

폐가공송전선 AI선재 재활용 기술개발

김상수^{1,a}, 구재관¹, 이영호¹, 김병걸²

¹ (주)메탈링크 기술연구소

² 한국전기연구원 HVDC연구본부

The Recycling Technology for Aged Aluminum Wire in Overhead Conductor

Shang-Shu Kim^{1,a}, Jae-Kwan Ku¹, Young-Ho Lee¹, and Byung-Geol Kim²

¹ R&D Center Metallink Inc., Eumseong 431-804, Korea

² HVDC Research Division, KERI, Changwon 642-120, Korea

(Received April 10, 2013; Revised May 11, 2013; Accepted May 12, 2013)

Abstract: The new recycling technology for aged aluminum wires in overhead conductor has been carried out. The authors are attempting to develop remanufacturing method for them for more effective way of recycling in stead of its conventional remelting process. The new recycling technology for aged aluminum wire in overhead conductor was composed of four steps in different develop process, destranding process for conductor, surface cleaning process, welding process and drawing process for aluminum wire. This paper investigates the properties during recycle process of aged aluminum wire. The results of microscopic analysis and mechanical properties were discussed to underscore recycling aluminum wire. Various graphs are presented accompanied by discussion about their relevance on the process. In conclusion, we confirmed the possibility of remanufacturing technique by using new process.

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

1. 서론

국내외적으로 전력망에서 노후화된 선로의 교체 또는 부하 증가에 의해 매년 수백만 톤의 폐가공송전선이 발생된다. 이러한 폐가공송전선은 알루미늄(aluminum, Al) 선재와 강선(steel wire)으로 분류되

어, 재용해(remelting)되는 재활용 공정(recycle process)으로 이루어져 있다. 일차원적 재활용 방식은 용해로, 연속 주조장치, 다단압연과 같은 고가의 시설을 필요로 한다. 또한 용해 과정에서 에너지를 많이 소모하며, 이로 인한 다량의 CO₂ 가스가 발생하게 되는 등 친환경적인 재활용 방식이라고는 할 수 없다.

최근 폐가공송전선 AI선재의 전통적인 재활용 방식에서 탈피하여 새로운 개념의 재활용 기술, 재제조 기술(remanufacture process)을 개발하였다. 종래의 재활용 방식에 비해 개발된 재활용 방식은 물리적인 방법에 의한 재활용 방식으로 재용해 처리에 의한

a. Corresponding author; 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.

CO₂ 가스가 발생하지 않는 친환경적이다. 본 논문에서는 재제조 기술에서 각각의 공정에 대하여 소개하고 각 공정에 따른 주요 물성을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 Remanufacture process

표 1에 폐가공송전선의 Al선재 재활용공정을 비교하였다. 가공송전선은 Al선재와 강선이 연선된 복합구조체로 알루미늄선재에 대한 재활용은 2가지 방법이 있다. 종래의 재활용 방법은 scrap 처리 후 용해 및 가공에 의한 재활용 방식이다.

본 연구에서 개발한 재제조 기술은 가공송전선에서 Al선재를 분류, 표면가공, 접합 및 신선가공에 의해 재활용하는 방법으로 다음과 같은 주요 공정으로 구성되어 있다.

- 해선(destranding process): 폐가공송전선에서 Al선재를 자동으로 분류
- 표면처리(surface cleaning process): 표면산화물과 이물질을 제거
- 접합(welding process): 단선된 Al선재의 접합 공정
- 신선(drawing process): 목표 치수와 물성을 조정하기 위한 가공 공정

재제조 기술은 고상에서 몇몇의 공정에 의하여 Al선재를 재처리함으로써 온실가스의 발생이 없으며, 재활용비용을 절감 및 가공송전선의 재생 사이클을 최소화한 고효율 재생기술이다.

1 ton을 재활용하였을 경우, 대기오염 물질인 이산화탄소 (CO₂)는 82.0%, 질소산화물 (NO_x) 88.9%, energy 68.5%, 고형폐기물 94.2%의 절감 효과가 있다 [1,2].

2.2 시험 방법

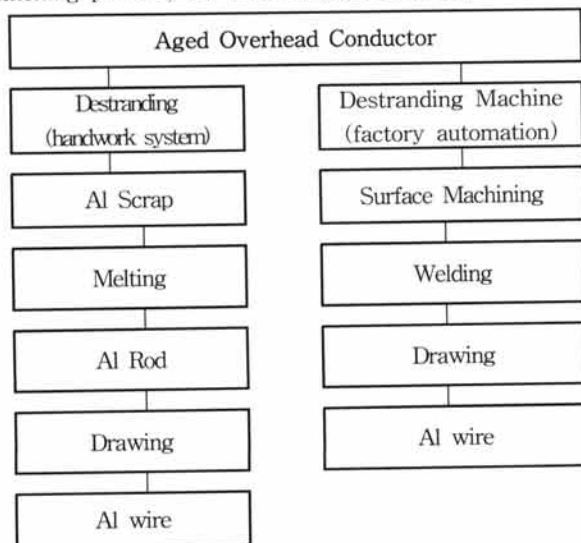
본 연구에서는 폐가공송전선의 Al선재에 대한 재제조 기술에 대한 타당성을 조사하기 위하여 약 40년간 사용된 폐가공송전선을 대상으로 하였다. 가설지역에 따라 수거된 폐가공송전선에서 앞서 열거된 공정에 따라 시험하였다.

접합은 냉간 접합을 하였으며, 일정 압력과 회수를 조절하면서 시험하였다. 접합하중은 최소 30 kgf/cm²에서 최대 120 kgf/cm²으로 압력계를 설치하여 접합 압력을 조절하였다.

신선가공은 6단계의 다이스(dies)를 이용하였으며, 각 다이스의 평균 감면율은 약 25%이다. 참고로 신제품 Al선재에서는 약 10~12단계의 다이스가 이용된다.

각 공정에 의한 Al선재의 물성을 조사하였으며 시험은 송전선용 Al선재의 규격인 KS C 3002와 IEC 60888에 준하였다.

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



3. 결과 및 고찰

3.1 폐가공송전선 표면 분석

폐가공송전선의 기대 수명은 약 40년으로 가선되어 있는 동안 지역적 위치에 따라 염해 및 공해에 의해 침식과 더불어 Al선재의 강도 저하가 발생된다.

폐가공송전선의 수명의 Al선재의 인장강도에 의하여 좌우되며, 인장강도 잔존율이 90% 이하로 감소하면 가공송전선은 교체된다.

그림 1은 염공해 지역에서 약 40년간 사용된 폐가공송전선을 나타낸 것이다. 가공송전선은 중심부의 아연도금강선 주위에 Al선재를 연선한 구조이며, 최외층 Al선재는 대기 중에 노출되어 오염원과 부식원에 직접 접촉되어 있다. 내층 Al선재는 외층 Al선재에 의하여 부식원으로 부터 어느 정도 보호를 받고

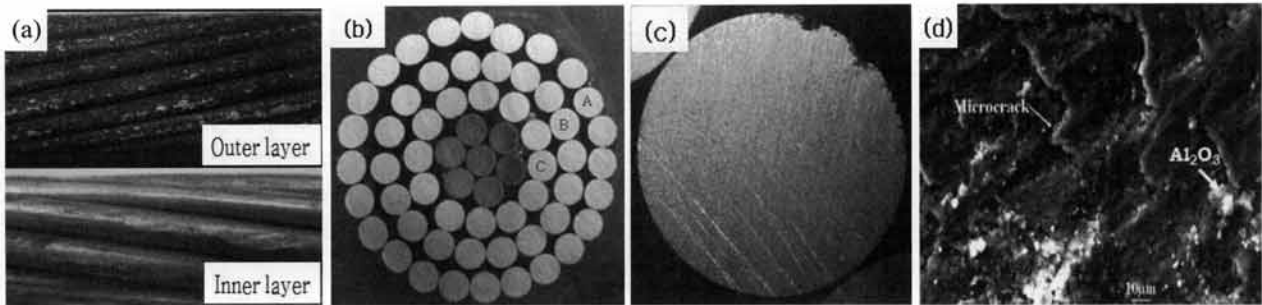


Fig. 1. The surface for aged overhead conductor. (a) appearance of Al wire, (b) cross section of overhead conductor, (c) cross section of 3rd Al wire, (d) materials & microcrack by corrosion.

있으나 부식원이 내부로 침투하게 되면 습윤 기간이 외부에 비해 길어서 부식 진행을 촉진하기도 한다.

그림 1(a) 최외층 Al선재의 표면부는 대기 중의 먼지, 공해 (SO₂) 인자 등에 의하여 검게 변화하였으며, 내층 Al선재 일부에서는 검게 변화하였으나 부식으로 인한 흔적은 거의 발견되지 않았다.

그림 1(b)와 (c)는 폐가공송전선의 단면과 최외층 Al선재의 단면을 나타낸 것으로 내층 Al선재는 소선간의 마찰에 의한 마모 현상만 다소 있을 뿐 전체적으로 건전한 상태를 유지한 반면에 최외층 Al선재는 부식이나 침식 등에 의해 침식 현상이 발견되었다. 또한 염해 지역과 공해 지역에서는 Cl⁻, SO₂ 가스로 인하여 반응 부식물이 형성되어 미소균열이 발생되었다 (그림 1(c), (d) 참조). 대기 중의 오염 물질은 매연, 검댕, 액적 등의 고체상과 액체상 물질로 구성되어 있고 미세 먼지 중에서 S의 성분이 가장 높게 나타나며 그 다음 Na, Al, Ca, Fe 등의 순서를 나타낸다 [3].

그림 1(d)는 Al선재의 표면을 SEM 분석한 것으로 대기 중에 장시간 노출되면 산소와 반응하여 Al₂O₃ 형태의 부식 생성물이 형성되며, 이러한 부식에 의하여 표면침식이 발생된다 [3]. 부식 이외 Al선재의 침식 발생 원인으로는 바람에 의한 미세진동으로 Al소선간 마찰에 의한 마모 현상과 spacer, damper에 의한 마찰로 발생하는 것으로 보고되고 있다 [3,4].

또한 가공송전선 내의 Al부식은 오염물질의 침적으로 발생한다. 대기 중에 노출되면 산화알루미늄이 가장 먼저 형성되고 수분이 존재할 경우 수산화알루미늄, 산화알루미늄과 수산화염화물이 형성되어 pitting (그림 1(c))과 미세 균열 (그림 1(d))이 발생된다. 부식 비율은 청정 지역 0.1 μm/yr, 공해 지역 1 μm/yr, 염해지역 0.4~0.6 μm/yr 정도이다 [3].

3.2 폐Al선재 물성 분석

가공송전선은 통전 시 발생하는 주울열과 태양 복사열 등과 같은 열 환경에 항시 노출되어 사용연한 등에 의해 Al선재 강도는 점차 연화되어 소프트닝 (softening)된다.

표 2는 약 40년 경과된 154 kV, ACSR 410 mm² 가공송전선용 Al선재에 대하여 인장강도와 도전율을 나타낸 것이다. 40년간 사용된 폐Al선재의 경도는 약 44.9 Hv로 약 10% 정도 감소하였다. 인장강도는 가설 지역에 따라 14.5~18.5 kgf/mm²의 분포를 나타내었다. 염해 및 공해지역에 가설된 Al선재의 인장강도는 90℃ 노출과 더불어 부식 산화물과 같은 부식인자로 인하여 연화, 또는 부식되어 큰 편차를 나타내었다.

Table 2. The properties of new and aged Al wire.

Properties	New Al	Aged Al
Hardness(Hv)	49.0	44.9
Tensile strength (kgf/mm ²)	min 16.0	14.5~18.5
Conductivity(%IACS)	min. 62.0	61.0~62.0

폐Al선재의 도전율은 신품 Al선재에 비하여 약 1% IACS 정도 감소하였다. 이는 눈, 비, 먼지 등의 영향으로 표면 부식 및 미소 균열에 의한 것으로 사료된다.

3.3 해선 공정 (destranding process)

폐가공송전선은 아연도금강선과 Al선재가 연선되어

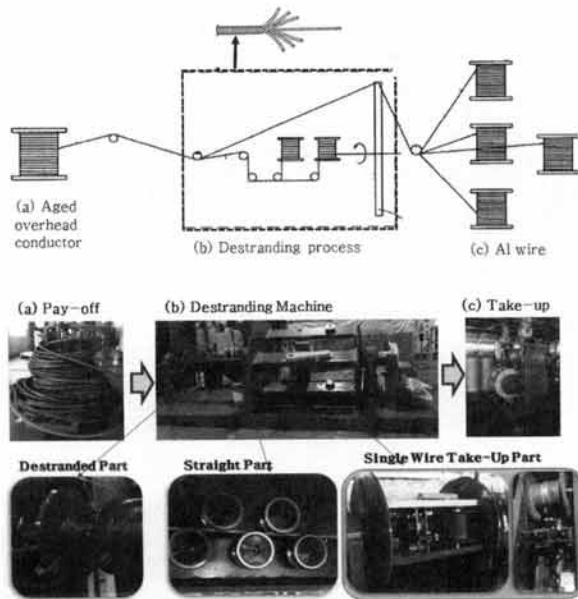


Fig. 2. The view of destranding process.

있는 복합구조체를 각각의 AI선재로 해선하는 공정으로 AI선재의 기계적인 손상이 없이 효율적으로 분류하는 것이 본 공정의 핵심이다.

그림 2는 본 연구에서 AI선재 해선을 위해 개발한 장치의 모식도와 실측 사진이다. 해선 공정은 폐가공송전선을 일정한 속도로 공급하는 pay-off, AI소선을 분류하여 권취하는 해선기 (destranding machine)와 AI선재를 제외한 강선을 권취하는 take-up으로 구성되어 있다. 해선기에서 분류된 AI선재는 연선형상이므로 직선기를 설치하여 직선화 후 권취하였다.

해선공정에서 폐가공송전선의 인입 속도와 AI선재의 해선 및 권취 속도 차이에 의하여 단선 가능성을 고려하여 가변기어를 설치하여 연동하였다.

3.4 폐AI선재 표면 처리 (surface cleaning)

해선 공정에서 분류된 AI선재의 표면은 대기 중에 노출로 인하여 이물질 및 산화물이 형성되어 있으므로 재활용을 위해서는 반드시 제거하여야 한다. 본 연구에서는 AI선재 표면 산화물을 위하여 스틸 브러시를 연속적으로 배열하여 기계적인 방법을 이용하였다.

그림 3은 표면산화물 제거 전후 AI선재의 표면 사진이다. 직경 4.5 mm의 AI선재에 대하여 스틸 브러시를 이용하여 선속 30 m/min의 속도로 시험하였다.

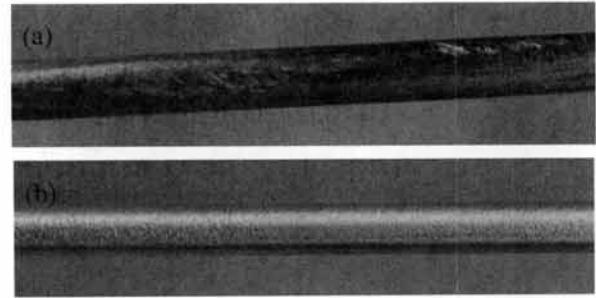


Fig. 3. Surface AI wire. (a) aged AI wire, (b) after surface cleaning.

폐AI선재 산화물과 표면 미세균열 (microcrack)은 스틸 브러쉬에 의하여 대부분 제거되었으며, 신품 AI선재와 유사한 광택을 나타내었다.

기타 산화물 제거방법에는 화학적 및 절삭 방법 등이 있다. 화학적 방법에서는 표면 산화물을 제거하는 것은 가능하나 표면 균열은 제거하는 것이 불가능하였다. 표면부를 일정 두께로 절삭하는 것은 산화물과 균열 제거에는 효율적이나 단선되는 현상이 발생하였다.

3.5 접합 (welding)

그림 4는 폐AI선재 접합에 의한 미세조직을 나타낸 그림이다. 접합에 의하여 소재 유동성에 의한 변형 (material flow deformation) 선이 잘 발달되었으며, 접합부 (cold weld), 영향부 (mechanically affected zone) 및 모재 (base metal)로 구분되었다 [5,6].

폐AI선재의 모재 조직은 (그림 4(a)) 초기 신선가공에 의한 조직 형상을 유지하였다. 가공 방향으로 연신되어 섬유상의 형태가 약 40년간 90°C 온도에 노출, 열화로 파괴되지 않고 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

접합부 미세조직 (그림 4(b))은 접합 압력에 의하여 압력 방향과 수직 방향으로 배열되었으며, TEM 사진에 의하면 압축력에 의하여 결정립계에 전위 증식과 결정립 미세화가 발생된 것을 확인할 수 있었다.

AI선재 접합은 접합표면에서 압력에 의해 원자 간의 거리가 1 Å 이하로 근접하면 원자 상호간의 인력에 의해 접합되며, 접합력을 높게 하기 위해서는 접합에 관여하는 원자의 수를 증가시켜야 한다. 계면에서 원자의 배열이 일치하는 원자의 수를 증가시키기 위해서 접합계면을 약 5° 기울여 접합하면 우수한 접합성을 나타내는 것으로 조사되었다 [5,6].

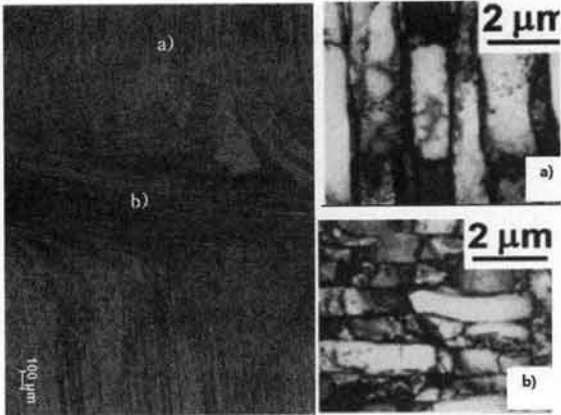


Fig. 4. The microstructure of welded Al wire. (a) base material, (b) welded material.

그림 5는 접합 압력에 따른 페Al선재 접합력을 나타낸 그림이다. 페Al선재의 인장강도와 접합 압력에 의한 상관성을 조사하기 위하여 압력을 30 kgf/cm²에서 120 kgf/cm²으로 가변하면서 시험하였다. 접합 압력의 증가에 따라 접합력은 전반적으로 증가하였으나 모재의 인장강도에 따라 접합력의 크기는 다소 차이를 나타내었다.

낮은 인장강도의 페Al선재 (14.5 kgf/mm² grade)에서 접합 압력의 영향은 100 kgf/cm² 압력에서 최대 접합력 22.3 kgf/mm²을 나타내었으며, 이상의 압력에서는 접합력이 다소 감소하였다.

높은 인장강도의 페Al선재 (18.0 kgf/mm² grade)에서 접합력은 저강도 Al선재와 유사하였으나 120 kgf/cm² 압력에서 최대 접합력 22.9 kgf/mm²을 나타내었다. 페Al선재 (접합재) 인장강도가 클수록 높은 접합 압력을 필요로 하였다. 이는 접합소재 인장강도 증가에 따라 원자를 이동시키기 위해서는 높은 압력이 필요하기 때문이다.

접합 압력이 증가하면 계면에서 변형이 크기 때문에 우수한 접합 특성을 얻을 수 있다. 가압력에 의해 접합 초기에 접합 표면의 미세한 요철 부분 소성 변형과 산화피막 파괴에 의해 원자의 확산이 가능한 금속접촉면을 만들고 접합 표면의 공동을 소멸시키는 효과가 있으므로 가압력 크기는 중요한 접합요소이다. 그러나 저강도 소재의 경우 접합 표면에 압력이 너무 높으면 필요한 압력이 가해지지 않기 때문에 접합이 곤란한 경우가 있으므로 적정 가압력을 가하여야 한다 [6].

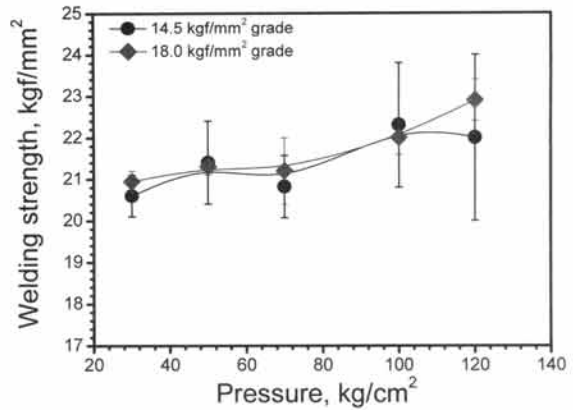


Fig. 5. Welding strength in accordance to pressure.

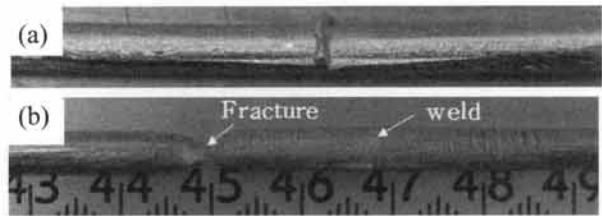


Fig. 6. Welded sample. (a) welded sample, (b) tensile tested sample.

접합 Al선재의 인장 파단면을 그림 6에 나타내었다. 파단은 접합부로부터 약 15~20 mm 떨어진 위치에서 발생되었다. 접합에 의해 경화 (hardening)되는 접합부 (cold weld), 기계적인 힘에 의해 가공경화가 발생하는 영향부 (mechanically affected zone)와 모재 (base metal)로 구분되는데 파단은 주로 영향부와 모재의 경계면에서 발생하였다.

기계적 경화되는 거리를 측정하기 위하여 접합부로부터 거리에 따른 경도 변화를 조사하여 그림 7에 나타내었다. 접합부에서 경도와 접합 인장강도는 약 53 Hv와 21 kgf/mm²으로 모재의 경도와 인장강도 44.9 Hv, 14.5 kgf/mm²에 비하여 경화되어 있음을 확인하였다. 접합부로부터 모재 방향으로 경도는 감소하였으며, 접합부에서 약 15 mm 떨어진 영역의 경도는 약 45.6 Hv로 모재 44.9 Hv와 유사한 수준이다. 접합에 의하여 경화가 발생하는 영향부는 약 15~20 mm로 파단부와 일치하였다. 영향부는 다이스에 의한 반복 압축으로 전위 (dislocation)의 증식 등으로 경화되어 발생한 현상이다.

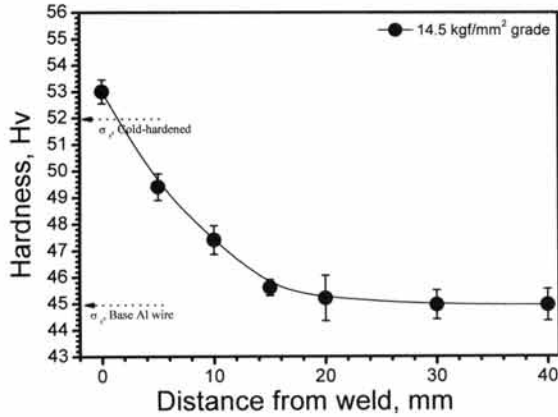


Fig. 7. The variation of hardness with the distance from weld.

M. Iordachescu 등에 의하면 압축력에 의하여 소재 접합부에서 material flow에 의한 변형되고 소재 중심부에 응력이 증가하여 우선 접합되며 최종적으로 표면부가 접합된다고 하였다. 또한 접합부에서 멀어질수록 응력 분포는 감소한다고 보고하였다 [5,6].

3.6 신선가공 (drawing)

그림 8은 직경 4.5 mm 폐Al선재를 직경 2.6 mm로 66.6% 신선 가공한 미세 조직을 나타낸 그림이다. 그림 8(a)의 폐Al선재는 약 40년간 90℃ 온도에 노출, 열화된 미세조직이지만 섬유상의 조직은 완전히 파괴되지 않고 가공방향으로 연신된 형상의 조직구조를 유지하고 있었다. 조직학적 변화는 온도와 시간에 의하여 결정된다. Al금속의 재결정 온도는 약 250℃이며, 재결정 온도 이상에서 장시간 유지하게 되면 결정립의 재결정화 및 성장이 발생되나, 폐Al선재는 약 70~90℃ 온도에서 약 40년간 사용으로 인하여 결정립의 성장은 다소 발생하였으나 신품 Al선재와 유사한 조직 구조를 나타내고 있다.

그림 8(b)는 2.6 mm로 신선 가공된 조직으로 가공방향으로 미세조직이 연신되어 섬유상의 형태가 발달되었다. 가공률에 따라 결정립계는 미세화되며, 집합조직을 형성하였다. 이러한 미세한 조직은 전위 이동의 장애물로 작용하여 기계적 성질의 향상과 더불어 피로 및 부식에도 큰 영향을 미친다 [7,8].

그림 9는 직경 4.5 mm에서 6 pass로 직경 2.6 mm까지 신선 가공하면서 각 가공률에 따른 인장강도의

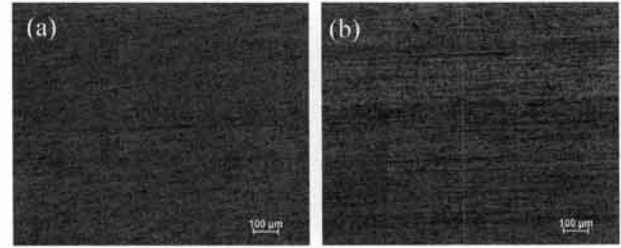


Fig. 8. The microstructure of Al wire. (a) aged 4.5 mm Al wire, (b) drawing 2.6 mm Al wire.

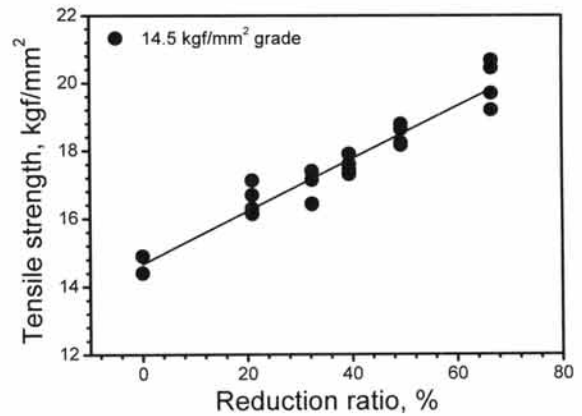


Fig. 9. The tensile strength variation in accordance with reduction ratio of aged aluminum wire.

거동을 조사한 결과이다. 인장강도 14.5 kgf/mm²의 폐Al선재를 신선 가공하면 가공률에 비례하여 인장강도는 증가하였다. 가공률에 따른 강도의 증가는 결정립의 미세화 및 전위 증식에 의한 것이다. 66.6% (직경 2.6 mm) 가공률으로 신선한 Al선재의 인장강도는 20.0 kgf/mm²으로 약 38% 정도 향상되었으며, 한국 전력 표준구매시방서 및 IEC 규격의 인장강도 17.4 kgf/mm²을 상회하는 수치이다. 신품 Al선재의 인장강도 19.0~21.0 kgf/mm²와 비교하여도 거의 동일한 수치이다. 폐Al선재 신선 가공에서 인장강도와 가공률에 따른 상관성을 조사한 결과 직선적 비례관계가 성립되며, 식 (1)과 같이 도출되었다 [8].

$$TS = 14.73 + 0.078 \times RA \quad (1)$$

TS : 인장강도 (kgf/mm²)
RA : Reduction ratio (%)

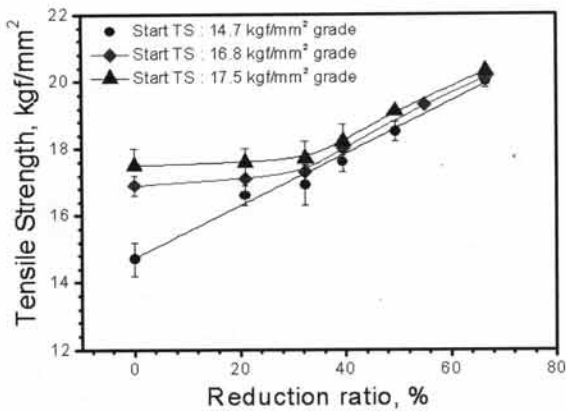


Fig. 10. The tensile strength variation in accordance with reduction ratio in start tensile strength.

폐Al선재는 가설지역과 사용 환경에 따라 다양한 강도 분포를 나타낸다. 염해 및 공해지역과 같은 부식 환경과 90℃의 허용 전류 환경에 노출된 가공송전선의 경우 열화 정도가 심한 반면 청정지역과 낮은 허용온도에 노출된 경우 열화 정도가 작다.

폐Al선재의 인장강도를 14.5 kgf/mm²에서 17.5 kgf/mm²의 3등급으로 분류하여 시작 인장강도에 따라 신선가공의 영향을 조사한 결과를 그림 10에 나타내었다. 시작 인장강도가 낮은 14.5 kgf/mm²의 폐Al선재는 가공률에 따라 인장강도는 선형적으로 증가하였으며, 이 관계는 식 (1)과 같다. 반면에, 시작 강도 16.8 kgf/mm²과 17.5 kgf/mm² 폐Al선재에서는 가공률과 인장강도는 상관성이 달리 나타났다. 40% 이하의 가공률에서는 인장강도 증가가 미미하다가 40% 이상의 가공률에서는 저강도 (14.5 kgf/mm²) Al소재의 인장강도 증가 거동과 동일하게 나타났다.

낮은 시작강도에서 신선한 Al선재는 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 증가 효과가 미미한 것으로 판단된다. 즉 소재의 인장강도가 낮을수록 우수한 유동성으로 인하여 가공경화 효과가 충분히 나타났다. 소재를 가공하면 소성 변형의 증가와 함께 전위밀도가 증가하여 가공 조직이 형성되고 소성유동용력이 증대하여 가공경화 된다. 강도가 큰 소재는 높은 유동용력을 필요로 하기 때문에 가공 초기에는 인장강도 증대 효과가 작게 나타난다 [7-9].

Table 3. The properties of recycle Al wire.

	Remanufacturing		Standard
	Al wire	KEPCO	IEC
Diameter (mm)	2.6	2.6	2.6
Tensile strength (kgf/mm ²)	20.0	17.2	17.8
Conductivity (%IACS)	61.9	61.0	61.0

표 3은 재제조 공정 (remanufacturing process)에 의한 재활용 Al선재의 최종물성과 규격을 나타내었다. 재제조 공정에 의해 제조된 Al선재는 한국전력 표준구매시방서와 국제규격 (IEC)의 인장강도와 도전을 기준을 충족함으로써 타당성을 확인하였다.

4. 결론

폐가공송전선에서 고가의 금속인 Al선재에 대한 재활용 기술, 재제조기술을 개발하여, 각 제조공정별 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 기존 용해에 의한 재활용방식은 용해로, 연속주조장치 및 다단압연과 같은 고가의 시설이 필요한 장치산업인 반면에 재제조 방식은 고가의 설비가 필요하지 않은 경제적인 재활용 방식이다.
2. 재제조에 의한 재활용은 온실저감효과가 크며, 친환경적 재활용 방식이다.
3. 재제조공정은 Al선재를 분류하는 해선공정, 표면처리공정, 접합과 신선가공으로 구성되며, 본 공정에 의한 재활용은 타당하였다.
4. 소재의 유동성은 인장강도의 영향을 받으므로 폐Al선재 접합을 위해서는 인장강도에 따라 접합 압력과 접합 회수를 조절하는 것이 타당하다.
5. 재생 Al선재는 신품 Al선재와 유사한 미세조직과 집합 조직이 형성되었으며, 인장강도는 약 20 kgf/mm²이며, 이는 신품 Al선재와 유사한 인장강도이다.

감사의 글

본 논문은 환경부 글로벌담 환경기술개발사업 중 폐금속유용자원재활용기술개발사업의 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] The Greenhouse Gas Guideline, Ministry of the Environment, Japan (2003).
- [3] T. E. Graedel, *J. Electrochem. Soc.*, 136 (1989).
- [4] IEEE Standard 664-1993, *IEEE Guide for Laboratory Measurement of the Power Dissipation Characteristics of Aeolian Vibration Dampers for Single Conductors* (New York, 1993).
- [5] M. Iordachescu and D. Iordachescu, *J. Materials Processing Technology*, 209, 4255
- [6] S. S. Kim, J. K. Ku, Y. H. Lee, and B. G. Kim, *J. KIEEME*, 26, 415 (2013).
- [7] W. C. Nam, *The Handbook of Advanced Aluminum Technology*, 892 (1997).
- [8] S. S. Kim, J. K. Ku, Y. H. Lee, and B. G. Kim, *J. KIEEME*, 26, 482 (2013).
- [9] G. Chen, X. Wang, J. Wang, J. Liu, T. Zhang, and W. Tang, *Engineering Failure Analysis*, 19, 13, (2012).