

# 유한요소해석을 이용한 Al-Si 선재의 인발 공정해석

황원호\* · 김병민\*\* · 김원용\*\*\*

## Analysis of drawing process of the Al-Si wire using FEM

W. H. Hwang, B. M. Kim and W. Y. Kim

### Abstract

This paper is concerned with the drawing process of Al-Si wire. In this study, the finite-element model established in previous work was used to analyze the effects of various forming parameters, which included the reduction in area, the semi-die angle, the aspect ratio and the inter-particle spacing of the Si in drawing processes. The finite-element results gave the consolidation condition. From the results of analysis, the effects of each forming parameter were determined. It is possible to obtain the important basic data which can be guaranteed in the fracture prevention of Al-Si wire by using FEM simulation.

**Key Words :** Al-Si Wire(Al-Si 선재), Aspect Ratio(종횡비), Inter-particle Spacing(입자 간격), Semi-die Angle(다이반각), Reduction In Area(단면감소율), Damage(손상값), Effective Strain(유효변형률)

### 1. 서론

열팽창 계수가 적고, 비중이 적고, 내마멸성이 우수하며, 고온강도 및 기계가공성이 좋은 Al-Si 선재의 신선 공정 시 공정 변수들의 영향을 파악하여 적절하지 못한 공정에 의해서 발생하는 각종 신선 결함을 억제하고, Si 조직의 Aspect ratio와 inter-particle spacing에 따른 적절한 다이스 패스를 설계함으로써 각종 신선 결함이 없는 Al-Si 선재의 신선 및 생산성 향상에 기여하고자 한다. 따라서 현재 널리 시행되고 있는 등단면 패스 스케줄에 대해서 평가하고, 이를 수정하여 적절한 Al-Si 선재의 패스 스케줄을 설계하고자 한다.

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D를 이용하였으며, Al-Si 합금에서 나타나는 여러 가지 Si 조직의 Aspect ratio와 inter-

particle spacing 변수에 대해서 신선 공정 시 결함 발생에 영향을 미치는 damage와 Al과 Si사이의 effective strain을 평가하여 적절한 다이반각과 단면 감소율을 결정하였다.

### 2. Al-Si 선재의 기계적 상태량과 해석조건

#### 2.1 Al-Si 선재의 기계적 상태량

Al-Si 선재의 인발공정 해석을 수행하기 위해서 Al-Si 선재의 유동 응력식은 인장 시험을 통하여 구했으며, Al 과 Si 의 물성치는 Pure Al 과 Pure Si 의 물성치를 사용하였다.

$$\text{Al-Si} : \bar{\sigma} = 180(\bar{\epsilon})^{0.35} \text{ (Mpa)} \quad (1)$$

$$\text{Pure Al} : \bar{\sigma} = 171(\bar{\epsilon})^{0.31} \text{ (Mpa)} \quad (2)$$

$$\text{Pure Al} : \bar{\sigma} = 120(\bar{\epsilon})^{0.01} \text{ (Mpa)} \quad (3)$$

\* 부산대학교 정밀기계공학과  
\*\* 부산대학교 기계공학부  
\*\*\* 한국생산기술연구원

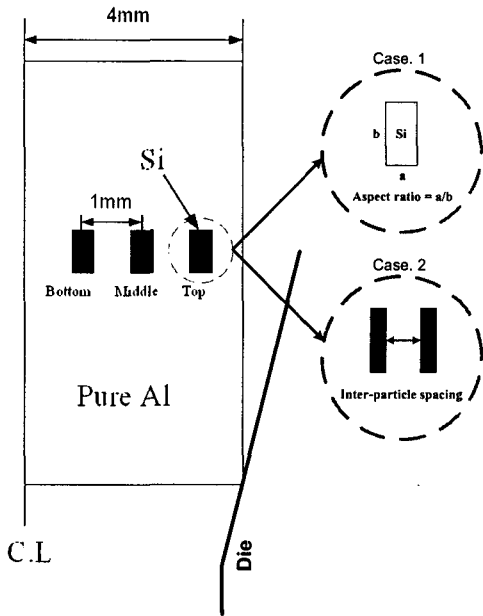


Fig. 1 Process variables and analysis model

Table 1 Drawing conditions of Al-Si wire

Drawing Conditions	Value
Wire radius (mm)	4
Reduction in Area (%)	15, 20, 25
Semi-die angle (°)	5, 7, 10
Aspect ratio	0.4, 0.6, 0.8
Inter-particle spacing( $\mu\text{m}$ )	18, 26, 34

온도는 냉간 인발공정이므로 상온(20°C)으로 설정하였으며, 선재와 다이스 사이의 마찰상수를 직접 측정하는 것은 현실적으로 매우 어려우므로 일반적인 건식인발공정에서 사용되는 마찰상수 0.1로 가정하여 해석을 수행하였다.

## 2.2 해석모델 및 조건

본 연구에서 사용되어진 Al-Si 선재의 해석 모델을 Fig. 1에 나타내었으며, 축대칭으로 해석하였다. Case. 1의 경우 Si의 Aspect ratio 변수에 대해서 해석을 수행하였으며, Case. 2의 경우에는 Si의 inter-particle spacing 변수에 대해서 해석을 수행하였다. 최소의 damage 값과 Si의 조직에 대해서 적절한 패스 스케줄을 구하기 위한 인발 공정조건들은 Table 1에 나타내었다.

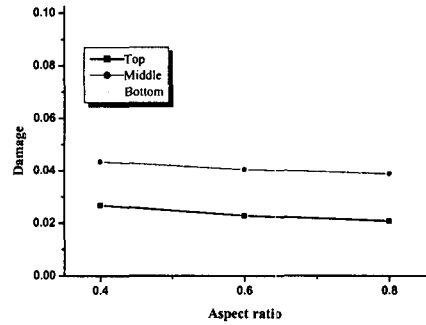


Fig. 2 Relation between aspect ratio and damage on location of Si

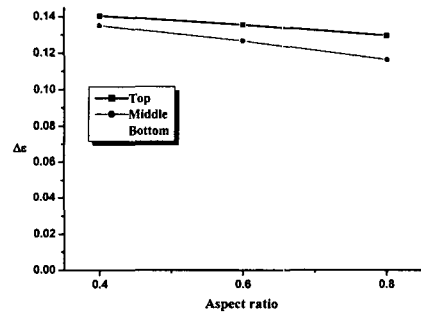


Fig. 3 Relation between aspect ratio and difference of effective strain on location of Si

## 3. 유한요소해석 및 결과

### 3.1 Al-Si 선재의 유한요소해석

#### 3.1.1 Aspect ratio에 대한 해석결과

본 해석에서는 Aspect ratio에 대한 영향을 평가하기 위해서 다이반각을 7°, 단면감소율을 20%로 고정하고, Aspect ratio를 변화시켜 해석하였다. Fig.2와 Fig.3은 Aspect ratio에 대한 위치별 Si 주위의 damage와 Al-Si 선재에서 Al과 Si의 경계면 사이의 effective strain 값의 차를 나타낸 것이다. Effective strain 값의 차는 다음 식과 같이 표현된다.

$$\overline{\Delta \epsilon} = \overline{\epsilon}_{Al} - \overline{\epsilon}_{Si} \quad (4)$$

Aspect ratio 가 커질수록 Si 주위의 damage 값이 감소하며, effective strain 차의 값이 감소함으로 Aspect ratio 가 커질수록 결함발생 가능성이 낮은 것을 알 수 있다.

### 3.1.2 Inter-particle spacing 에 대한 해석결과

본 해석에서는 inter-particl spacing 에 대한 영향을 평가하기 위해서 다이반각을 7°, 단면감소율을 20%, Aspect ratio 를 0.4 로 고정하고, inter-particle spacing 을 변화시켜 해석하였다. Fig.4 와 Fig.5 에서는 Inter-particle spacing 이 커질수록 Si 주위의 damage 값이 감소하며, effective strain 차의 값이 감소함으로 inter-particle spacing 이 커질수록 결함발생 가능성이 낮은 것을 알 수 있다.

### 3.1.3 인발 공정조건에 대한 해석결과

본 해석에서는 인발공정조건에 대한 영향을 평가하기 위해서 Fig.6 은 단면감소율을 20%, Aspect ratio 를 0.4 로 고정하고, 다이반각을 변화시켜 해석한 결과이다. 전체적으로 다이반각이 클 때 damage 값도 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig.7 은 다이반각을 7°, Aspect ratio 를 0.4 로 고정하고, 단면감소율을 변화시켜 해석한 결과이다. 전체적으로 단면감소율이 클 때 damage 값도 크게 나타남을 알 수 있다.

### 3.2 Al-Si 선재의 연속 인발 공정해석

앞에서 얻은 결과를 통해 Al-Si 선재에 대해서 연속 인발 공정해석을 수행하였다. 초기 선재 직경 8mm 에서 최종 선재 직경 1mm 로 총단면감소율 98.44%까지 해석을 수행하였다.

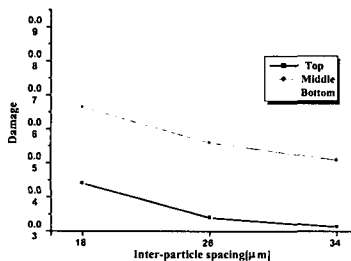


Fig. 4 Relation between aspect ratio and damage on location of Si

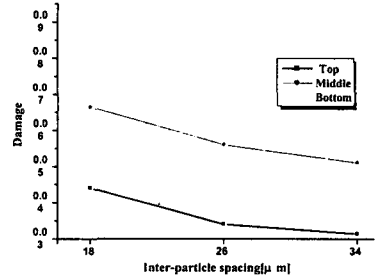


Fig. 5 Relation between aspect ratio and difference of effective strain on location of Si

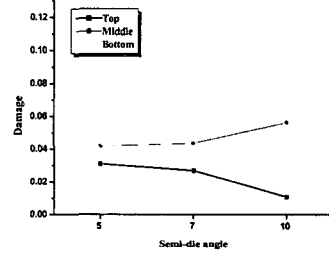


Fig. 6 Relation between semi die angle and damage on location of Si

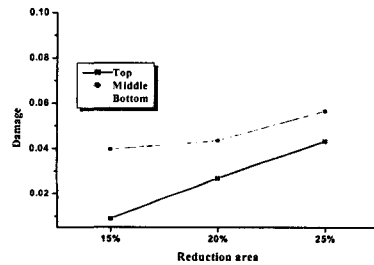


Fig. 7 Relation between semi die angle and damage on location of Si

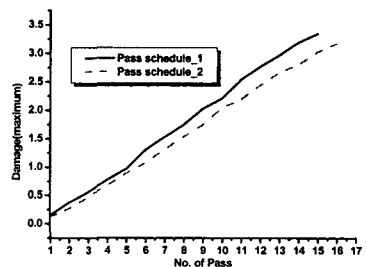


Fig. 8 Relation between No. of pass and maximum damage on type of pass schedule

Pass schedule\_1 은 25%의 등단면감소율로 해석을 수행한 결과이며, pass schedule\_2 는 초기 2pass 는 15%의 등단면감소율로, 중반부의 13pass 는 25%의 등단면감소율로, 후반부에서는 10%의 skin pass 를 적용하여 해석을 수행한 결과를 Fig.8 에서 보여주고 있다. Pass schedule\_1 이 pass schedule\_2 보다 소재의 최대 damage 값이 높게 나타남으로 25% 등단면 pass schedule 을 수정한 pass schedule\_2 가 소재의 결함 발생가능성이 낮은 것으로 판단할 수 있다.

#### 4. 결론

선재의 제조비용이 높은 이유로는 가공중의 단선이 있다. 한번 단선이 발생하면 다이스를 통과시키는데 많은 시간을 요하기 때문에, 생산효율에 치명적인 타격을 주게 되므로 안정한 장선 제품 제조에 방해가 된다. 단선 연구는 오래 전부터 적극적으로 행해지고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 유한요소해석을 수행하였고, Al-Si 선재의 Si 조직의 Aspect ratio, inter-particle spacing 에 대한 결함 발생 가능성에 대해 연구하였다. 또한, 공정 변수들이 소재 내부에 위치한 Si 에 미치는 영향에 대해 연구하였고, 이를 바탕으로 등단면 pass schedule 을 수정하여 새로운 pass schedule 을 제안하였다. 이를 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 부의 Si 의 위치가 표면에서 중심으로 갈수록 Si 주변의 최대 damage 값이 증가하고, 이로 인해 결함 발생 가능성이 높아지게 된다.

(2) Si 의 aspect ratio 가 커질수록 Si 주변의 최대 damage 는 감소하고, pure Al 과 pure Si 사이의 effective strain 값의 차가 작아지므로 Si 의 aspect ratio 가 커질수록 결함 발생 방지 측면에서 유리하다.

(3) Si 의 inter-particle spacing 이 커질수록 damage 는 감소하고, pure Al 과 pure Si 사이의 effective strain 값의 차가 작아지므로, Si 의 inter-particle spacing 이 커질수록 결함 방지 측면에 대해 유리하다.

(4) 다이 반각이 커질수록 표면 부근 Si 주위의 최대 damage 값은 작아지고, 중심부로 갈수록 Si 의 주위의 최대 damage 값이 커지게 되는 것을 확인할 수 있으며, 단면감소율이 커질수록 중심부로 갈수록 Si 주위의 최대 damage 의 값이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

이상의 연구 결과를 현장에 적용함으로써 체계적인 공정 관리를 통한 공정의 안정화가 가능하고 제조비용의 절감을 통한 제품의 가격 경쟁력 확보 및 적절한 공정설계에 기인한 품질 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 참고 문헌

- (1) A.L.R. de Castro, H.B. Campos, P.R. Cetlin, 1996, "Influence of die semi-angle on mechanical properties of single and multiple pass drawn copper", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, pp. 179~182.
- (2) P. D. Hodgson, 1996, "Microstructure modeling for property prediction and control", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, pp. 27~33.
- (3) G. Celano, S. Fichera, L. Fratini, F. Micari, 2001, "The application of AI techniques in the optimal design of multi-pass cold drawing processes", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 113, pp. 680~685.
- (4) B. P. P. A. GOUVEIA, J. M. C. RODRIGUES, P. A. F. MARTINS, 1996, "FRACTURE PREDICTING IN BULK METAL FORMING", *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 4, pp. 361~372.
- (5) Kazutake Komori, 1999, "Simulation of chevron crack formation and evolution in drawing", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 41, pp. 1499~1513.
- (6) Bogdan Golis, Jan W. Pilarczyk, Henryk Dyja, Zbigniew Btazejowski, Zbigniew Muskalski, 2000, "Effort and fracture of wire in the drawing process", *WIRE JOURNAL INTERNATIONAL*, DECEMBER 2000, pp. 104~111.