

폐가공송전선 Al선재 냉간접합 특성

김상수^{1,a}, 구재관¹, 이영호¹, 김병걸²

¹ (주)메탈링크 기술연구소

² 한국전기연구원 HVDC연구본부

The Cold Welding Properties for Al Wire of Aged 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 8, 2013; Accepted April 24, 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 weld of aged aluminum wires play a vital role in remanufacture process. The paper investigates the mechanical properties during cold welding process of aged Aluminum wire. The tensile tests and microscopic analysis results are discussed to underscore the hardening features of welded 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. 서 론

지구상에 존재하는 부존자원의 고갈은 특히 자원빈국에 있어서는 국가의 지속적인 발전을 가로막는 중요한 장애요인으로 부상할 것이다. 따라서 절대 자원 빈국인 우리나라는 각종 자원의 효율적인 재활용을 국가적인 차원에서 활성화시킬 필요가 있다.

노후화된 가공송전선로의 교체 또는 송전용량 증대를 위하여 한국전력에서 매년 수백 톤의 폐가공송전

선이 발생된다. 폐가공송배전선은 중간 수집상에 넘겨지고 그곳에서 알루미늄 선재와 강선으로 분류되어, 관련 소재 제련업체에서 재용해 (remelting)되는 일차원적 재활용 공정 (recycle process)으로 이루어져 있다. 일차원적 재활용방식은 수작업에 의한 분류 및 재용해 처리에 따른 비용 상승과 함께 에너지 소비형 재활용방식이다. 특히 재용해 및 가공과정에서 다량의 CO₂ gas 등의 온실가스가 발생하게 되므로 친환경적 재활용 방식이라고는 할 수 없다.

최근 폐가공송전선의 알루미늄 (aluminum)선재의 전통적인 재활용방식에서 탈피하여 새로운 개념의 재활용기술, 재제조기술 (remanufacture process)이 개발되어 실용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 재제조 기술에 핵심적인 역할을 하고 있는 접합공정과 접합에 영향을 미치는 인자를 도

a. Corresponding author; mlicto@emellink.com

출하여 각 인자에 의한 접합 특성을 조사하였다. 접합에 영향을 미치는 인자로 접합압력, 접합회수, 접합간 거리 등이 있으며, 각 접합 인자에 의한 접합성과 접합소재의 인장강도 변화에 따른 접합성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 Remanufacture process

표 1에 가공송전선용 폐AI선재 재활용 공정을 비교하여 나타낸 것이다. 기존 폐AI선재 재활용은 폐가공선에서 폐AI선재와 강선을 수작업에 의해 분류 scrap 처리 후 용해업체에 매각하여 재용방식으로 재활용하는 방식이다. 재제조 기술은 AI선재를 scrap에 의한 용해, 제련처리하지 않고 해선, 산화물 제거와 같은 표면처리 및 물리적인 가공에 의하여 재생 (reuse)할 수 있는 공정으로 CO₂ gas발생과 재활용비용을 최소화하는 신개념의 재활용기술이며, 가공송전선의 재생 사이클을 최소화한 고효율 재생기술이다.

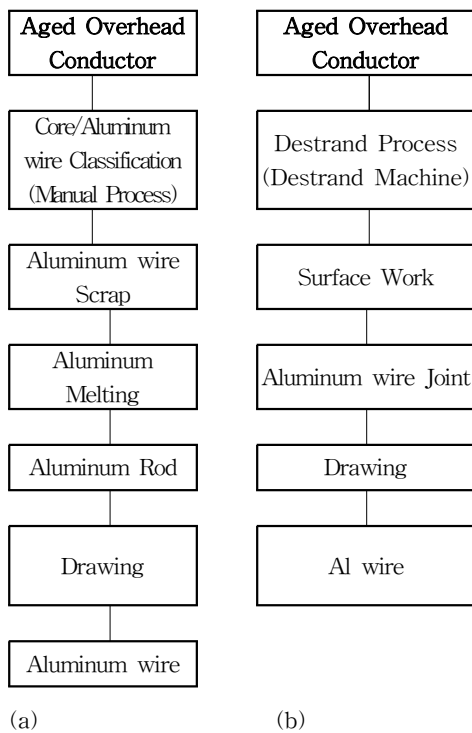


Table 1. The recycle process of overhead conductor. (a) remelting process, (b) remanufacture process.

해선공정은 강선과 AI선재의 연선되어 있는 복합구조체인 가공송전선으로부터 AI선재의 기계적인 손상이 없이 효율적으로 분류하는 공정이다. 표면가공은 폐AI선재의 표면부식물을 제거하는 공정이다. 폐AI선재의 표면은 장시간 옥외에서 사용되는 동안 이물질과 산화물에 의하여 표면이 부식되어 있으므로 기계적 및 화학적 방법으로 산화물을 제거하여야 한다. 표면가공은 스틸브러쉬 (steel brusher)의 강도차를 이용, 강도가 다른 스틸브러쉬를 연속적으로 배열하여 AI선재 산화물과 표면 미세균열 (microcrack)을 제거하였다. 표면가공이 완료된 폐AI선재는 접합 (weld)과 신선가공으로 재생 (reuse)되어 신제품 AI선재로 사용이 가능하다.

1 ton을 재활용하였을 경우, 대기오염 물질인 이산화탄소 (CO₂)는 82.0%, 질소산화물 (NO_x) 88.9%, energy 68.5%, 고형 폐기물 94.2%의 절감효과가 있다.

2.2 폐AI선재 인장강도

폐가공송전선의 가설지역과 노후년수에 따라 폐AI선재의 인장강도는 큰 편차를 나타내었다. 청정지역 폐AI선재의 인장강도 감소는 작은 반면 염해 및 공해 지역에서 사용된 폐AI선재의 인장강도는 부식적 영향으로 큰 폭으로 감소하였다. 폐AI선재의 인장강도 분포를 조사한 결과 약 14.5 kgf/mm² ~ 18.0 kgf/mm²의 분포를 나타내었다.

인장강도에 따른 접합성을 조사하기 위하여 폐AI선재 인장강도를 2단계로 분류하였다. 인장강도 14.5 kgf/mm² grade를 저강도, 18.0 kgf/mm² grade를 고강도 AI선재로 분류하여 인장강도와 접합성의 상관관계를 조사하였다.

2.3 폐AI선재 접합

폐AI선재의 재제조 (remanufacture)를 위한 접합성을 조사하기 위하여 약 40년간 사용된 폐가공송전선으로부터 AI선재를 분류, 표면가공을 하여 산화물과 이물질을 제거하였다.

AI소재의 접합에는 소재의 직경과 후 처리에 따라 냉간 접합과 열간 접합이 이용된다. AI rod와 같이 직경 9.5 mm 정도에서는 열간 압접이 사용되며, 직경 4.5 mm와 같은 선재 (wire)에서는 본 연구와 같은 냉간압접이 이용되고 있다.

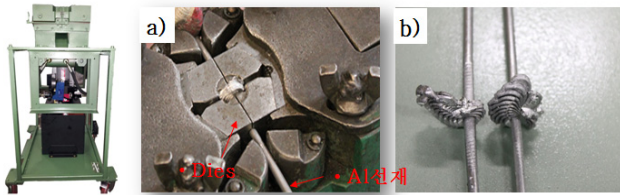


Fig. 1. The cold weld of aged Al wire. (a) welding dies and wire position, (b) cold welded Al wire before burr removal.

접합은 그림 1(a)의 다이스 (Dies) 양단에 절단된 페Al선재를 삽입 후 일정 압력과 회수를 조절하면서 시험하였다. 접합하중은 최소 30 kgf/cm^2 에서 최대 120 kgf/cm^2 으로 압력계를 설치하여 접합압력을 조절하였다. 접합 후 Al선재의 형상은 그림 1(b)와 같이 접합부에서 Al burr가 돌출되면서 접합되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세 조직

그림 2는 페Al선재 냉간접합에 의한 전형적인 미세 조직을 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.

페Al선재의 모재 조직은(그림 2 (a)) 신선가공에 의하여 가공방향으로 연신되어 섬유상의 형태가 발달되었다. 약 40년간 90°C 온도에 노출, 열화에 의해 파괴되지 않았으며 신제품Al선재와 유사한 조직구조를 유지하고 있었다.

접합부 미세조직(그림 2 (b))은 접합압력에 의하여 압력방향과 수직방향으로 배열되었으며, TEM 사진에 의하면 압축력에 의하여 결정립계에 전위 증식과 결정립 미세화가 발생된 것을 확인할 수 있었다.

냉간접합은 접합표면에서 금속원자 상호 간 인력으로 접합되며 원자 간의 거리가 1 \AA 이하일 때 원자 상호 간의 인력이 가장 높으며 접합력이 가장 우수하다. 접합력을 높게 하기 위해서는 접합에 관여하는 원자의 수를 증가시켜야 한다. 계면에서 원자의 배열

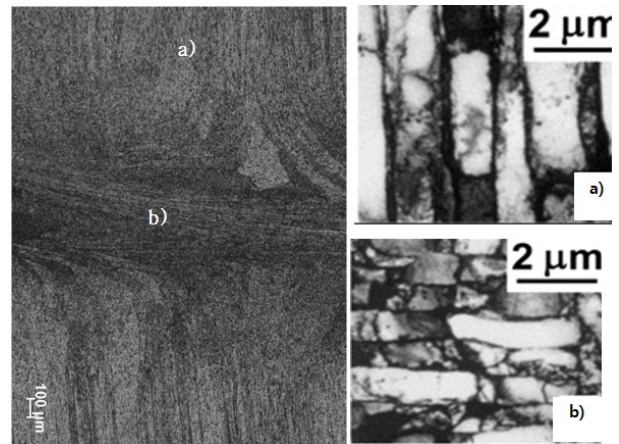


Fig. 2. The Microstructure of welded Al wire. (a) base material, (b) welded material.

이 일치하는 이방성으로 배열하기 위하여 접합계면을 약 5° 기울어 시험한 결과 우수한 접합성을 나타내었다. 변형방위를 $[100]$ 배열한 접합력이 $[110][100]$ 으로 배열한 소재에 비하여 우수한 접합력을 나타낸다 [1].

3.2 접합압력의 영향

그림 3은 압력변화에 따른 페Al선재 접합력을 나타낸 그림이다. 압력을 30 kg/cm^2 에서 120 kg/cm^2 까지 변화하면서 5회 접합 후 인장강도를 조사하였다. 저강도 (14.5 kgf/mm^2 grade) 페Al선재에서 접합 후 압력변화에 따른 영향은 다소 증가하였지만 미미하였다. 100 kgf/cm^2 압력에서 최대 접합력 22.3 kgf/mm^2 을 나타내었으며, 이상의 압력에서는 접합력이 다소 감소하였다.

고강도 (18.0 kgf/mm^2 grade) 페Al선재에서 접합력은 저강도 Al선재와 유사하였으나 120 kgf/cm^2 압력에서 최대 접합력 22.9 kgf/mm^2 을 나타내었다. 접합재 인장강도가 높을수록 접합압력이 증가하였다. 접합소재 인장강도 증가에 따라 원자를 이동시키기 위해서는 높은 압력이 필요하기 때문이다.

접합압력이 증가하면 계면에서 변형이 크기 때문에 asperity가 깨지면서 우수한 접합특성을 얻을 수 있다. 가압력에 의해 접합초기에 접합표면의 미세한 요철부분 소성변형과 산화피막 파괴에 의해 원자의 확산이 가능한 금속접촉면을 만들고 접합표면의 공동을 소멸시키는 효과가 있으므로 가압력 크기는 중요한

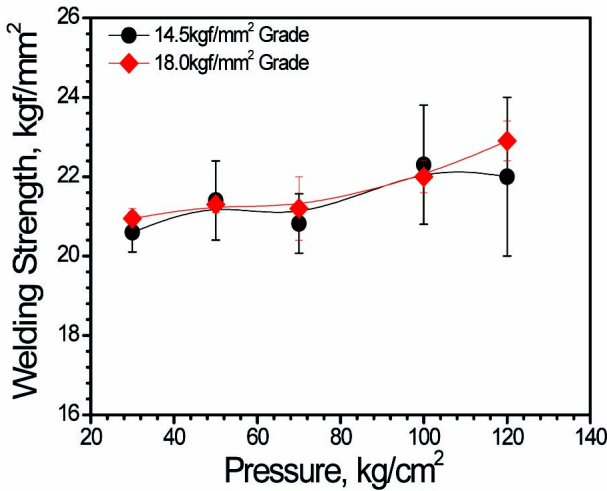


Fig. 3. Weld strength in accordance to pressure.

접합요소이다. 그러나 저강도 소재의 경우 접합표면에 압력이 너무 높으면 필요한 압력이 가해지지 않기 때문에 접합이 곤란한 경우가 있으므로 적정 가압력을 가하여야 한다 [2,3].

3.3 접합회수의 영향

그림 4는 압력 70 kg/cm²에서 접합회수 (cycle) 변화에 따른 폐Al선재 접합력을 나타낸 그림이다. 저강도 Al선재에서 2회 이하의 접합회수는 산화 피막의 잔류로 인하여 낮은 접합력을 나타내었으나 3회 이상의 접합회수에서는 충분한 접합성을 나타내었다. 이후 접합회수와 접합성과는 상관성을 나타내지 않았다. 접합강도는 약 20.8 ~ 21.6 kg/mm²으로 모재 인장강도에 비하여 46% 정도 증가하였다.

고강도 Al선재는 3회 이상에서 접합회수 증가에 따라 접합력이 서서히 증 후 약 7회에서 포화되었다. 약 9회 접합회수에서 접합력 21.4 kg/mm²으로 22% 증가하였다.

접합소재의 인장강도 증가에 따라 접합회수가 증가하였다. 이는 압축력에 의한 소재의 유동성 차이에 의하여 발생된 것으로 고려된다. 저강도 소재에서는 인가된 압축력이 접합표면에서 원자 이동을 충분히 가능하도록 유동성 (metal flow)이 발생하는데 반면에 고강도 소재는 동일 압축력에서 유동성이 충분하지 않아 원자간 이동이 원활하지 않기 때문에 많은 접합회수가 요구된다 [4,5].

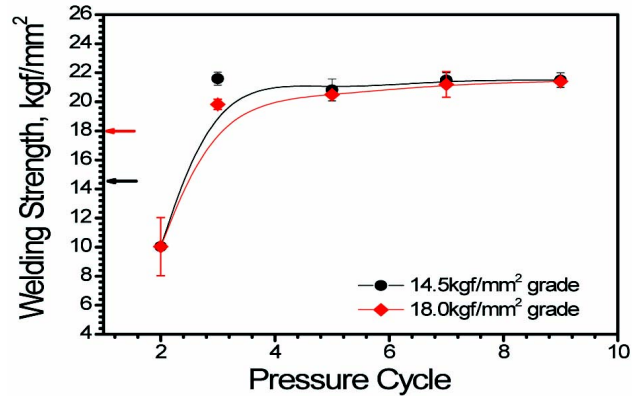


Fig. 4. Weld strength in accordance to pressure cycle at 70 kgf/cm² pressure.

3.4 접합 간 거리의 영향

그림 6은 접합에서 접합 거리를 나타낸 것으로 Al선재 직경의 배수로 하여 최대 2.5d까지 측정하였다.

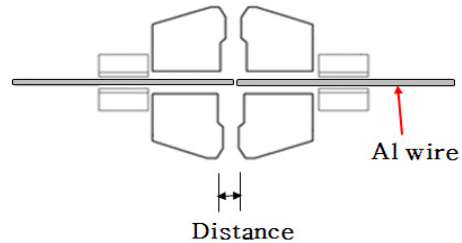


Fig. 5. The distance in cold weld.

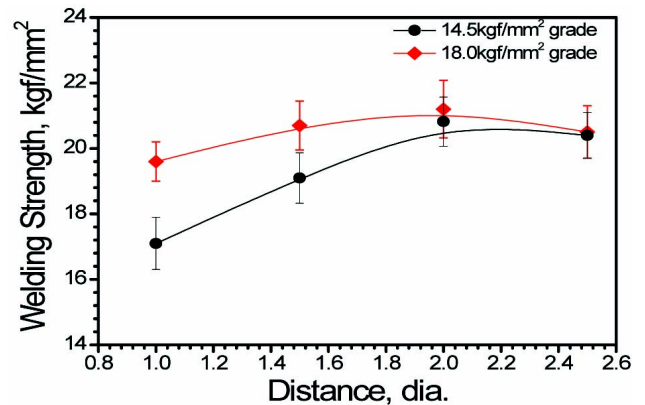


Fig. 6. Weld strength in accordance to distance at 70 kgf/cm² pressure & 5 cycle.

그림 6은 접합 간 거리에 대한 폐Al선재의 접합력을 나타내었다. 접합 거리에 따라 접합력은 큰 차이를 나타내었다. 동일한 압력과 회수에서 접합 거리에 따라 접합력은 증가하였으며, 약 소재 직경의 두 배 거리(2d)에서 최대 접합력을 나타내었으며, 접합력은 약 20.5 kgf/mm²이다. 접합 간 거리가 2.5d 이상에서는 접합력은 감소하였다.

접합 간 거리가 충분하지 않을 경우 접합회수 또는 압력이 증가함으로 인하여 동일한 접합력을 얻을 수 있다. 즉 접합 간 거리 2d, 접합회수 5회에서 접합력을 접합 간 거리 1d에서는 약 8회 접합회수에서 동일한 접합력을 얻을 수 있었다. 폐Al선재의 접합간 거리는 직경의 2배 (2d)에서 최적 접합력이 도출되었다.

저강도 Al선재에서 접합 거리의 영향이 크게 나타났다. 고강도 소재에서는 짧은 거리에서도 접합압력이 소재에 전달되지만, 저강도 소재에서는 원자간 이동에 필요한 압력이 충분히 가해지지 않기 때문에 접합력이 낮게 나타났다.

3.5 파단 및 material flow

접합된 Al선재에 대하여 인장시험을 실시하여 파단면을 그림 7에 나타내었다. 접합 Al선재의 인장시험 결과 파단은 접합부로부터 약 15 ~ 20 mm 떨어진 부위에서 발생되었다. Al선재는 접합으로 경화(hardening)되는 접합부 (cold weld), 기계적인 힘에 의해 가공경화가 발생하는 영향부 (mechanically affected zone)와 모재 (base metal)로 구분되었다. 파단은 주로 영향부와 모재의 경계면에서 발생하였다.

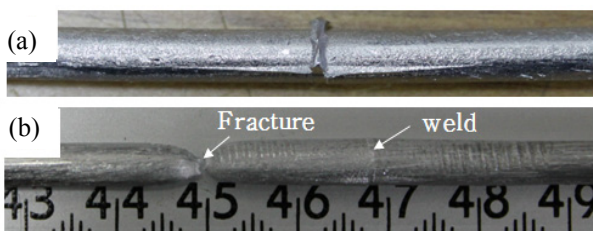


Fig. 7. Welded sample. (a) as welded sample, (b) tensile tested sample.

기계적으로 경화되는 깊이를 측정하기 위하여 접합부로부터 깊이에 따른 경도변화를 조사하여 그림 8에 나타내었다. 접합부에서 경도는 약 53 Hv, 인장강도

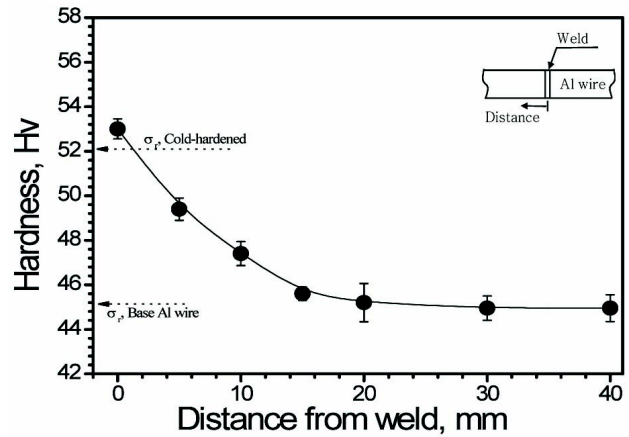


Fig. 8. The variation of hardness with the distance from weld.

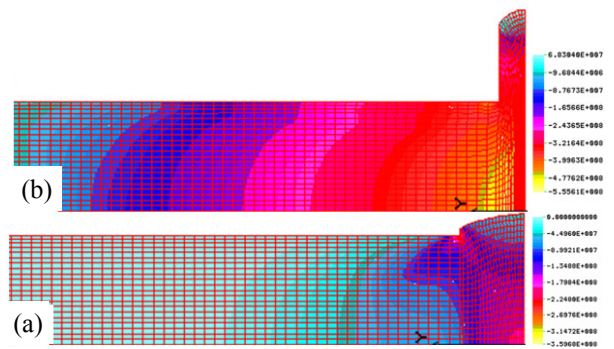


Fig. 9. Computed distribution of stress. (a) 0.3, (b) 0.78.

21 kgf/mm²로 경화되어 있음을 확인하였다. 접합부로부터 모재방향으로 경도는 감소하였으며, 접합부에서 약 15 mm 떨어진 영역의 경도는 약 45.6 Hv로 모재 44.9 Hv와 거의 동일한 수준이다. 접합에 의하여 경화가 발생하는 영향부는 약 15~20 mm로 그림 7의 파단부와 일치하였다. 접합부 부근의 소재 (즉, 영향부)는 다이스에 의한 반복 압축으로 전위 (dislocation)의 증식 등으로 경화되어 발생한 현상이다.

그림 9는 접합압력에 따른 접합부에서의 응력분포 시뮬레이션 결과이다. 접합소재의 경도에 따른 변형률 (strain, ϵ)은 식 1과 같다 [2].

$$\epsilon = 9.78 \times 10^{-18} \text{HV}^{10} \quad (\text{식 1})$$

그림 9 (a)는 저강도 폐Al선재, 그림 9 (b)는 고강도 폐Al선재이다. 소재의 강도가 높을수록 높은 압축

력에 의해 접합이 발생되며, 높은 압축력에 의하여 기계적으로 경화는 영향부도 크다는 것을 확인할 수 있었다 [1,6,7].

M. Iordachescu 등의 보고자에 의한 응력분포 시뮬레이션에 의하면 압축력에 의하여 소재 접합부에서 material flow에 의한 변형되고 소재 중심부에 응력이 증가하여 내부에서 우선 접합되며 최종적으로 표면부가 접합된다. 또한 접합부에서 멀어질수록 응력 분포는 감소하였다. 소재의 인장강도가 낮을수록 우수한 유동성으로 인하여 접합부에서 낮은 응력분포가 발생한다.

4. 결 론

폐가공송전선 AI선재에 대한 새로운 개념의 재활용 기술, 재제조기술 (remanufacture process)의 필수적인 공정인 접합에 영향을 미치는 인자와 접합성을 조사하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 가설지역에 따라 40년 간 사용된 폐가공송전선으로부터 AI선재를 분류, 기계적으로 표면 산화물을 제거한 샘플에 대하여 접합특성을 조사하였다.
2. 폐AI선재의 접합력은 모재의 인장강도가 높을수록 충분한 유동성 (metal flow)에 원자를 이동시키기 위해서 높은 가압력이 필요하다.
3. 소재에 형성된 산화 피막의 파쇄 및 안정적인 접합을 위해서는 가압력과 접합회수 및 접합 거리의 적절한 조합이 필요하다. 고강도 소재에서는 소재의 유동성이 충분하지 않기 때문에 높은 가압력, 회수, 조합 등은 필수적이다.

4. 접합 소재의 인장강도에 무관하게 직경의 2배 (2d) 접합 간 거리에서 최대 접합력을 나타내었다.

5. 가압력에 의한 material flow로 내부에서 가장 높은 응력분포가 발생하여 우선 접합되며, 최종적으로 표면이 접합된다. 반복응력에 의하여 경화되는 영향부는 약 15 ~ 20 mm이며, 과단은 영향부와 모재 경계면에서 발생되었다.

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] The Handbook of Advanced Aluminum Technology, 983 (1997).
- [2] M. Iordachescu, D. Iordachescu, and V. Georgescu, *J. Mater. Processing Technol.*, **209**, 4255 (2009).
- [3] D. Iordachescu, V. Georgescu, and M. Iordachescu, *J. Join. Mater.*, **16**, 2 (2004).
- [4] H. Long and R. Balendra, *J. Mater. Process. Technol.*, **80**, 665 (1998).
- [5] H. Long and R. Balendra, *J. Mater. Process. Technol.*, **84**, 247 (1998).
- [6] T. Tabata, S. Masaki, and K. Azekura, *Mater. Sci. Technol.*, **5**, 377. (1989).
- [7] W. Zhang and N. Bay, *Ann. CIRP*, **45**, 215, (1996).