論 文
55A-8-4

복합경량 부스바의 설계 및 제작

Design and Fabrication of Light-Weight Composite Bus Bar

裵俊漢† · 裵德權*
(Joon-Han Bae · Duck-Kweon Bea)

Abstract - Copper is widely used in electric wire, cable, conductor in electric devices. As the demand for electric power is increasing rapidly, electric power devices are getting amazingly bigger and complicated. The using of light-weight conductor can reduce the size and making cost of the electric devices. In high-frequency application, Electric current in a conductor tends to shift to the surface of the conductor, resulting in an uneven current distribution in the inner conductor. In the extreme case the current may essentially concentrate in the "skin" of the inner conductor as a surface current. In high frequency application, therefore, inner area of copper conductor may replace with aluminum conductor, which reduces the weight of conductor. This paper describes the manufacture and evaluation of composite conductors made of copper and aluminum. The optimum extruding ratio was 16 at 300℃. The electrical resistance of manufactured composite bus bar was 57μΩ at DC and 49.5μΩ at 300Hz.

Key Words : Copper, Aluminum Solenoids, Composite Bus Bar, Skin, Surface Current

1. 서 론

국내에서 생산되는 대부분의 전력은 복잡하게 연결된 전력계통 상의 전선을 따라 각 지역 및 가정으로 공급된다. 이러한 과정에서 생기는 손실을 최소화하기 위해 전송전압의 초고압화가 추진되고 있다. 공급된 전력은 배전반을 거쳐 여러 전력 수요부로 배분되는데 이러한 배전반에는 차단기 등의 전기/전자 부품을 서로 연결시켜 주며 전력의 분기점을 만들어 주는 부스바(bus bar)가 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 고가이다. 그래서 최근 이러한 문제를 해결하고자 경량금속을 복합화하여 가격을 낮추고 경량화하려는 연구가 많이 이루어지고 있으다 [1], [2]. 특히, 부스바의 저가, 경량화, 복합화에 있어서 금속/금속간의 재료로써 Al/Cu 복합 부스바 개발이 절실히 필요한 실정이다. Al/Cu 복합 부스바는 일부 선진국에서 이미 개발되어 사용되고 있으며, 그 수요 또한 매년 증가하고 있는 실정이다. 영국의 Hydrostatic Extrusions Limited에서는 정수압 압출에 의한 복합재 제품을 생산하고 있으며 독일에서는 간접압출에 의한 Al/Cu 복합재를 제조하고 있으나 제조와 관련한 기술은 전혀 공개되고 있지 않다. 국내에서는 수입한 복합 부스바로 차단기와 개폐기 등을 제조하여 외국으로 수출하고 있는 형편이다. Al/Cu 복합 부스바는 순동의 의해 제조된 부스바에 비하여 가격면에서 30~40% 정도 저렴하고, 중량면에서는 50~60% 정도 가벼워 복합 부스바의 공급가격 안정화 및 경량화 효과가 매우 크다고 할 수 있다. 특히 취급이 용이하며 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 재품생산과 수입의존도를 낮추고, 국가경쟁력을 높이며 무역수지 개선효과를 볼 수 있다. 본 연구에서는 간접압출법을 이용한 Al/Cu 경량 복합 부스바를 국내의 기술로써 설계, 제작하여 그 특성을 평가하고자 한며 이 연구를 바탕으로 경제적인 경량복합 부스바를 전기기기에 응용할 수 있도록 하고자 한다.

† 교신저자, 正會員 : 한국전기연구원 초전도 응용연구그룹
E-mail : baejh@keri.re.kr
* 正 會 員 : 한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터
接受日字 : 2006年 3月 14日
最終完了 : 2006年 6月 27日

2. 실험 구성

2.1 빌렛(Billet)의 설계 및 제작

본 연구에서는 전기적 특성을 최대한 저감시키지 않기 위하여 고전도성 구리(TPC)를 피복재로 사용하였으며 심재로는 순 Aluminum을 사용하였다. 이는 기존의 전도성 구리의 큰 비중에 의한 무게를 감소시키기 위한 것과 비교적 높은 전기적 특성을 고려하여 선정하였다. 피복재인 구리(TPC)는 심재인 알루미늄을 삽입할 수 있도록 절삭 가공하였다. 알루미늄과 같이 압출성이 용이한 금속을 심재로 선정하여, Al/Cu 복합 부스바의 압출성이 좋도록 하였다.

빌렛의 설계 및 제조방법으로는 피복재와 심재를 각각 제조한 후 프레스를 이용하여 삽입하는 방법과 피복재를 제조한 후 심재(알루미늄)를 용해하여 피복재에 주조하는 방법으로 두 가지를 고려하였다. 먼저 후자인 경우를 보면, 심재를

용해하여 주조한 경우인데, 주조에 대한 민감성 부분 때문에 주조결함이 발생하여 이종소재간의 접합강도에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 그림 1은 심재를 주조하였을 경우 단면을 보여주고 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이 주조시 중심부에 Shrinkage가 생길뿐만 아니라 알루미늄과 구리 접착된 표면에도 불균일한 표면을 나타내고 있다. 그래서 다른 한 가지 방법인 삽입하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 심재의 외경을 피복재의 내경보다 더 크게 하여 강제적으로 삽입하면 심재와 피복재 사이의 마찰에 의해 계면상태가 양호하다는 것이 기존에 보고 된 바가 있다. 이를 고려하여 심재의 외경을 피복재의 내경보다 3/100정도 크게 가공하였다. 제조된 알루미늄의 심재 표면과 피복재인 구리의 내경에 부착된 기름과 같은 불순물들은 에틸렌을 사용하여 제거하였다. 청

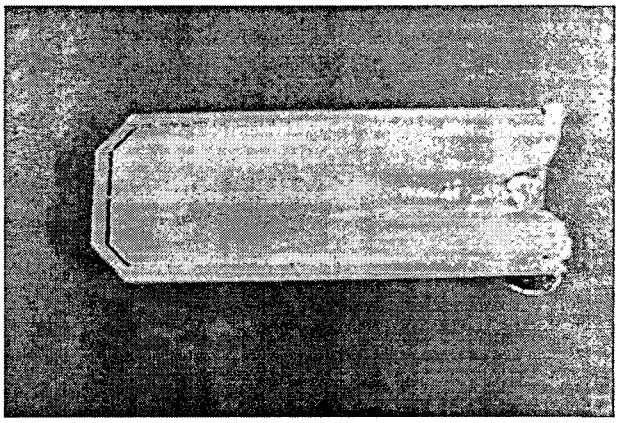


그림 1. 주조법에 의해 제조된 빌렛의 단면
Fig. 1. Cross section view of billet by melting process

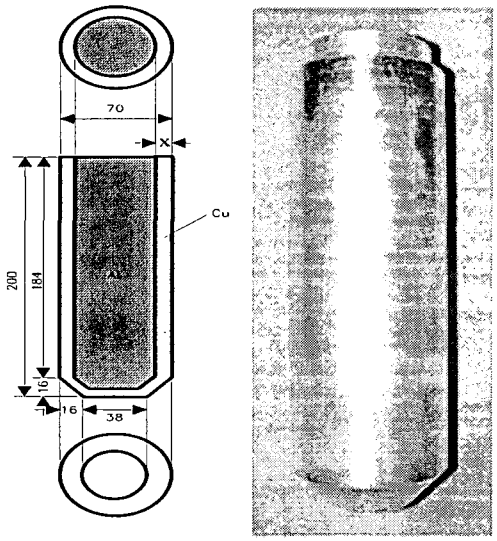


그림 2. 간접압출용 빌렛
Fig. 2. Billet for indirect extrude

결하게 유지된 심재인 알루미늄은 유압프레스에 의하여 피복재인 구리에 압입하였다. 그림 2는 위와 같이 제조된 빌렛의 설계 및 외관을 나타낸 것이다.

2.2 간접 압출조건 산출

Al/Cu 복합재 압출에 미치는 압출조건은 압출온도, 압출비, 다이스의 반각 등이 있다. 이들 조건 변화에 따른 압출재의 영향을 연구하여 최적의 압출조건을 찾고자 하였다. 먼저 압출온도에 의한 압출재의 영향을 연구하기 위해 압출온도는 300~500℃로 변화시켰으며 이때의 압출온도는 빌렛의 예열온도로 하였다. 또한, 압출비(R)를 6.98~38.03까지 변화시켜 실험하였다. 빌렛은 압출온도로 유지된 전기로에서 1시간동안 예열하였으며, 컨테이너의 온도는 300℃로 컨테이너 상부에 장착된 K-type 열전대를 이용하여 측정하였다. 이 때, 컨테이너의 상부와 하부의 온도편차는 ±5℃ 이내로 제어하였다. 컨테이너와 빌렛의 마찰을 줄이기 위한 윤활재로는 탄소계 윤활유를 사용하였으며, 빌렛과 다이스와의 마찰을 억제하기 위해서도 이 윤활유를 사용하였다. 압출 시 발생하는 압

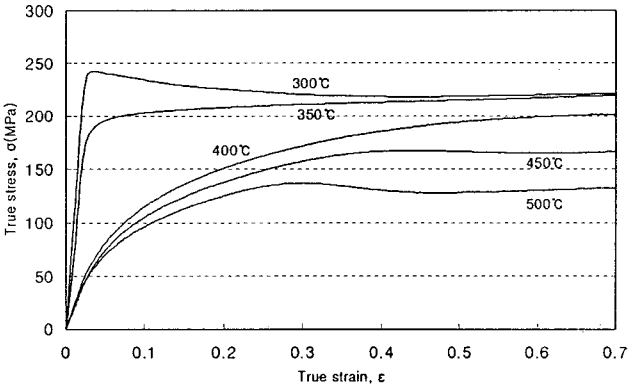


그림 3. $10^{-1}sec^{-1}$의 변형속도에서의 온도에 따른 구리의 진응력-변형률 곡선
Fig. 3. True stress-strain curves of copper according to temperature at transformation velocity of $10^{-1}sec^{-1}$

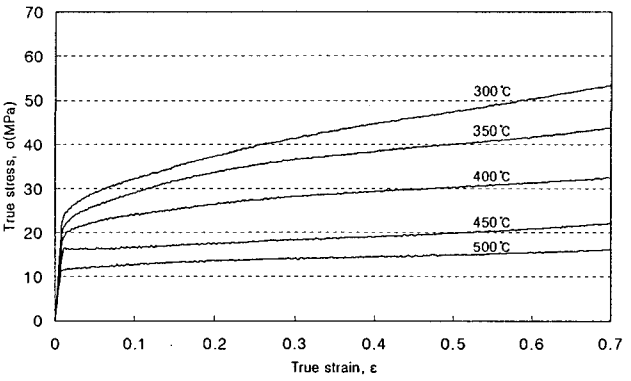


그림 4. $10^{-1}sec^{-1}$의 변형속도에서의 온도에 따른 알루미늄의 진응력-변형률 곡선
Fig. 4. True stress-strain curves of aluminum according to temperature at transformation velocity of $10^{-1}sec^{-1}$

출압력은 실리콘 응력 게이지가 내장된 PT-3000을 통해 얻은 데이터를 A/D 변환기와 LR-4100을 이용하여 측정하여 압출조건에 따른 압출압력의 변화를 고찰하였다.

2.2.1 압출온도선정

일반적으로 이종재료의 압출가공에 있어서 재료의 유동특성은 건전한 압출이 가능한지에 대한 기본적인 예측을 할 수 있는 기초적인 자료이다. 만약 두 재료의 유동특성의 차이가 큰 조건에서의 압출이 이루어진다면 유동응력이 작은 재료의 경우 빠른 변형속도로 압출이 되는 반면, 상대적으로 큰 유동응력을 가진 재료는 느린 변형속도를 가지게 된다. 이는 결국 변형속도의 차이를 유발하여 유동응력이 상대적으로 큰 즉, 변형속도가 작은 재료의 파단을 초래하게 된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 이종재료의 유동특성에 가장 큰 영향을 미치는 온도 즉 압출온도의 적정한 범위를 선정하기 위하여 피복재인 구리와 심재인 알루미늄에 대하여 유동특성을 관찰하였다. 유동특성을 평가하기 위한 방법으로는 압축시험을 선택하였다. 이는 인장시험에서 재료의 파단이 일어나는 시점이 비교적 낮은 변형률에서 일어나기 때문이다. 압축시험에서의 변형속도는 압출의 경우 상당히 빠른 변형속도를 가지는 것을 감안하여 $10^{-1}sec^{-1}$로 선정하였으며, 실험온도는 300℃~500℃사이의 범위를 선정하였다. 유동응력의 결정은 압출공정과 같은 소성변형에서는 높은 변형율을 가지기 때문에 약 50%의 변형율를 기준으로 하였다.

그림 3은 피복재인 구리의 유동특성을 나타낸 것으로 300~350℃에서 약 220MPa의 유동응력을 나타내었다. 그림 4는 심재인 알루미늄의 유동특성을 나타낸 것으로 알루미늄은

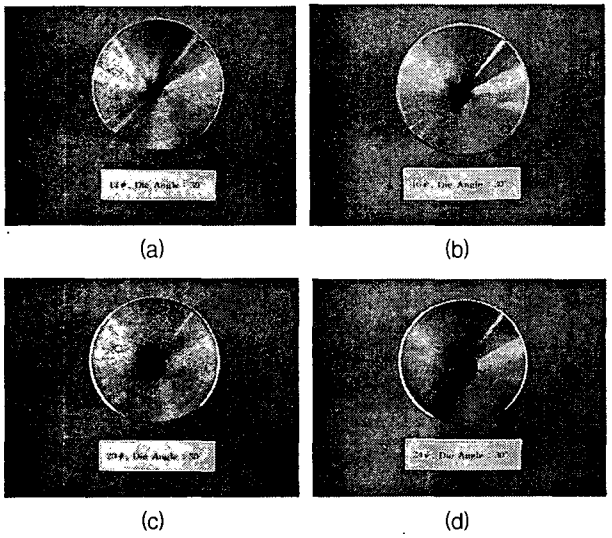


그림 5. 다이반각이 30°인 conical type의 간접압출용 다이스
(a) 압출비 6.98 (b) 압출비 9.5
(c) 압출비 13.69 (d) 압출비 21.39

Fig. 5. Conical type dice for indirect extrude with 30°
(a) extrude ratio 6.98 (b) extrude ratio 9.5
(c) extrude ratio 13.69 (d) extrude ratio 21.39

동일한 조건에서 40~50MPa사이의 유동응력을 나타내고 온도가 증가할수록 두 재료의 유동응력은 감소하지만 오히려 유동응력의 차이는 커짐을 알 수 있었다. 따라서 Al/Cu 복합압출재의 압출온도는 300~350℃가 적정함을 알 수 있었다.

2.2.2 압출비 선정

압출조건에 있어서의 또 다른 변수로는 압출비에 대한 적정한 선정이다. 이는 압출비가 증가할수록 변형저항의 증가에 따른 유동응력의 증가로 이 역시 피복재인 구리의 파단현상이 나타날 수 있기 때문이다. 특히, 본 연구에서의 목표인 Al/Cu 복합 부스바의 제조를 위해서는 압출 후 인발 및 압연 공정에 의한 제조가 요구되므로 건전한 압출이 가능하다면 압출비가 높을수록 적정한 인발 및 압연 공정의 감소에 따른 제조단가의 감소를 기대할 수 있다. 본 연구에서는 우선적으로 유동특성에 따른 압출온도의 적정성을 알아보기 위하여 비교적 낮은 압출비에서부터 시작하여 재료의 특성 및 피복율에 따른 압출특성을 관찰하였다. Al/Cu 복합압출재의 제조

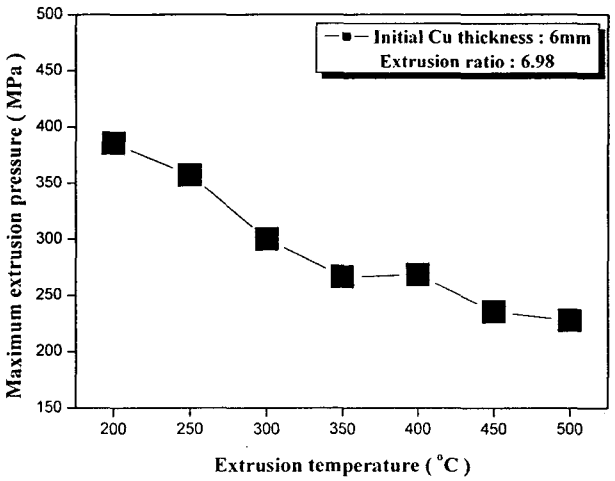


그림 6. 압출비 6.98와 구리피복두께 6mm에서 압출온도에 따른 최대압출압력

Fig. 6. Maximum extrude pressure according to extrude temperature with extrude ratio of 6.98 and copper thickness of 6 mm

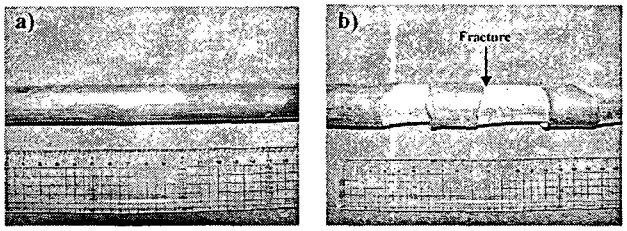


그림 7. 압출비 6.98와 구리피복두께 6mm에서 압출온도에 따른 Al/Cu 복합압출재 형상
(a) 300℃ (b) 400℃

Fig. 7. Formation of composite conductor according to extrude temperaturewith extrude ratio of 6.98 and copper thickness of 6 mm
(a) 300℃ (b) 400℃

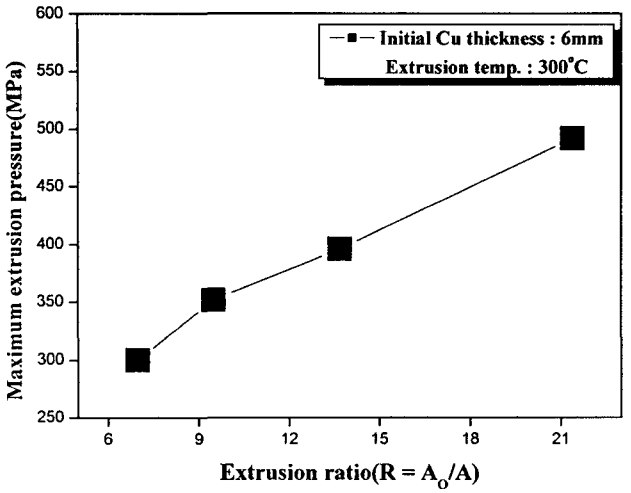


그림 8. 구리피복두께 6㎜, 압출온도 300℃에서 압출비 변화에 따른 최대압출압력

Fig. 8. Formation of composite conductor according to extrude ratio with copper thickness of 6 mm and ectrude temperature of 300℃

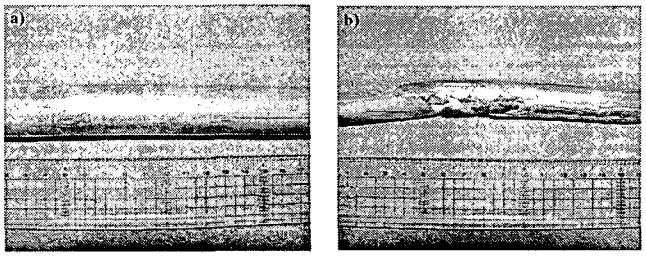


그림 9. 구리피복두께 6㎜, 압출온도 300℃에서 압출비 변화에 따른 Al/Cu 복합압출재 형상
(a) 6.98 (b) 21.39

Fig. 9. Maximum extrude pressure according the extrude ratio with copper thickness of 6 mm and ectrude temperature of 300℃

를 위한 압출온도의 적정성과 다이반각 등의 압출조건에 따른 압출성을 알아보기 위하여 심재를 알루미늄으로 압출비의 증가에 따른 압출성의 변화를 관찰하였다. 그림 5는 압출비에 따른 다이반각이 30°인 간접용 압출다이스 형상들이다.

2.2.3 압출온도 및 압출비의 영향

그림 6은 피복재인 구리의 두께가 6mm, 압출비가 6.98일 때 압출온도에 따른 최대압출압력의 변화를 나타낸 것이다.

최대압출압력은 압출온도가 200℃일 때 385.6MPa, 300℃일 때 300.2MPa, 400℃일 때 268.2MPa, 500℃일 때 227.7MPa로 압출온도가 높을수록 최대압출압력은 감소하였다. 이는 압출온도가 증가할수록 구리와 순알루미늄의 유동응력이 모두 감소하기 때문으로 판단된다. 그림 7는 압출온도에 따른 압출재의 외관을 나타낸 것으로 400℃이상의 압출온도에서는 피복재인 구리의 파단이 일어났으며, 이는 400℃이상의 압출온도에서는 앞의 유동특성에서 언급한 것과 같이 구리와 알루미늄 사이의 유동응력의 차이가 커지기 때문에 유동응력이 상대적으로 큰 피복재인 구리에서 파단이 일어나는 것으로 판단된다.

그림 8은 구리피복재 6mm와 압출온도 300℃조건에서 압출비에 따른 최대압출압력을 나타내었다. 압출비가 6.98일 때 300.2MPa, 9.5일 때 351.9MPa, 13.69일 때 395.9MPa, 21.39일 때 491.7MPa로 압출비가 증가할수록 최대압출압력은 증가하였다. 이는 압출비가 커질수록 빌렛과 다이스의 접합면이 커지게 되어 피복재인 구리의 유동응력을 증가시킬 뿐만 아니라, 변형응력이 증가하여 재료의 변형저항값을 증가시키기 때문이며 38.03의 높은 압출비에서는 압출재의 균일한 파단이 발생하였다. 그림 9는 피복재의 두께가 6mm인 경우 압출비에 따른 압출재의 외관을 나타낸 것으로 6.98의 낮은 압출비에서는 건전한 압출재가 얻어진 반면, 21.39의 큰 압출비에서는 피복재의 파단이 일어났다.

2.2.4 Al/Cu 복합 압출재의 접합특성

접합강도는 이종재료 즉 Al/Cu 복합 압출재의 특성에 매우 중요한 요인이다. 접합강도가 낮으면 건전한 압출이 이루어지더라도 접합특성이 불량하여 기계적, 전기적 특성에 악영향을 미칠 수 있으므로 우수한 접합강도를 갖기 위한 적정한 압출조건의 선정이 요구된다. 압출조건에 따른 압출재의 접합강도를 측정하기 위해 시험은 전단시험을 이용하여 측정하였으며, 시편은 압출재에 대하여 압축시험을 통하여 얻을 수 있다. 이때의 접합강도는 최대하중값을 심재와 피복재의 접합면적으로 나눈 값으로 식(1)과 같다.

$$\sigma = \frac{F_{max}}{S} \tag{1}$$

접합강도의 측정은 동일한 실험조건에서 5회 실험 후 최대

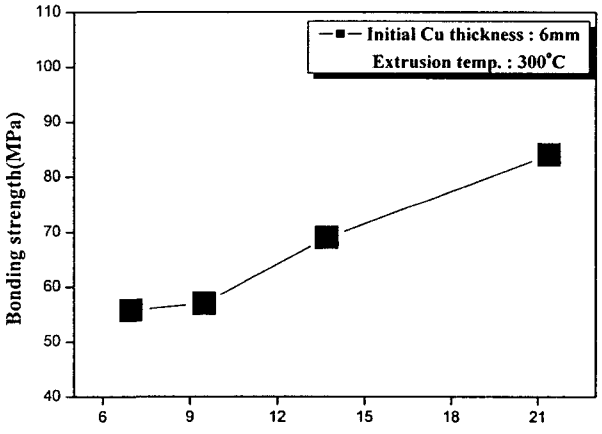


그림 10. 압출온도 300℃와 구리피복재 두께 6mm에서 압출비에 따른 접합강도

Fig. 10 Bonding strehgth according to the extrude ratio with copper thickness of 6 mm and ectrude temperature of 300℃

값과 최소값을 뺀 나머지 값을 평균하여 구하였다. 그림 10은 초기 피복재의 두께가 6mm, 압출온도 350℃일 때 압출비

에 따른 접합강도의 변화를 나타낸 것이다. 접합강도는 압출비가 6.98일 때 55.7MPa, 9.5일 때 57MPa, 13.69일 때 69MPa, 21.39일 때 84MPa로 압출비가 증가할수록 접합강도는 증가하였다. 따라서 우수한 접합강도를 얻기 위해서는 파단이 일어나지 않는 조건에서 높은 압출온도와 압출비를 선정하는 것이 유리함을 알 수 있었다.

2.3 복합 부스바의 표피효과 해석

복합도체는 도선에 교류 전류가 흐를 경우 도선의 외부로 전류가 집중되는 표피효과 특성을 이용하여 도체 내부에는 경량의 금속을 삽입하여 도체의 중량을 최소화하기 위한 목적으로 개발된다. 따라서 복합도체 내부의 전자기적 특성 특히, 주파수에 따른 전류 경로의 변화를 조사하는 것은 복합도체의 설계, 제작 및 특성 예측에 꼭 필요한 부분이다. 도체에 전계가 인가되면 아래의 식 (2)와 같은 멕스웰 방정식에 따라 전류가 발생한다.

$$J=\sigma\nabla\vec{E} \tag{2}$$

여기서, J = 전류밀도 A/m^2, σ = 도전율 S/m

또한 전류의 주파수가 증가함에 따라 도체 내부로 흐른 전류는 도체 표면을 따라 도전되려는 경향을 보이는데 이런 현상을 표피효과(skin effect)라고 하며 일반적인 단일 재질 도체에서의 표피효과에 의해 전류가 통전되는 영역 즉, '침투깊이'는 다음식 (3)과 같이 계산 할 수 있다 [3].

$$d=\frac{1}{\sqrt{\pi\sigma f\mu}} \tag{3}$$

여기서, d = 침투깊이 m, f = 주파수 Hz, μ = 투자율 H/m

표 1. 해석대상 물질의 제원

Table 1. Specification of analyzed materials

항목	저항율(Ω · m)	비중(kg/m^3)
구리	1.72×10^{-8}	8.94×10^{-3}
알루미늄	2.62×10^{-8}	2.7×10^{-3}

표 2. 주파수에 따른 침투깊이

Table 2. Penetration depth according to frequency

항목	침투깊이 (mm)			
	60 Hz	180 Hz	300 Hz	1,000 Hz
구리	8.52	4.92	3.81	2.09
알루미늄	10.52	6.07	4.70	2.58

위 식을 적용하여 복합도체의 재료로 사용되는 구리와 알루미늄에 대한 침투깊이를 계산할 수 있다. 아래 표1은 구리와 알루미늄의 일반적인 물질상수 이며, 표 2는 재료별로 몇 개의 주파수에 대한 침투 깊이를 계산한 것이다. 결과에서 보이는 바와 같이, 주파수가 증가함에 따라 침투깊이가 얕아짐을 알 수 있다. 그러나 본 수식으로 계산된 침투 깊이는 상당히 일반적인 경우를 산정한 것이므로, 복합도체의 모양 변화에 따른 전류 분포를 확인하는 방법이 되지는 못한다. 따라서 유한요소법을 이용한 전자장해석이 필요하게 된다.

2.3.1 유한요소법을 이용한 복합도체의 침투깊이 해석

그림 11과 12는 각각 구리와 Cu/Al 복합도체의 주파수에 따른 전류밀집현상 즉 표피효과에 대한 해석결과이다. 해석대상은 직경 16 mm의 원형 봉이며 그림 12에 나타낸 복합도체의 경우에는 구리와 알루미늄의 면적비가 구리:알루미늄 =0.721:0.279였다. 도체의 전송 전류는 600A로 전류밀도는

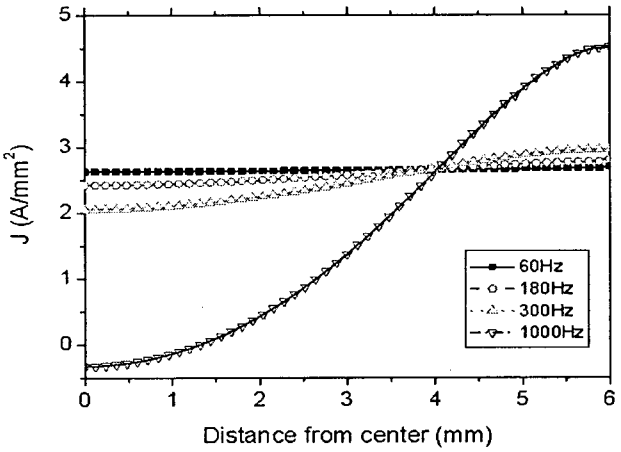


그림 11. 구리도체의 전류밀도 분포

Fig. 11 Current density distribution of copper conductor

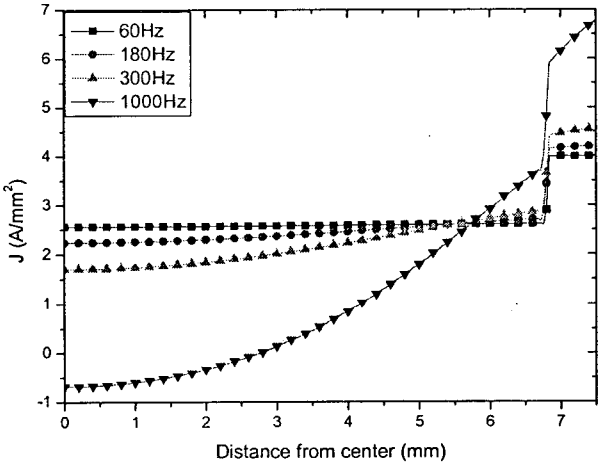


그림 12. Cu/Al 복합도체의 전류밀도 분포

Fig. 12. Current distribution density of Cu/Al composite conductor

2.98A/mm^{2}였다. 해석한 전류의 주파수는 각각 60, 180, 300, 1,000Hz였다. 두 가지 해석 모두에서 상용전원을 기준으로 한

제 5 고조파(300Hz)까지의 전류밀도 분포 변화는 작음을 알 수 있었다. 그러나 1,000Hz의 해석에서는 표면으로의 전류가 집중되는 표피효과에 의한 도체 표면부부의 전류밀도가 높아짐을 알 수 있다. 따라서 고주파 응용에서 표피효과에 의한 경량화 설계가 효과적이라고 볼 수 있다. 특히 그림 12에서 볼 수 있는 바와 같이 복합도체(내부:AL, 외부:Cu)를 사용함에 따라 비저항이 작은 바깥쪽으로 전류가 집중되었으며 표피효과에 저항비의 차이가 중복되어 바깥쪽인 구리로의 전류밀도가 더 커짐을 알 수 있었다. 즉, 복합도체를 사용함에 따라 표피부분으로의 전류집중도가 향상되었다. 이는 경량화 도체의 전류전송능력을 키워주는 효과이다.

복합도체에 주파수 1,000Hz의 전류를 통전시킬 경우 표피효과에 의한 전류집중으로 구리도체 부분에 대부분의 전류가 흐르는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 복합도체의 고주파기기 응용의 이점을 보여준다. 이 결과로써 본 논문의 서두에서 제시한 상용주파수의 전류를 흘리는 전기기기 외에 전력변환설비나 용접 등에 사용되는 고주파 응용 전기기기에 본 도체를 사용할 수 있는 가능성을 제시한다. 고주파 응용에 본 복합도체를 사용할 경우 알루미늄을 사용한 경량화 뿐 아니라 전류가 집중되는 부분에 도전율이 큰 도체를 배치하는 효율적인 도체사용 이점이 있다. 본 복합도체를 변압기 권선에 적용하면 기존 구리권선의 48%로 권선중량을 줄일 수 있을 것이다.

3. 복합부스바의 제작 및 평가

3.1 Al/Cu 복합부스바의 제작

제조공정조건으로 먼저 압출비는 고압출비를 통한 인발공정의 감소(원가절감 및 생산성 향상)를 고려하여 예비실험에서 제시한 조건보다 높은 압출비(25:1)와 적정한 조건 이내의 압출비(16:1)를 선정하였다. 압출속도는 ram speed를 기준으로 5~20mm/sec 정도의 속도로 압출하였다. 윤활재의 사용유무 및 종류가 Al/Cu 복합압출재의 압출성에 미치는 영향을 알아보기 위해 300~400℃의 온도에서 적정한 윤활재로 보고된 MoS_2계 페이스트 이용하여 실험하였다. 각 조건에 대한 압출실험은 모두 300℃의 온도에서 압출을 행하였다.

선행 실험 결과 적정 압출비보다 큰 압출비인 25에서 압출한 결과는 그림 13에서 알 수 있듯이 압출비가 25에서는 피복재의 파단이 크고 규칙적으로 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이러한 실험결과는 예비실험에서 언급한 것과 같이 적정 압출비 이상에서는 다이스와 빌렛의 마찰면적이 증가함에 따른 변형저항의 증가에 기인하는 것으로 판단된다. 윤활제는 빌렛과 다이스, 그리고 빌렛과 슬리브내의 마찰저항을 감소시킬 뿐만 아니라 재료의 유동을 원활히 하기 때문으로 윤활재의 사용은 반드시 필요하다고 판단된다. 그래서 300~400℃에서 적당하고 고르게 분포시킬 수 있는 MoS_2 윤활제를 사용한 결과, 피복재의 파단은 관찰되지 않았으며, 이는 윤활제를 사용하여 Al/Cu 복합압출재의 제조 적절함음을 알 수 있다. 그림 14는 이와 같이 제조된 압출재 중에서 압출이 건전하게 이뤄진 압출비 16, 다이반각이 30°, 압출속도가 5mm/sec 및 MoS_2 윤활제를 사용했을 때 얻어진 Al/Cu복합재의 압출재 형상 및 단면사진을 나타낸 것이다.

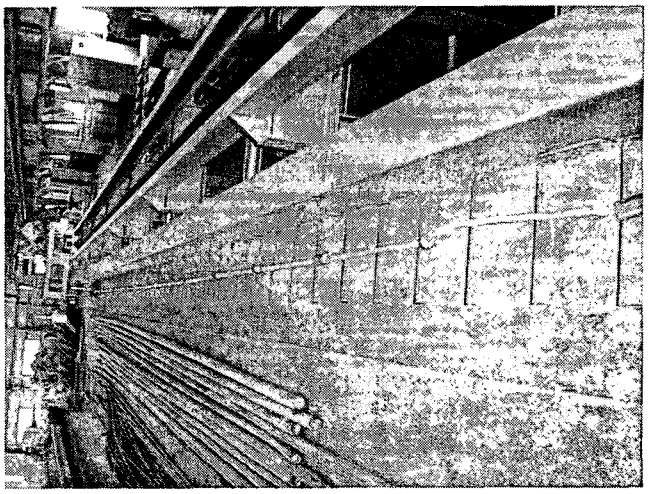


그림 13. 간접압출된 Cu/Al 복합도체(압출비: 25, 압출온도: 300℃, 구리피복: 16mm)

Fig. 13. Extruded Cu/Al composite conductor(extrude ratio: 25, extrude temperature: 300℃, copper thickness: 16mm)

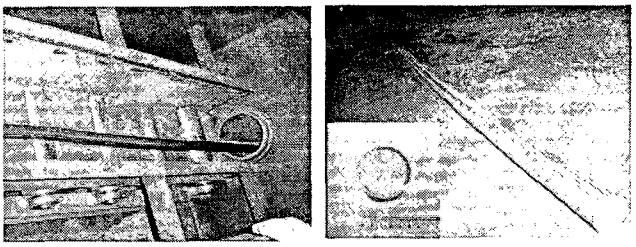


그림 14. 간접압출에 의해 제조된 Cu/Al 복합도체

Fig. 14. Manufactured Cu/Al composite conductor by indirect extrude method

3.2 Al/Cu 복합부스바의 평가

Al/Cu 복합압출재의 인장강도와 항복강도를 측정하였다. 3회 정도 실시하여 평균값을 나타냈으며, 그 평균값으로는 133.5MPa의 인장강도와 88.26MPa의 항복강도값을 나타내었다. 또한 앞서 설명한 접합강도 측정방법에 따라 76.3MPa의 강도를 나타내었다.

제작된 원형의 복합도체 샘플에 대한 전기전도도를 측정하였다. 저항의 측정 4단자법을 이용하였다. 즉, 도체에 전류를 흘리고 있는 상태에서 도체에 발생하는 전압을 측정한 후 이 값들을 오옴의 법칙에 적용하여 전기전도도를 측정하였다. 본 측정은 직류와 교류에 대해 측정하였으며, 교류의 경우 전류의 주파수를 증가시키면서 저항의 변화 추이를 조사하였다. 표 3은 복합도체의 사양 및 실험방법을 나타낸다. 측정된 직류 저항은 57μΩ이었다. 표 4는 교류저항의 측정결과를 나타낸다. 주파수 증가에 따라 저항이 줄어드는 것을 관찰할 수 있었으며 이는 통전주파수 상승 시 복합도체 사용에 따른 저항감소효과가 측정된 것으로 볼 수 있다.

표 3. 복합도체 사양 및 실험방법

Table 3. Specification of composite conductor and experimental setup

복합 도체 사양	직경	15.9mm	
	Cu 두께	1.2 mm	
	재질	내측:Al 외측:Cu	
실험 방법	DC 저항	전압탭 길이	50cm
		통전전류	100A
		Ramp rate	50A/sec
	AC 저항	전압탭 길이	50cm
		통전전류	100A
		Ramp rate	50A/sec
		주파수	60Hz,100Hz, 200Hz, 300Hz
		Noise 및 인덕턴스 캔슬 측정	

표 4. AC 저항 측정결과

Table. 4. Measured AC resistance

주파수(Hz)	전류 (Arms)	전압 (mVrms)	저항 (μΩ)
60	71.72	4.1	57.1
100	72.34	4.07	56
200	75.20	3.96	53.6
300	79.85	3.96	49.5

4. 결 론

Cu/Al 복합부스바의 최대 장점인 경량화에 부합되고, 최대 압출압력을 받지 않는 적정한 피복률은 15~30%임을 알 수 있었다. 압출온도는 구리 피복재와 심재의 유동응력을 측정하여 차이가 적은 300~350℃범위에서 적당함을 알 수 있었다. 또한, 생산성을 고려하여 압출비 25와 16을 시험으로 시험한 결과 압출비 25에서는 높은 압출압력으로 인하여 압출기의 다이스 및 슬리브에 악영향을 줄 수 있다. 그래서 본 연구에서는 압출비 16을 최적 압출비로 설정하였다. Cu/Al 복합재에 있어서 두 금속간의 접합강도는 압출온도 및 압출비가 증가할수록 증가하였으며, 이는 두 금속간의 확산거동과 관계가 있음을 알 수 있다. 유한요소법을 이용한 전자장해석에서는 Cu/Al 복합도체가 주파수에 따른 표피로의 자속선 집중도가 구리도체보다 더 커짐을 알 수 있었다. 즉, 복합도체를 사용함에 따라 표피부분으로 전류집중도가 향상됨을 알 수 있다.

상용전원을 기준으로 한 제 5고조파(300Hz)까지의 전류밀도 분포 변화는 표피로의 집중이 작음을 알 수 있었다. 그러나 1,000Hz에서 구리의 침투깊이를 파악한 결과 고주파 응용에서 표피효과에 의한 경량화 설계가 효과적이라고 볼 수 있다.

알루미늄의 단면적을 전체 도체 단면적의 75%로 제작한 복합도체를 변압기 권선에 적용할 경우 구리만을 사용한 권선의 48%로 권선중량을 줄일 수 있을 것이다. 기계적 특성 및 전기적 특성으로는 133.5MPa의 인장강도를 나타냈으며, 도전율은 직류에서 57μΩ를 나타내었다. 접합강도는 앞서 설명한 방법으로 측정한 결과 76.3MPa의 강도를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

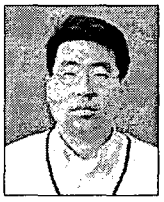
참 고 문 헌

[1] http://www.bussmann.com/library/docs/Disconnect/1200A-3150 Anfds.pdf

[2] http://www.eatonelectric.com.au/brochures/SVS_08.pdf

[3] David K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 370, 1989.

저 자 소 개



배 준 한 (裵 俊 漢)

1966년 4월 30일생, 1992년 건국대학교 전기공학과 졸업, 1994년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도 응용연구그룹 선임연구원

배 덕 권 (裵 德 權)

1971년 8월 16일생, 1998년 광운대학교 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2005년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 현재 한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터 선임연구원