

전자접촉기 열화에 따른 전기적 특성 분석

최순호 

구미대학교 전기에너지과

Analysis of Electrical Characteristics Due to Deterioration of Electromagnetic Contactor

Sun-Ho Choi

Department of Electricity and Energy, Gumi University, Gumi 39213, Korea

(Received April 19, 2019; Revised June 16, 2019; Accepted July 4, 2019)

Abstract: In this paper, the changes in the electrical characteristics (arc energy, contact resistance, and bouncing phenomenon) due to the deterioration of the contact are analyzed. The results are generally consistent and can be analyzed for contact deterioration. The results of the experiment demonstrate that the arc energy is linearly related to the current when the contact samples and the voltage conditions are the same. The contact resistance varies due to multiple factors, but is generally within a certain range, and the contact deterioration can be determined. Contact stabilization can be detected by the decrease in the bouncing phenomenon due to deterioration (the change of the shape of the contact).

Keywords: Electromagnetic contactor, Contact arc energy, Contact resistance, Bouncing characteristic

1. 서론

전자접촉기는 전기적 접점을 전자석의 원리를 이용하여 간단한 작동으로 다양한 부하를 손쉽게 제어할 수 있다. 전자접촉기가 사용되기 위해서는 전기접점은 결합 시 전류가 흘러 완전한 회로를 구성하여야 하고, 통전 시 전기적 접촉저항이 낮아야 한다. 또한, 접점의 접촉이 떨어졌을 경우 전류를 차단하여야 제어기능을 확보할 수 있다. 낮은 비용으로 손쉬운 제어가 가능한 전자접촉기는 현대 저압 회로에서 많이 사용되고 있으며, 접점 원리를 이용한 광범위한 분야(스마트그리드, 전기자동차)에서의 적용이 증가하고 있다 [1,2]. 관련 기술의 적용 분야가 점차 증가함에 따라 접점 제어 분

야의 신뢰성과 수명에 대한 중요성이 높아지고 있다. 전자접촉기의 수명에 연관성이 있는 문제는 반복적인 개폐 동작으로 인한 열적·화학적 원인으로 소모되는 접점 침식(contact erosion)과 접점 표면에 오염물질(contaminants)이 증착하였을 때 발생한다. 전자접촉기 접점의 다양한 열화 인자 중 가장 큰 원인은 접점의 작동 시 발생하는 아크로 인해 접점 표면의 열화가 진행된다. 열화를 최소화하기 위해서는 아크의 발생 시 접점 표면에 고온이 발생하기 때문에 접점 물질의 이동(migration), 증발(evaporation), 용착이 일어나지 않도록 하여야 한다. 또한, 접점 소재의 탄력성(elasticity)과 유연도(softness)를 가져 릴레이 접점의 작동 시 운동 에너지를 최대한 흡수하여 바운싱 현상을 감소시킬 필요성이 있다 [3,4].

본 논문에서는 일정한 기준에서 전자접촉기의 장기적 열화 진행 시 접점의 기계적(바운싱 현상), 전기적(접촉저항) 특성 변화를 분석하였고, 이 결과를 전자접촉기 열화 사전파악에 활용할 수 있는지를 판단하였다.

✉ Sun-Ho Choi; shchoi@gumi.ac.kr

2. 실험 방법

2.1 전자접촉기 접점 열화

실험에 사용된 전자접촉기의 구조는 그림 1과 같으며, 접점의 밀착력을 높이기 위해 스프링으로 압력을 가하는 구조로 되어 있다. 이런 구조로 인하여 금속의 부딪침과 스프링의 작용으로 인한 순간적인 떨림 현상이 발생하게 되고 접점 자체에서 바운싱 현상이 발생하게 된다. 접점에서 아크가 발생할 경우 접점 열화 과정으로 아크에 의해 증발(vaporize)하고 금속 물질이 표면에서 튀어나온다. 이후 금속이 재퇴적(redeposition)하는 과정을 통해 접점의 침식이 일어난다. 만약에 전원 소스가 DC 전원일 경우 전류의 방향성이 존재하고 양극(anode)과 음극(cathode)에 특성에 맞춰 재퇴적으로 인한 각각의 특징적인 형상 변화가 발생한다. 양극일 경우에는 가동접점, 고정접점과 상관없이 돌출되는 형상을 가지고, 음극일 경우는 반대 형상을 가진다. 하지만 본 실험과 같이 AC 전원에서는 접점에 별도의 극성을 가지지 않기 때문에 DC 전원에서는와 같은 형상적 특징을 가지지 않는다.

실험에 사용된 전자접촉기의 특성과 실험 방법은 표 1과 같고 그림 2와 같은 구성을 통해 실험을 진행하였

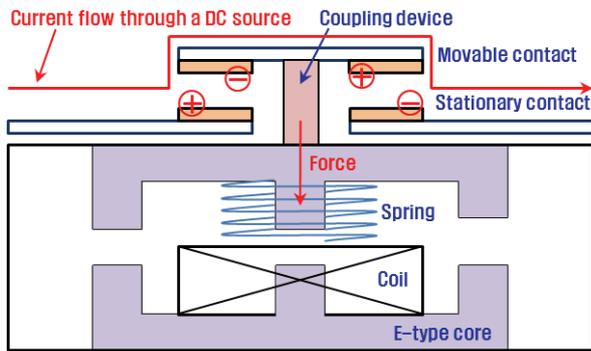


Fig. 1. Example of magnetic contactor structure.

Table 1. Test conditions.

| Contact material | Ag/CdO |
|---------------------|--------------------------|
| Circuit condition | AC 440 V / 13 A |
| Frequency/PF | 60 Hz / 1.0 |
| Load type | Non-inductive resistance |
| Switching mode | On/off=0.05s/5.95s |
| Number of operating | 10 times / 1 min |
| Surrounding gas | Air |

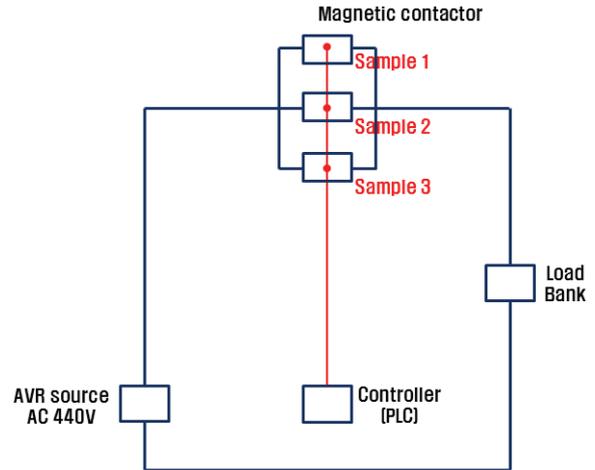


Fig. 2. Experimental apparatus.

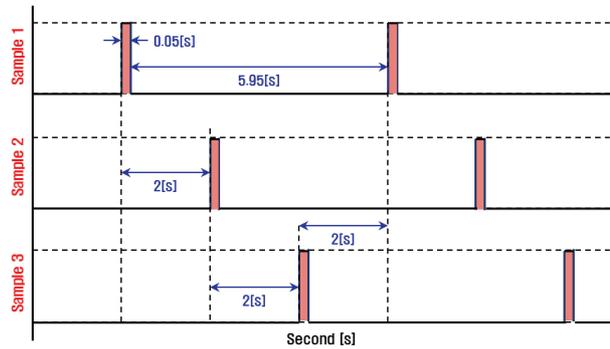


Fig. 3. PLC control signal.

다. 전자접촉기의 제어는 편의성과 장기적 안정성을 가진 PLC (M사 제품)를 적용하였다. 전자접촉기는 일정 신호 이후에 이동 위치를 유지하는 자계유지형 릴레이가 아니기 때문에 순간적인 신호 이후에는 초기 상태로 돌아오게 된다. 이렇기 때문에 그림 3과 같이 순간적인 신호로 실험을 진행할 수 있고 ON/OFF=0.05s/5.95s 기준으로 부하실험을 하였다.

2.2 접점의 아크에너지 측정

전자접촉기 접점에서 발생하는 아크 현상은 전극 사이에서 기체의 절연이 파괴되어 도통되는 현상으로 아크는 전극의 재질, 절연기체, 전류, 전압 등 다양한 원인에 의해서 변화된다. 아크기둥(arc column)의 전극 물질이 일정할 때, 아크길이에 정비례하며, 아크길이와 발열량은 정비례하게 나타난다. 접점의 개폐에 따른 아크의 파형은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다 [6-8]. 접

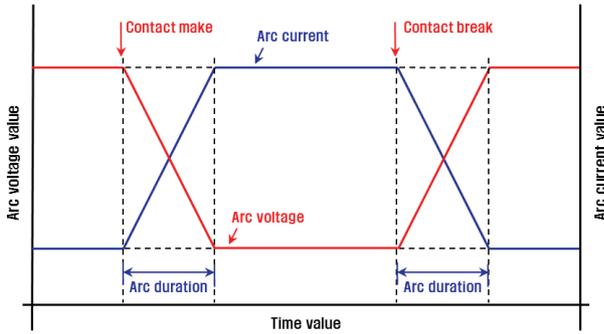


Fig. 4. Example of contact make and break arc waveform.

Table 2. Arc energy according to current.

| Current [A] | Maximum voltage [V] | Arc duration time [ms] | Arc energy [J, Ws] |
|-------------|---------------------|------------------------|--------------------|
| 1 | 165 | 0.293 | 2.65 |
| 2.5 | 131 | 0.337 | 6.19 |
| 5 | 109 | 0.372 | 11.98 |
| 10 | 90.6 | 0.383 | 22.03 |

점이 make 상태가 되면 순간적으로 전압이 떨어지고 전류가 상승하여 교차하는 형태로 직류, 교류에서 모두 나타나게 된다. 반대로 break 상태 시 전류는 떨어지고 전압이 상승하게 되며, 이를 통해 아크 지속시간과 그 시간 동안의 전압, 전류의 값을 측정할 수 있다. 본 실험에서 전류 측정은 고정밀 CT (Bergoz, CT-F0.05), 전압측정은 differential probe (Tektronix P5200)을 사용하여 아크지속시간 동안의 전압, 전류변화를 오실로스코프로 측정하였다. 아크 에너지는 측정값을 바탕으로 식 (1)과 [9,10] 같이 아크 지속시간 동안의 전압, 전류의 값을 계산하여 구하였다.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} v(t) i(t) dt \quad (1)$$

전자접촉기에서 발생하는 아크에너지의 변화를 분석하기 위해 AC 220 V/1~10 A의 변화로 실험한 결과는 표 2와 같고 전류의 크기가 증가함에 따라 최대전압은 감소하고 아크지속시간은 증가한다.

상기 전류에 변화에 따른 아크에너지의 변화를 최소자승법(method of least squares)을 사용하여 분석한 결과는 그림 5와 같고 결정계수(R^2 , coefficient of determination) 값은 0.997로 1에 매우 가까운 값을

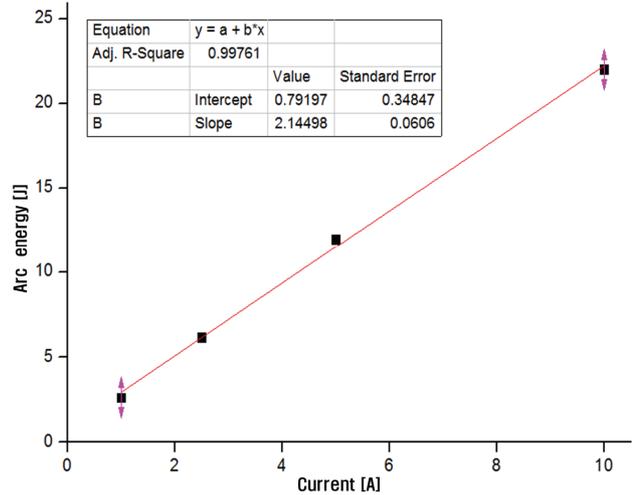


Fig. 5. Method of least squares of Arc energy.

가지고 높은 선형성을 가지는 것을 알 수 있다. 결과적으로 점점 샘플과 전압 조건이 같을 경우 전류의 값에 따라 아크에너지는 선형성을 가지고 증가한다는 것을 실험을 통해 알 수 있다.

2.3 점점 전기적 특성 변화

전자접촉기의 접점의 동작 시 결합에 의해 전류흐름 경우 전류의 통로가 좁아짐에 따라 그림 6과 같이 a-spot으로 전류가 집중하여 흐르게 된다. 접촉저항의 값은 전류의 통로가 좁아짐에 따라 발생하는 집중 저항(constriction resistance, R_c)과 도체 저항(conductor resistance, R_m)으로 나눌 수 있고, 집중 저항은 접점 표면의 형상, 표면파형(waviness), 거칠기(contaminants)와 같이 미세한 요소가 주요하게 영향을 미치게 된다. 접점은 금속인 이유로 표면에 대기 중에 노출될 경우 산화막이 형성되며, 초기 산화막이 제거되지 않을 경우 산화막 유·무에 따른 접촉저항 값의 변화를 예상할 수 있다. 일정한 부하가 진행된 이후에는 불규칙한 위치에 발생하는 아크에 의해 그림 7과 같이 아크열에 의한 실제 전류흐름 영역인 a-spot이 증가하고 산화막이 제거되기 때문에 접촉저항이 초기보다 감소하고 일정 오차범위 안에서 유지될 것을 예상할 수 있다. 이후 점점 열화에 지속해서 진행되어 접점의 표면의 특성 및 형상 변화에 의해 점점수명의 문제가 발생하였을 때 접촉저항의 급격한 증가를 예상할 수 있다. 릴레이 접점의 아크열화 실험은 ASTM B576-46 [5]을 이용해서 다양한 분석을 진행할 수 있고 이 중

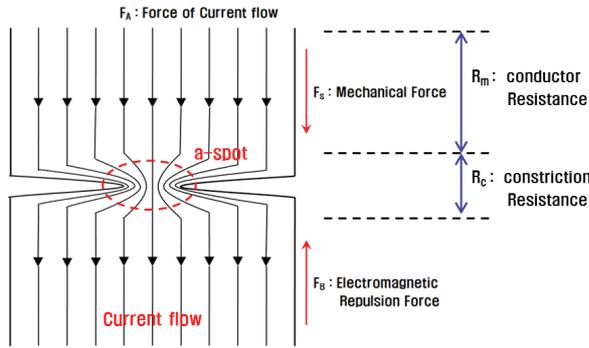


Fig. 6. Kind of power and resistance in the relay contact.

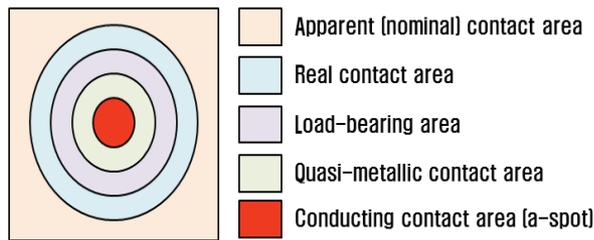


Fig. 7. Schematic of real contact area [7].

세부적인 실험기준인 ASTM B539-02 [6]에서 제시하고 있는 4선식 측정 방법(4-wire measurement)을 활용하여 접촉저항을 측정하였다.

2.4 접점의 기계적 특성 및 바운싱

전자접촉기의 접점에 사용된 접점 소재 특성은 표 3과 같다. 접점의 소재를 분석할 시 다양한 물리적 특성을 파악하여야 한다. 릴레이 작동 시 압력에 의한 변화 특성을 예상할 수 있는 요소는 탄성계수(modulus of elasticity)로서 탄성물질이 응력(stress, 압축, 인장, 굽힘, 비틀림 등의 하중(외력)에 의한 재료 내의 저항력)을 받았을 때 일어나는 변형률을 나타내는 것이다. 체적탄성계수(비압축률, k)는 압력에 저항하는 정도를 나타내는 것으로 모든 방향으로 같은 압력이 가해질 때 응력으로 이는 압력의 변화(ΔP)이다. 식 (2)과 같이 체적 탄성계수는 변형률[부피 변화(ΔV)와 초기 부피(V)의 비율]과 응력으로 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{\text{응력}}{\text{변형률}} = \frac{\Delta P}{\Delta V/V} \quad (2)$$

식 (2)에서와 같이 응력(ΔP)을 받는 물질이 변화를

Table 3. Physical properties of the contact materials.

| Element | Ag | Cd |
|--|------|------|
| Melting point (°C) | 961 | 321 |
| Modulus of elasticity (kNmm ⁻²) | 79 | 57.5 |
| Hardness (×10 ² Nmm ⁻²) | 3~7 | ≈3.5 |
| Resistivity @20°C (μΩ·cm) | 1.59 | 6.83 |

일으키지 않으면($\Delta V=0$), 그 물질은 압축불능($k = \infty$)이라 한다. 반대로 작은 응력을 받고도 부피 변화가 큰 물질은 체적 탄성계수(k)가 작으므로 쉽게 압축한다. 전자접촉기의 접점은 동작 과정에서 지속해서 응력이 가해지고 부하인가로 인해 순간적인 아크가 발생한다. 결과적으로 가해지는 기계적 힘과 전기적 에너지를 통해 접점 표면 형상이 지속해서 변화할 것이다.

또한, 접점 작동에 의한 표면에 발생하는 기계적 충격에 의한 진동을 관찰하기 위해 접점 ON/OFF 시 발생하는 바운싱 현상을 측정하였다. 바운싱 현상은 오실로스코프를 이용하여 측정하였으며, 전원소스(DC 9 V)와 저항으로 구성된 회로를 제작하여 접점 작동 시 측정되는 순간적인 DC 파형으로 열화가 진행됨에 따라 변화되는 바운싱 현상을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 접점 열화에 따른 접촉저항

전자접촉기의 접촉저항을 측정한 결과는 그림 8, 9와 같다. 그림 8의 경우는 부하를 인가하지 않은 상태이고, 그림 9는 일정한 부하(AC 440 V/13 A) 열화를 진행하면서 측정한 결과다. 부하를 인가하지 않았을 경우 대략 100 mΩ 이하를 유지하지만, 100 mΩ 이상의 급격하게 증가한 특이사항을 발견할 수 있다. 일반적으로 금속은 산화하고 표면에 옥안으로 관찰할 수 없는 산화막이 형성되기 때문에 접점 동작에 따른 기계적 압력에 의해서는 접점 산화막을 완벽하게 제거할 수 없다는 것을 알 수 있다. 하지만 RLC 접촉저항 측정기기를 통한 측정 시 일정한 전압을 흘려 측정이 진행되기 때문에 완벽한 접점 피막이 파괴되지 않은 드라이 회로(dry circuit)가 아니며, 이 때문에 100 mΩ 수준 이하를 유지한다는 것을 확인할 수 있다. 이와 반대로 접점에 일정 이상의 전류를 흘려 아크가 발생하고 물리적 변화가 일어나면 접점의 산화막이 파괴되고 실제적인

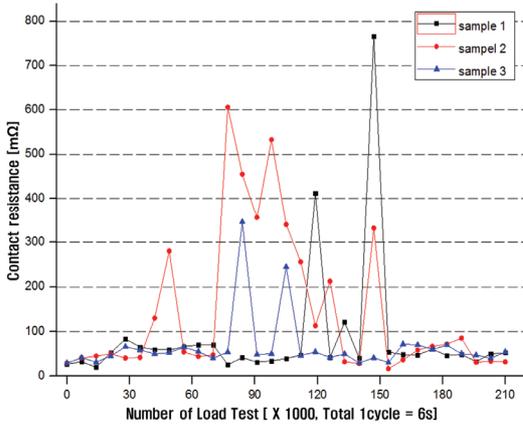


Fig. 8. Change of contact resistance due to mechanical impact.

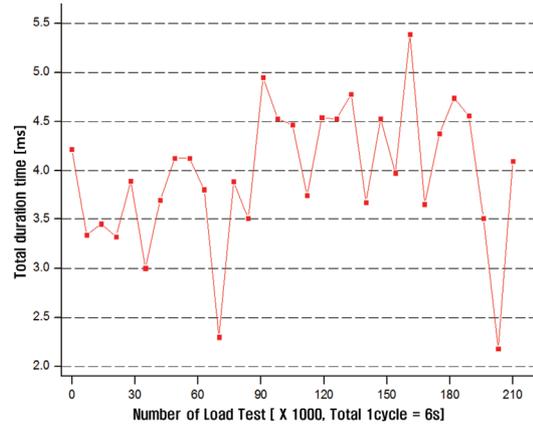


Fig. 10. Total duration time of bounce phenomenon.

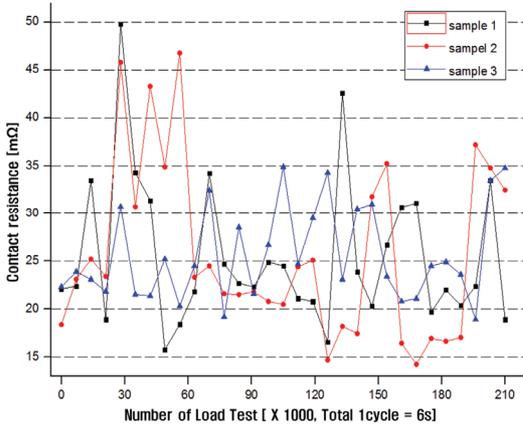


Fig. 9. Change of contact resistance due to electrical deterioration.

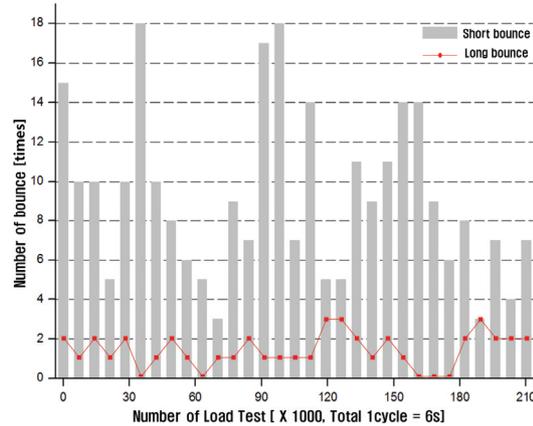


Fig. 11. Change of the bounce number.

전류흐름 통로인 a-spot이 증가할 것이며, 결과적으로 일정한 부하실험이 진행된 그림 9의 경우에는 15~50 mΩ 사이에서 접촉저항이 분포하는 것을 알 수 있다.

3.2 접점 바운싱 현상

전자접촉기 부하에 따른 접점에서 측정되는 바운싱 현상의 총 지속시간은 그림 10과 같고 수치로 전체평균 (total average)은 3.97, 표준편차(standard deviation)는 0.711이다. 바운싱 지속시간의 평균과 표준편차의 값을 바탕으로 열화가 안정적으로 진행됨을 알 수 있다. 또한, 바운싱의 지속시간은 0.2 ms 기준으로 short/long 바운싱 현상으로 분류한 후 발생하는 횟수를 비교한 결과 short 바운싱 현상은 상대적으로 많이 발생하고 long 바운싱 현상은 일정한 수준을 유지하는 것을 알 수 있다. 하지만 short 바운싱 현상은 순간적으

로 발생하는 이유로 열화에 큰 영향을 미치지 않는다고 알려져 있다. Short 바운싱 현상을 배제하고 long 바운싱의 발생 횟수와 바운싱 지속시간, 접촉저항의 결과를 통해 현재 열화가 진행되는 상태임을 유추할 수 있고 추가된 열화가 진행되어 관련된 결과의 급격한 변동이 발견되면 접점의 이상 유·무를 파악할 수 있다.

4. 결론

전자접촉기의 일정한 부하를 인가할 때 접점 열화에 따른 접점의 기계적·전기적 특성 변화를 분석하였다. 그 결과 열화 진행에 따라 분석 결과(접촉저항, 바운싱 현상)가 일정한 특성을 유지하며, 상기 특성을 이용하여 변화되는 특성을 활용하면 추후 열화 정도를 판단할 수 있다.

- 1) 접점에 작용하는 아크 에너지는 접점 작동 환경 조건이 일정하게 유지될 때 부하의 증가에 따라 아크 에너지는 선형형태로 증가한다. 이를 바탕으로 접점에서 발생하는 아크 에너지 크기와 인가 횟수를 지속해서 추적 가능하다면 접점의 수명을 예측할 수 있다.
- 2) 접촉저항은 무부하 시 충격반복 실험 시 거의 일정한 범위 내 분포한다. 하지만 열화가 진행될 시 변화가 발생하며 이는 아크에 의한 접점표면 형상 변화의 원인에서 찾을 수 있다. 접촉저항의 수치가 변화하지만 비교적 일정한 범위에 분포함을 알 수 있으며, 전자접촉기의 접점 수명한계에 도달하면 일정한 분포범위를 벗어날 것을 예상할 수 있다. 이를 바탕으로 접점 열화를 판단할 수 있다.
- 3) 전자접촉기 작동 시 순간적인 아크열과 작동 충격으로 접점의 형상이 변화한다. 형상 변화는 표면 거칠기, 3D 이미지 분석으로 확인할 수 있지만, 본 실험과 같이 바운싱 발생으로도 예측 분석할 수 있다. 접점의 형상이 안정화된다면 초기보다 바운싱의 지속시간, 발생 횟수가 감소하므로 대략적 접점 표면의 안정화 과정을 유추할 수 있다.

ORCID

Sun-Ho Choi

<https://orcid.org/0000-0001-9780-8177>

REFERENCES

- [1] S. H. Choi, K. S. Kim, J. M. Ryu, and C. S. Huh, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 115 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.2.115>]
- [2] Y. K. Ko, S. S. Cho, H. Huh, S. Y. Lee, H. T. Park, and I. S. Oh, *Proc. 2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (IEEE, Seoul, South Korea, 2009). [DOI: <https://doi.org/10.1109/isie.2009.5217784>]
- [3] J. M. Ryu, S. H. Choi, K. H. Park, and C. S. Huh, *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, **27**, 383 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.4313/jkem.2014.27.6.383>]
- [4] P. G. Slade, *Electric Contacts: Principles and Application* (CRC Press, Boca Raton, FL, 1999) p. 169.
- [5] ASTM B576-94: Standard Guide for Arc Erosion Testing of Electrical Contact Materials.
- [6] ASTM B539-02: Standard Test Method for Measuring Resistance of Electrical Connections (Static Contacts).
- [7] M. Braunovic, N. K. Myshkin, and V. V. Konchits, *Electrical Contacts: Fundamentals, Applications and Technology* (CRC Press, Boca Raton, FL, 2006) p. 6.
- [8] J. Sekikawa and T. Kubono, *Proc. 2008 Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* (IEEE, Orlando, USA, 2008). [DOI: <https://doi.org/10.1109/holm.2008.ecp.17>]
- [9] R. Holm, *Electric Contacts: Theory and Application* (Springer, New York, 1979).
- [10] N. Wakatsuki and Y. Yonezawa, *Proc. Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts Electrical Contacts, 2004* (IEEE, Seattle, USA, 2004). [DOI: <https://doi.org/10.1109/holm.2004.1353159>]