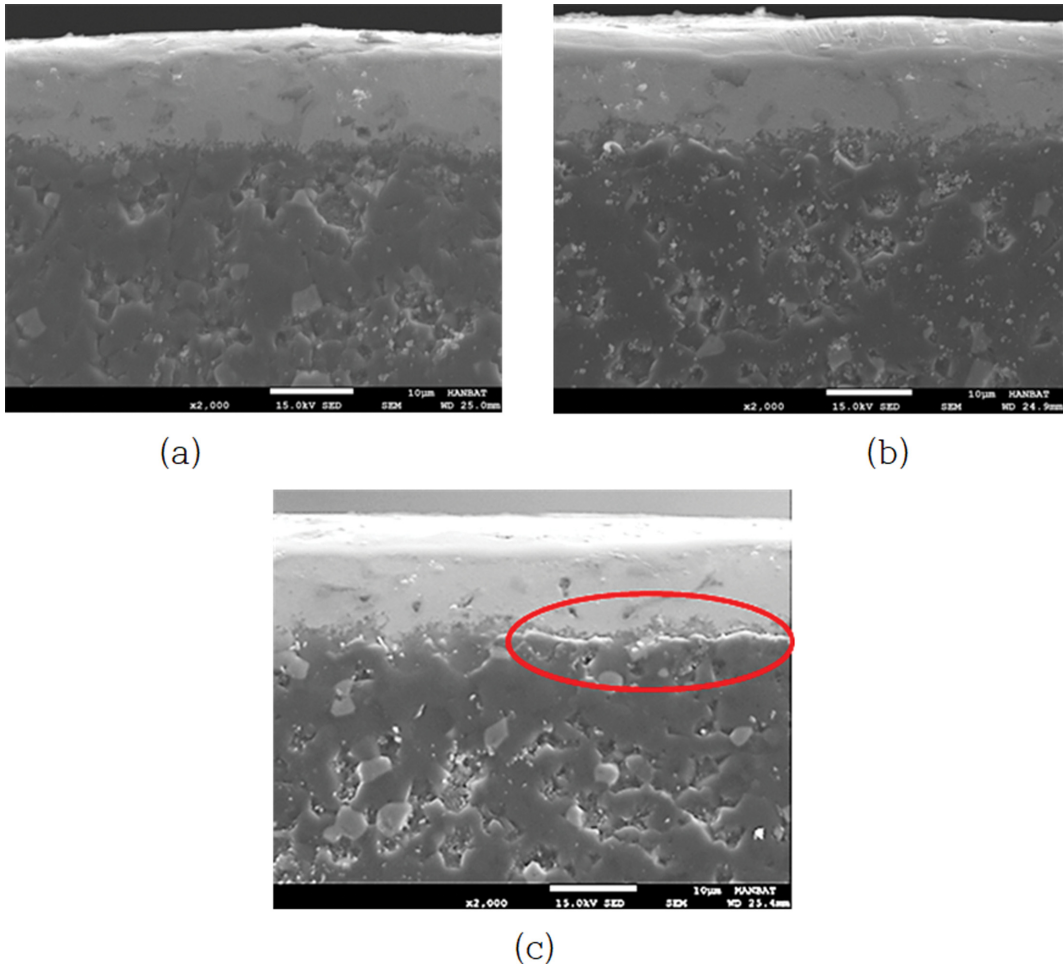


Fig. 7. Cross sectional view of sintered film on substrate of various surface roughness. (a) $R_a = 0.3$, (b) $R_a = 0.5$, (c) $R_a = 0.7$.

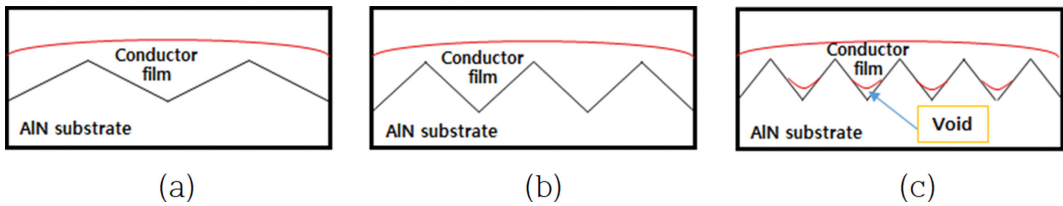


Fig. 8. Schematic diagram of sintered film on substrate of various surface roughness. (a) $R_a = 0.3$, (b) $R_a = 0.5$, (c) $R_a = 0.7$.

도체막과 기판의 융착이 양호하여 도체막의 접착강도가 우수하므로 고주파 부품의 제조에 있어 기판의 표면조도 관리는 R_a 값으로 0.5 정도로 관리하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

이와 같은 상황을 Fig. 8에 모식적으로 나타내었다. 표면조도가 작은 경우는 도체막과 기판 사이의 접촉면적이 작고 표면조도가 0.7 이상으로 큰 경우는 소결 속도가 빨라 유리상이 충분히 스며들지 못해서 기판과 막 사이에 void가 생기게 되고 이로 인해 기판과 막 사이의 접촉면적이 적어 표면조도가 0.5인 경우보다 접착강도가 적게 나타났을 것으로 생각된다.

적절한 소결온도의 설정을 위해 각기 다른 표면조도의 기판에 인쇄한 도체막의 벨트로와 머플로에서 각각 소결 온도에 따른 접착강도의 결과를 Fig. 9와 10에 나타내었다. Figure 9에서 보는 바와 같이 벨트로의 경우는 850°C에서 소결한 시편의 경우가 가장 높은 값을 보였으며 Fig. 10의 머플로에서 소결한 시편의 경우는 오히려 900°C에서 소결한 경우가 가장 높게 나타남을 알 수 있었다.

Figure 11은 R_a 가 0.5인 AlN 기판에 도체 페이스트를 인쇄한 후 벨트로를 이용하여 800~900°C 사이에서 소결한 시편의 표면과 단면을 FE-SEM으로 관찰하여 얻은

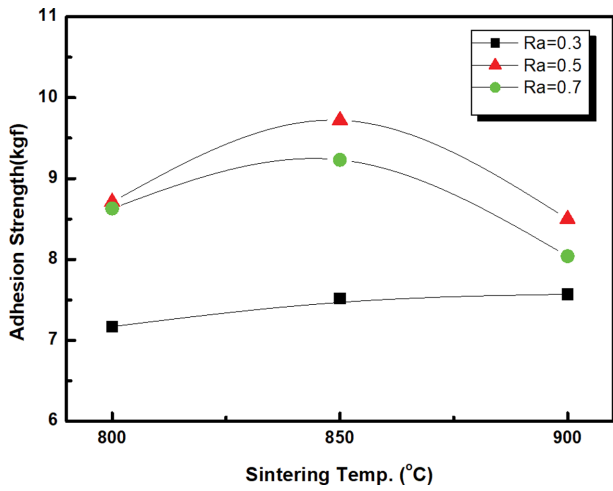


Fig. 9. The influence of sintering temperature on the adhesion strength of the thick film Ag sintered in a belt furnace.

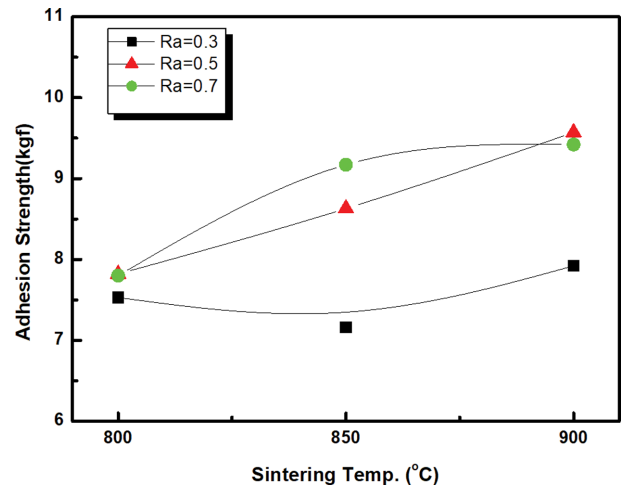
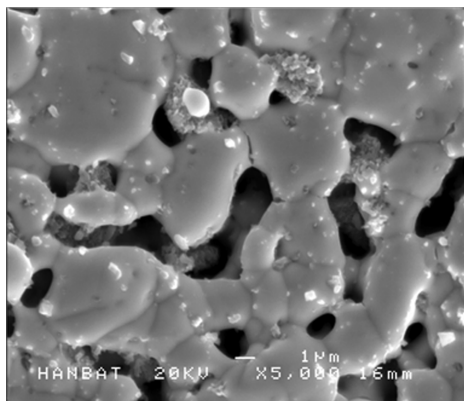


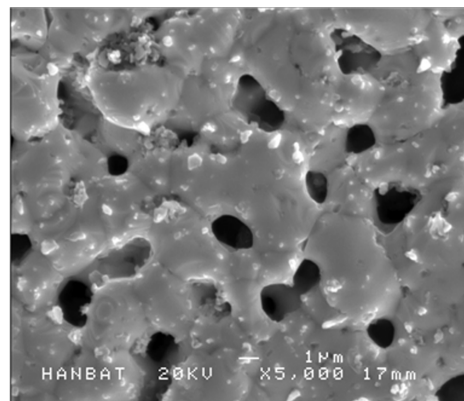
Fig. 10. The influence of sintering temperature on the adhesion strength of the thick film Ag sintered in a muffle furnace.

미세구조 사진이다. 소결온도에 증가에 따라 막의 치밀도는 증가하였으나, 875°C에서는 비록 850°C의 경우보다 치밀도는 약간 증가했지만, 결정도는 다소 떨어짐을 알 수 있었다. 이는 875°C 이상에서는 액상으로 된 프리트상이 Ag 막의 표면을 덮어 Ag가 프리트상에 부분

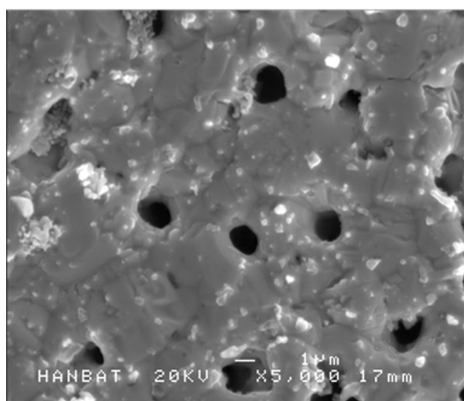
적으로 녹은 후 다시 재결정화 된 모습이라고 생각되며 900°C에서 소결한 시편에서 이러한 현상은 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다. 이로 인해 리드선이 Ag 막에 충분히 솔더링이 되지 못해 접착강도가 떨어지는 결과를 가져왔을 것으로 생각된다. 머플로에서 소결한 경우는



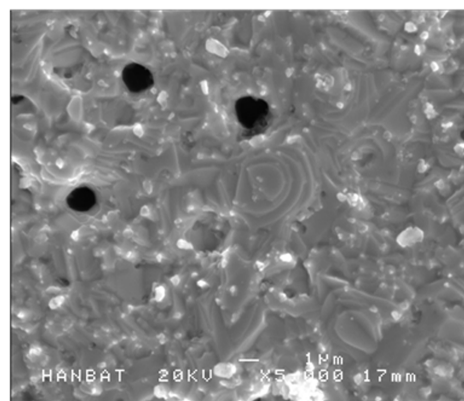
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 11. Surface morphology of Ag conductor film sintered at various sintering temperature: (a) 800°C, (b) 850°C, (c) 875°C, (d) 900°C.

소결온도가 900°C인 경우에도 접착강도가 가장 높게 나타났는데 이는 프리트트가 잘 용착되어 표면에 결정도가 떨어져 생기는 강도 저하보다 접착면적이 커짐에 따른 접착강도의 증가가 더 크게 작용하였기 때문일 것으로 생각된다.

4. 결 론

AlN 기판의 표면조도를 달리하여 Ag 도체막을 인쇄한 후 벨트로에서 소결온도를 달리하여 도체 막을 제조한 후 막의 접착강도에 미치는 기판의 표면조도와 소결온도의 영향을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) AlN 기판의 표면조도(R_a)가 0.5인 기판을 사용하여 제조한 후막도체의 접착강도가 R_a 가 0.5보다 크거나 작은 기판을 사용하여 제조한 경우보다 가장 높게 나타났다. 표면조도(R_a)가 0.5보다 작은 기판의 경우 Ag 후막도체와 기판 사이의 접촉면적이 상대적으로 작아 접착강도가 작게 나타났으며 표면조도가 0.5보다 큰 기판을 사용한 경우에는 기판과 도체막 사이에 용착되지 못하는 부분이 생겨서 이로 인해서 접착강도가 적게 나타났다.

2) 소결온도를 850°C로 하여 얻어진 도체 막의 표면평활도가 다른 소결온도에서 소결하여 얻어진 도체막의 평활도와 비교하면 가장 우수하였고 이 때문에 도체막의 접착강도가 9.5 kgf로 가장 높게 나타남을 알 수 있었다.

3) 본 실험에서는 이동통신용 고주파 저항부품의 제조에서는 표면조도(R_a)가 0.5인 AlN 기판을 사용하고, 도체 소결온도를 850°C로 하는 것이 가장 적합하다는 것을 알 수 있었다.

References

- [1] K.V. Subramaniam, RamBabu. Busi, B. Poornaiah and Y. Srinivasa Rao, "Microwave trimming method (MTM) of polymer thick film resistors", *Procedia Materials Science* 6 (2014) 897.
- [2] C. Ryu, D.J. Kim, B.D. Kang, B.K. Koo, J.H. Kang, K.M. Yu and K.S. Ryu, "The fabrication of RF termination power resistor (in Kor.)", *KIEEME Summer Conference* (2002) 553.
- [3] S. Choi, K. Lee, B. Song and J. Ryu, "Failure mode of high power fixed RF resistor of RuO₂ thick film on AlN substrate", *2009 Asia Pacific Microwave Conference, Singapore* (2009) 1413.
- [4] B. Su, J.E. Holmes, C. Meggs and T.W. Button, "Dielectrics and microwave properties of barium strontium titanate thick films on alumina substrate", *J. Eur. Ceram. Soc.* 23 (2003) 2699.
- [5] R. Martínez-Máñez, J. Soto, E. García-Breijo, L. Gil, J. Ibáñez and E. Gadea, "A multisensor in thick-film technology for water quality control", *Sensors and Actuators, A* 120 (2005) 589.
- [6] D. Crescini, D. Marioli and A. Taroni, "Low-cost accelerometers: Two examples in thick-film technology", *Sensors and Actuators, A* 55 (1996) 79.
- [7] C.L. Yuan, X.Y. Liu, C.R. Zhou, J.W. Xu and B. Li, "Electrical properties of lead-free thick film NTC thermistors based on perovskite - type BaCo_xCo_{2x}Bi_{1-3x}O₃", *Mater. Lett.* 65 (2011) 836.
- [8] C.A. Harper, *Handbook of Thick Film Hybrid Microelectronics*; Ch. 3, McGRAW-Hill Book Company (1982) p. 1-47.
- [9] P.J. Holmes and R.G. Loasby, *Handbook of Thick Film Technology*; Electrochemical Pub. (1976) p. 14-49.
- [10] B.K. Koo, "Effect of lead free glass frit compositions on properties of Ag system conductor and RuO₂ based resistor pastes", *J. of the KIEEME (in Korean)* 24 (2011) 200.