

폐전선 재활용 기술개발

梁政一 · 吳重煥 · 崔佑鎭 · 황선국

한국자원연구소 광물활용부

Development of Recycling Technology for Used Cables

Jung-Il Yang, Jung-Whan Oh, Woo-Zin Choi and Seon-Kook Hwang

Minerals Utilization Division, KIGAM

요 약

폐전선류 등은 재활용가치가 높기 때문에 간단한 처리방법 등이 개발되어 일부 실용화되어 있는 형편이다. 그러나 아직까지도 일정한 굵기 이하의 가는 폐전선의 효율적인 처리 또는 현재 가행되고 있는 공정중에서도 폐절연물 질중에 수반되는 미립동의 유실의 문제점 등이 있다.

따라서 본 연구는 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 기초적인 기술방안과 현재는 일정한 종류의 폐전선만을 간단한 처리방법으로 처리하고 있는 실정이지만, 앞으로는 다품종의 폐전선이 처리되어야 할 것을 감안하여 기초적인 실험실 연구를 시도하게 되었다.

톨루엔과 물의 혼합용액을 86°C 까지 가열한 후 5% 고체 비율로 0.4 mm dia. 이하의 폐전선을 넣고, 약 10분 정도 처리하면 10~15 mm 길이 정도 크기에서도 동과 PE가 분리 가능하다. 이는 현재 전식테이블 비중선별시 적용중인 1~2 mm 길이 보다 긴 상태에서 분리가 가능케 되므로 미립자 동의 유실을 적게 하고 용융시 비산 등의 문제점을 해결할 수 있다. 현재는 일정한 품종의 폐전선만을 재활용하고 있지만, 다품종 혼합폐전선은 분쇄-전식 비중선별-정전기선별 등의 혼합 방법을 적용하여야 처리가 가능할 것이며, 본 실험에서 실시한 정전기 선별기는 미립동을 재회수하기 위하여 실험하였으며, 공급 롤러의 속도가 20~50 RPM, 고압직류전압이 15~30 KV 정도가 양호한 것으로 나타나 있다.

ABSTRACT

A part of used cables, such as electric and communication cables has already been recycled by using simple processing methods. However, it has been found that the main problems in recycling of the used cables are insufficient treatment of fine stranded wires and low recovery of copper by air separation process.

It has been shown that copper can be effectively separated from the PE using a solvent treatment method. In the present study, the used communication wires having diameter of 0.4 mm are treated in the mixing solution of toluene and water at 86°C for about 10 minutes. In the solvent treatment, the copper wires recovered have 10~15 mm length, which are much longer than that of 1~2 mm length copper wires recovered by air table concentration method used in current recycling plants. The process consisting of cutting, air separation and electrostatic separation would be recommendable for the treatment of mixed cables. In this investigation, fine copper powders can also efficiently be recovered from insulation materials using electrostatic separator at the conditions of 20~50 RPM roller speed and 15~30 KV high DC power.

1. 서 론

우리나라의 경제 및 산업발전에 따라 각종 제품의 소비가 크게 증가하였고, 이에 따른 폐기물의 양도 엄청난 증가현상을 보이고 있다. 특히 우리들의 일상생활

이나 각종 산업 분야에 널리 이용하고 있는 전기 및 통신 산업 분야에서 전력선 또는 통신선의 이용은 실로 엄청난 양으로 추정되며 또한 이 분야에서 폐기되어지고 있는 전력선 또는 통신선의 양도 점차 크게 증가하고 있는 형편이다. 외국의 경우는 이러한 폐전선류의 재활용이

이미 1960년대 부터 시도되었으나, 우리나라의 경우는 최근 산업발전에 따라 일부 폐전선의 재활용을 실시하고 있는 실정이다.

실제로 폐전선으로부터 재이용할 수 있는 주요 유기 성분들로는 동, 알루미늄, 철 및 플라스틱류 등을 들 수 있었으며, 이러한 유기성분들을 재활용함으로써 자원의 효율적인 이용뿐만 아니라, 환경 보전 측면에서도 효과를 거둘 수 있을 것이다. 과거 국내 폐전선 재활용 분야에서는 폐전선을 소각함으로써 전선을 재이용하였으나, 환경적 측면에서의 문제점 등으로 인하여, 최근에는 폐전선을 절단-분리 할 수 있는 간단한 기계적 공정을 이용하고 있다. 그러나 이러한 폐전선의 재활용 공정중에서도 일정한 굵기이하의 세폐전선의 비효율적인 처리 또는 폐절연 물질중에 수반되는 미립동의 유실 및 몇가지 문제점들이 제시되었으므로 본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 방안을 얻기 위하여 기초적인 연구를 수행하게 되었다.

2. 시료 및 실험방법

2.1. 시료

앞에서 언급한 바와 같이 현재 폐전선 재활용 업체에서 폐전선을 처리하는 과정에서 동과 절연물질을 분리하기 위하여 폐전선을 너무 짧게 절단하고 여기서 회수한 동의 크기가 너무 미세하여 용동과정에서 사용하기가 불편하거나, 또는 미립의 동이 폐기되는 절연물질과 함께 폐기(약 6.68%)되는 문제점 등을 해결하기 위하여 준비한 폐전선 시료는 도체에 의한 분류로서 연선으로 분류할 수 있다. 우선 한 가닥의 동선이 PE로 피복되어 있는 단선이 다시 여러가닥으로 묶여진 통신용케이블(Fig.1)



Fig. 1. Photograph of used communication cables.

과 현재 폐전선 재활용업체의 처리공정에서 제거되는 분쇄된 지절연물질(미세한 동성분이 약간 함유된 것)을 준비하였다. 특히 폐통신용케이블의 절연물질과 동을 잘게 분쇄하지 않고 효율적으로 분리하는 방법을 연구하기 위하여 PE로 피복되어 있는 각 단선을 실험에 필요한 길이로 잘라서 이용하였다.

실험에 사용한 폐전선의 굵기는 나선 1본의 직경이 0.4 mm인 것과 0.65 mm인 것을 각각 사용하였다.

2.2. 화학적 처리

채취한 통신용케이블을 절단하고 외부피복제내에 들어 있는 수백회선되는 PE로 피복된 단선들을 필요에 따라 절단하여 실험용 시료로 준비하였다. 본 연구에서 화학적 처리라함은 각종 Toluene, Benzene, THF, Acetone 등과 같은 Solvent를 이용하여 동과 PE를 분리할 수 있는 처리방법을 말한다. 화학적 처리를 위한 공정을 다음 Fig. 2에서와 같이 우선 비이커에 일정량의 Solvent 또는 물을 채워 전기열판 위에 올려놓고, 실험하기 위한 일정량의 시료를 다시 용액속에 넣어 반응시킨 후 실험 결과를 분석하였다. 이때 Solvent가 가열반응에 의하여 증발되지만 실제로 조업시에는 증류장치를 사용하여 회수가 가능할 것으로 사료된다.

2.3. 정전기 선별처리

정전기 선별기는 보통 광물중에 전기적으로 양도체인

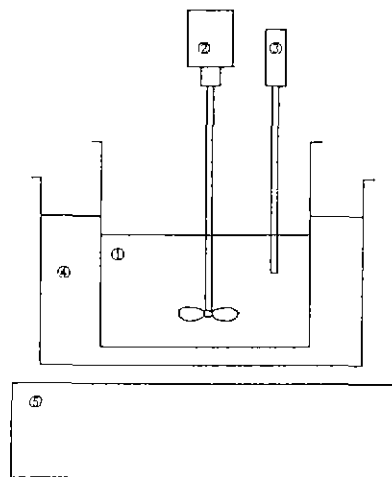


Fig. 2. Schematic representation of the solvent treatment device used in the present work.

- ① reaction vessel ② stirrer ③ thermocouple
- ④ heater

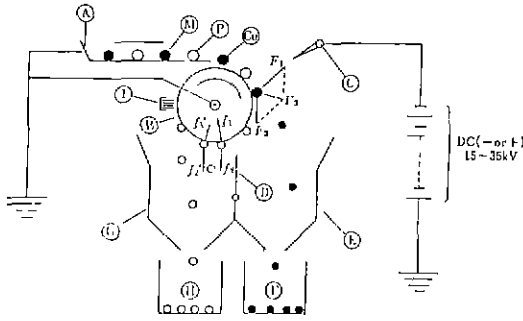


Fig. 3. Principle of electrostatic separation.

광물과 불량도체인 광물들을 분리하기 위하여 널리 이용되는 분리장치인데, 본 연구에서는 폐전선 중 전기적으로 양도체인 동과 불량도체인 절연물질을 분리하는 데 적용하였다. 일반적으로 폐전선으로부터 동 회수를 목적으로 건식처리하는 방법으로는 폐전선을 직접 연소시켜 절연물질을 태워버리고 동을 회수할 수 있는 간단한 방법이 있지만, 이때는 심한 공해문제로 금지되어 있으며, 앞에서 언급한 바도 있지만 현재 일반적으로 이용되고 있는 전식비중선별법으로는 도체 1본의 직경이 1 mm 이상 전선의 경우에는 매우 효과적이지만, 실제로 단선의 직경이 0.5 mm 이하인 경우에는 분리효과가 저조한 것으로 알려져 있다.

그러나 이러한 전식비중 선별 방법과는 달리 정전기 선별 방법이 있으며, 그 선별원리는 다음 Fig. 3에 따라 간단하게 설명할 수 있다. 먼저 폐전선을 잘게 분쇄하면 동(Cu)과 절연물질(P)이 분리되어지며, ① 이를 정전기 선별기의 Feeder에 의해 Rotor B에 일정량씩 공급한다. ② Rotor에 공급된 Cu와 P는 전극 C와 Rotor와의 사이에 형성된 정전계의 작용에 의하여 전하를 띄게 된다. ③ 양도체인 Cu는 Rotor를 통하여 방전되기 때문에 중력에 의하여 인력 F_2 와 전극의 흡인력 F_1 에 의하여 F_3 방향으로 낙하하게 되어 F에 떨어진다. ④ 한편, 절연물질 P는 Rotor의 표면에 정착되어 이동하다가 방전에 의하여 $F_2 > F_1$ 되는 순간에 P가 H에 떨어져 분리하게 된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 화학적 처리

Table 1. Temperature of toluene as a function of heating time.

Time (min.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
Temperature (°C)	47	56	62	75	83	90	96	100	104	108	109

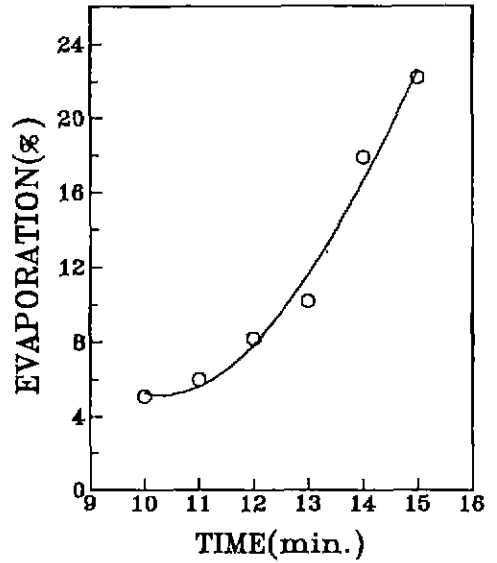


Fig. 4. Evaporation ratio of toluene as a function of heating time reaching to 110~120°C.

일정한 길이로 절단된 시료를 화학적으로 동과 PE를 분리시키기 위하여 Toluene, Benzene, THF, Acetone 등을 비교 검토하기 위하여 예비실험을 실시한 결과, Toluene이 비교적 사용하는데 유리할 것으로 판단되어 본 연구에서는 주로 Toluene을 사용하였다. 또한 Toluene을 효과적으로 사용하기 위하여 물과 혼합하거나 Toluene 단독으로도 비교 사용하였다.

먼저 Toluene 200 ml 정도를 비이커에 넣고 상온(23°C)에서부터 비등점(110~112°C)에 이르기까지 가열하여 용매의 가열시간에 따른 증발정도를 조사하여 본 결과, 다음 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에 나타난 결과에 따르면, 약 10분 가열 후 5% 정도 휘발하였고 15분 경과시 약 22.5% 정도 휘발하였고, 20분 경과시 크게 60% 정도 휘발하는 것으로 나타나 있다. 그래서 가열 시간이 증가하게 될 때 toluene 용액의 온도가 어떻게 변화하는 것을 측정된 결과 다음 Table 1과 같았다.

Table 1과 앞의 Fig. 4를 함께 비교하여 보면, 가열시간이 10분 경과하면 용매온도가 108°C 정도로 되어 거의 비등점에 가깝게 되고 이때 용매 휘발은 약 5%정도

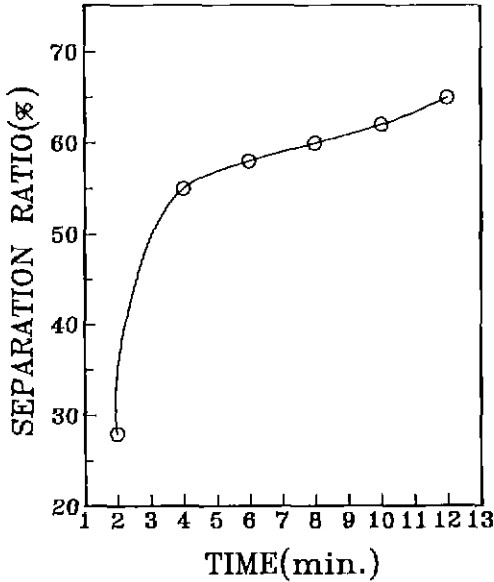


Fig. 5. Effect of solvent treatment time on copper separation efficiency.

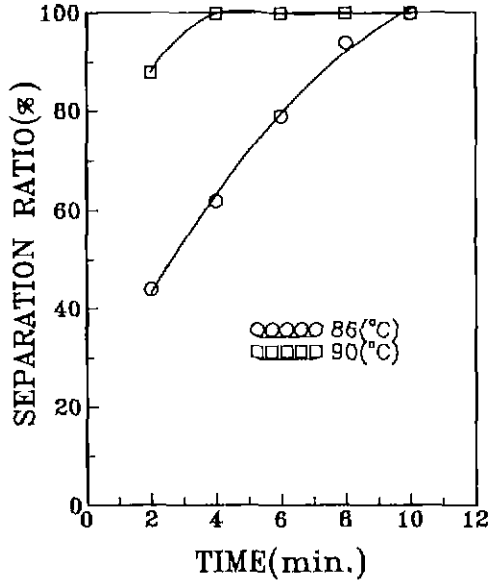


Fig. 6. Effect of contact time on copper separation efficiency in toluene at 86°C and 90°C.

였으며, 이시간 이후부터는 크게 온도가 비등점에 접근되어 급격한 증발이 일어나는 현상을 볼 수 있다.

Toluene 용매를 사용할 경우 온도 변화에 따라 동과 절연물질의 분리효과를 알아보려고 Toluene 200 ml를 비이커에 준비하고, 준비된 0.65 mm dia.의 폐전선을 1 cm씩 절단한 시료를 각각 5% Solid 되게 투입하고 교반기의 교반속도를 700 rpm되게 교반하면서 가열시간을 2, 4, 6, 8, 10, 12분씩 각각 주어 처리한 후, 동과 절연물질의 분리효과를 다음 Fig. 5에 나타내었다. 이때 온도변화는 Table 1과 같은 방법으로 조절하였다.

Fig. 5에서 동이 분리효과를 보면 Toluene의 온도가 82°C 정도 조건에서는 처리시간을 증가시켜도 동과 PE와의 분리효과가 비교적 낮은 상태였으므로, 실험조건은 Fig. 5의 경우와 똑같이 하고 단지 Toluene 가열온도를 86°C와 90°C 조건에서 각각 실험한 결과를 다음 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6의 실험결과를 보면 Toluene의 온도를 82°C 보다 높게 86°C 또는 90°C로 각각 고정하고 처리시간을 증가시킨 결과, 동과 절연물질의 분리효과가 크게 향상되었다. 더우기 Toluene의 온도를 90°C까지 증가시켰을 때 처리시간은 4분 이내에 동이 절연물질로부터 완전히 분리되었지만, 이 때 절연물질인 PE가 용해된 상태였으며, 일부 용해된 PE가 동을 회수할 때 약간씩 재피복하는 현상을 나타내었으며, 실제로 절연물질이 용해

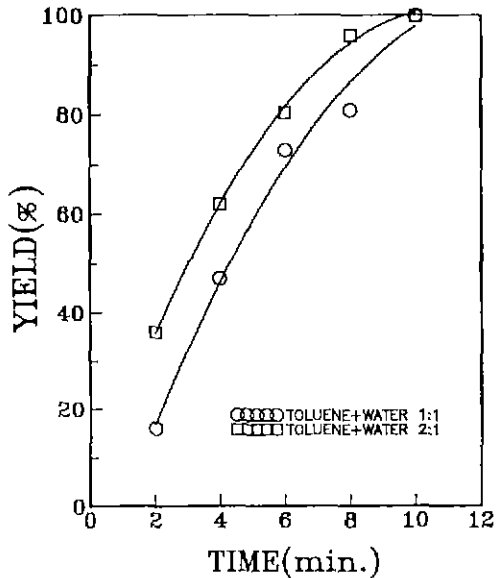


Fig. 7. Effect of mixing ratio of toluene to water on copper separation efficiency at 86°C.

되지 않고 동으로부터 분리되는 경계점을 찾기가 어려웠다.

따라서 본 연구에서는 Toluene의 온도를 86°C 전후 되게 고정하고 절연물질인 PE가 거의 용해되지 않게

Table 2. Effect of solid-liquid ratio on copper separation efficiency in toluene solvent at 86°C.

Solid-Liquid Ratio(% solid)	5	7.5	10
Separation efficiency(%)	56	52	51

Table 3. Effect of cutting length of used cables on copper separation efficiency in toluene solution at 86°C.

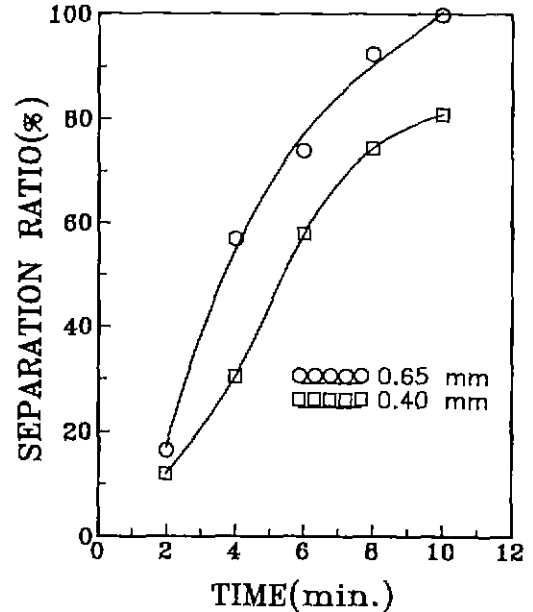
Cutting length(mm)	5	10	20	30
Separation efficiency(%)	85	50	53	49

하기 위하여 Toluene과 물을 혼합하여 실험하였다. Toluene을 물과 1:1의 비율로 혼합하고 용액의 온도를 86°C 되게 가열하여 준비된 폐전선 시료(0.65 mm dia. 10 mm L)를 5% Solid되게 한 후 처리시간을 변경하여 가면서 동을 분리효과를 검토한 결과를 다음 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7의 실험결과를 보면 앞에서 Toluene만 가지고 동을 분리한 결과와 거의 일치하는 결과를 볼 수 있다. 특히, Toluene을 물과 1:1의 비율로 혼합하여 가열하면 용액의 온도를 86°C 전후되게 유지하기가 용이하며, 또한 절연물질(PE)이 용액내에서 쉽게 용해되지 않았음을 주목할 수 있다. 또한 Toluene과 물의 혼합비율을 2:1로 하여 동의 분리효과를 비교한 결과 1:1의 혼합조건 보다는 크게 향상되는 경향을 나타나지 않았으므로, 용매의 혼합비율은 Toluene과 물을 1:1의 비율로 혼합토록 하였다.

지금까지는 폐전선시료를 용액에 넣었을때 고체-액체의 비율을 5% Solid 조건에서 조사하였으나, 고체-액체의 비율 변화가 동의 분리효과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 고체-액체의 비율을 5% Solid, 7.5% Solid, 10% Solid 되게 각각 준비하되 용액의 가열온도를 86°C 정도로 한 후 시료를 투입하고 4분간 처리하여 각 시료의 동과 절연물질의 분리 효과를 검토하여 다음 Table 2에 나타내었으며, 이때 실험한 조건에서의 동의 분리효과 경향을 보면 고체-액체 비율이 증가함에 따라 동의 분리효과가 차츰 저하하는 경향이었으므로 실험은 5% Solid 조건에서 실험하였다.

폐전선 시료의 길이의 변화에 따른 동과 절연물질의 분리효과를 조사하기 위하여 Toluene과 물을 1:1의 비율로 혼합한 용액에 고체농도를 5% Solid로 하고 용액의 교반속도를 700 RPM으로 하며, 용액의 온도가 86°C 된 후에 0.65 mm dia. 폐전선 시료의 길이를 5 mm, 10 mm, 15 mm 되게 각각 절단한 3종류의 시료를 각각

**Fig. 8.** Effect of diameter of used cables on copper separation efficiency in toluene solution.

투입하여 4분간 처리한 후 꺼내어 동의 분리효과를 조사하였고 그 결과는 다음 Table 3과 같았다. Table 3의 결과에 따르면 분리하고자 하는 폐전선의 길이가 짧아 질수록 분리효과는 크게 증가함을 알 수 있었다.

지금까지 실험한 폐전선 시료의 직경은 0.65 mm dia. 정도였으나, 이와 비교하기 위하여 0.4 mm dia.의 폐전선 시료를 10 mm 길이로 절단하여 일정한 시료를 준비하고, 이를 1:1 비율의 Toluene과 물을 혼합한 용액을 가열하여 86°C 되게 한 후, 여기에 준비한 시료를 5% Solid 되게 용액에 넣고 교반기의 교반속도를 700 RPM으로 하여 처리한 후 동의 분리효과를 비교 조사하여 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8의 결과에 따르면 처리하고자 하는 폐전선의 직경이 가늘어 질수록 분리효과가 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 이때 동의 분리효과를 향상시키기 위하여는 처리시간을 증가시키면 가능한 것이므로 큰 문제가 없을 것으로 본다.

3.2. 건식정전기 선별처리

건식정전기 선별실험을 위하여 준비한 폐통신 케이블을 1, 2, 5, 10, 15 mm L 되게 각각 절단하여 각각 시료로 준비하고 이를 앞의 화학적 처리방법으로 동과 절연물질을 각각 완전하게 분리시킨 것을 정전기 선별실험용

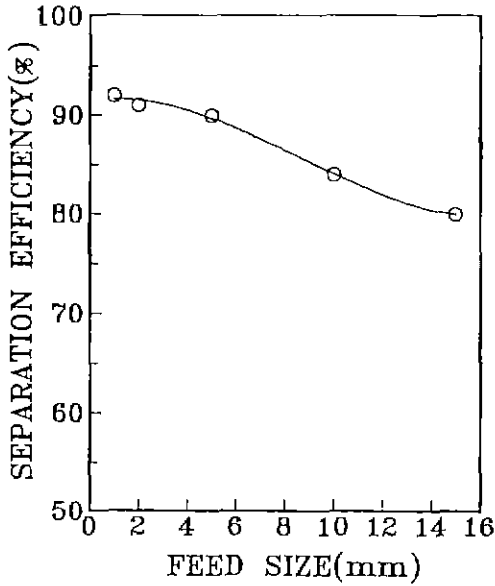


Fig. 9. Effect of feed size of used cables on the electrostatic separation of copper from the chemically treated used-cable.

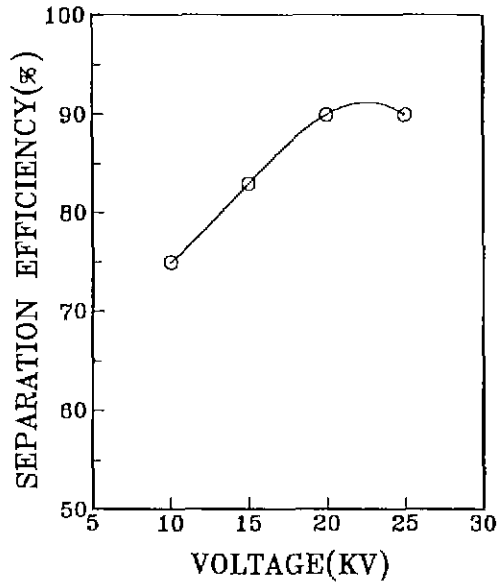


Fig. 11 Effect of applied voltage on copper separation efficiency in electrostatic separation.

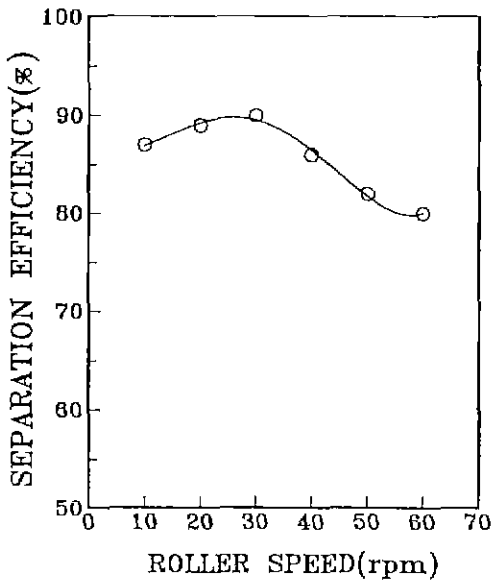


Fig. 10 Effect of roller speed on copper separation efficiency the electrostatic separation of copper from the chemically treated used-cable.

시료로 준비하였다. 시료의 크기의 변화에 따라 동과 철연물질의 분리효과를 조사하기 위하여 급광 Roller의 회전속도를 30 RPM, 교류전압 15 KV, 직류전압 20 KV,

Table 4. Effect of number of treatment stages on copper separation efficiency in electrostatic separation tests.

Number of Electrostatic separation (times)	1	2	3
Separation efficiency (%)	88	90	91

분리회수 1회로 고정하여 각각 실험한 결과는 다음 Fig. 9 와 같다.

시료입도가 작아질수록 분리효과가 약간씩 증가하지만 실제로 시료입도를 작게 할수록 처리비용 및 미립의 동유실율이 증가될 것으로 보아 시료입도는 5 mm L 정도로 하였다. 정전기 선별기의 급광 Roller 속도의 변화에 따라 동과 철연물질의 분리효과를 검토하기 위하여 Roller의 속도를 10, 20, 30, 40, 50, 60 RPM으로 각각 변경하여 가면서 다른 실험조건은 앞의 경우와 같게 하고 실험한 결과, 분리효과는 Fig. 10과 같았다.

실험실용 정전기 선별기의 Roller 속도는 30 RPM 정도면 비교적 양호한 등의 분리효과를 얻을 수 있었다. 또한 정전기 선별기의 정전효과를 만들어 주는 고압직류 전압의 변경에 따른 등의 분리효과를 검토하고자 시료 입도 5 mm, Roller 속도 30 rpm, 교류전압 15 KV, 처리 회수 1회의 실험조건으로 실험한 결과는 다음 Fig. 11과 같다.

앞에서도 언급한 바와 같이 현장 전식테이블 비중선 별공정에서 폐기되는 지절연물질 중에 소량의 동선분이 함유되어 폐기되고 있는 것을 재처리하여 미립의 동성분을 회수하고자 준비된 시료를 가지고 전식정전기 선별실험을 시도하였다.

실험조건은 앞의 실험조건과 동일하게 하였으며, 시료의 준비는 먼저 전식사분(16 mesh)하여 조립의 지절연물질을 제거하고 나머지 세립의 지절연물질 및 동성분이 함유된 시료로 하였으며, 실험결과는 다음 Table 4와 같았다.

4. 결 론

현재 국내업체에서는 통신용 폐전선을 처리함에 있어 0.4 mm dia. 이하의 세선을 전식비중 선별함에 있어 회수율이 저하될 뿐만 아니라, 용동시 비산될 문제가 우려되고, 전식비중선별시 테이블링으로 폐기되는 절연물질 속에는 아직까지도 미립자 동이 유실되는 문제점과 통신용케이블의 외피중 PVC, 알루미늄 및 철의 효율적인 분리제거의 문제점이 있어 본 연구에서는 이를 검토하기 위하여 toluene을 사용한 분리 실험을 하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 0.4 mm dia. 이하의 세 폐전선을 전식처리할 경우는 1~2 mm 길이 정도로 잘게 절단하여야 하며, 이때 동 회수율도 저하될 뿐만 아니라 용동시 문제점을 야기시킬 수 있어서, 이를 해결하기 위하여 톨루엔, 벤젠, THF 등 각종 용매를 이용한 화학처리를 한 결과 용매는 물과 톨루엔을 1:1의 비율로 혼합하여 86°C 까지 가열한 후 폐전선을 10~15 mm 길이 정도로 절단하여 5% Solid 상태에서 교반(700 RPM)하여 약 10분 정도 처리하면 동과 절연물질이

양호하게 분리 가능하다.

2. 현재 일반적으로 폐전선을 분쇄-전식비중 선별하는 공정을 활용하고 있으나, 앞으로 처리방법이 대형화되고 재활용 대상 폐전선의 종류가 복잡해지는 경우에는 절단-전식비중선별-정전기선별 등의 복합 처리 공정이 요구될 것으로 보아, 본 연구에서도 폐전선의 정전선별처리를 한 결과, 동과 절연물질의 분리효과는 처리 대상물질의 입도크기, 정전선별기의 Roll 속도, 정전선별시 고압교류전압, 고압직류전압의 변화에 큰 영향을 받으며, 실험결과로 보아 정전기 선별기 Roller 속도는 20~50 RPM. 고압직류전압은 15~30 KV 정도가 양호한 것으로 나타나 있다.

參考文獻

1. Min-Shing Tsai, Huahn-Shiou Tsai, "Separation and Recovery of Metals from Insulated Cables and Wires", The Second International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology, pp.34-45, 1993.
2. J. Marcher, "Separation and Recycling of Wire and Cable Scrap in the Cable Industry", Wire Journal International, pp.106-114, 1984.
3. J.F. Sullivan, "Recycling Scrap Wire and Cable; the State of the Art", Wire Journal International, pp.36-50, 1985.
4. E. Scalco and *et. al.*, "Recycling of PVC from Cable and Wire Scrap", Proc. of the Int. Wire and Cable Symp, pp.96-104, 1979.
5. J.E. Lawver, "General Principles and Types of Electrostatic Separators", SME Mineral Processing Handbook, pp.6-10, 1985.