

송배전용 Al-Cu 접속금구의 신뢰도 향상에 관한 연구(II)
 압축형 및 폭발용접형 접속금구의 내식성 비교

하운철, 배정효, 하태현, 이현구, 김대경
 한국전기연구원

Study on the Improvement of the Reliability of Al-Cu Connections
 in Power Distribution Systems (II)

Yoon-Cheol Ha, Jeong-Hyo Bae, Tae-Hyun Ha, Hyun-Goo Lee, Dae-Kyeong Kim
 Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - As there expands the usage of Al-Cu connections to interface aluminum and copper in power distribution systems, efforts to mitigate the mechanical, electrical or electro-chemical degradation are widely spreading. The explosive bonding technology, in particular, has been thought as a countermeasure for the degradation. In this paper, electrochemical analysis and optical microscopic observation are carried out in order to compare the corrosion resistivities of the commercial compression type bimetallic sleeve and the explosion type bimetallic sleeve. The results show that the explosive bonding technology can prevent the interfacial corrosion caused by the formation of crevices and pits as well as from galvanic potential difference.

1. 서 론

송배전 시스템에서 알루미늄이 광범위하게 사용됨에 따라 알루미늄과 동과의 접속이 점점 증가하고 있으며, 이에 따라 알루미늄 전선과 동 전선을 연결하는 슬리브류, 전선과 전기설비를 연결하는 압축단자류 및 변전소 개폐기에 사용되는 이질금속관에 이르기까지 이질금속 접속금구의 사용도 다양해지고 있다. 현재 국내에서는 한전 잠정표준구매시방서를 통해 압축형 접속금구를 사용토록 규정하고 있는데[1] 이러한 압축형 이질금속 금구의 경우 이질금속 접합부의 경년열화에 의해 계면으로 수분과 전해질이 침투할 수 있으며, 알루미늄과 동과의 전기화학적 전위차에 의해 갈바니 부식이 내부로 진행될 수 있다. 계면의 부식생성물은 전기저항을 증가시켜 금기가 전력 공급 중단사고와 같은 큰 재앙을 야기할 수 있다. 현장에서는 주기적으로 이러한 접속금구를 교체해 오고 있으며 이에 따른 Al-Cu 이질금속 접속금구의 부식 비용이 연간 100억원에 달해 전체 전력시스템의 부식비용의 2%에 달하고 있다.

접촉계면의 열화 메커니즘으로는 산화[2], 응력이완[3], 차등열팽창[4], 갈바니부식[5], 금속간화합물의 형성[6], 프래팅부식[7] 등 다양한 주장이 제기되어 왔다. 이러한 열화에 의해 전기저항이 초기값의 5~6배에 이르게 되면 급속한 파괴가 일어남이 보고되었다[8].

계면에서의 열화 문제를 해결하기 위한 대책으로 선진국에서는 폭발 접합 기법을 이용하여 이질금속 접속금구의 제작하고 있으나 국내에서는 관련기술이 성숙되지 못하고 있는 실정이다. 폭발 접합은 알루미늄과 동 도재에 존재하는 표면 산화물 및 계면의 오염물질을 제거할 뿐만 아니라 두 금속의 접합을 원자 거리 수준까지 접근시킴으로써 접촉 계면을 통한 전해질의 침투를 억제시키는 것으로 알려져 있다[9][10].

본 연구에서는 현재 상용화되어 있는 압축형 이질금속 접속금구와 폭발 접합 기법으로 제작된 이질금속 접속금

구의 부식성을 평가하기 위하여 전기화학적 분석 기법과 광학적 관찰을 통해 비교하였고, 이를 통해 국내 폭발 접합 기술의 성숙에 이바지 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

접속금구용 알루미늄 및 동 각각의 부식 거동에 대한 일반적인 이론적 서술은 앞서의 논문에 기술되어 있다 [11]. 여기에서는 알루미늄-동 접속부의 부식에 대한 이론적인 접근을 통하여 보다 심도있게 갈바니부식 메커니즘과 틈부식 및 공식에 대해 설명하고자 한다.

수용액에서 금속의 전기화학적 거동 또는 부식 거동은 전기화학적 전위(E)와 용액의 수소이온농도(pH)와의 관계를 도식화한 E-pH 도표 또는 Pourbaix 도표를 이용하면 쉽게 예측할 수 있다[12]. 그림 1은 1기압, 25°C에서 알루미늄-물 계에서의 E-pH 도표를 나타낸다. 그림에서 알루미늄 금속과 알루미늄 산화물의 평형 전위는 pH = 7의 중성용액을 가정할 때 약 -1.9 V vs SHE의 값을 갖는다. 이 전위는 물의 안정한 전위영역(-0.413 V vs. SHE at pH=7)보다 훨씬 낮아서 이 전위차가 구동력이 되어 알루미늄을 물의 환원반응과 부식생물 이루어면서 산화시켜 알루미늄 산화물을 형성하게 되는데 이 알루미늄 산화물은 중성 수용액에서는 매우 견고한 부동태 피막을 형성하여 알루미늄의 산화를 억제한다. 이 부동태 피막은 국부 pH가 4~9 사이에서는 매우 안정적이거나 이 범위를 벗어나는 조건, 예를 들면 염소이온 환경에서는 국부 pH가 산성화되어 부동태피막이 불안정해지는 공식이나 틈부식이 발생할 수 있다.

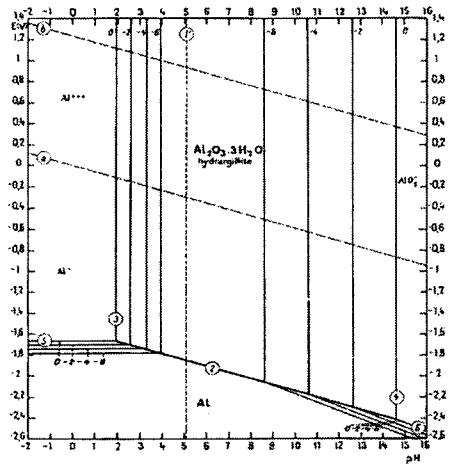


그림 1. 알루미늄의 E-pH 도표(1기압, 25°C)

반면 동은 그림 2와 같이 물의 안정한 영역 내에 공존할 수 있어서 수용액 중에서 금속 상태를 유지할 수 있으나 수용액 중에 존재하는 용존산소의 환원 반응과 부식쌍을 이루어 산화물을 형성하기도 한다. 즉 동과 동 의 1가 산화물 사이의 평형전위는 pH=7에서 0.058 V vs. SHE이며 용존산소와 물의 평형전위는 같은 조건에서 0.815 V vs. SHE이므로 이 사이의 전위차가 부식의 구동력이 되어 동 의 부식을 진행시킨다. 결국 동 의 부식전위는 1가 산화물 표면에서 1가 산화물의 2가로의 산화반응과 용존산소의 환원반응에 의해 결정된다.

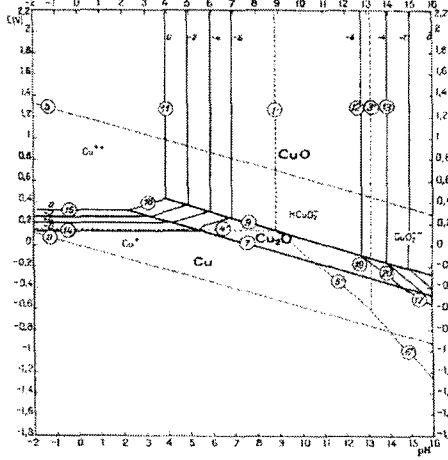


그림 2. 동 의 E-pH 도표 (1기압, 25°C)

알루미늄-동 이질금속 사이의 갈바니 부식은 따라서 알루미늄의 부식전위와 동 의 부식전위의 차이에서 기인 하는 전위차 구동력에 의해 진행되며 부식전위가 높은 동 표면에서는 환원 반응이, 부식전위가 낮은 알루미늄 표면에서는 산화반응이 가속된다. 이러한 갈바니 부식은 틈부식 및 공식과 결합하여 알루미늄-동 접촉 계면의 열화를 야기시킴을 예상할 수 있다.

2.2 실험방법

실험에 사용된 작동전극은 KSD 6763에 규정된 A1050 재질의 알루미늄, KSD 5301에 규정된 C1100 재질의 동, 그리고 상용 압축형 이질금속 슬리브와 수입한 폭발용접형 이질금속 슬리브의 단면을 이용하였고, 보조전극으로는 흑연, 기준전극으로는 Ag/AgCl (sat. KCl, 0.197 V vs. SHE) 전극을 사용하였다.

전해질은 해안 환경을 근사한 0.1 M NaCl 수용액과 도심 환경을 근사한 0.1 M Na₂SO₄ 수용액 및 0.1 M NaNO₃ 수용액을 사용하였다.

전기화학적 분석 실험은 Solartron Potentiostat Model 1280B를 이용하여 수행하였으며, 회전원판 전극 실험은 Pine사의 Model AFMSRX RED 장치를 이용하였으며, 광학 현미경 관찰은 Olympus사의 Model GX71-413B 금속현미경을 이용하였다.

2.3 결과 및 고찰

알루미늄과 동 의 갈바니 부식 거동을 살펴보기 위해 부식전위 측정 실험과 부식전류 측정 실험을 수행하였다. 0.1M NaCl 수용액에서 동 의 부식전위는 0.01 V vs. Ag/AgCl 이었으며, 알루미늄은 -0.52 V 의 값을 나타내었다. 그림 3는 알루미늄과 동 의 갈바니 부식전위 차이를 나타낸 것이다. 약 530 mV의 구동력이 접촉계

면을 중심으로 발생하여 접촉면에 전류 분포가 집중하게 된다. 이 구동력은 접촉부의 알루미늄 산화 피막의 전위를 공식전위 이상으로 높일 수 있어 염소이온 환경 하에서 는 갈바니 쌍에 의해 공식이 촉진될 수 있음을 예측할 수 있다.

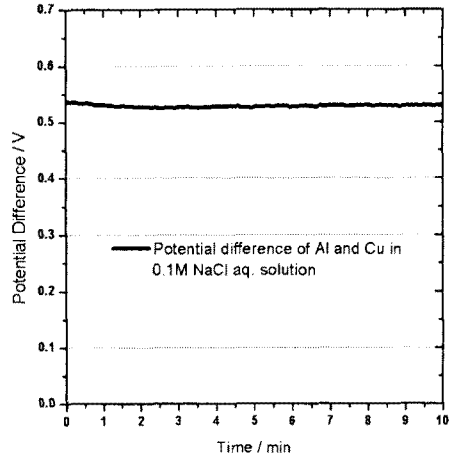


그림 3. 알루미늄-동 갈바니 부식전위차

그림 4는 각 수용액에서 알루미늄과 동 의 갈바니 부식전류를 측정 한 것이다. 염소이온이 존재하는 경우가 황산이온이나 질산이온의 경우보다 갈바니 부식전류에 있어서도 훨씬 큰 전류가 흐름을 알 수 있다.

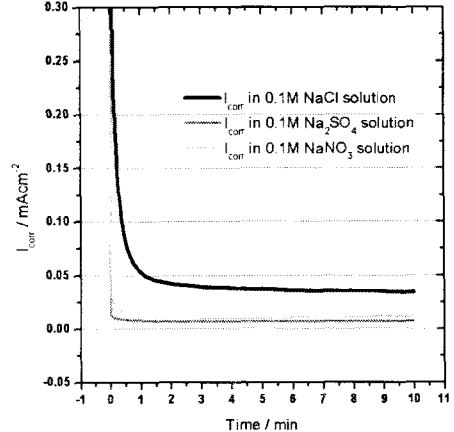


그림 4. 알루미늄-동 갈바니 부식전류

그림 5는 압축형 및 폭발용접형 이질금속 슬리브로 제작한 전극의 산화 분극 곡선을 나타낸다. 그림에서 압축형의 경우가 더 낮은 전위에서부터 산화전류가 나타나기 시작하고 공식전위는 거의 비슷한 양상을 나타내었다. 이러한 양상은 전기화학적으로 피트가 생성되기 전에 이미 계면에 부식에 취약한 영역이 존재함을 예상할 수 있는데 압축형 이질금속 슬리브의 경우 이러한 영역은 접촉부에 불가피하게 존재하는 틈(Crevice)에 의한 효과라고 보여진다.

그림 6(a)와 6(b)는 각각 압축형 및 폭발용접형 전극의 부식양태를 금속현미경으로 1000배의 배율로 관찰한 것이다. 압축형의 경우 계면이 직선이지만 계면에 존재하는 틈에서의 부식이 가속되어 전해질이 내부로 깊이 침투할 것으로 예상되며 폭발형의 경우 폭발 접합의 전형적인 물결이 나타나며 틈부식은 현저히 작은 규모로

일어나고 있음을 알 수 있다.

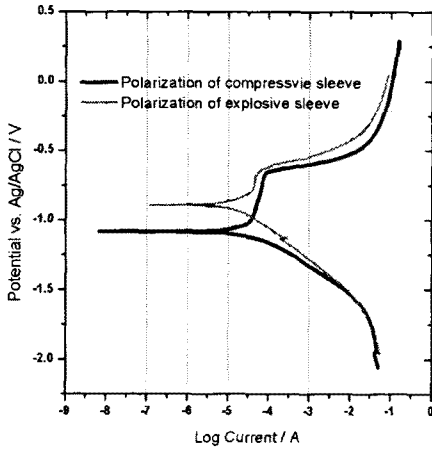
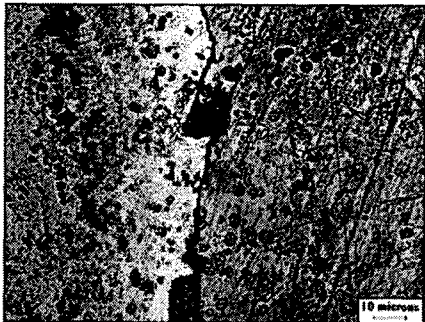


그림 5. 압축형 및 폭발용접형 슬리브 전극의 산화분극곡선



(a) 압축형 슬리브 전극



(b) 폭발용접형 슬리브 전극

그림 6. 압축형 및 폭발용접형 슬리브 전극 부식 표면의 광학 현미경 사진

3. 결 론

알루미늄은 염소이온이 존재하는 환경에서는 부동태 피막의 파괴와 이러한 국부 영역에서의 급격한 산화로 인해 공식이 발생한다. 약 530 mV에 해당하는 알루미늄-동 이질금속의 갈바니 전위차는 알루미늄의 전위를 공식전위 이상으로 상승시켜 접촉계면에서의 부식을 가속시키며 여기에 압축형 이질금속 접속금구에 불가피하게 존재하는 틈은 국부부식의 영역으로 작용하게 된다.

알루미늄-동 접속금구의 부식문제는 단순히 갈바니 부식의 문제가 아니라 갈바니 부식, 공식 및 틈부식이 결합된 형태로 나타나게 된다.

폭발용접형 이질금속 접속금구의 경우 계면에서의 틈을 크게 줄여 국부 부식이 가속되는 것을 억제할 수 있다. 따라서 폭발 접합의 제반 변수들을 최적화하여 보다 치밀한 계면을 만들어냄으로써 틈부식을 억제할 뿐만 아니라 계면을 따라 전해질이 침투하지 못하게 함으로써 이질금속 접속금구의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] "압축형 이질금속 슬리브", 한전잠정표준구메시방서 PS 114-209~220, 2001
- [2] R.D. Naybour and T. Farrel, "Degradation Mechanisms of Mechanical connectors on Aluminum Conductors", Proc. IEE, Vol.120 no.2, p. 273, 1973
- [3] R. Atermo, "A Method of Testing Compressive Relaxation in Aluminum conductors", Wire Journal, Sept. 1973m p. 127, 1973
- [4] N. Bond, "Aluminum Contact Surface in Electrical Transition Interface", IEEE Transactions PMP-9, p. 104, 1969
- [5] W.F. Bonwitt, "An Experimental Investigation of the Electrical Performance of Bolted Aluminum-to-Copper Connections", AIEE Transactions, Vol.67, p. 1208, 1948
- [6] M. Braunovic and N.Alexandrov, "Intermetallic Compounds at Aluminum-to-Copper electrical Interfaces: Effect of Temperature and Electric Current", IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol.17 no.1, pp. 78-85, 1994
- [7] M. Braunovic, "Effect of fretting in aluminum-to-tin connections", Electrical Contacts, Sept., Chicago, pp. 221-228, 1989
- [8] B.W. Callen, B. Johnson, P.King, R.S. Timsit and W.H. Abbott, "Environmental Degradation of Utility Power Connectors in a Harsh Environment", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol.23 no.2, pp. 261-270, 2000
- [9] A. Pocalyko, "Fabrication of Explosive Welded Titanium Composites", Welding Journal, Jan., 1987
- [10] S. H. Carpenter and R. H. Wittman, "Recent Developments in the Theory and Application of Explosive Welding", SME Technical Paper No. MF 74-819, 1974
- [11] 하윤철, 배정효, 김대경, 하태현, 이현구, "송배전용 Al-Cu 접속금구의 신뢰도 향상에 관한 연구(I) 알루미늄 및 동 의 부식특성", 2003 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A권 pp. 488-490, 2003
- [12] M.Pourbaix, "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions", NACE, Huston, Texas, USA, 1974