

# Al-0.11Fe계 합금에서의 Zr원소 미세첨가에 따른 연속주조재 및 압연재의 특성

김병걸, 김상수, 김성규\*, 김한얼\*, 김지상\*\*  
 한국전기연구원, 부경대학교\*, KTC(주)\*\*

## The Effect of Zr element on the Properties of Continuous Casting and Rolling Materials for Al - 0.11wt.%Fe Alloy

Byung-geol Kim, Shang-shu Kim, Sung-kyu\*, Han-sik Kim\*, Ji-sang Kim\*\*  
 KERI, Pukyung University, KTC\*\*

**Abstract :** In order to develop non-heated STAl(super thermal resistant Aluminum alloy) for ampacity gain conductor, the systematic research was carried out. Especially, the effect of a very small amount of Zr element in EC grade Al ingot on mechanical and electrical properties was our priority. As a result, it was found that the strength and recrystallization temperature of designed alloy was gradually increased with Zr addition up to 0.3wt.%. However, the electric conductivity showed no drastic change. The tensile strength and recrystallization temperature, 17.75 kgf/mm<sup>2</sup> and 420℃, was obtained at 0.3 wt.% Zr addition, respectively.

**Key Words :** Zr, STAl, EC grade, Tensile Strength, Recrystallization Temperature, Electric Conductivity

### 1. 서 론

현재 국내는 대도시의 고밀도화와 함께 생활수준의 향상, 산업의 발전으로 전력수요가 매년 10%가까이 급증하고 있다. 전력수요 증가에 대응하기 위해서 발전용량증대뿐만 아니라 발전소에서 사용처인 대도시나 공업단지 등에 증산된 전력을 원활히 공급하기 위한 송전선로의 용량증대가 요구되고 있다. 이런 이유로 우리나라의 한국 전력은 90년대 후반부터 STACIR(Super Thermal-resistant Aluminum-alloy Conductors, Invar Reinforced)류 대용량 송전선을 부하가 급증한 지역에 설치하여 운영하고 있다. STAl이 적용한 STACIR전선은 동일규격의 ACSR전선과 비교할 때, 약 두 배 가까이 송전용량을 증가시킬 수 있다. STAl은 내열성 향상원소로서 0.25~0.3wt.%의 Zr원소를 첨가하여, 고온에서 장시간 열처리하여 수십~수백 nm 크기의 미세한 Al<sub>3</sub>Zr 준안정상을 Al기지 내에 균일하게 석출시켜 고온에서도 결정입계의 이동을 억제함으로써 높은 내열특성을 달성하고 있다. Zr원자의 원자반경은 16nm로 Al의 14.3nm에 비해 상당히 크고, 용점 또한 대단히 높기 때문에, 열처리 시 그 확산속도가 매우 느려, Al<sub>3</sub>Zr 준안정상을 석출시키기 위해서는 450℃의 고온에서 48시간 이상의 장시간 열처리가 필요하다. STAl은 에너지 다소비형 제품이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 STAl 제조 시, 첨가원소의 편석을 최소화하고, 석출상 형성을 위한 열처리공정이 필요하지 않는 비열처리형 STAl을 개발하는 것을 목적으로 한다. 열처리공정이 생략됨으로 인하여 제조효율의 증가와 더불어 제조단가가 약 30% 정도 하락이 예상된다.

### 2. 실험

비열처리형 초내열 Al합금을 개발하기 위하여 99.8% EC(Electrical Conduct) Al합금을 사용하였다. 표 1에

EC Al의 화학조성을 나타내었다. Zr을 최대 0.3wt%까지 첨가하여 연속주조, 연속다단압연, 냉간압연 공정을 거쳐 시험편을 제조하여 기계적 특성, 내열성, 도전율을 측정하였다.

표 1 EC Al grade의 화학조성

Al	Si	Fe	Ni	Zn	Ti	V	Ga	B	Na
99.84	0.04	0.11	0.006	0.001	<0.001	0.001	0.015	0.006	0.002

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 Cast bar의 제조

용해로에서 출탕된 용탕이 압연기에 들어가기 전까지의 공정에서 Al은 용융상태에서 응고하여 450℃ ~ 550℃의 cast bar로 응고한다. 이 과정에서 전선용 도체의 기본적인 물성과 구조결합의 발생여부가 거의 결정되므로 세심한 관리가 필요한 공정이다. 응고속도는 냉각수의 양과, 냉각수 온도, mold ring의 회전속도, mold ring과 steel belt의 재질에 따른 열전도도, 용탕의 온도 등 여러 가지가 복합적으로 작용하고, 최종적으로 cast bar의 온도가 이들의 영향에 대한 결과치로 나타난다. mold ring의 온도를 최대 550℃로 유지하였으며 주조된 cast bar의 온도는 460℃ ~ 490℃이다. cast bar의 온도가 과도히 낮을 때에는 다음과정인 연속다단압연에서 압착불량에 의한 균열의 위험성이 높아지고, cast bar의 온도가 과도히 높을 때에는 압연은 용이하나 cast bar의 중앙부에 미세 수축공의 발생의 위험이 높아진다. 미세수축공이 압연과정에서 압착되지 못하면 차후 신선과정에서 중앙부 단선의 원인이 된다.

#### 3.2 연속다단압연

연속다단압연 roll은 13strand로서 각 roll의 압연비, 압

연속도가 중요하고, 특히 압연유의 온도, 윤활제(emulsion)의 첨가량 등이 중요하다. 압연유의 온도는 cast bar의 압연시 냉각속도에 크게 영향을 주고, 압연유의 온도가 낮으면 균열의 원인이 되거나 압연된 직경 9.5mm의 선이 낮은 전기전도도를 나타내나 인장강도는 증가한다. 연속다단압연시 시작온도는 약 490℃이며 13pass를 거치며 각 단계별의 압연율은 평균적으로 25%로 직경 9.5mm로 권치기에 coiling될때의 온도는 250℃ ~ 290℃를 나타내었다. 윤활제의 온도는 40℃ ~ 50℃로 계면활성제를 사용한다. cast bar을 열간압연하는 것은 주조조직을 파괴하고 정출한 Zr, Fe등을 포함한 조대한 정출물을 분쇄하여 균일하고 미세하게 분포시켜 강도를 향상시킴과 동시에 신선후 처리에 있어서 Zr 등의 석출site가 되는 전위를 증식시키기 위해서 이다. 열간가공온도를 550℃이하에서 시작하여 350℃이하에서 가공을 종료하는 이유는 열간가공 개시 온도가 550℃를 초과하면 Zr, Si, Be 등의 강제 고용된 합금원소가 조대하게 석출되어 내열성과 강도 등의 특성향상에 기여하지 않는 현상이 발생되었으며 열간가공의 종료온도가 350℃ 이상에서는 Zr의 석출site가 되는 전위의 증식이 충분하지 않았다.

또한 열간 가공시 단면감소율을 92%로 하였다. 이는 단면감소율이 80%미만에서는 주조조직의 파괴, 조대한 정출물의 분쇄, 전위의 증식 등이 충분히 일어나지 않았기 때문이다.

### 3.3 Al-0.11Fe-Zr합금의 특성

그림 1은 EC Al에 Zr원소 첨가함량에 따른 인장강도와 전기전도도 변화를 나타낸 것이다. EC Al의 인장강도는 16.6kgf/mm<sup>2</sup>으로 전선용 Al합금의 강도기준을 만족하였다.

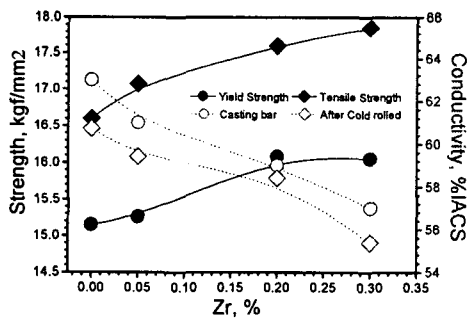


그림 1 Zr함량에 대한 강도, 전기전도도변화

Zr을 첨가하면 그림에 나타난 것처럼 강도는 점차적으로 증가하였으며, Al-0.3wt%Zr합금의 인장강도는 17.85kgf/mm<sup>2</sup>으로 상당히 높게 나타났다. 그러나 강도가 증가하면 전기전도도는 감소하게 된다. EC Al의 전기전도도는 60.72%IACS에서 55.4%IACS로 감소하였다. 이는 강도와 도전율은 반대되는 요소로 Zr의 첨가로 주조나 연속다단압연중에 Al<sub>3</sub>Zr이 정출되므로 인해 강도는 증가하지만 전기전도도는 감소하게 된다. 가공에 의한 전기전도도는 약 2 ~ 3%IACS 정도 감소하였다. EC Al Casting bar의 전기전도도는

63.0%IACS에서 연속다단압연과 냉간가공에 의해 60.7%IACS로 2.3%IACS 감소하였다. Al-0.3%Zr합금의 경우 57.0%IACS에서 가공에 의해 55.4%IACS로 감소하였다. 이는 가공 중에 형성된 전위 등의 결함에 의해 증가된 것이다.

Zr함량에 따른 재결정온도를 표 2에 나타내었다. 재결정온도는 200℃에서 500℃까지 각 100℃단위로 1시간 동안 열처리 후 상온 인장강도가 50% 연화하는 온도로 결정하였다. Zr을 첨가할수록 고용강화와 시효석출 등에 의해 재결정온도는 증가하였다. EC Al합금의 재결정온도는 약 360℃이며, 0.3wt%Zr합금의 경우 약 420℃로 증가하였다. 반대로 400℃에서 한 시간 유지한 후 상온 전기전도도는 2~5%IACS증가하였다. 이는 Zr, Fe을 포함한 Al<sub>3</sub>Zr과 Al<sub>3</sub>Fe정출물이 분쇄되어 균일하고 미세하게 분포됨과 동시에 열처리하는 동안 재료내부에 포화되어 있던 Zr과 Fe가 석출되었기 때문인 것으로 사료된다.

표 2 Zr첨가에 의한 재결정 및 400℃전기전도도

조성	재결정온도 (℃)	전기전도도 (%IACS)
EC Al	360	62.88
Al-0.05wt%Zr	382	60.57
Al-0.2wt%Zr	390	59.0
Al-0.3wt%Zr	420	59.0

## 4. 결론

본 연구에서는 STAl 제조 시, 열처리 공정이 생략되는 비열처리형 STAl개발에 있어 Zr첨가에 따른 합금의 특성을 연구한 결과 다음과 같다.

연속주조시 주조 bar의 압연성과 주조결합 등을 고려한 최적의 조건은 mold ring의 온도를 최대 550℃로 유지하였으며 주조된 cast bar의 온도는 460℃ ~ 490℃이다.

연속다단압연시 시작온도는 약 490℃이며 권치기에 coiling될때의 온도는 250℃ ~ 290℃를 나타내었다. 열간가공 개시 온도가 550℃를 초과하면 Zr의 강제 고용된 합금원소가 조대하게 석출되어 내열성과 강도 등의 특성향상에 기여하지 않는 현상이 발생되었으며 열간가공의 종료온도가 350℃ 이상에서는 Zr의 석출site가 되는 전위의 증식이 충분하지 않았다.

EC Al합금의 인장강도와 재결정온도는 16.6kgf/mm<sup>2</sup>, 360℃며 Zr첨가에 따라 인장강도와 재결정온도는 고용강화, 석출 등에 의해 증가하였다. 약 0.3wt% 합금의 인장강도와 재결정온도는 17.75kgf/mm<sup>2</sup>, 420℃로 상승하였다. 이는 Zr, Fe을 포함한 Al<sub>3</sub>Zr과 Al<sub>3</sub>Fe정출물이 분쇄되어 균일하고 미세하게 분포에 의한 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- [1] E. Nes : Acta Met., 20 (1972) 499
- [2] E. Nes and H.Billdal : Acta Metal., 25 (1977) 1031
- [3] HORI Shigenori, KONDO Toshio and IKENO Susumu : J. Jpn. Inst. Light Met., 28 (1978) 79