

## 논문

## 동피복 복합선재 제조를 위한 연속주조공정의 최적화

조 훈<sup>†</sup> · 김대근\* · 황덕영 · 조형호 · 김윤규\*\* · 김영직\*한국생산기술연구원  
\*성균관대학교 신소재공학과  
\*\*창영산업(주)

## The Optimization of Continuous Casting Process for Production of Copper Clad Steel Wire

Hoon Cho<sup>†</sup>, Dae-geun Kim\*, Duck-young Hwang, Hyung-Ho Jo, Yun-Kyu Kim\*\*, and Young-Jig Kim\*

Adv. Mater. Ctr., Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-800, Korea

\*Dept. of Adv. Mater. Eng., Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea

\*\*Chang-young industry Co. Ltd., Incheon, 405-819, Korea

## Abstract

The copper clad steel wire is used extensively as lead wires of electronic components such as capacitors, diodes and glass sealing lamp because the wire combines the strength and low thermal expansion characteristic of Fe-Ni steel with the conductivity and corrosion resistance of copper. In order to fabricate the copper clad steel wire, several processes including electro-plating, tube-cladding extrusion process and dip forming process have been introduced and applied. The electroplating process for the production of copper clad steel wire shows poor productivity and induces environmental load generation such as electroplating solution. The dip forming process is suitable to mass production of copper clad steel such as trolley wire, and need expensive manufacturing facilities. The present paper describes the improvement of the conventional continuous casting process to fabricate copper clad steel wire, which its core metal is low thermal expansion Fe-Ni alloy and its sheath material is copper. In particular, the formation of intermetallic compound at interface between core and sheath was investigated in order to introduce optimum continuous casting process parameter for fabrication of copper clad steel wire with higher electrical conductivity. The mechanical strength of copper clad steel wire was also investigated through wire-drawing process with of 95% in total reduction ratio.

**Key words:** Continuous casting process, Copper clad steel wire, Fe-Ni alloy, Intermetallic compound.

(Received November 15, 2005; Accepted December 23, 2005)

## 1. 서 론

강을 심재로 하는 동피복 복합선재는 강이 가지고 있는 강도와 피복재인 동이 가지고 있는 특성을 동시에 만족시키는 이점이 있기 때문에 송전선, 통신선으로 사용되어 왔을뿐만 아니라 캐퍼시터등의 전자부품용 lead wire로서도 많이 이용되고 있다. 최근에는 작동중에도 기밀성이 유지되어야 하는 다이오드 등 glass sealing 전자부품의 lead wire용으로 심재를 저열팽창 Fe-Ni합금으로 하는 복합선재에 대한 수요가 증가하고 있는 실정이다[1,2]. 이와 같은 복합선재는 대부분 전기도금법, 테이프 압접법, Tube Clad압접법 및 용탕침적법등에 의해 제조되고 있으나 제조공정상의 한계로 인하여 통상적으로 Cu부착비율이 30% 이하이며 전기전도도는 50%IACS 이하의 것이 대부분을 차지하고 있다. 또한 전기도금법은 도금액의 폐수로 인한 환경오염으로 문제가 많고 테이프압접법이나 Tube Clad압접법은 제조원가가 높고 불량발생율이 높다는 문제점을 가지고 있다.

전기도금법이나 Tube Clad압접법등 제조방법상의 문제점을 보완하기 위해 개발된 용탕침적법은 최초로 GE사가 무산소동을 제조하기 위해 고안된 것이지만 일본 Fujikura 전선이 동피복 강선에 적용하여 현재 가동 중에 있다. 그러나 이 방법에 의해서도 예열장치, 도가니의 특수한 설계, 심재표면면삭장치 및 다이스의 냉각장치등 매우 복잡한 주변장치의 설계 및 제작이 필요하다. 결국 이러한 장치에 대한 막대한 투자비로 제조원가의 상승을 초래하기 때문에 대량생산 체제를 구축해야만이 경제성이 있어 극히 제한적으로 가동되고 있다[3-5].

최근 전자재료의 lead wire용으로는 보다 높은 성능이 요구되고 있기 때문에 40% 이상 동부착비율을 갖고 50%IACS 이상의 고전도성 복합선재의 수요는 급격히 증대되어 가고 있다. 이처럼 Cu부착비가 높은 복합선재를 제조할 경우 기존 용탕침적법, 전기도금법, Tube Clad압접법등으로는 결함발생등으로 인한 수율의 급격한 저하나 생산성 등에 한계가 있기 때문에 제조 원가가 적게 들고 품질이 우수한 새로운 제조방법이

<sup>†</sup>E-mail : hoony67@kitech.re.kr

모색되고 있다. 그 중에 하나가 복합선재 연속주조법의 적용이다. 복합선재 제조용 연속주조법은 청정한 용탕유지, 심재표면의 청정화, Cu부착비의 자유로운 제어, Cu부착두께의 정도, 심재와 Cu의 우수한 밀착성 등을 만족할 수 있는 장점을 가진 기술이므로 우수한 품질의 복합선재를 제조할 수 있으며 불량발생율이 저감되고 압출등의 가공공정이 생략되어 제조원가의 절감면에서도 매우 유리하다.

본 연구에서는 동피복복합선재 제조를 위한 연속주조장치를 제작하고 연속주조공정시 인출속도, 용탕온도의 변화에 따른 동피복복합선재의 심재와 피복재 계면반응층의 생성을 조사하여 전기전도도 저하원인을 고찰하였으며 미세조직 및 기계적 성질의 변화를 측정함으로써 고전도성 동피복 복합선재 제조를 위한 연속주조공정의 최적화를 실현하고자 하였다.

**2. 실험 방법**

본 연구에서 제작된 동피복 복합선재 제조용 연속주조장치는 용해 및 보온로, 심재 장입장치, 주형장치, 냉각장치, 인출장치로 구성되어 있으며 Fig. 1에는 연속주조장치의 모식도를 나타내었다. 피복재로 사용되는 전기동을 고주파 유도용해로에서 목탄에 의해 환원성 분위기가 유지되는 상태에서 용해하였다. 보온로 내에 있는 용탕의 온도를 1100~1200°C의 범위로 조절하였으며 인출작업시 냉각수의 입수온도는 약 21°C, 출수온도는 46°C의 범위로 조절하였고 냉각수의 유량은 약 4 l/min 이었다. 보온로 하부에 설치된 주형장치로 Fe-Ni합금 심재를 삽입하면서 수평방향으로 연속주조하였다. 이때 인출속도는 50 mm/min에서 150 mm/min으로 변화시키면서 직경 10 mm의 동피복 복합선재를 연속주조하였다.

연속주조법에 의해 동피복복합선재를 제조하기 위해서는 연속주조 주형내에서의 응고선단의 위치를 예측하고 그에 따른 심재의 침적시간을 최적화할 필요가 있다. 본 연구에서는 주형으로 사용된 흑연주형에 각각 용탕으로부터 40, 60, 80 그리고 100 mm 떨어진 지점에 열전대를 삽입하여 주형내의 온도분포를 측정하였으며 측정결과를 Fig. 2에 나타내었다. 피복재인동의 응고온도(1083°C)를 이용하여 산정한 연속주조시 주형내에서의 응고선단의 위치는 용탕으로부터 42-64 mm 떨어진 지

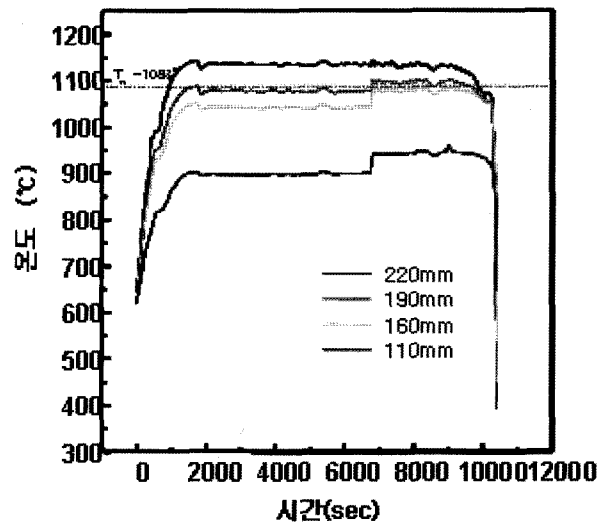


Fig. 2. Temperature profile within the mold during continuous casting process. (a) V=50 mm/min (b) V=100 mm/min (c) V=150 mm/min.

점에서 형성됨을 알 수 있었으며 응고선단의 위치는 주조온도가 높거나 인출속도가 빠를수록 용탕으로부터 멀리 떨어져 형성됨을 알 수 있었다.

연속주조법에 의해 제조된 동피복복합선재를 대상소재로 하여 인출속도 및 연속주조온도 변화에 따른 계면반응층의 생성을 EPMA와 WDX등을 이용하여 조사하였으며, Yokogawa사 portable double bridge(model 2769)와 동사의 Current & potential clamp(model 2754) 장비를 이용하여 길이 50 cm로 절단된 복합선재의 저항을 측정후 체적에 의해 비저항을 산출하고 이를 IACS로 환산하였다.

**3. 실험결과 및 고찰**

**3.1 인출속도에 따른 동피복 복합선재의 특성 변화**

Fe-Ni 합금선재를 심재로 하는 동피복 복합선재의 종단면 거시조직을 Fig. 3에 나타내었다. 인출속도가 50 mm/min인 경우에는 연속주조방향과 평행하게 성장한 결정립들이 관찰되면 그들의 평균 크기는 3500-4000 μm의 범위를 나타냄을 알 수 있다. 반면에 연속주조속도를 150 mm/min을 증가시켜 주조한 동피복 복합선재에서는 연속주조 방향과 평행하게 성장한 결정립 외에도 심재주위에서 핵생성 및 성장한 결정들이 관찰되며 평균결정립의 크기가 2000 μm 이하임을 알 수 있었다. 이는 연속주조 속도 증가에 의한 고액계면의 곡률이 증가하고 그로 인한 열방출방향이 변화하였기 때문이며, 연속주조 증가에 의한 냉각속도 증가에 의한 과냉도 증가에 의해 다수의 핵이 생성하고 성장하였기 때문인 것으로 설명된다. Fig. 4에는 동피복복합선재에서 심재의 직경변화를 측정된 결과를 나타내었으며 Table 1에는 심재와 피복재 계면에서 피복재쪽으로 500 μm 떨어진 지점에서 측정된 WDX 분석결과를 나타내었다. 주조온도가 1100°C일때 Heisler가 제시한 방법에 의해 심재표면의 온도를 산정하면 심재의 온도가 피복재의 용융온도에 도달하는데 필요한 시간은 30초 이내임을 알 수 있다. 즉 주조속도가

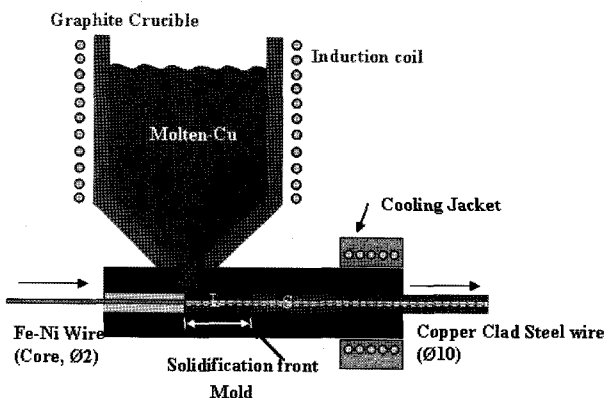


Fig. 1. Schematic illustration showing continuous casting equipment for copper clad steel wire.



(a) V=50mm/min (b) V=100mm/min (c) V=150mm/min

Fig. 3. Macrostructure of copper clad steel wire in variation of casting speed(V).

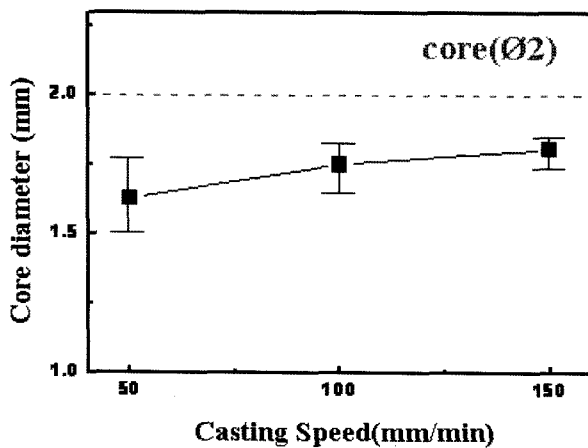


Fig. 4. The change of core diameter in variation of casting speed.

Table 1. WDX analysis result of Fe and Ni in sheath material. (wt. %)

	Fe	Ni	Fe+Ni
50 mm/min	1.6848	1.3572	3.042
100 mm/min	0.3423	0.2411	0.5834
150 mm/min	0.2941	0.1917	0.4848

150 mm/min 이하인 경우에는 심재가 용융동 속을 통과하는 침지시간이 50초 이상이므로 심재의 온도가 용융에 필요한 온도까지 충분히 상승하여 심재의 국부적인 용융(oxidation)이 발생한 것으로 보이며 그로인해 피복재에 Fe와 Ni등이 혼입됨을 알 수 있었다. 이와 같이 심재의 용융과 그로인한 피복재의 오염에 의해 Fig. 5에서 보는 바와 같이 동피복 복합선재의 전기전도도는 58%IACS에서 38%IACS로 저하함을 알 수 있었다.

Fig. 6에는 동피복 복합선재에서 피복재와 심재계면에서의 반응층 생성을 관찰하기 위하여 행한 EPMA 분석결과를 나타내었다. 주조속도가 50 mm/min인 경우에 비하여 주조속도가 150 mm/min인 경우에 심재와 피복재 계면에서 피복재 쪽으로의 Ni의 확산거리는 감소하는 경향을 나타내었으나 계면에서의 반응층 생성은 관찰되지 않았다. 또한 Fig. 7에서 나타난 계면에서의 미소경도 측정결과에서도 반응층 생성이 관찰되지 않았음을 알 수 있다. 이는 심재가 용융동에 침지되어 주형을 통과하는 동안 심재의 용융이 발생하고 용융된 Fe와 Ni은 용융상태인 Cu중에 매우 빠른 속도로 혼입되고 응고된후 주형에서

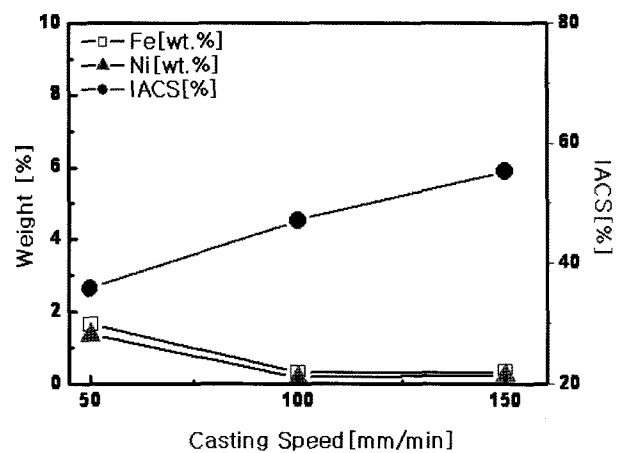


Fig. 5. The influence of casting speed on electrical conductivity of copper clad steel wire FeNiCu50mm/min100 mm/min150 mm/min.

의 냉각구역을 통과함에 따라 계면반응층 생성이 억제되었을 것으로 사료된다. 또한 Fig. 7에서 보는바와 같이 계면에서 피복재로 800 μm 이상 떨어진 지점에서의 경도가 순동의 경도보다 15 Hv 이상 높게 관찰되는 것으로 보아 Fe와 Ni등의 심재금속원소의 용융에 의한 혼입이 피복재내에서 매우 넓은 범위에 걸쳐 일어났음을 알 수 있다.

연속주조속도의 변화에 따른 이상의 실험결과를 종합하여 볼 때 Fe와 Ni과 같은 심재금속원소의 혼입에 의한 동피복재의 오염을 방지하여 55%IACS 이상의 고전도 동피복 복합선재를 제조하기 위해서는 연속주조시 인출속도를 150 mm/min이상으로 제어하여 심재의 용탕침지시간을 30초 이내로 하여야 함을 알 수 있었다.

### 3.2 연속주조 온도에 따른 동피복 복합선재의 특성 변화

연속주조법에 의해 동피복복합선재를 제조하는 경우, 연속주조 온도 변화에 따른 동피복복합선재의 계면반응층 생성 및 전기전도도 변화를 조사하기 위하여 심재를 Fe-Ni 합금으로 하는 직경 10 mm의 동피복 복합선재를 주조온도 1100, 1150 그리고 1200°C의 공정조건에서 제조하였다. 이때 인출속도는 100 mm/min으로 일정하게 하였다. Fig. 8에는 동피복 복합선재의 종단면 거시조직을 나타내었다. 연속주조 온도변화에 따른

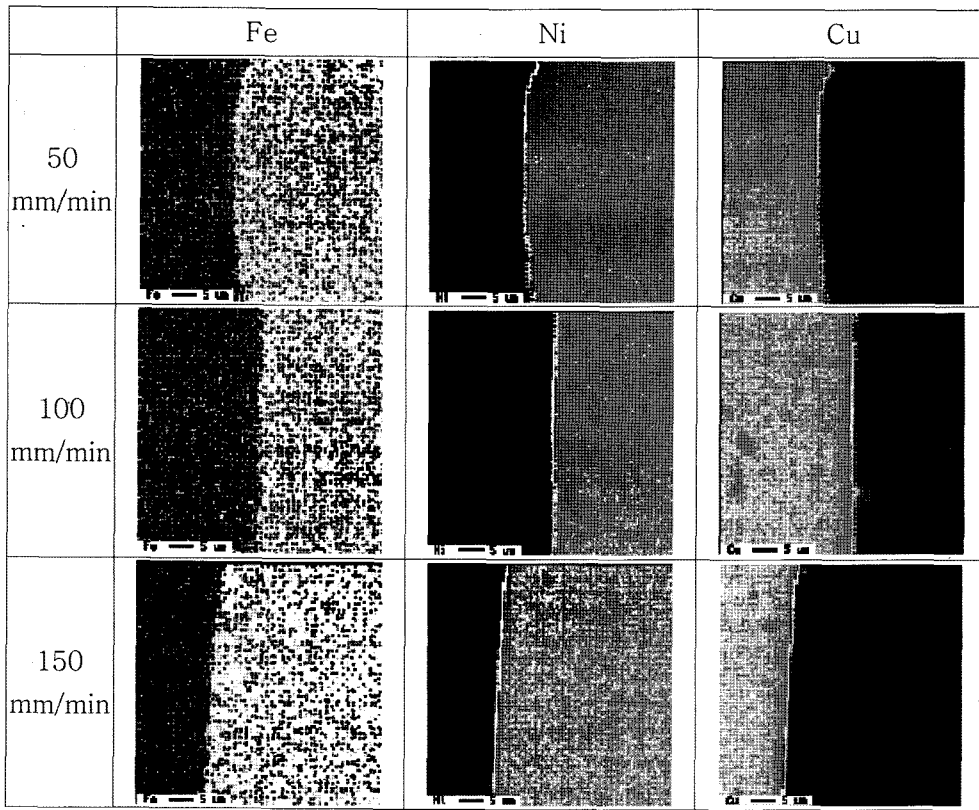


Fig. 6. EPMA analysis result showing Fe, Ni and Cu distribution at core/sheath interface.

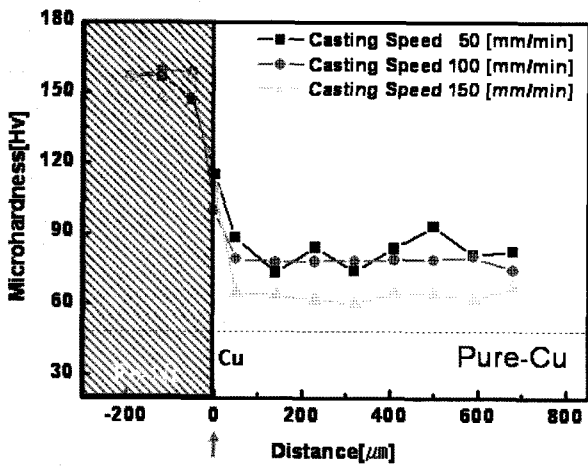


Fig. 7. Microhardness measurement result of copper clad steel wire in variation of casting speed. (a) T=1100°C (b) T=1150°C (c) T=1200°C.

피복재 거시조직의 결정성장 방향의 변화는 매우 미미하였음을 알 수 있었으며 평균결정립의 크기도 2000 μm로 주조온도 변화에 영향을 받지 않았음을 알 수 있다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 주조온도가 1200°C인 경우에는 심재의 직경변화가 매우 크게 관찰되었다. 이는 주조온도 증가에 의해 용고선단이 용탕으로부터 상대적으로 멀리 떨어진 지점에서 형성됨에 따라 심재의 용탕침지시간이 증가하는 결과를 초래하였고 더욱이 용융동의 온도가 높음으로 인해 심재의 용융 및 심재금속원소의 혼입이 급격히 일어났음을 설명할 수 있다. 심재와 피복재 계면에서 피복재쪽으로 500 μm 떨어진 지점에서 측정된 WDX 분석결과에서도 피복재내의 Fe와 Ni와 같은 심재금속원소의 혼입을 관찰되었으며 그로인해 Fig. 10에서 보는 바와 같이 전기전도의 저하가 발생하였다. 이는 앞서 살펴본 인출속도의 영향과 마찬가지로 용융동내를 통과하는 심재의 침지시간 증가 및 용융동 온도의 증가로 설명할 수 있다.

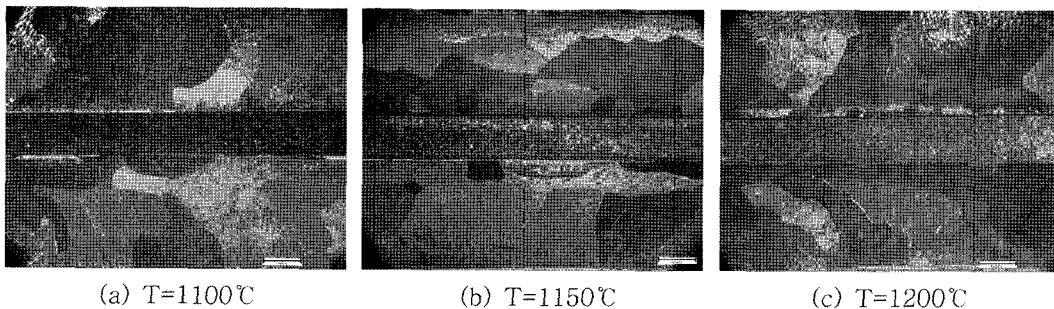


Fig. 8. Macrostructure of copper clad steel wire in variation of casting temperature(T).

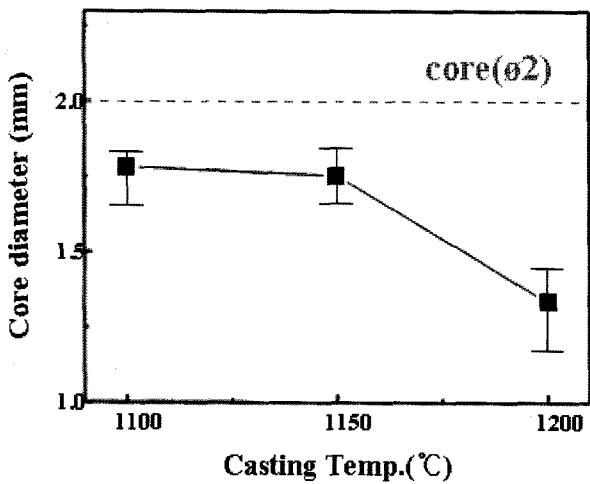


Fig. 9. The change of core diameter in variation of casting temperature.

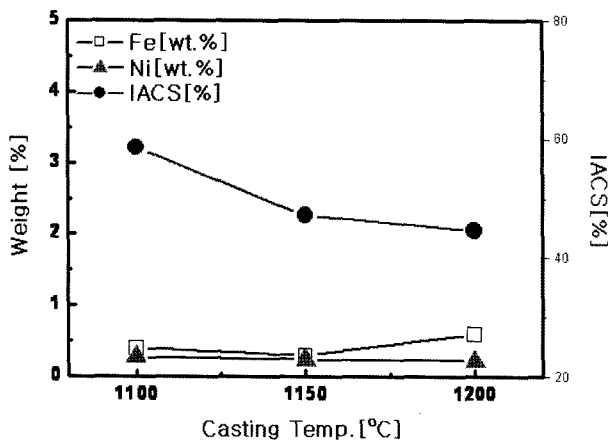


Fig. 10. The influence of casting temperature on electrical conductivity of copper clad steel wire.

동피복 복합선재에서 피복재와 심재계면에서의 반응층 생성을 관찰하기 위하여 행한 EPMA 분석결과에서 알 수 있듯이 연주속도를 변화시킨 경우와 마찬가지로 심재와 피복재 계면에서의 반응층 생성은 관찰되지 않았다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 계면에서의 미소경도 측정결과에서도 반응층 생성이 관찰되지 않았음을 알 수 있다. 이는 심재가 용융동에 침지되어 주형을 통과하는 동안 심재의 용융이 발생하고 용융된 Fe와 Ni은 용융상태인 Cu중에 매우 빠른 속도로 혼합되고 응고된 후 주형에서의 냉각구역을 통과함에 따라 계면반응층 생성이 억제되었을 것으로 사료된다. 계면에서 피복재로 800 μm 이상 떨어진 지점에서의 경도가 순동의 경도보다 15 Hv 이상 높게 관찰되며 또한 피복재 경도의 증가는 연주온도가 증가할 수록 더욱 심화되는 것으로 보이는 것으로 보아 Fe와 Ni등의 심재 금속원소의 용융에 의한 혼입이 피복재 내에서 매우 넓은 범위에 걸쳐 일어난 것으로 사료된다.

연속주조온도의 변화에 따른 이상의 실험결과를 종합하여 볼 때 Fe와 Ni과 같은 심재금속원소의 혼입에 의한 동피복재의

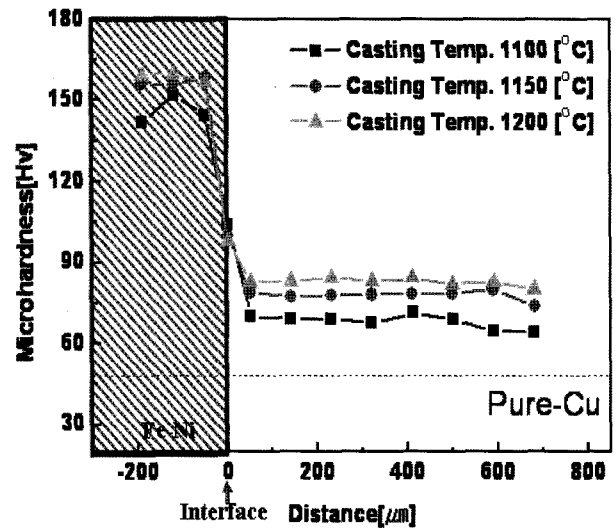


Fig. 11. Microhardness measurement result of copper clad steel wire in variation of casting temperature.

오염을 방지하여 55%IACS 이상의 고전도 동피복 복합선재를 제조하기 위해서는 연속주조시 연주온도를 1150°C 이하로 제어하여야 함을 알 수 있었다.

본 연구에서 제조한 다이오드용 동피복 Fe-Ni 복합선재의 인장강도를 측정된 결과, 본 연구에서 제조한 직경 0.5 mm 이하의 동피복 복합선재의 인장강도는 450 MPa 이상으로 심재로 사용한 Fe-Ni합금의 인장강도와 유사함을 알 수 있었으며 또한 동소재의 인장강도(TPC소재, W-H, 345 MPa)와 비교하여도 40% 이상 향상되었음을 알 수 있었다. 결론적으로 본 연구를 통하여 제조한 다이오드용 동피복 Fe-Ni 복합선재 시제품은 연속주조공정의 확립에 의해 내부 및 외부 결함이 억제된 건전한 상태로 주조되었음을 알 수 있었으며 총 단면감소율 95%로 0.5 mm까지 인발가공하는 경우에도 단선이 발생하지 않았음을 확인하였다. 또한 인장강도 및 전기전도도등이 기존의 다이오드용 소재에 비하여 우수함을 알 수 있고 특히 동피복 복합선재의 고강도화 및 고전도성을 확보함에 따라 다이오드용 lead wire의 세선화를 기대할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

연속주조법에 의해 심재를 Fe-Ni합금으로 하는 동피복 복합선재를 제조하기 위하여 연속주조장치를 제작하고 연속주조공정 변수의 최적화에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 심재의 용융과 그로인한 심재 금속원소의 피복재료의 혼입 및 오염을 억제하여 고전도성 동피복 복합선재를 제조하기 위해서는 인출속도 150 mm/min이상, 용탕온도 1150°C 이하의 공정조건이 최적의 공정변수임을 알았다.

2) 연속주조법의 적용에 의해 전기도금법등과 같은 기존 동피복 복합선재 제조공정에서 얻을 수 있었던 동피복 비율을 초과하는 60% 이상의 높은 피복비율을 갖는 동피복 복합선재의 제조가 가능함을 알 수 있었으며 55%IACS 이상의 우수한

전기전도도 확보가 가능함을 알 수 있었다.

3) 본 연구를 통하여 직경 0.5 mm 이하의 다이오드용 lead wire 소재로 사용되는 동피복 복합선재의 연속주조공정을 확립 하였으며 향후 복합 EDM wire 소재의 제조에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 산업기술개발사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

[1] Sano *et al* : United Patent, "Method of manufacturing a copper

electrical conductor, especially for transmitting audio and video signals and quality control method for such conductors" Patent No. 5,443,665.

[2] A. Fox, E. Fuchs, M. Davis, Wire journal international, "Fatigue of Steel Wire and Copper-clad Steel Conductor Used for Telephone Drop Wire", 16(4) (1983) 62-70.

[3] M. Kornmann, J. Rexer, E. Anderson, Wire journal "High Speed, Hot Dipping Of Steel Wire", 11(8) (1978) 52-58.

[4] Takayama *et al* : United Patent, "Method of manufacturing high-conductivity copper-clad steel trolley wire" Patent No. 5,087,300.

[5] Howell *et al* : Wire and Wire products, " Metal clad extends copper clad conductor range to 1300F", No. 8 (1967) 1312-1383.