

## 미세 Si 입자를 고려한 Al-1%Si 본딩 와이어의 신선공정해석

고대철<sup>1</sup>, 황원호<sup>2</sup>, 이상근<sup>2</sup>, 김병민<sup>#</sup>

### FE-simulation of Drawing Process for Al-1%Si Bonding Wire Considering Fine Si Particle

D. C. Ko, W. H. Hwang, S. K. Lee, B. M. Kim

(Received February 2, 2006)

#### Abstract

Drawing process of Al-1%Si bonding wire considering fine Si particle is analyzed in this study using FE-simulation. Al-1%Si bonding wire requires electric conductivity because Al-1%Si bonding wire is used for interconnection in semiconductor device. About 1% of Si is added to Al wire for dispersion-strengthening. Distribution and shape of fine Si particle have strongly influence on the wire drawing process. In this study, therefore, the finite-element model based on the observation of wire by continuous casting is used to analyze the effect of various parameters, such as the reduction in area, the semi-die angle, the aspect ratio, the inter-particle spacing and orientation angle of the fine Si particle on wire drawing processes. The effect of each parameter on the wire drawing process is investigated from the aspect of ductility and defects of wire. From the results of the analysis, it is possible to obtain the important basic data which can be guaranteed in the fracture prevention of Al-1%Si wire.

**Key Words :** Wire Drawing, Bonding Wire, Si Particle, Aspect Ratio, Interparticle Spacing, Orientation Angle

#### 1. 서 론

반도체용 반자동 및 자동 초음파 와이어 본딩 장치의 개발은 Al-Si 본딩 와이어에 대한 많은 수요를 창출하였다. 본딩 속도가 빠르고 초기 설치 후 인력에 거의 의존하지 않는 반자동 및 자동 본딩 장치에서 와이어 제품의 건전성은 필수적이다.

본딩 와이어는 반도체 리드 프레임과 실리콘 칩을 연결하여 전기적 신호를 전달하는 부품으로, 상호 결합된 상태에서의 전기 저항은 중요한 고려 사항이다. 순수알루미늄은 연하고 가공경화를

이 상대적으로 낮아서, 선경 0.002~0.003인치 이하로 신선하기가 곤란하고 강도도 낮다. 이러한 문제점은 합금에 의해 해결될 수 있는데, 합금 첨가는 반도체 디바이스의 신뢰도에 문제를 일으키지 않도록 해야 한다. 따라서 알루미늄에 일반적인 합금 원소인 구리는 신뢰도에 문제가 있으므로 알루미늄에 실리콘을 일정량 첨가하면 전기전도성이나 초음파 본딩성을 감소시키지 않으면서 알루미늄에 상당한 강도를 줄 수 있다.

Al-Si 상태도에 의하면 1%Si은 525℃ 이상 온도에서 Si이 Al내에 고용되어 있다가 온도가 내려감에 따라 Si입자의 석출이 일어나기 시작하여

1. 부산대학교 동남권부품소재산업협력혁신연구소

2. 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

# 교신저자 : 부산대학교 정밀기계공학과

E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

상온에서 거의 모든 Si가 Al기지 내에 독립된 입자로 존재한다. 인장강도 및 연성은 가공 경화된 Al기지와 분산된 미세 Si 입자의 효과에 기인하므로, 용체화 온도에서 급냉에 의해 Al기지 내에서 석출되는 미세 Si 입자의 분포 및 크기는 냉간 신선가공과 같은 기계적 처리 과정에 커다란 영향을 미친다.

연성을 지배하는 금속학적 인자는 어느 정도 알려져 있으나, 신선가공 조건 등 소성역학적인 관점에서의 연성저하는 잘 알려져 있지 않다. 따라서 소성역학적인 측면에서 연성저하에 대해 신선가공조건이 미치는 영향을 체계적으로 파악하는 것이 중요하다.

단면감소율이 99% 이상인 본딩 와이어의 제조에 있어서 선재 신선 기술은 중요한 인자이다. 따라서 미세 Si 입자가 Al-1%Si의 연성에 상당한 영향을 미치기 때문에 미세 Si 입자의 분포 및 크기의 영향을 고려하여 신선 공정 시 공정 변수들의 영향을 파악함으로써 적절하지 못한 공정에 의해서 발생하는 각종 신선 결함과 연성저하를 방지하는 다이스의 설계는 매우 중요하다[1~4].

본 연구에서는 반도체용 본딩 와이어로 사용되고 있는 Al-1%Si 선재 제조공정 중의 하나인 연속건식 신선 공정의 해석을 수행하기 위해, 시험을 통하여 Al-1%Si 선재의 연속주조 공정 조건들에 의한 Al기지 내의 미세 Si 입자의 분포 및 크기에 대해서 조사하고, 관찰된 미세 Si 입자의 분포 및 크기 그리고 미세 Si 입자가 임의의 초기 정렬각(initial orientation angle)을 가지는 경우에 대해서 유한요소해석을 수행하여 신선 가공 공정조건이 Al-1%Si 선재의 연성에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 유한요소 모델링

### 2.1 연속주조 공정

연속주조 공정에서 공정조건에 따라 Al-1%Si 선재의 Al기지 내에 미세 Si 입자의 분포와 크기는 다르게 나타난다. Fig. 1은 연속주조 공정에 의해서 제작된 Al-1%Si 선재의 시험편이며, Fig. 2는 시험편의 조직 사진을 찍은 것이다. Fig. 2와 같이 Al기지 내의 미세 Si 입자는 연속주조 공정조건에 따라 일정한 분포와 크기를 가지게 되는데, 미세 Si 입자의 세장비(aspect ratio)와 입자간 간격(interparticle spacing)을 시험편 조직 사진의 분석을 통해 조사하였다.

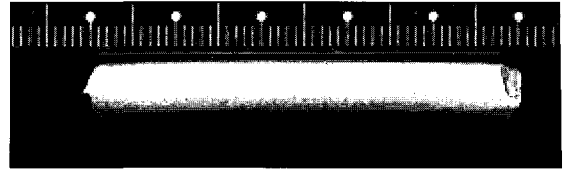


Fig. 1 Specimen of the Al-1%Si wire by continuous casting

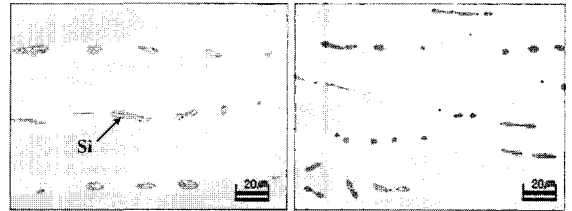


Fig. 2 SEM cross-section image of the specimen in longitudinal direction

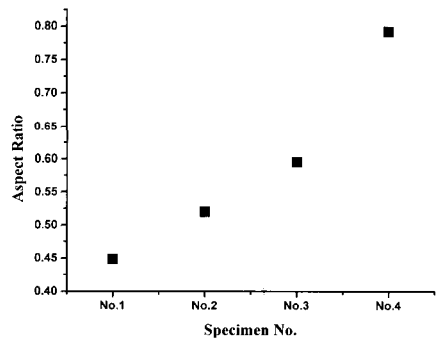


Fig. 3 Aspect ratio of the fine Si particle in the Al substrate

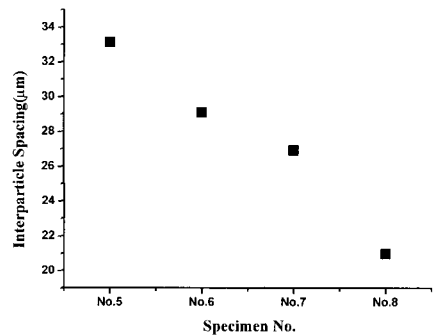


Fig. 4 Interparticle spacing of the fine Si particle in the Al substrate

Fig. 3과 Fig. 4는 연속주조 공정 조건에 의해서 Al기지 내에 분포하는 미세 Si입자의 세장비와 입자간 간격에 대한 값들을 보여주고 있다. 미세 Si 입자의 세장비는 0.4~0.8이며, 입자간 간격은 18~34 $\mu\text{m}$ 으로 나타났다. 미세 Si 입자는 Al-1%Si선재의 중심부부터 표면부까지 분포한다.

### 2.2 유한요소해석 모델 및 조건

Al-1%Si 선재의 미세 Si 입자에 대한 신선가공 유한요소해석을 수행하기 위해서는 해석에 필요한 소재의 물성 확보, 유한요소 모델링, 해석 조건 설정 및 해석방법의 확립 등이 매우 중요하다.

Al-Si 상태도에 의하면 1%Si은 525 $^{\circ}\text{C}$  이상 온도에서 Si이 Al내에 고용되어 있다가 온도가 내려감에 따라 석출이 일어나 상온에서 거의 모든 Si가 Al기지 내에 독립된 입자로 존재하기 때문에 Al과 Si은 99.9%의 순수알루미늄과 단결정규소로 인장시험에서 얻어진 물성을 사용하였다.

$$\text{Al: } \bar{\sigma} = 171\bar{\epsilon}^{0.31} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

$$\text{Si: } \bar{\sigma} = 120\bar{\epsilon}^{0.27} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

신선공정의 해석은 냉간으로 가정하였으며, 선재와 다이스 사이의 마찰상수는 일반적으로 건식 신선 공정에서 사용되는 마찰상수인 0.1로 가정하였다. Al-1%Si 선재의 신선공정해석은 Fig. 5와 같이 평면변형(plane strain) 문제로 가정하여 1/2만 모델링 하였으며, Table 1에 나타난 신선공정 조건들을 적용하여 유한요소해석을 수행하였다.

미세 Si 입자의 세장비는 세로변의 길이를 25 $\mu\text{m}$ 로 고정하고 가로변의 길이를 조정하여 가로변 길이에 대한 세로변 길이의 값으로 나타내었으며, 미세 Si 입자의 입자간 간격은 서로 아주 가깝게 분포하고 있는 미세 Si 입자간 사이의 거리로 나타내었다. 그리고 선재의 축방향에 대해 미세 Si 입자가 가지는 초기 정렬각을  $\alpha$ 로 정의하였다.

본 연구에서는 강소성 전용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다[5~8].

### 3. 유한요소해석 결과

#### 3.1 Si 입자의 세장비에 대한 영향 평가

Al-1%Si 선재에서 Al 기지 내의 미세 Si 입자의 세장비에 대한 영향을 평가하기 위하여 다이반각

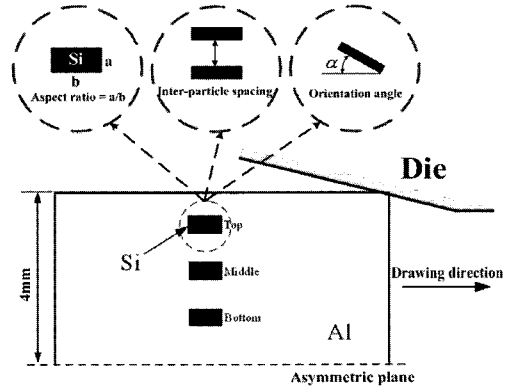


Fig. 5 Process variables and analysis model

7 $^{\circ}$ , 단면감소율 20%의 공정조건에서 해석을 수행하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 세장비에 대한 위치별 Si 입자 주위의 데미지(damage)와 Al-1%Si 선재에서 Al기지와 Si입자의 경계면에서 Al과 Si의 변형률(effective strain) 값의 차를 나타내었으며, 이 값을 이용하여 Al기지와 Si입자의 계면이 분리되는 결합의 발생 가능성 정도를 판단하였다[9]. 본 연구에서 데미지는 Cockcroft-Latham이 제안한 식(3)를 이용하였다[10].

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_1$ 은 최대인장응력,  $\bar{\sigma}$ 는 유효응력,  $d\bar{\epsilon}$ 는 유효변형률증분, 그리고  $C$ 는 재료 상수이다. 변형률 값의 차는 아래의 식(4)로 표현하였다.

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

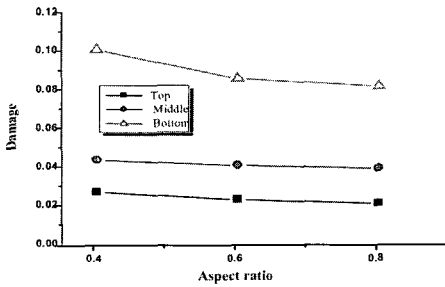
Al의 변형률( $\bar{\epsilon}_{Al}$ ) 값은 미세 Si 입자의 변형률( $\bar{\epsilon}_{Si}$ ) 값보다 항상 크게 나타난다. Fig. 6과 Fig. 7에서는 Si 입자의 세장비가 커질수록 데미지와  $\Delta\bar{\epsilon}$  값이 감소하므로, Si 입자의 세장비가 커지면 Al-1%Si 선재의 연성저하 방지 및 Al 기지와 미세 Si 입자 사이의 계면이 분리되는 결합을 방지하는 데 유리하다는 것을 알 수 있다.

#### 3.2 Si의 입자간 간격에 대한 영향 평가

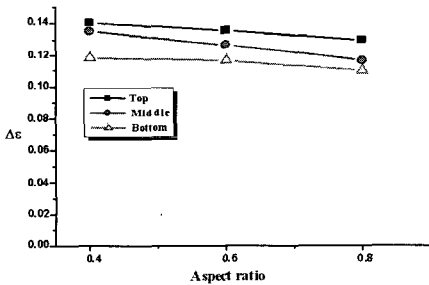
미세 Si 입자의 입자간 간격에 대한 영향을 평가하기 위하여 Si 입자의 세장비는 0.4, 다이반각 7 $^{\circ}$ , 단면감소율 20%의 공정조건에서 해석을 수

**Table 1 Drawing conditions of Al-1%Si wire**

Drawing Conditions	Value
Wire diameter (mm)	8
Reduction in area (%)	15, 20, 25
Semi-die angle (°)	5, 7, 10
Aspect ratio	0.4, 0.6, 0.8
Interparticle spacing( $\mu\text{m}$ )	18, 26, 34
Orientation angle (°)	45, 80, 90, 100, 135

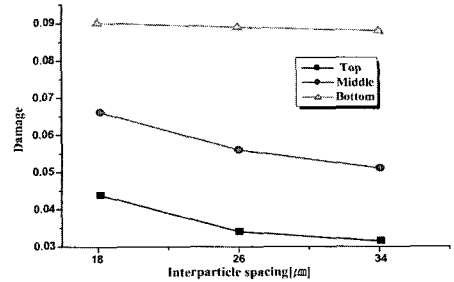


**Fig. 6 Relation between aspect ratio and damage on location of fine Si particle**

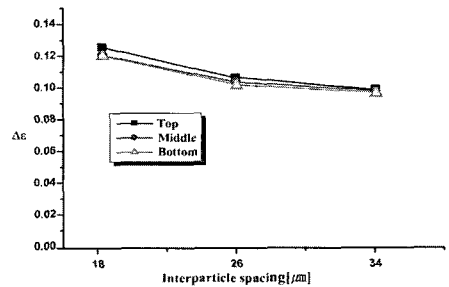


**Fig. 7 Relation between aspect ratio and difference of effective strain on location of fine Si particle**

행하였다. Fig. 8 과 Fig. 9 에서는 Si 입자의 입자간 간격이 커질수록 데미지와  $\Delta\epsilon$  값이 감소하므로, Si 입자의 입자간 간격이 커지면 Al-1%Si 선재의 연성저하 방지와 Al 기지와 미세 Si 입자 사이의 계면이 분리되는 결함을 방지하는데 유리함을 알 수 있다. 그리고 Al 기지와 Si 입자 사이의 계면이 분리되는 결함이 발생하여 미세 기공(micro void)이 생성될 때 Si 입자의 입자간 간격이 작을 경우 기공의 성장이 더 빠르게 진행되어 공정 중에 단선의 발생 가능성이 더 높아진다. 그러므로 Si 입자의 입자간 간격이 클수록 신선 공정을 더 안정화시킬 수 있다.



**Fig. 8 Relation between interparticle spacing and damage on location of fine Si particle**



**Fig. 9 Relation between interparticle spacing and difference of effective strain on location of fine Si particle**

### 3.3 인발공정조건에 대한 영향 평가

Al-1%Si 선재에 대하여 인발공정조건에 대한 영향을 평가하기 위하여 Fig. 10 에서는 Si 입자의 세장비를 0.4, 단면감소율을 20%로 고정하고 다이 반각을 변수로 두고 해석을 수행하였으며, Fig. 11 에서는 Si 입자의 세장비를 0.4, 다이반각을 7°로 고정하고 단면감소율을 변수로 두고 해석을 수행하였다.

Fig. 10 에서는 다이반각이 커질수록 Al-1%Si 선재의 미세 Si 입자가 선재의 중심부 가까이 분포할 때 Si 입자 주위의 데미지 값이 커지므로, 다이 반각이 커지면 Al-1%Si 선재의 연성저하 방지에 불리하게 된다. Al-1%Si 선재의 표면부 미세 Si 입자가 분포하는 경우에는 다이반각이 커질수록 Si 입자 주위의 데미지 값이 작아지게 되는데, 이는 다이반각이 작아질수록 표면부의 마찰 면적이 넓어지기 때문에 표면부 부근에 분포하는 Si 입자 주위의 데미지 값이 높아지는 것으로 판단된다. 하지만, 표면부 부근의 Si 입자 주위에서 나타나는 데미지 값에 의한 연성저하는 선재 중심부 부근에 분포하는 Si 입자 주위에서 나타나는 데미지

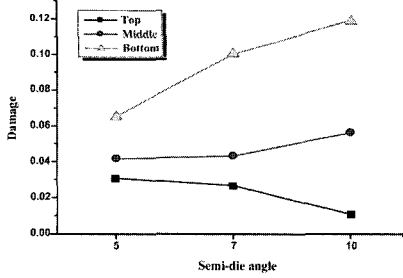


Fig.10 Relation between semi die angle and damage on location of fine Si particle

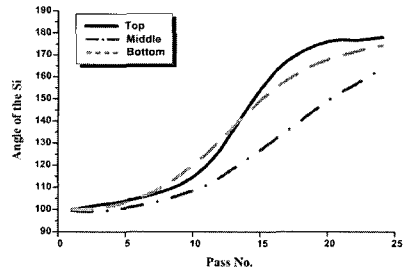


Fig.13 Reorientation of initial orientation angle on R.A. 15% in drawing process with multi-pass

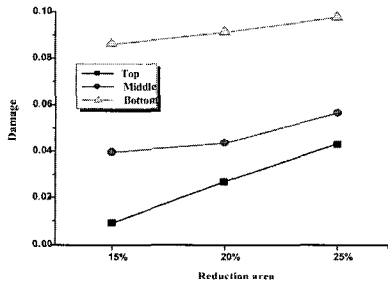


Fig.11 Relation between reduction in area and damage on location of fine Si particle

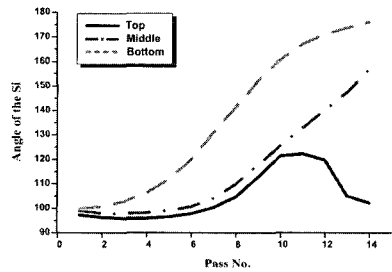


Fig.14 Reorientation of initial orientation angle on R.A. 25% in drawing process with multi-pass

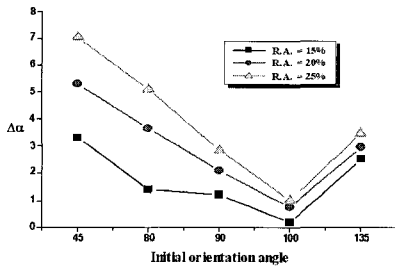


Fig.12 Relation between initial orientation angle and difference of angle on reduction in area

값으로 인한 연성저하보다 상대적으로 아주 작은 값이기 때문에 다이반각이 작아질수록 Al-1%Si 선재의 연성저하를 방지하는데 유리하다고 판단할 수 있다.

Fig. 11에서는 단면감소율이 커질수록 미세 Si 입자 주위의 데미지 값이 커지므로, 단면감소율이 커질수록 Al-1%Si 선재의 연성저하 방지에 불리하게 된다.

Fig. 6~11에서 미세 Si 입자가 표면부 부근에 분포할 때 신선 시  $\Delta\epsilon$  값이 높게 나타나기 때문에 Al 기지와 Si 입자의 계면분리가 우려되지만, 미세

Si 입자가 중심부 부근에 분포할 때 신선 시 데미지 값에 의한 연성저하가 더 크게 고려되어야 할 것으로 판단된다. 그러므로 연속주조공정을 통해 미세 Si 입자가 선재의 중심부보다 표면부에 분포하도록 제어하는 것이 보다 더 유리한 신선 조건을 제공할 것이다.

### 3.4 Si 입자의 초기 정렬각 변화

실제 연속주조 공정에 의해 제조된 Al-1%Si 선재의 미세 Si 입자는 임의의 초기 정렬각을 가질 수 있다. 이와 같이 Si 입자가 초기 정렬각을 가지게 되는 경우에 대해 신선공정 시 Al-1%Si 선재의 미세 Si 입자의 초기 정렬각의 변화에 대하여 평가하기 위하여 Si 입자의 세장비를 0.4, 다이반각을 7°로 고정하고 단면감소율과 Si 입자의 초기 정렬각을 변수로 두고 해석을 수행하였다.

Si 입자의 정렬은 Al-1%Si 선재의 연성에 커다란 영향을 주는 중요한 인자 중 하나이다[11~13]. 미세 Si 입자가 선재의 중심축 상에 평행하게 정렬이 되어질수록 선재의 연성을 더 좋게 해준다. Fig. 12에서는 Al-1%Si 선재의 중심부와 표면부 사이에 존재하는 Si 입자 정렬각의 변화량이 매우 비

슷한 값으로 나타나기 때문에 표면부 부근의 Si 입자의 정렬각의 변화량을 대표적으로 나타내었다.

Fig. 12에서 Si 입자가 중심축에 더 평행한 초기 정렬각을 가질수록 신선가공 시 배열이 잘 되며, Si 입자가 중심축과 수직( $80^{\circ}\sim 100^{\circ}$ )하게 정렬한 경우 배열이 잘 되지 않음을 확인할 수 있는데, 이것은 선재의 연성을 저하시키는 요인이 될 수 있다. Fig. 12에서는 단면감소율이 커질수록 배열이 잘 되는 것으로 보여진다.

하지만 Fig. 13과 Fig. 14에서 Si 입자가  $100^{\circ}$ 의 초기 정렬각을 가지는 경우 동일한 총단면감소율로 연속신선공정 시 평균 단면감소율이 15%인 경우 Si 입자가 축방향으로 잘 배열되지만, 평균 단면감소율이 25%인 경우 연속신선공정 시 불안정한 배열 상태를 보여준다. 그러므로 연속신선공정에서 평균단면감소율 15%를 적용할 경우 미세 Si 입자의 배열이 잘 일어나게 하여 선재의 연성을 확보할 수 있다.

#### 4. 결 론

Al-1%Si 본딩 와이어의 신선 공정에서 선재의 연성저하로 인한 단선을 방지하고, 선재의 내부결함이 없는 건전한 제품을 얻기 위해서 연속주조공정의 제어를 통한 균일한 Al-1%Si 선재의 확보와 신선가공 시 각 패스의 적합한 공정 변수의 설계가 중요하다. 따라서 본 연구에서는 신선가공 시 단선 발생을 방지하고, 내부결함이 없는 건전한 제품을 얻기 위해 Al-1%Si 선재에서 나타나는 미세 Si 입자의 분포 및 크기의 영향에 대해 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연속주조공정을 제어하여 미세 Si 입자의 세 장비와 입자 간격을 넓게 하면 신선가공 시 Al-1%Si 본딩 와이어의 연성저하와 Al 기지와 Si 입자 계면분리 결함 발생을 억제할 수 있다.

(2) 단면감소율과 다이반각이 커질수록 미세 Si 입자 주위의 데미지 값이 커지므로, 각 패스의 공정 변수인 단면감소율과 다이반각을 비교적 작게 적용하면 Al-1%Si 본딩 와이어의 연성저하를 방지하는데 유리하다.

(3) 연속주조공정 시 미세 Si 입자의 초기 정렬각을 중심축에 평행하게 제어하면 선재의 연성을 향상시킬 수 있으며, 15% 단면감소율을 적용한 연속신선가공 시 미세 Si 입자의 배열이 잘 되도록 해주면 선재의 연성을 확보할 수 있다.

실제 Al-1%Si 본딩 와이어의 신선 시 발생할 수 있는 결함발생 기구를 유한요소해석을 수행하여 파악하였으며, 본 연구의 해석결과는 Al-1%Si 본딩 와이어의 신선가공 시 단선의 방지와 내부결함의 발생을 방지할 수 있는 신선 공정조건을 선정하는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 한국산업기술재단(KOTEF)에서 지원하는 지역혁신 인력양성사업 연구과제인 “고기능, 고정도 판재성형 및 금형설계 기술개발 인력양성”(TS-32)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 임차용, 우의성, 1990, 방향성 알루미늄 합금 개발 및 재료특성 규명에 관한 연구(II), 한국기계연구원, pp. 28~32.
- [2] W. Qin, R. Doyle, T. Scharr, M. Shah, M. Kottke, G. Chen, D. Theodore, 2004, Surface oxide evolution on Al-Si bond wires for high-power RF applications, *Microelectronic Engineering*, Vol. 75, pp. 111~116.
- [3] Hoon Cho, Hyung-Ho Jo, Sang-Gon Lee, Byung-Min Kim, Young-Jig Kim, 2002, Effect of reduction ratio, inclusion size and distance between inclusions on wire breaks in Cu fine wire drawing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130~131, pp. 416~420.
- [4] Martin Gagne, Eric Thibault, 1999, Control of inclusion characteristics in direct cast steel billets, *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 38, No. 5, pp. 311~321.
- [5] P. D. Hodgson, 1996, Microstructure modeling for property prediction and control, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, pp. 27~33.
- [6] Kazutake Komori, 1999, Simulation of chevron crack formation and evolution in drawing, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 41, pp. 1499~1513.
- [7] 박동인, 김병민, 오상수, 2004, 유한요소법에 의한 Bi2223 고온 초전도 선재의 다심 인발에 대한 연구, *한국소성가공학회지*, Vol. 13, No. 1, pp. 78~83.

- [8] Ulrich T. Riedel, Wolfgang Bleck, John E. Morgan, Felicity J. Guild, Chris A. McMahon, 1999, Finite element modelling of the effect of non-metallic inclusions in metal forming processes, Computational Materials Science, Vol. 16, pp. 32~38.
- [9] D. C. Ko, B. S. Kang, B. M. Kim, J. C. Choi, 1994, A study on Prevention of General Burst Defects in Wire Drawing, The Korean society of mechanical engineering, Vol 11, pp. 3098~3310.
- [10] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, 1968, Ductility and the workability of metals, J. Inst. Metals, Vol 96, pp. 33~39.
- [11] Jan W. Pilarczyk, 1997, Hydrodynamic drawing effects on wire ASTRO characteristics, Wire Journal International, pp. 70~83.
- [12] L. Godecki, 1972, Influence of the drafting schedule and die angle on properties of steel spring wire, Wire Industry, No. 6, p. 518.
- [13] N. Lamber, T. Greday, 1974, Microstructure and deformation of high carbon wire, CRM, September, No. 4, p. 43.