

전력기기용 Al/Cu 복합 부스바의 통전용량 설계 및 특성 평가

論 文

55B-12-6

Transport Capacity Design and Characteristics Evaluation of Al/Cu Composite Busbar for Power Equipments

裴俊漢* · 金海鶴*
(Joon-Han Bae · Hae-Joon Kim)

Abstract - This paper deals with the electric and thermal characteristics of the composite busbar composed of aluminum and copper. When AC current is flowing in Cu busbar used widely in conservative equipments like power cable, transformer, and switchgear & controlgear most current is concentrated on the surface of the busbar by the skin effect. Therefore, if the Cu region in the busbar having low current density is replaced with aluminum, we can largely reduce the product cost and weight of the busbar. To conform the performance of the composite busbar, we designed and fabricated a test Al/Cu composite busbar. Maximum temperature rise of the busbar was 35°C when 1600 Arms of AC current was applied to the test composite busbar(120mm×10mm). Based on test results, we can expect to make the low-priced and light power equipments using the Al/Cu composite busbar.

Key Words : Al/Cu composite busbar, skin effect, maximum temperature rise

1. 서 론

국내에서 생산되는 대부분의 전력은 전력계통도를 따라 복잡하게 연결되어 고압전선을 따라 각 지역별로 이동되고 있으며, 각 가정으로 공급된다. 이러한 과정에서 생기는 손실을 최소화하기 위해 고압화를 추진하고 있다. 공급된 전력은 배전반을 거쳐 여러 전력 수요부로 나뉘어지는데 이러한 배전반에는 차단기 등의 전기/전자 부품과 연결시켜 주며 전력의 분기점을 만들어 주는 부스바가 필수적이라 할 수 있다. 국내의 부스바 수요는 월 1,000톤 이상이며 대부분 구리 또는 구리합금을 사용되고 있으나 그 자체무게가 무거워 취급하기에 매우 불편하고 가격 또한 고가이며 원자재 공급도 불안정하다.[1] 그래서 최근 이러한 문제를 해결하고자 경량금속을 복합화하여 가격을 낮추고 경량화하려는 연구가 많이 이루어지고 있으며, 특히, 부스바의 원가절감 및 경량화를 위해서 알루미늄(Al)도체에 구리(Cu)를 피막을 입힌 Al/Cu 복합 부스바 개발이 절실히 필요한 실정이다. 복합체의 형성을 위해서는 전자계 해석 등의 전기적인 현상을 고려하여야 하지만 이러한 설계분야에서는 특히 기술적으로 극복해야 할 과제가 많이 있다. Al/Cu 복합 부스바가 일부 선진국에서 정수압 압출로 제조하여 사용되고 있으며, 국내에서는 현재 전량수입에 의존하고 있는 실정이다.[2-3]

Al/Cu 복합 부스바가 일부 선진국에서 개발되어 사용되

고 있으며, 국내에서는 정수압 압출로 제조된 선진국의 제품을 수입하여 차단기와 개폐기 등을 제조하여 외국으로 수출되는 형편이고 이러한 복합경량 부스바는 수출되는 제품의 사양으로 선정되어 있기 때문에 수요는 증가되며, 수입 의존도가 높다. Al/Cu 복합 부스바는 순동의 의해 제조된 부스바에 비하여 가격면에서 30~40%정도 낮고, 무게는 최대 약 50~60%까지 경량화 할 수 있으며, 공급가격을 안정화할 수 있고, 작업시 취급이 용이하여 작은 힘으로 큰 성과를 거둘 수 있어 작업성이 매우 높다. 이러한 우수한 특성을 지닌 복합 부스바 개발이 변압기용, 배전반용 등이 수요가 증가되고 있는 추세이다. 이러한 소재를 국산화함으로써 경쟁력 있는 제품생산과 수입의존도를 낮추고, 국가경쟁력을 높이며 무역수지 개선효과를 볼 수 있다.[4] 따라서 본 연구에서는 고가이고 다소 비중이 높은 Cu계 busbar를 가격을 낮추고 무게와 재료비를 줄이고, 같은 전류를 흘릴 수 있는 Al/Cu 형태의 복합부스바 개발하기 위해 통전용량 설계 및 개발된 복합 부스바의 온도상승 시험을 하여, 기존 동부스바의 규격과 특성을 비교 분석하였다.

2. 복합 부스바의 통전용량 설계

복합 부스바는 일반적인 동부스바에 비해서 도전율이 낮기 때문에 단위 면적에 흘릴 수 있는 전류가 적어지게 된다. 이러한 문제는 순수한 동의 도전율을 100으로 하고, 동과 비교한 %로 표시하고 있다. 일반적으로 알루미늄의 도전율은 63%선이지만 실제 교류전류가 통전될 때 표피효과에 의해 표면으로 거의 대부분 흐르기 때문에 내부에서는 통전용량이 아주 작다. 따라서 이러한 복합 부스바의 통전용량

* 교신저자, 正會員 : 韓國電氣硏究員 先任硏究員

E-mail : baejh@keri.re.kr

* 正會員 : 韓國電氣硏究員 委囑硏究員

接受日字 : 2006年 9月 15日

最終完了 : 2006年 10月 23日

설계를 위해 운전전류에 따른 전류밀도, 자장, 발열량, 등의 해석이 필요하다.

2.1 복합 부스바의 전자장 해석

복합 부스바의 경우 도체의 재질과 형태만 바뀌고 나머지는 거의 같은 조건으로 해석이 가능하다. 또한 이러한 복합 부스바를 사용하여 동일한 특성을 가지면서 무게를 줄이면서 재료의 가격을 낮추는 역할이 가능하다. 일반적으로 전류는 표피효과에 의해 표면으로 많이 흐르기 때문에 내부에는 전기전도도가 낮은 Al를 사용하고, 외부에는 Cu를 사용하여 기존의 동 부스바와 동일한 효과를 갖도록 한다.

그림 1에서는 본 연구에서 개발된 분진반용 복합 부스바의 형태이자 전자장 해석 모델이다. 구리와 알루미늄의 점적율이 각각 0.3, 0.7이고, 통전용량이 1600[A_{rms}]로 설계된 복합 부스바이다. 그림 2에서는 복합 부스바에 1600[A_{rms}]의 전류가 흐를 때 전류밀도분포를 나타내었다. 전류밀도분포는 다음과 같이 계산된다.

$$J = \sigma \nabla E, d = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma f \mu}} \quad (1)$$

여기서, J = 전류밀도[A/m²], s = 도전율 [siemens/m], d = 침투깊이 [m], f = 주파수[Hz], μ = 투자율[H/m]

주파수가 높아지거나 도전율 및 투자율이 클 경우 도체내부에는 전류 및 자속이 존재하지 않는 표피효과가 나타난다. 모든 전류가 동일한 손실을 갖고 흘러야만 하는 도선에서 등가의 전류관통 깊이인 Skin Depth는 오직 주파수 및 도선 특성과 함수를 가진다. 그래서 부스바 내부의 전류는 표피값에 비하여 1/e(=0.37)배로 감소된다. 식 (1)에 의해서 60[Hz]일 때 Skin Depth는 약 6[mm]로 계산되며, 복합 부스바에 전류 분포는 그림 2와 같이 분포된다.

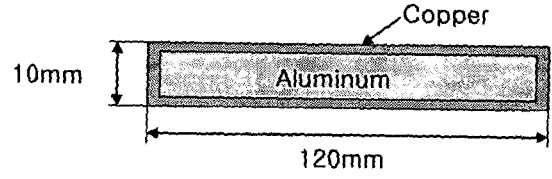
전류밀도 분포는 구리 및 알루미늄의 전기 전도도에 의해 구리영역에 집중되며 60Hz의 저주파에 의한 표피효과의 영향은 무시해도 가능하다.

2.2 복합 부스바의 저항열 발생 해석

그림 4에서는 교류전류 1600[A_{rms}]가 흐를 때 한 주기당 복합 부스바의 온도 상승의 원인이 되는 Joule loss를 계산하였다. 점적율이 작은 구리에 전류가 집중되고 구리영역의 열발생이 알루미늄 영역보다 열손실이 크게 발생하였다.

복합 부스바 내부의 열속의 흐름이 비교적 적은 Al 부분보다 전류밀도가 높은 Cu 부분에서 Joule loss가 훨씬 크게 나타났다. 이것은 표피효과에 의해 복합 부스바의 단면에서 바깥쪽 부분이 자속밀도가 높아서 전류가 균일하게 흐르지 못하고 표피에 많이 흐르게 된다. 따라서 표피부분에 Copper를 사용하고 내부에 Al을 사용한다면 부스바의 무게와 부피가 줄어들게 된다. 또한 구리와 알루미늄의 점적율을 적절히 조절함으로써 발생열량을 허용치 이하로 제한이

가능하다.



- ✓ 구리 점적율 = 0.3
- ✓ 알루미늄 점적율 = 0.7
- ✓ 통전전류 1600Arms @ 60Hz

그림 1 복합부스바의 전자장 해석 모델

Fig. 1 Electromagnetic field analysis model of composite busbar

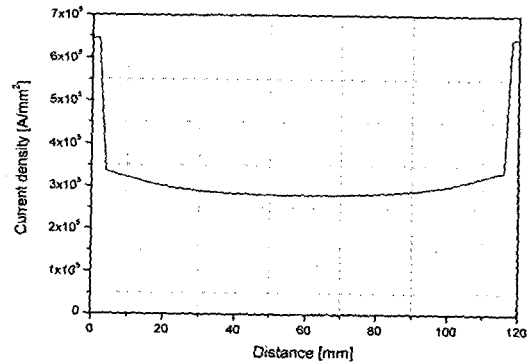


그림 2 1600[A_{rms}]에서 복합부스바 단면의 전류밀도 분포
Fig. 2 Current density at y=0 plane at I = 1600[A_{rms}]

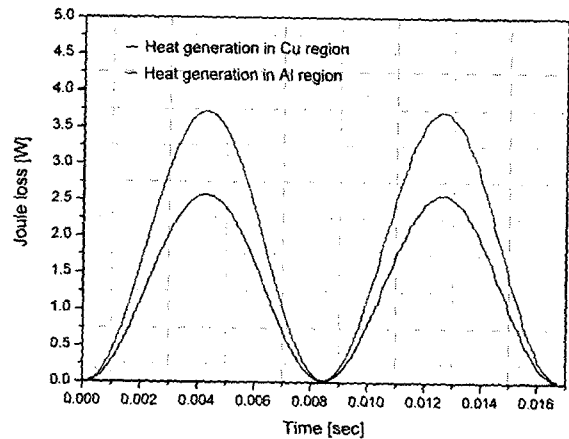


그림 3 부스바내 한 주기동안의 열발생

Fig. 3 Heat for one cycle in the composite busbar

2.3 복합 부스바의 중량 및 비용감소효과

구리의 비중은 8.94 [g/m³]이며 부피는 0.87[m³]이므로 무게는 0.77778[kg/m]이고, 알루미늄의 비중은 2.72[g/m³] 부피는 5.13[m³]이므로 무게가 1.39536[kg/m]로 계산된다. 따라서 복합 부스바의 구리 점적율에 따른 복합 부스바의 무게 및 온도 상승은 그림 4와 같이 표현된다.

복합 부스바에서 구리 점적율이 감소할수록 도체 중량은

선형적 감소한다. 점적율이 0%인 경우 중량은 3.264[kg/m] 점적율이 100%인 경우 중량은 10.728[kg/m]이며 구리 점적율을 감소로 최대 1/3까지 중량 감소가 가능하다.

복합 부스바의 비용측면을 살펴보면 구리의 점적율이 감소할수록 도체의 비용 또한 선형적 감소한다. 구리 점적율이 0% 인 경우의 비용은 2006년 4월 LMC가격 기준으로 8.813[\$/kg/m]이고, 구리 점적율이 100%인 경우의 비용은 77.242[\$/kg/m]이다. 따라서, 구리 점적율을 감소하여 최대 88.6%까지 비용을 절감 가능할 수 있다.

이러한 결과로 부터 구리의 점적율이 30%인 120mm×10mm 크기의 복합 부스바의 경우 무게는 약 7.3 [kg/m]이므로 기존의 동 부스바에 비해 3[kg/m] 정도의 무게 감소효과가 기대된다. 또한, 최대온도상승 역시 35℃로 기존의 동 부스바에 비해 10[℃] 정도의 적은 상승을 보인다.

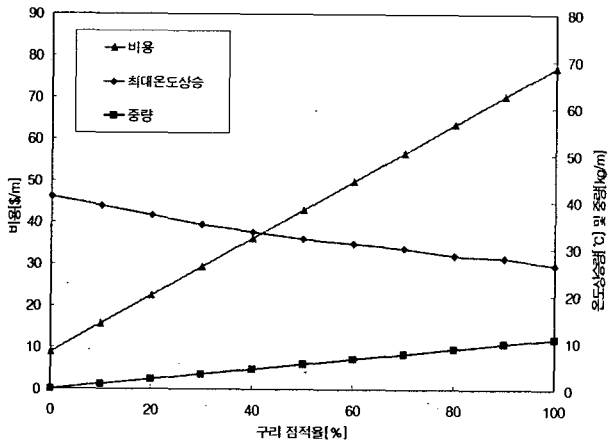


그림 4 구리의 점적율에 따른 복합부스바의 비용, 최대온도 상승 및 중량 관계

Fig. 4 Cost, maximum temperature rising and weight of composite busbar with Cu content ratio

2.4 복합 부스바의 전류용량 설계

복합 부스바의 전류용량 설계에 있어서 중요한 것은 온도 상승과 포화온도 산출이다. 120mm×10mm 크기의 분전반용 동부스바의 허용전류용량은 수직포설의 경우 1900[A_{rms}]이고, 수평포설의 경우 허용전류의 약 85%인 1600[A_{rms}]이다. 이러한 조건하에서 동일크기의 복합 부스바의 전류용량을 산정하기 위해서 먼저 복합 부스바에 1600[A_{rms}]가 흐를 때의 발열량을 계산하였다. 복합 부스바의 발열량은 복사와 자연대류에 의해 발생되고, 이러한 발열량이 복합 부스바의 온도상승에 직결된다.

복합부스바의 설계는 정격전류 통전시 도체의 최대도달온도가 미리 정해진 허용온도를 넘지 않도록 부스바의 크기, 구리 및 알루미늄의 점적율을 적절히 조절하여 수행된다.

통전시 부스바의 최대도달온도는 도체 내부의 저항에 의해 발생하는 발열량(Q1)과 대류 및 복사에 의해 도체의 발열을 주변으로 전달하는 냉각량(Q2)의 크기가 같아지는

지점에서 결정된다.

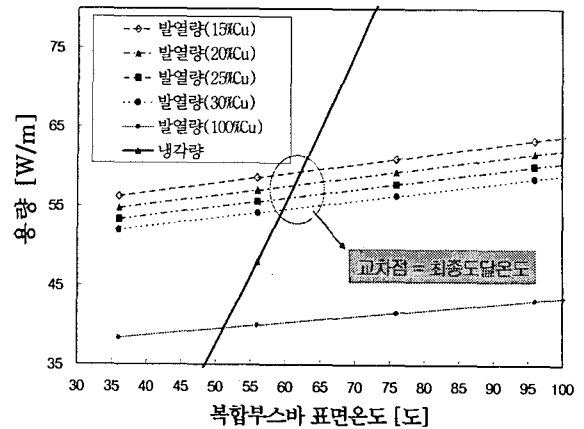


그림 5 부스바 모선의 온도상승 예측

Fig. 5 Temperature rising prediction of composite busbar

도체내부의 저항에 의해 발생하는 발열량(Q1)과 대류 및 복사에 의해 도체의 발열을 주변으로 전달하는 냉각량(Q2)은 다음과 같이 계산된다.

$$Q1 = I_{rms}^2 \times R_{eq} \quad (2)$$

$$Q2 = h(T_s - T_{\infty}) + \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (3)$$

I_{rms} : 교류전류의 실효치

R_{eq} : 복합부스바의 등가저항

ϵ : 방사율

σ : Stefan-Boltzmann 상수 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$

T_s : 도체의 표면온도

그림 5에서는 복합 부스바에서 구리의 점적율에 따라서 도체저항에 의해 발생하는 발열량과 발생된 열이 주변으로 전달되는 냉각량을 위 두 식을 이용하여 계산하였다. 구리의 점적율이 감소함에 따라 발열량은 선형적으로 증가하며, 냉각량 선과 교차하는 지점이 전류 1600[A_{rms}]에서의 최종도달온도이다. 그림 5에서와 같이 구리의 점적율이 30%일 때 최종도달온도 즉, 포화온도는 약 59℃가 된다.

2.5 복합 부스바의 온도상승 시험

본 연구를 통해 개발된 복합 부스바(120mm×10mm, 길이 1m)에 교류전류 1600[A_{rms}]를 인가하여 온도상승 및 Joint 부분과 부스바 부분의 온도차이, 포화온도를 측정하였다. 복합 부스바의 온도 상승 시험은 KSC 4507에 의해 주변온도 10~40℃에서 모선 부분의 온도 상승이 50℃ 이하, joint 부분의 온도 상승이 75℃이하의 기준으로 실험하였다. joint와 터미널 부분사이 온도 차이는 5℃이하이며, 포화온도 기준은 2[℃/hour]를 기준하였다.[5-8]

그림 6에서처럼 복합 부스바를 지상에서부터 75[cm]이상 이격하여 수평포설 하였으며, 온도센서는 부스바와 전류 도입선의 터미널 부분, 복합 부스바의 joint 부분, 그리고 주변 온도 측정을 위해 복합 부스바에서 1[m] 이내의 절연유 내

에 온도센서를 설치하여 온도를 측정하였다. 차단기나 분전반에 사용되는 동 부스바의 표준 규격 및 허용전류 기준에서 두께 10mm의 부스바가 수직 포설시 전류 1900[A_{rms}]에서 50℃의 온도상승이 기준이다. 그러나 본 연구에서 개발된 복합 부스바는 분전반에 사용될 것을 목적으로 제조되었기 때문에 분전반 내에 수평으로 포설되는 경우의 기준으로 하였다. 따라서 수직 포설시 통전전류의 85%인 1600[A_{rms}]를 복합 부스바에 인가하여 최대 온도 상승 및 포화 온도를 측정하였다.

그림 7은 복합 부스바의 온도상승 시험 결과를 나타내었다. 통전시작 3시간 후 55℃에서 복합 부스바의 온도가 포화되었고, 최대 온도상승은 35℃ 이었다. 시험 결과는 그림 5에서 예측된 온도상승과 좋은 일치를 보였다. 따라서, 본 연구에서 개발된 복합 부스바는 기존의 동 부스바의 무게와 비용은 크게 절감하면서 온도 상승은 규격기준을 충분히 만족시키는 우수한 특성을 보이는 것을 확인하였다.

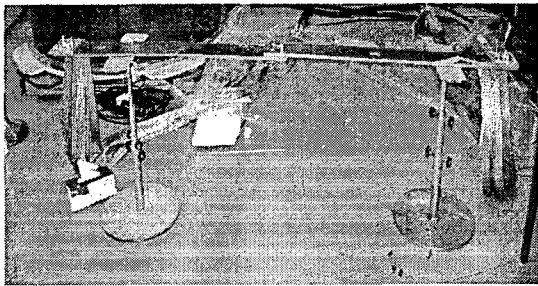


그림 6 복합부스바 온도상승시험 모습
Fig. 6 Photo of composite busbar temperature rising test

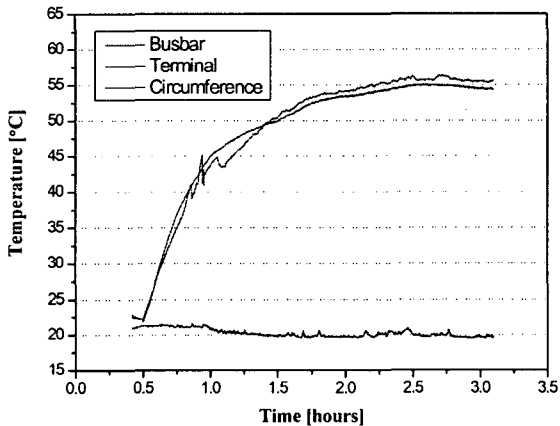


그림 7 1600[A_{rms}]에서 복합부스바의 온도상승 시험결과
Fig. 7 Result of composite busbar temperature rising test at 1600[A_{rms}]

3. 결 론

본 연구에서는 고가이고 다소 비중이 높은 기존 동 부스바의 대부분을 저가이고 경량의 알루미늄으로 대체함으로써 원가와 무게를 절감하면서 동일한 전류를 흘릴 수 있는 Al/Cu 형태의 복합 부스바를 개발하고자 통전용량 설계 및

특성평가를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 복합 부스바에서 구리 점적율이 감소할수록 도체 중량과 비용은 선형적 감소한다. 점적율이 0%인 경우 중량은 3.264[kg/m], 비용은 8.813[\$/kg/m] 점적율이 100%인 경우 중량은 10.728[kg/m], 비용은 77.242[\$/kg/m]이며 구리 점적율을 감소로 최대 1/3까지 중량 감소 및 최대 88.6%까지 비용 절감이 가능하였다.

2. 통전시 부스바의 최대도달온도는 도체 내부의 저항에 의해 발생하는 발열량(Q1)과 대류 및 복사에 의해 도체의 발열을 주변으로 전달하는 냉각량(Q2)의 크기가 같아지는 지점에서 결정된다. 구리 점적율이 감소함에 따라 최대 도달 온도는 선형적으로 증가하며, 점적율이 구리가 0.3, 알루미늄이 0.7일 때 최대도달온도는 59℃(35℃ 상승)으로 계산되었고, 온도상승시험을 통해 측정값과 좋은 일치를 보임을 확인하였다.

따라서, 기존의 전력설비에 널리 사용되고 있는 동 부스바를 본 연구를 통해 개발된 복합 부스바로 대체한다면 가볍고 저렴한 전력설비의 제조가 가능할 것으로 기대된다.

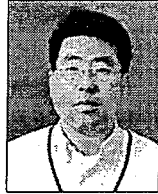
감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 '차세대 초전도 응용기술개발사업단'의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Ragnar Holm, Electric Contacts : Theory and Applications 4th Ed., Berlin, Springer Verlag, pp1-26, 1979
- [2] R. W. Caven, Jr and J. Jalali, Predicting the contact resistance distribution of electrical contacts by modeling the contact interface, Proc. of the Thirty-seventh IEEE Holm Conf. Electrical Contacts, pp83-89, 1991
- [3] 오연호 외, "부스바형 전기 접점의 단락통전 성능 해석 기법 개발", 대한전기학회논문지, 54B권, 1호, p27-32, 2005년, 1월.
- [4] "복합 경량 부스바 개발 및 가공기술 연구", 1차년도 최종보고서 과학기술처, 1997. 12
- [5] KS C 4507, 접속부 부스바 온도상승 시험법
- [6] JEC - 2200
- [7] KS D 5581
- [8] 한전구메시방서 "변압기 단락강도 시험 규격"

저 자 소 개



배 준 한 (裴 俊 漢)

1966년 4월 30일 생, 1992년 건국대학교 전기공학과 졸업, 1994년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원

Tel : 055-280-1698

Fax : 055-280-1399

E-mail : baejh@keri.re.kr



김 해 준 (金 海 窩)

1977년 2월 19일생, 2000년 영남대학교 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 위촉연구원

Tel : 055-280-2543

Fax : 055-280-1399

E-mail : haejoon@keri.re.kr