

초고압 케이블용 AL 도체 접속 기술에 관한 연구

채병하, 김우진, 한봉수
일진전기(주) 전선기술연구소

A Study of Jointing an Aluminum Conductor of the Extra High Voltage Cable

Byung-Ha Chae, Woo-Jin Kim, Bong-Soo Han
ILJIN Electric Co., Ltd Cable Division Research & Development Lab.

Abstract - 신도시의 건설뿐만 아니라 기존 거대 도시에서의 전력 수요량을 계속적으로 증가하고 있는 추세이다. 한전계통에 적용되는 지중 송전용 케이블 대부분의 경우 동(Cu)도체를 사용하고 있으나, 현재 LME의 급격한 상승 때문에 국외에서는 지중송전용 케이블의 도체를 동도체에서 알루미늄(AL) 도체로 대체하고 있다. 이에 알루미늄은 자체의 독특한 특성 때문에 동도체와 같은 방법(슬리브 압착)으로 접속할 경우 접속부에서 도체 과열과 같은 예기치 못한 문제로 접속 구간뿐만 아니라 인근 계통에도 큰 문제를 발생시킬 수 있다. 그리하여 본 논문에서는 초고압 지중송전용 케이블에 동도체 대신 적용되는 알루미늄 도체의 접속기술에 관한 연구를 진행하였다.

1. 서 론

알루미늄은 동에 대해서 높은 전기전도도(전도율)를 나타내며, 전기 전도도는 미량의 Cr, Mn, V, Zr, Ti의 함유에 의해서 현저하게 저해된다. 극저온에서는 동보다도 비저항이 작다. 그리고 알루미늄은 활성인 금속으로 대기 중에서 쉽게 산화되지만, 표면에 치밀한 알루미늄을 형성하여 내부의 산화를 방지한다. 이 산화피막은 내부에서 치밀한 피막과 그 위에 수화된 피막이 합해져 산화층으로 되어있다. 이 산화피막은 인공적으로 양극산화에 의해서 만들어지고 내식성과 내마모성이 양호하다. 일반적으로 순알루미늄은 유기산에는 내식성이 있으므로 초산에 대해서는 안정되지만, 개미산, 수산에는 부식되기 쉽다. 알루미늄보다 높은 전위의 Fe, Cu등과 접촉하면 알루미늄이 현저하게 부식하는 접촉 부식이 생긴다. 이와 같은 특성 때문에 슬리브 압착에 의한 방식으로 알루미늄 도체를 연결하기는 쉽지 않다. 따라서, 용접에 의한 방법으로 도체를 연결하고 전기적 특성 및 열적 특성을 검토해 보았다.

2. 본 론

2.1 아크용접(Arc welding)[1]

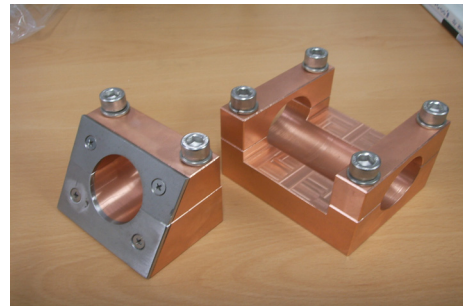
아크용접(Arc welding)은 모재를 1개의 전극으로 전극과의 사이에 아크를 발생시켜, 그 열로 용융시키는 것에 의하여 접합하는 방법이다. 모재는 아크열에 의하여 용융되지만, 다른 쪽의 전극은 용접봉으로써 용가재를 겸하는 소모전극방식과 용접이 높은 텅스텐등을 이용하여 전극을 용융시키지 않도록 가열용 공구로써 사용하는 비소모전극방식이 있다. 아크용접은 장치가 간단하고 용접부의 재질도 양호하여 신뢰성이 높으므로 현재 용접법 중에서는 광범위하게 이용되고 있다. 아크용접에서의 전원의 종류로서는 직류 아크용접기, 교류아크용접기, 자동아크용접기 등이 있다. 아크용접에서는 용접부가 대기의 영향을 받아 접합 강도가 손상되지 않도록 하기 위해서 용접부를 외기로부터 보호한 상태에서 행하는 것이 바람직하다. 그 방법으로는 다음 2종류가 있다. 1) 피복용접봉을 이용하는 방법, 용접봉의 피복재가 아크열에 의하여 분해되어 가스를 발생하고, 이 가스가 용접부를 공기로부터 차단한다. 2) 불활성가스식 Be나 Ar 등의 불활성가스(inert gas)를 흐르게 하는 것에 따라서 아크부나 용접부를 보호한다. 1)의 방식의 피복아크용접은 철계 금속의 접합에 적합하지만, 용접부 표면이 슬랙으로 피복되기 때문에 슬랙의 제거에 시간이 걸리며, 또한 Al 등의 산화되기 쉬운 금속에 대해서는 접합이 곤란하다. 2)의 불활성 가스방식은 비복아크용접에서는 접합이 곤란한 Al, Mg, Cu, Ti 및 그것들의 합금 등의 접합을 가능하게 하기 위해서, 또한 슬랙 제거의 공정을 생략하기 위해서 개발된 방식이다. 2)의 불활성 가스아크용접에서전극에 슬리드와이어를 이용하는 소모전극방식을 MIG 용접(Metal inert gas welding)이라 한다.

특히 용접의 경우에 있어서는 열의 영향에 따라서 접합부의 기계적 성질, 변형상태 및 잔류응력 등이 문제가 된다. 용접에서는 국부적인 가열냉각과 용접시의 모재의 구속에 의하여 접합부의 응력이 복잡하게 변화하고, 팽창/수축이나 굽힘 등의 변형이 생기며, 또한 냉각된 후에도 응력이 잔류한다. 이는 용접제품의 상상정밀도나 접합강도를 저하시켜,

심한 경우에는 용접균열(weld crack)등이 원인이 된다. 따라서 용접균열을 작게하기 위해서는 용접할 때의 입열량을 가능한 한 작게하고, 열량을 집중시키지 않는다. 용접순서나 구속방법을 적절하게 선택하는 것이 필요하다. 그리고 외부로부터의 힘이 작용하지 않는 상태에서 물체에 내재하는 응력인 잔류응력문제와 있고, 용접 잔류응력은 용접시의 급격한 온도변화에 따라서 불균일한 응력 분포가 일어나고, 재료내부에 남아 있는 응력이다. 이 용접잔류응력의 존재는 용접구조물의 취성파괴의 원인이 된다.

2.2 Al 도체 용접

알루미늄 도체 용접은 일반 알루미늄용접과 약간의 차이점을 가지고 있다. 일반 알루미늄 용접은 단심 선재나 관재의 용접의 경우가 대부분이나 케이블 도체의 용접은 여러 가닥의 소선들이 꼬여져 있는 형태를 가지고 있어 소선 한 가닥씩 용접을 해주어야 하는 특징이 있기에 용접을 위한 특별한 지그(jig)가 필요하다. 그림 1과 같이 용접을 용이하기 하기위한 절단 지그(버터링 지그로 활용)와 용접지그의 그림이다.



〈그림 1〉 절단지그와 용접지그

2.2.1 알루미늄 도체의 용접 순서

2.2에서 언급한 도체 용접용 지그(jig)를 이용한 용접 순서는 다음과 같다. 우선 케이블 도체 적당길이 만큼 노출한다. 그다음으로 절단지그를 체결하고 절단 지그면을 따라 케이블을 절단한다. 이 절단 지그를 사용하면 케이블 도체면은 60°의 경사를 이루게 된다. 알루미늄 도체 용접의 중요한 점은 도체를 구성하고 있는 소선의 모든 가닥이 용접이 되어야 함으로 주 용접(main welding)을 진행하기 전에 반드시 예비용접(buttering welding)이 선행되어야 주 용접시 용접부에 기포 발생을 최소화할 수 있게 된다. 여기서 예비 용접(buttering welding)이란, 알루미늄 도체 용접시 케이블 각 소선이 일대일로 용접이 가능하게 하기 위해 절단면 표면을 용접하는 것이다.

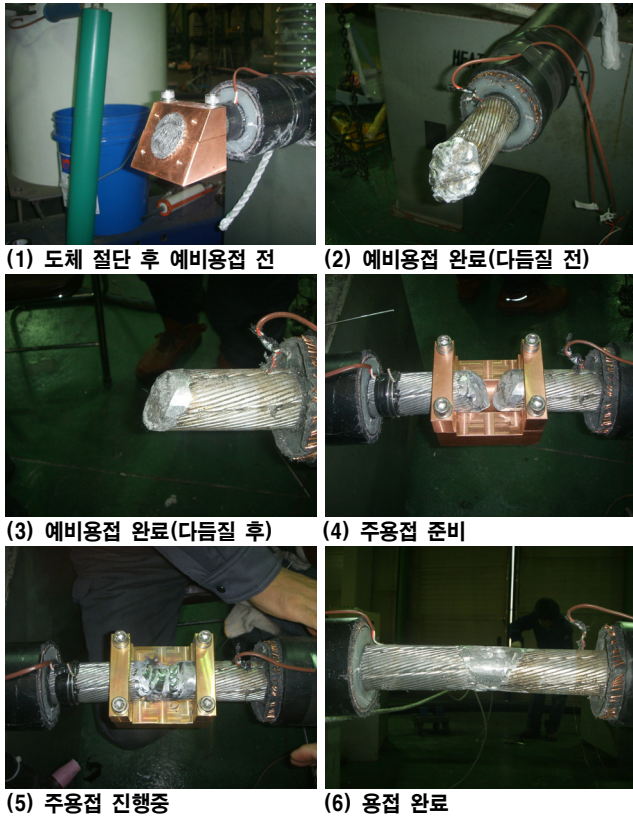
이때 기포는 용접부의 크랙을 유발하는 주요 원인이 되며, 결국 전력 계통에 치명적인 사고를 유발할 수도 있다. 예비 용접은 신속하게 진행하여 도체의 온도가 105℃가 넘지 않게 한다. 만약 한계 온도에 도달했을 경우에는 용접을 중단하고 온도를 낮추어 준다. 여기서 급격한 냉각을 용접부 stress를 주게 되어 Al 소선이 끊어지는 현상이 발생하게 된다. 예비 용접이 완료되면 주 용접을 하기위해 용접부 표면을 적당한 두께로 갈아낸다. 이후 절단지그(예비용접지그)를 분리하고 주 용접을 위한 용접지그를 결합한다. 주 용접시는 용접할 부분이 예비 용접보다 넓기 때문에 용접시 알루미늄 도체의 온도를 지속적으로 확인하면서 용접을 진행한다. 도체 냉각시 알루미늄 표면을 산소와 반응하여 산화막이 형성됨으로 반드시 용접을 다시 진행하기 전에 반드시 표면을 철술을 이용하여 산화막을 제거한다. 용접이 완료가 되면 표면을 매끄럽게 하여 전압 인가시 용접부가 전극의 역할을 하지 않도록 한다.

2.3 전기적 특성 시험과 열싸이클 시험 및 결과

접속용 금구류 재질인 알루미늄 합금(A6061)과 도체(A1050)의 용접시 강도와 도전율을 고려하여 용접봉은 A4043의 재질을 선택하였다. [2] A4043의 특성은 다음 표 1과 같다. 중간접속재의 경우 도체끼리 용접을 하기 때문에 도체의 재질과 같은 A1050의 용접봉을 사용하는 것이 좋으나, A4043 용접봉을 적용했을 때보다 기계적 강도가 낮기 때문에 A1050의 용접봉을 사용하지 않았다. 용접은 2.2에서 언급한 방식으로 진행하였다. 그림 2는 알루미늄 도체 용접의 단계별 진행사항을 보여준다.

<표 1> Alloy 4043 data sheet[3]

녹는점(°C)	573~632.2
전도율(%)	42%(IACS)
밀도(kg/Cu cm)	0.1117
산화피막색	회색



<그림 2> 단계별 진행

첫 번째 용접시에는 Arc 용접기를 이용하여 용접을 진행하였다. 그러나 알루미늄의 용융점(약 600°C) 특성상 도체의 온도가 단 시간내 105°C에 도달하여 용접 진행이 쉽지 않았다. 이후 MIG 용접기를 사용하여 진행하였고 도체의 온도가 105°C에 도달하기 전에 용접할 수 있는 범위가 확대되었고 105°C까지 도달하는 경우도 1~2회 정도로 용접 진행 회수를 줄일 수 있었다. 따라서 케이블 절연체에 과도한 열이 전달을 막을수 있었다.

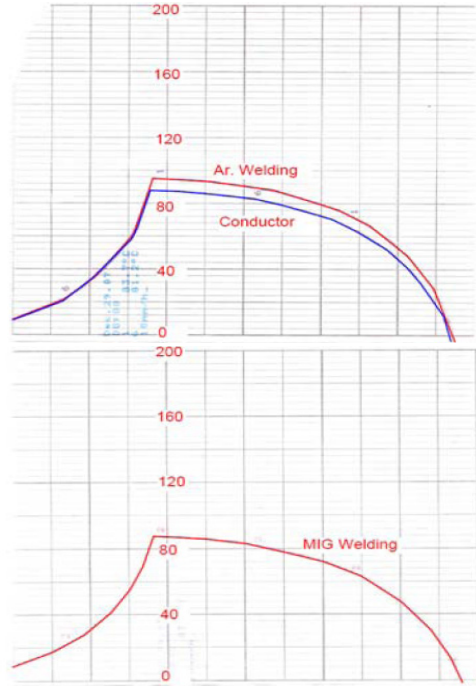
<표 2> 시험진행

구 분	인가전압	비 고
AC 내전압	2.5Uo(318kV)/1일	
뇌충격시험	±1,050kV / 10회	
	±1,100kV / 3회	
	±1,150kV / 3회	
	-1,200kV / 1회	Flashover로 중단

열싸이클 시험을 진행하기 위해 132kV 1,200mm² AL 도체 케이블을

이용하여 진행하였다. 이 케이블의 허용전류는 상온에서 90°C까지 올라는데 약 1,300A로 설계되었다. 열싸이클 시험은 상온(0°C)에서 IEC 60840 11.1항의 시험 온도는 95~100°C에 도달하기위해 1700~1800A 전류를 케이블에 흘려 95°C에 도달하도록 진행하였다. 용접부와 도체의 온도는 그림 3과 같다. Arc 용접은 도체와 7°C(95°C) 정도 높았으며, MIG 용접의 경우는 도체와의 온도(88°C) 차이가 없었다.

전기적 특성 시험은 220kV 1000mm² AL 도체 케이블과 기중중단접속함(EBA) 그리고 가스중중단접속함(EBG)를 연결한 상태에서 AC 내전압시험과 뇌충격시험(Lightning Impulse test)을 위의 표 2와 같이 진행하였다. AC 내전압 시험과 뇌충격시험에서도 도체 용접 부위는 이상이 없었다. 신뢰성 확보를 위해 뇌충격시험을 50kV씩 승압하여 진행하였고, 1,200kV에서 Flashover의 발생으로 시험을 중단하였다.



<그림 3> 온도그래프

3. 결 론

알루미늄도체는 알루미늄의 특성상 구리(Cu)와 같은 슬리브 압착방법에 의해 접속 연결부에서 기준이상의 발열문제로 지중송전선로에 심각한 문제를 야기시킬 수 있다. 이에 따라 알루미늄 도체를 용접에 의한 방법으로 접속을 진행하여 열싸이클 시험 및 전기적 특성시험을 진행하였다.

열싸이클 시험은 용접부의 온도가 도체와 거의 일치하였으며, 전기적 특성시험에서도 IEC 규격내에서 문제가 발생하지 않았다. 알루미늄 도체는 용접이 가장 이상적인 연결 방법이지만, 중간접속재(PMJ)에 적용시 용접을 하면서 고무슬리브가 장축 케이블쪽에 위치하여 장시간 고정된 상태에 있기 때문에 용접완료후 정위치 시키기 위해 고무슬리브에 무리한 힘이 가해져서 고무슬리브의 파손이 우려된다. 이에 용접의 시간을 최대한으로 단축하고 알루미늄 도체의 연결 방법을 용접이 아닌 다른 방법도 진행할 계획에 있다.

[참 고 문 헌]

[1] “재료가공학”, 기전연구소, p113~127
 [2] “Aluminum Filler Alloy Chart”, AlcoTec Wire Corporation
 [3] “Alloy 4043 Weld Data Sheet”, AlcoTec Wire Corporation
 [4] 채병하 외 6명, “220kV 가교절연 케이블용 Plug-in 중단접속재 개발”, 2006년도 대한전기학회 전력기술분회 추계학술대회 논문집, p337~338, 2006