

## 폐가공송전선용 Al선재의 신선가공 특성

김상수<sup>1,a</sup>, 구재관<sup>1</sup>, 이영호<sup>1</sup>, 김병걸<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (주)메탈링크 기술연구소

<sup>2</sup> 한국전기연구원 HVDC연구본부

## The Drawing Properties of Aluminum Wire in Aged Overhead Conductor

Shang-Shu Kim<sup>1,a</sup>, Jae-Kwan Ku<sup>1</sup>, Young-Ho Lee<sup>1</sup>, and Byung-Geol Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> R&D Center Metallink Inc., Eumseong 431-804, Korea

<sup>2</sup> HVDC Research Division, KERI, Changwon 642-120, Korea

(Received May 10, 2013; Revised May 21, 2013; Accepted May 21, 2013)

**Abstract:** The new recycling technology for aged aluminum wires in overhead conductor have been carried out. We are attempting to develop remanufacturing method for them for more effective way of recycling in stead of its conventional remelting process. The drawing process of aged aluminum wires play a role in remanufacture process. Drawing process was performed under lubricant. The speed of drawing was between 500 m/min and 1,000 m/min. These machines have 11 or 12 dies house for breakdown of the feedstock. Material of the die is tungsten carbide and they have generally 25% reduction ratio. The paper investigates the mechanical properties during drawing process of aged aluminum wire. The results of tensile tests and microscopic analysis were discussed to underscore the hardening features of drawing aluminum wire. Various graphs are presented accompanied by discussion about their relevance on the process.

**Keywords:** Overhead conductor, Aged aluminum wires, Recycling process, Remanufacture process for aluminum wires

### 1. 서론

지구상에 존재하는 부존자원의 고갈은 특히 자원빈국에 있어서는 국가의 지속적인 발전을 가로막는 중

요한 장애요인으로 부상할 것이다. 따라서 절대 자원 빈국인 우리나라는 각종 자원의 효율적인 재활용을 국가적인 차원에서 활성화시킬 필요가 있다.

노후화된 가공 송전선로의 교체 또는 송전용량 증대를 위하여 한국전력에서 매년 수백 톤의 폐가공송전선이 발생된다. 폐가공송배전선은 중간 수집상에 넘겨지고 그곳에서 알루미늄(aluminum, Al) 선재와 강선(steel wire)으로 분류되어, 관련 소재 제련업체에서 재용해(remelting)되는 일차원적 재활용 공정(recycle process)으로 이루어져 있다. 일차원적 재활

a. Corresponding author; [mlicto@emetallink.com](mailto:mlicto@emetallink.com)

Copyright ©2013 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

용방식은 수작업에 의한 분류 및 재용해 처리에 따른 비용 상승과 함께 에너지 소비형 재활용 방식이다. 특히 재용해 및 가공 과정에서 다량의 CO<sub>2</sub> gas 등의 온실가스가 발생하게 되므로 친환경적 재활용 방식이라고는 할 수 없다. 최근 폐가공송전선용 AI선재의 전통적인 재활용 방식에서 탈피하여 새로운 개념의 재활용 기술, 재제조기술 (remanufacture process)이 개발되어 실용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 재제조 기술에 의해 분류된 폐AI선재에 대하여 신선 가공하여 특성의 변화를 조사하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 Remanufacture process

표 1에 폐가공송전선의 AI선재 재활용 공정을 비교하였다. 가공 송전선은 AI선재와 강선이 연선된 복합구조체이며 기존 재활용 공정은 scrap 처리 후 용해 및 가공에 의한 재활용 방식이다.

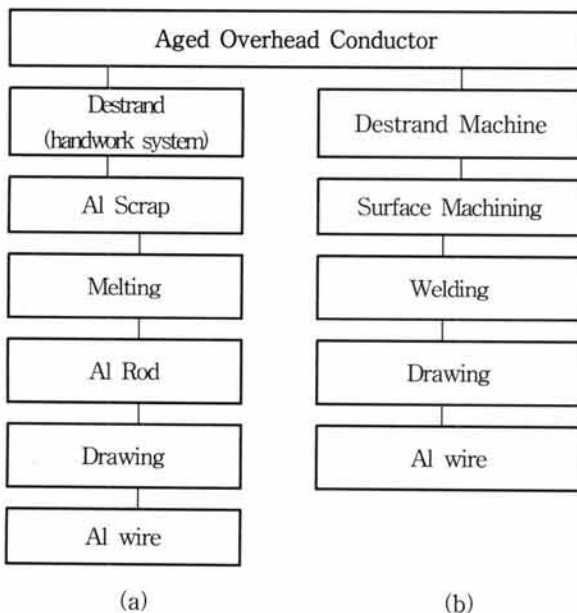


Table 1. The recycle process of overhead conductor. (a) remelting process, (b) remanufacture process.

재제조 기술은 다음과 같은 주요 공정으로 구성되어 있다.

- 해선 (destrand process) : 폐가공 송전선에서 AI 선재를 자동으로 분류

- 표면처리 : 표면산화물과 이물질을 제거

- 신선 (drawing process) : 목표 치수와 물성을 위한 가공공정

재제조 기술은 AI선재를 scrap 처리하는 1차원적인 재활용 개념에서 탈피한 재활용 방식으로 CO<sub>2</sub> gas 발생과 재활용비용을 최소화하는 신개념의 재활용기술이며, 가공송전선의 재생 사이클을 최소화한 고효율 재생기술이다. 1 ton을 재활용하였을 경우, 대기오염 물질인 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>)는 82.0%, 질소산화물 (NO<sub>x</sub>) 88.9%, energy 68.5%, 고형폐기물 94.2%의 절감효과가 있다 [1].

### 2.2 폐AI선재 신선가공

폐AI선재의 신선가공 특성을 조사하기 위하여 약 40년간 사용된 폐가공송전선에서 AI선재를 분류, 표면가공 한 다음 표 2에 나타낸 가공률에 따라 신선 가공하였다.

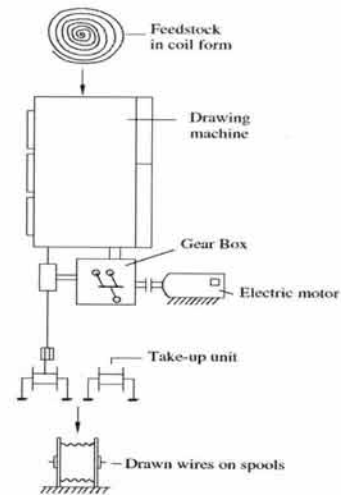


Fig. 1. Wire drawing line.

Table 2. The wire diameter & reduction ratio of aluminum wire.

Reduction Ratio	Diameter (mm)							
	9.7	4.5	4.0	3.7	3.5	3.2	3.0	2.6
New Al.	0	78.6	83.0	85.5	87.0	89.1	90.4	92.8
Aged Al.	-	0	21.0	32.4	39.5	49.4	55.6	66.6

신선에 의해 Al선재를 제조할 경우 소재의 시작 인장강도, 신선속도, 가공률에 의한 영향을 조사하기 위하여 폐Al선재의 인장강도를 사용 년수와 가설지역에 따라  $14.5 \text{ kgf/mm}^2 \sim 17.5 \text{ mm}^2$  3등급으로 구분하여, 40 m/min와 500 m/min의 신선속도에서 신선 가공하였다. 폐Al선재 신선가공은 6단계의 다이스 (dies)를 이용하였으며, 각 다이스의 평균 감면율은 약 25%이다. 신품 Al선재에서는 약 10~12단계의 다이스가 이용된다. 신선에 따른 인장강도 및 항복강도는 KSC 3002에 준하여 시험하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 미세 조직

그림 2는 직경 4.5 mm 폐Al선재를 직경 2.6 mm로 66.6% 가공률로 신선 가공한 미세조직을 나타낸 그림이다. 그림 2(d)에 참고로 직경 9.5 mm Al rod를 2.6 mm로 신선한 신품 Al선재를 같이 나타내었다.

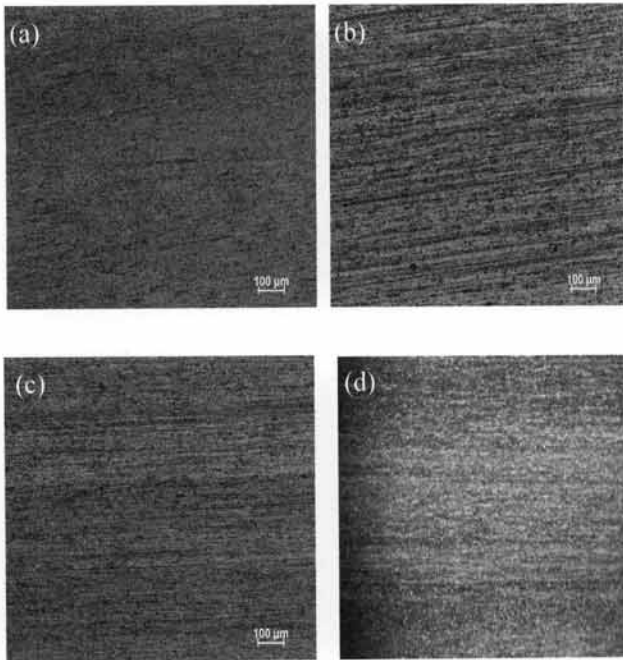


Fig. 2. The microstructure of Al wire. (a) aged 4.5 mm Al wire, (b) drawing 4.0 mm, (c) drawing 2.6 mm, (d) new 2.6 mm Al wire.

그림 2(a)의 폐Al선재는 약 40년 간  $90^\circ\text{C}$  온도에

노출, 열화된 미세조직이지만 섬유상의 조직은 완전히 파괴되지 않았으며 신품 Al선재와 유사한 조직구조를 유지하고 있었다. 조직학적 변화는 온도와 시간에 의하여 결정된다. Al금속의 재결정 온도는 약  $250^\circ\text{C}$ 이며, 재결정 온도 이상에서 장시간 유지하게 되면 결정립의 재결정화 및 성장이 발생되나, 폐Al선재는 약  $70\sim 90^\circ\text{C}$  온도에서 약 40년 간 사용으로 인하여 결정립의 성장은 다소 발생하였으나 신품 Al선재와 유사한 조직 구조를 나타내고 있다.

신선가공에 의해 그림 2(b), (c)와 같이 소재는 유동성에 의한 변형선 (material flow deformation)이 잘 발달되며, 특히 가공방향으로 미세조직이 연신되어 섬유상의 형태가 발달되었다. 가공률에 따라 결정립계는 미세화되며, 집합조직을 형성하였다. 그림 2(d)의 신품 Al선재와 비교하여도 미세 조직학적으로는 차이가 없음을 확인할 수 있다.

초기 직경 4.5 mm에서 최종 직경 2.6 mm로 소재는 신선가공에 의해 결정립은 가공방향으로 우선 배열되며 결정격자는 회전하는 결정의 방위회전이 발생하며, 다중 슬립계가 작용하여 신선방향으로 매우 미세한 조직을 형성한다 [2]. 이러한 미세한 조직은 전위 이동의 장애물로 작용하여 기계적 성질의 향상뿐만 아니라 피로 및 부식에도 큰 영향을 미친다.

#### 3.2 신선가공에 의한 집합조직

신선과 같은 일방향 소성가공에 의해 집합조직이 형성되며, 부식속도 및 최종 제품의 물리적 성질이 변화한다. 제조공정을 통한 집합조직의 발달과 재료물성의 변화를 예측하면 최적의 재료물성을 갖는 제품을 생산하기 위한 제조공정을 확립할 수 있다.

그림 3과 그림 4는 폐Al선재의 신선가공에 사용되는 6개 다이스에 의한 유한요소해석법으로 선재의 형상변화와 전단변형율 ( $\epsilon_{31}$ )을 나타낸 것이다. 신선되는 과정에서 소재와 신선다이 사이의 마찰에 의해 발생하는 전단변형이 선재의 표면부에 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 각 신선단계 별 중심부에 미치는 전단변형의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

그림 3(b)의 첫 번째 다이 (die)를 통과한 선재의 미세조직 (그림 2(b))에 비해 그림 3(c)의 6번째 다이를 통과한 선재의 미세조직 (그림 2(c))이 더욱 미세하며, 가공방향 배열성이 우수하였다. 이는 가공량이 증가함에 따라 신선에 의한 집합변형 조직이 발달되고 있음을 확인한 것이다.

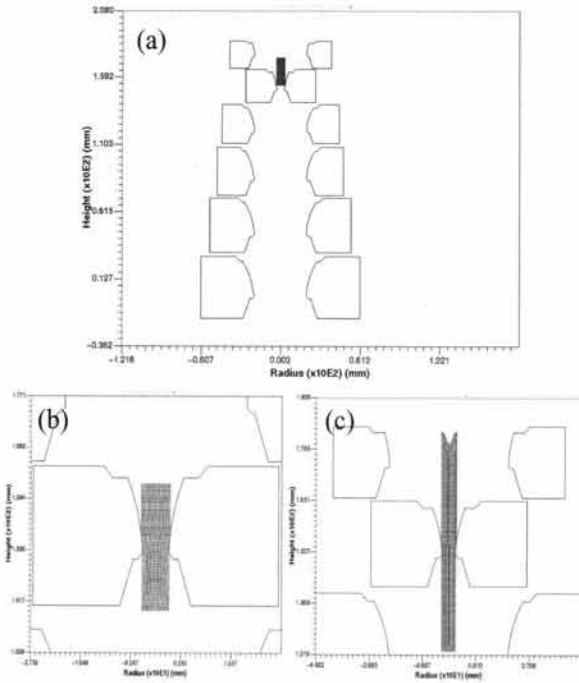


Fig. 3. The finite element analysis of drawing. (a) 6 pass drawing dies line, (b) 1st pass drawing (4.5 mm→4.0 mm), (c) 6th pass drawing (3.0 mm→2.6 mm).

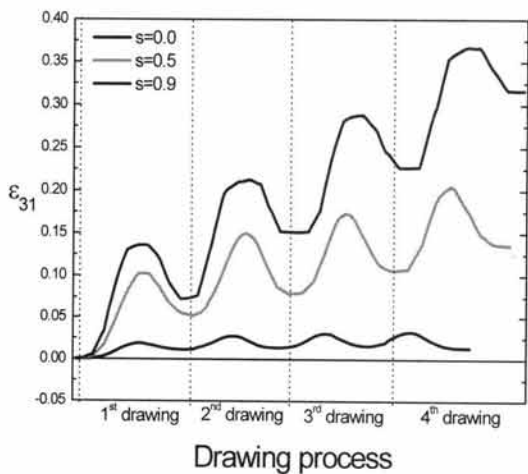


Fig. 4. The  $\epsilon_{31}$  analysis from  $s= 0.1$  to  $s= 0.9$  during 4 pass drawing.

그림 4는 Al선재의 위치에 따른 전단변형률을 중심부 ( $s=0.1$ )에서 표면부 ( $s=0.9$ )로 분석한 결과이다. 전단 변형률 ( $\epsilon_{31}$ )은 다이와의 마찰에 의해 표면부로 갈수록 큰 값을 나타내었으며, 신선회수가 증가할수록 증가하였다. 신선평정에서 가장 중요한 것으로 판

단되는 전단변형률 성분은 표면층으로 갈수록 심한 전단변형을 내포하며 축대칭 변형보다는 평면변형과 유사한 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 신선에 의해 재료 내부에서는 균질변형으로 <111> 방향의 섬유 집합조직 (fiber texture)이 형성되며, 표면부에서는 다이와 소재의 마찰 또는 전단변형력에 의하여 원형 집합조직 (circular texture)이 형성되었다 [3].

### 3.3 신선에 의한 페Al선재 경도특성

그림 5는 신선가공에 따른 경도변화를 나타낸 그림이다. 신선가공은 직경 4.5 mm에서 6 pass로 직경 2.6 mm까지 66.6% 가공률로 신선했다. 직경 4.5 mm 페Al선재의 경도는 약 45 Hv이며, 2.6 mm로 가공된 Al선재의 경도는 약 52 Hv로 가공에 따라 선형적으로 증가하였다. 용해 및 가공에 의해 제조된 신품 Al선재의 경도 (50 ~ 55 Hv)와 유사한 수치를 나타내었다.

가공률과 경도 및 경도와 인장강도는 일정한 상관성을 나타내고 있으며, 상관관계는 가공에 의하여 선형적으로 증가하며 식 (1), 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 선형적인 관계는 신선가공에 의하여 소재내부 변형에너지 축적, 전위 증식 및 결정립 미세화 등에 의하여 기계적 성질이 증가하기 때문이다.

$$Hv = 44.15 + 0.097 \times RA \quad (1)$$

$$TS = 0.75 \times HV - 17.78 \quad (2)$$

Hv : Hardness

RA : Reduction ratio(%)

TS : Tensile strength(kgf/mm<sup>2</sup>)

표 3은 66.6% 가공된 직경 2.6 mm Al선재의 횡단면 경도를 나타낸 것이다. 표면부와 중심부에 비하여 1/4t 지점 ( $s=0.5$ )에서 가장 높은 경도를 나타내었다. 가공에 의하여 축적되는 변형 에너지 (strain energy)와 다이와 마찰로 인한 접촉 마찰열에 의해 발생된 것으로 가공률이 증가하면 심화됨을 알 수 있다. 이는 앞서 조사한 집합조직 시뮬레이션 결과와 일치하였다.

신선에 의하여 다이압 및 마찰력의 축방향 분력이 신선평정과 동일 선상에 있지 않기 때문에 소재는 인장, 압축, 전단변형과 같은 응력을 동시에 받게 된다.

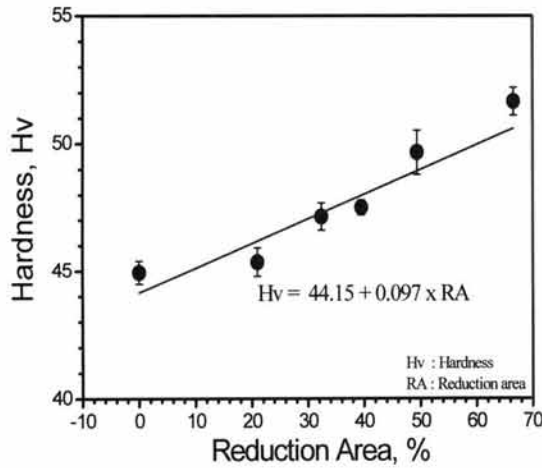


Fig. 5. The Hardness in accordance with reduction ratio of aged aluminum wire.

Table 3. The Hardness in accordance with position of 2.6 mm aluminum wire.

Position (s)		s=0.1	s=0.5	s=0.9
Hardness (Hv)	3.5 mm	47	48	46
	2.6 mm	50	52	49

표면부는 다이스와 마찰로 유동성 (material flow) 이 제약을 받는 반면에 중심부 쪽은 자유로운 변형이 가능하므로 전단변형은 중심부에 비해 표면부가 현저히 크다. 신선하는 과정에서 Al선재가 다이스를 통과한 후 수축하려는 축방향의 탄성변형은 표면부 쪽이 크다. 따라서 표면부는 중심부보다 압축하려는 경향은 크지만 중심부에 저지되어 표면부에는 인장, 중심부에는 압축의 잔류응력이 형성된다 [4].

### 3.4 신선에 의한 페Al선재 강도 특성

표 4에 40 m/min과 500 m/min 속도로 신선가공 후 인장강도를 나타낸 것으로 신선 속도에 따라 인장강도는 저속에서 약간 높으나 error bar 이내로 인장강도의 차이는 거의 나타나지 않았다. 저속에서는 신선 과정에서 다이스와의 마찰로 인하여 발생하는 열이 발생되어 Al선재의 온도 상승을 방지할 시간적 여유가 있는 반면에 고속에서는 신선하는 과정에서 Al선재 온도가 약간 증가하여 신선 속도에 따라 인장강도 차이가 발생한 것으로 사료된다.

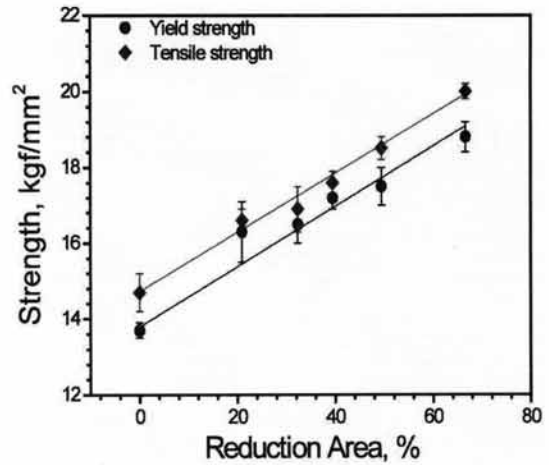


Fig. 6. The Strength variation in accordance with reduction ratio of aged aluminum wire.

Table 4. The tensile strength in accordance with drawing speed.

Reduction ratio(%)	40		55
	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	40 m/min	18.2±0.1
	500 m/min	18.0±0.1	19.4±0.1

직경 4.5 mm에서 6 pass로 직경 2.6 mm까지 신선 가공하면서 각 가공율에 따른 인장강도 및 항복강도의 거동을 조사하여 그림 6에 나타내었다. 시작 인장강도 14.5 kgf/mm<sup>2</sup>의 페Al선재를 신선 가공하면 가공량에 비례하여 항복강도와 인장강도는 증가하였다. 앞서 언급한 바와 같이 가공량에 따른 강도의 증가는 결정립의 미세화 및 전위 증식에 의한 것이다.

66.6% (직경 2.6 mm) 가공량으로 신선한 Al선재의 항복강도와 인장강도는 18.6 kgf/mm<sup>2</sup>과 20.0 kgf/mm<sup>2</sup>으로 약 38% 정도 향상되었으며, 한국전력 표준구매 사양서 및 IEC 규격의 인장강도 17.4 kgf/mm<sup>2</sup>을 상회하는 수치이다. 신품 Al선재의 인장강도 19.0 ~ 21.0 kgf/mm<sup>2</sup>와 비교하여도 거의 동일한 수치이다.

페Al선재 신선 가공에서 인장강도와 가공량에 따른 상관성을 조사한 결과 직선적 비례관계가 성립되며, 식 (3)과 같이 도출되었다.

$$TS = 14.73 + 0.078 \times RA \tag{3}$$

TS : 인장강도(kgf/mm<sup>2</sup>)  
RA : Reduction ratio(%)

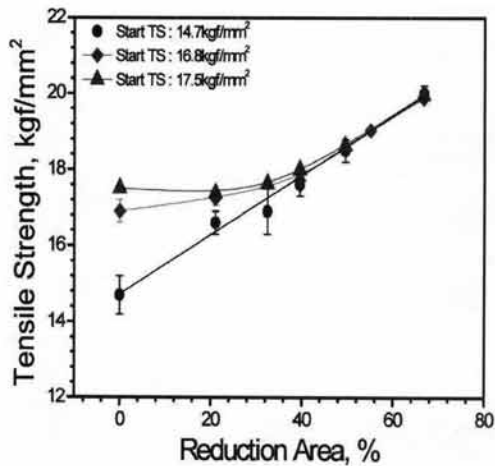


Fig. 7. The tensile strength variation in accordance with reduction ratio in start tensile strength.

이러한 결과에서 나타난 바와 같이 폐AI선재를 신선 가공하여 재생하는 가공법은 합당한 것으로 판단된다. 폐AI선재는 가설지역과 사용 환경에 따라 다양한 강도분포를 나타낸다. 염해 및 공해 지역과 같은 부식 환경과 90℃의 허용전류 환경에 노출된 가공송전선의 경우 열화 정도가 심한 반면 청정지역과 낮은 허용온도에 노출된 경우 열화정도가 작다.

본 연구에서는 폐AI선재의 인장강도를 14.5 kgf/mm<sup>2</sup>에서 17.5 kgf/mm<sup>2</sup>의 3등급으로 분류, 시작 강도에 따른 인장강도 변화를 조사한 결과를 그림 7에 나타내었다. 시작 강도가 낮은 14.5 kgf/mm<sup>2</sup>의 폐AI선재는 가공률에 따라 인장강도는 선형적으로 증가하였으며, 이 관계는 식 (3)과 같다. 반면에, 시작 강도 16.8 kgf/mm<sup>2</sup>과 17.5 kgf/mm<sup>2</sup> 폐AI선재에서는 가공률과 인장강도는 상관성이 달리 나타났다. 40% 이하의 가공률에서는 인장강도 증가가 미미하다가 40% 이상의 가공률에서 저강도 (14.5 kgf/mm<sup>2</sup>) AI소재의 인장강도 증가 거동과 동일하게 나타났다.

낮은 시작강도에서 신선한 AI선재는 신선과 같은 가공에 의해 전위 증식 등의 강도 증가 요인이 충분히 존재하지만, 높은 시작강도에서는 이와 같은 요인이 어느 정도 포화를 이루고 있기 때문에 신선 초기 낮은 가공률에서는 인장강도 증가효과가 미미한 것으로 판단된다.

즉 소재의 인장강도가 낮을수록 우수한 유동성으로 인하여 가공경화 효과가 충분히 나타났다. 소재를 가공하면 소성변형의 증가와 함께 전위밀도가 증가하여 가공조직이 형성되고 소성유동응력이 증대하여 가공경화된다. 강도가 큰 소재는 높은 유동응력을 필요로 하기 때문에 가공 초기에는 인장강도 증대 효과가 작게 나타난다 [2,3].

#### 4. 결론

폐가공송전선 AI선재에 대한 새로운 개념의 재활용 기술, 재제조 기술의 필수적인 공정인 신선가공에 영향을 미치는 인자와 기계적 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 재제조공정에 의한 신선가공으로 가공송전선용 폐AI선재의 재활용이 가능하다.
2. 폐AI선재의 신선가공에 의하여 신품 AI선재와 유사한 미세조직과 집합조직이 형성되었으며, 조직학적으로 차이가 없었다.
3. 66% 가공률, 6 pass 신선가공한 폐AI선재 인장강도는 약 20 kgf/mm<sup>2</sup>이며, 이는 신품 AI선재와 유사한 인장강도이다.

#### 감사의 글

본 논문은 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 폐급속유용자원재활용기술개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다. (과제번호: GT-11-C-01-110-0)

#### REFERENCES

- [1] H. I. Kim and Y. S. Han, *The Understand & Using for Aluminum*, 272 (2009).
- [2] K. Ito, *The Met. Soc.*, 169 (1988).
- [3] *Development of High Conductive Al Alloy and High Strength Core Material for Conductor* (2006).
- [4] B. G. Kim and S. S. Kim, *J. Kor. Insti. Met. & Mater.*, 39, 1212 (2001).