

## 와이어 인발용 건식 윤활제의 재생기술 개발 및 평가

김선호<sup>#</sup>, 장규철<sup>\*</sup>, Chi-Wook Lee<sup>\*\*</sup>

(<sup>#</sup> 동의대학교, <sup>\*</sup> Reen tech, <sup>\*\*</sup> 퍼시픽대학교)

### Development and Evaluation of Dry Lubricant Recycle Technologies for Wire Drawing Process

Sun-Ho Kim<sup>#</sup>, Gyu-Chul Jang<sup>\*</sup>, Chi-Wook Lee<sup>\*\*</sup>

(Received 19 November 2013; received in revised form 15 January 2014; accepted 16 March 2014)

#### ABSTRACT

Wire drawing is a plastic deformation process that produces a wire with a desired diameter by pulling the end of the wire through a die. During the cold wire drawing process, the temperature between the wire and the die bearing is increased. This temperature increase causes energy consumption increase, bad wire quality, and decreased die life. To reduce friction and avoid high temperature between the wire and the die in the cold wire drawing process, a dry lubricant with soap particles is used. It is not possible to reuse the lubricant once iron oxide is attached to the soap particles at high pressure die. In this study, recycling technologies for wasted soap particles with processes of crushing, separation, and screening are developed. From the evaluation, the recycling efficiency was found to be 86.97%.

**Key Words :** Recycle(재생), Dry Lubricant(건식 윤활제), Soap Particle(소프입자), Wire Drawing(와이어 인발)

#### 1. 서 론

다이(dies)를 통과시킨 와이어의 끝단을 잡아당기는 방법으로 원하는 직경의 와이어를 생산하는 소성가공법을 와이어 인발(wire drawing)이라고 한다. 소재가 인발 다이의 베어링(bearing)을 통과하면서 마찰력에 의해 고열이 발생하게 되는데, 이는 와

이어의 품질 저하, 다이의 수명 단축 그리고 에너지의 과다소비 원인이 된다.<sup>[1]</sup> 생산성을 높이기 위해 인발속도를 높이면 재료표면의 결함 빈도가 높아진다. 이러한 마찰력을 줄여 주기 위해 윤활제가 사용된다. 윤활제가 사용되면 가공부하를 감소시켜 가공한도를 높일 수 있고, 가공면의 상태를 향상시킬 수 있다. 또한, 다이의 마멸을 줄일 수 있고 냉각작용을 통해 재료의 변화를 감소시킬 수 있다. 특히, 와이어 인발가공에서는 다이와 재료의 상대 미끄럼 속도가 빠르기 때문에 윤활의 중요성은 더욱 크다. 윤활제는 습식과 건식이 있는데, 인발과정에서는 일반적으로 건식이 사용된다. 건식 윤활제를 구성하는 윤활입자를 소프입자(soap particle)

<sup>#</sup> Corresponding Author :

Dept. Mechatronics Engineering, Dong-Eui University  
E-mail : sunhokim@deu.ac.kr

<sup>\*</sup> Reen Tech. Ltd.

<sup>\*\*</sup> Dept. of Mechanical Engineering, University of the Pacific, U.S.A.

라고 하는데, 고압의 다이로 통과한 소프입자에는 자기성분 오염산화물이 부착되어 폐윤활제가 된다.

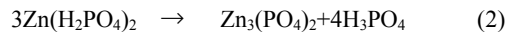
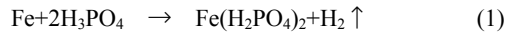
본 연구에서는 덩어리화 된 소프입자를 적당한 크기로 만드는 파쇄공정, 마그네틱을 이용한 철분의 분리공정 그리고 원하는 크기로 분류하는 선별공정을 통해 폐윤활제를 재생하고자 했다.

## 2. 와이어 인발공정

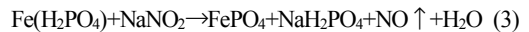
와이어 인발공정에서 윤활은 인발하려는 와이어 소재, 직경과 용도, 후가공의 여부에 따라 Fig.1과 같이 건식, 습식, 유성 등 3개의 방법이 이용된다. 일반적으로 와이어 인발가공에서는 탈청(산화피막의 제거)과 전처리 공정은 연속으로 두는 경우가 많다. 탈청은 보통 산세법이 이용되며 수세로 탈산하고, 중화와 방청을 겸해 전처리제를 도포 또는 화학적으로 부착시킨다. 전처리제는 주로 철, 강, 스테인리스강 등에 도포하며 석회비누, 인산염, 붕사, 수지피막 그리고 금속도금 등이 사용된다. 석회비누는 중화능력, 방청효과가 있고 저렴하지만 작업환경이 좋지 않게 된다. 인산염은 윤활성, 방청성, 2차 가공성 등이 우수하지만 도금선에는 부적합하다. 붕사는 저가격이고 작업도 간단 하지만 건조 후의 흡습성이 문제가 된다. 수지피막은 처리가 간단하고 윤활성도 좋지만 용제를 사용하므로 작업환경이 좋지 않게 된다. 금속도금은 윤활성은 매우 좋지만 설비, 작업에 문제가 있고 고가이다. 이러한 전처리제는 그 자체가 윤활제로도 작용을 하므로 넓은 의미의 와이어 인발용 윤활제로 생각할 수 있다. 또한 전처리제는 다음 공정인 와이어 인발공정에 그대로 인계되므로 와이어 인발공정에서는 와이어 인발 윤활제와 혼합되게 된다. 따라서 전처리 공정은 단순히 탈청을 위한 것이 아니고 다음 공정의 윤활성을 크게 좌우하게 된다. 그렇기 때문에 사용하고자 하는 윤활제는 전처리

공정을 고려해야 한다.

본 연구에서는 전처리제로서는 인산염을 그리고 윤활제로는 건식 윤활제를 사용했다. 전처리에서 인산처리액의 성분은 제일인산아연이 주성분이며 여기에 인산과 피막 조정제가 배합된다. 이는 결정의 촉진작용과 제이철로 산화시키는 작용을 겸한 촉진제를 병용된다. 인산처리액과 와이어와의 반응식은 아래와 같다.



먼저 (1)식의 반응이 일어나고 인산이 감소하면 (2)식이 진행되어 물에 불용성인 제삼인산아연의 결정이 성장하여 피막으로 된다. 액 중에 용해된 제일인산철은 촉진제에 의하여 제삼인산철로 되어 슬러지 형태로 가라앉는다.



실제 피막처리 시 매우 복잡한 피막성분이 생성되는데, 이는  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 와  $\text{Zn}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 의 혼합물이다. 인산염 피막의 성질은 연하고 전연성이 풍부하며 형태가 침상결정이기 때문에 윤활제를 운반하는 작용이 우수하다.

건식 윤활제는 기름 형태인 기계, 절삭가공, 기타 소성가공 등에 사용되는 윤활제와는 상이한 특징을 갖는다. 형태는 분말로서 물이나 기름과 혼합하지 않고 직접 분말로서 윤활면에 공급한다. 따라서 윤활제로서의 냉각효과가 없기 때문에 냉각은 다른 기계적인 방법으로 해결해야 된다. 건식 윤활제가 구비해야 할 성질은 분말상으로 높은 융점을 갖고 다이 안에서 용융하지 않아야 하고, 와이어와 다이의 접촉면에서는 용융하여 유체가 되고 점성과 전착성(展着性)이 커야 하고, 극성이 있고 가공 시에 선재표면에 흡착되는 성질을 가져야 하고 내열성이 좋아야 한다. 분말의 입자는 보통 10~300 메시(mesh) 정도로 입도분포가 균일해야 하고, 수분의 함량이 1~2%로서 윤활제의 성능저하가 없어야 한다.

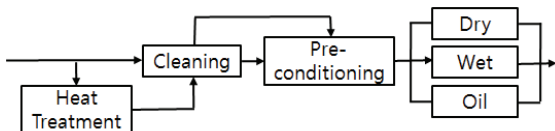


Fig. 1 Wire drawing process

## 2. 윤활제의 노화 프로세스

와이어의 직경이 급격히 변형되면서 가공이 이루어지는 인발작업에서 와이어와 인발 다이의 접촉면에서는 가혹한 조건의 압축, 마찰상태가 유지되기 때문에 많은 열이 발생하게 된다. 그리고 다이에 비해 상대적으로 연질인 와이어 표면에는 스크래치 등의 표면 결함이 발생하게 된다. 이때 발생하는 마찰력을 감소시키기 위해 와이어와 다이의 표면 경계면에 윤활제를 공급하게 된다. 와이어와 다이 표면 사이의 마찰상태는 유체윤활(fluid lubrication)과 경계윤활(boundary lubrication)의 두 형태로 구분된다. 유체윤활은 상대 운동을 하는 두 개의 고체 표면 사이에 충분한 양의 오일이 존재할 때 금속면이 완전히 분리되는 경우를 말한다. 마찰계수는 윤활유의 점도, 마찰면 사이의 상대 속도 및 면적에 비례한다. 유체윤활은 마찰계수가 0.0001~0.01 정도가 되는 이상적인 마찰상태이지만 와이어와 다이 표면의 마찰상태는 두 접촉면에 부여되는 높은 압력에 의하여 유체윤활 상태가 깨져 유체윤활과 무윤활 상태가 혼재하는 경계윤활 상태가 된다. 경계윤활은 윤활유의 후막 두께가 수 분자에서 수십 분자의 층인 윤활 조건에서 금속 표면에 미시적인 융착이 생겨 유체막, 경계막, 금속 접촉부가 혼재하여 하중을 분담하게 되는 상태이다. 이 상태에서는 경계층이 파괴되어 부분적으로 고체 간의 접촉이 일어나므로 마모가 늘고 늘어붙을 위험도 있다. 완전한 유체윤활 상태는 실현 곤란하며 부분적으로는 경계윤활 상태로 되는 것이 일반적이다. 경계윤활에서는 마찰계수가 0.1~0.3 정도이다. 상기 두 가지의 윤활상태가 공존하는 경우를 혼합윤활이라고 하는데 마찰계수는 0.005~0.1 정도가 된다. 와이어 인발가공은 경계윤활과 부분적인 유체윤활이 혼재하는 형태가 된다. 이러한 혼합윤활에서는 건식 윤활제가 효과적으로 적용 가능하다.

다이에 공급된 건식 윤활제는 와이어가 인발 다이를 통과하는 과정에서 높은 마찰열(200~600℃)에 의해 건식 윤활제의 소프입자가 탄화작용이 일어나고, 다이의 베어링을 통과하는 과정에서 표면 마찰력에 의해 철분입자가 소프입자에 점착됨으로서 윤활제로서의 기능을 잃어버리게 된다. 이러한 원리를 Fig.2에 나타내었다.

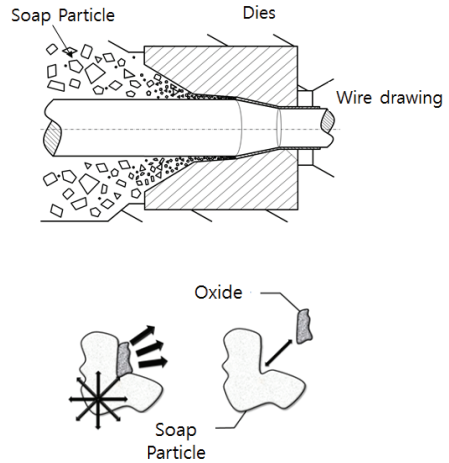


Fig. 2 Wasted process of soap particle

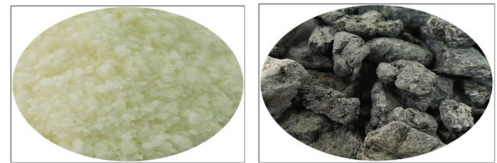


Fig. 3 New and wasted soap particle

Fig. 3은 정상적인 것과 노화된 소프입자를 보여준다. 노화된 소프입자는 탄화작용에 의해 색이 검게 변하며 표면에는 철분이 점착된 형태를 갖는다. 이러한 소프입자는 윤활기능이 떨어져 폐기되는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서 제시하는 바와 같은 적절한 공정을 거치면 정상제품에 근접한 성능을 갖는 제품으로 재생이 가능하다.

## 3. 재생 공정

지금까지 보편적으로 사용되어 오는 재생법으로는 폐윤활제를 정상 윤활제와 혼합하면서 열을 가하여 철분을 제거하는 자기 스크린법이 사용되는데 이 방법은 가열과정에서 윤활특성이 변하는 단점이 있다.

본 연구에서는 폐윤활제에 포함된 산화철을 분리시키는 방법으로 화학적 방법이 아닌 물리적 방

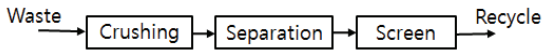


Fig. 4 Recycle process

법을 적용했다. 산화철로 오염된 소프입자에서 물리적으로 산화철을 제거하면 순수 윤활제만 남게 된다. 또한, 윤활제가 탄화되면서 발생한 탄화물도 강한 자성을 가지지 때문에 탄화물도 동일한 방법으로 제거가 가능하다. 물리적 공정은 사용하면서 덩어리화 된 소프입자를 적당한 크기로 만드는 파쇄공정(crushing process), 마그네틱을 이용한 철분의 분리공정(separation process) 그리고 원하는 크기로 분류하는 선별공정(screen process)으로 이루어진다. 이를 Fig. 4에 나타내었다.

일반적으로 사용되는 파쇄기에서 파쇄기구로는 커터 또는 스크류가 사용된다. 커터는 반경방향으로 원심력이 작용하여 균질한 파쇄가 어렵고 커터의 폭에 따라 대상물의 파쇄 크기가 결정되므로 커터의 폭을 좁게 하여야만 파쇄 효율을 높일 수 있다는 문제점이 있다. 커터의 폭을 얇게 가공하는 경우 커터의 강도가 현저히 떨어짐은 물론 가공에도 어려움이 있다. 스크류를 사용하는 경우에는 맞물리는 나사의 정밀도와 스크류의 길이가 파쇄 능력에 영향을 주게 된다. 또한, 스크류를 이동하는 과정에서 폐윤활제가 덩어리화 될 가능성도 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 고려하여 기어방식의 파쇄기구를 적용했다. 이 방식은 맞물리는 두 개의 기어에 의해 파쇄가 이루어지고 파쇄된 폐윤활제는 하단으로 자유낙하하기 때문에 구성이 매우 간단한 장점을 가진다.

파쇄된 입자는 자기성분 산화물입자를 분리해야 하는데 본 연구에서는 마그네틱 분리를 개발 적용하였다. 자성분리에서 자성발생의 기본적인 원리는 균일한 자장 내에 곡률반경이 작은 자성매체(matrix)를 삽입하여 자성입자가 자성매체에 흡입 되도록 한 것이다. 자성입자에 작용하는 자력  $F_m$ 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$F_m \propto V \cdot a \cdot H \cdot (dH/dX) \quad (4)$$

여기서  $V$ 는 자성입자의 체적,  $a$ 는 자성입자의

자화율,  $H$ 는 자장의 세기,  $(dH/dX)$ 는 자장의 변화율을 나타낸다. 일정한 체적과 자화율을 갖는 자성입자를 유체 중에서 자성분리 효율을 높이기 위해서는 자장의 세기와 자장 변화율의 곱이 되도록 해야 한다. 자성분리기에서 자성입자에 작용하는 외력으로는 자력 외에 중력  $F_g$ 과 유체의 항력  $F_D$ 를 들 수 있다. 다음 식에서 보는 바와 같이 이들로 형성되는 반대되는 비자성 힘들의 합, 즉  $F_g + F_D$ 보다 자력  $F_m$ 이 커야만 자성입자가 포집이 가능하다.

$$F_m > F_g + F_D \quad (5)$$

본 연구에서는 외경이 80mm인 봉의 내부 외측으로 직경 12mm인 영구자석 8개가 설치하여 40,000 가우스의 자력을 가지도록 설계했다.

파쇄된 입자로부터 자기성분 산화물입자를 분리한 후에는 입도에 따라 입자를 분리해야 한다. 본 연구에서는 입도를 분리하기 위한 방법으로 축방향으로 메쉬의 크기가 달리하는 메쉬 필터를 제작하여 적용했다.

입자를 선별하는 스크린 방법으로 회전 스크린과 진동 스크린의 두 가지로 대별되는데 회전 스크린은 트롬멜 스크린(trommel screen)이 대표적이



Fig. 5 Crusher with gear sets

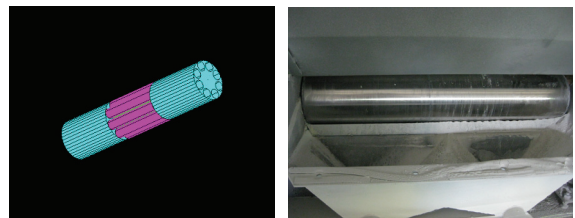


Fig. 6 Magnetic separation

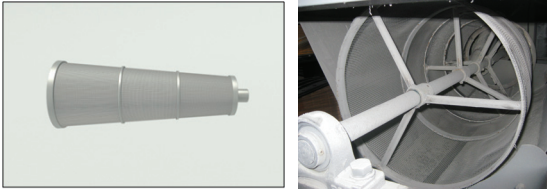


Fig. 7 Screen with 10~300 mesh

다. 트롬멜 스크린은 스크린 중에서 선별효율이 가장 좋고 유지관리가 용이하다. 트롬멜 스크린의 선별효율에 영향을 주는 인자로는 체의 크기, 직경 그리고 회전속도이다. 체가 길면 효율이 상승하지만 동력소모가 많다. 경사도가 크면 효율이 떨어지지만 부하가 크면 경사도가 높아져야 한다. 2~3도가 적합하다. 회전속도가 높아지면 어느 정도까지는 선별효율이 증가하지만 어느 이상이 되면 원심력  $F_c$ 에 의해 막힘 현상이 일어나는데 이 속도를 임계속도라고 한다.  $W_1 = F_c$  일 때의 회전속도가 임계속도가 되고,  $W_1$ 이  $F_c$  보다 클 때 입자가 벽에 붙지 않고 떨어지게 된다.<sup>[3]</sup>

$$W_1 = W \cdot \cos\alpha \quad (6)$$

$$F_c = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (7)$$

여기서  $W$ 는 하중,  $\alpha$ 는 경사각,  $m$ 는 입자의 질량,  $r$ 는 체의 반경 그리고  $\omega$ 는 각속도가 된다.

회전하는 메쉬 필터로 들어간 입자는 크기가 작은 것부터 큰 것 순서를 자유낙하하게 된다. 메쉬 필터는 스테인레스 재질의 박판에 10~300 메쉬가 되도록 가공을 한 후 원형으로 조립을 했다. 일반적으로 사용되는 속도는 임계속도의 45%로 결정한다. 본 연구에서는 50 rpm을 적용했다.

#### 4. 결과분석 및 고찰

Fig. 8은 사용하기 전의 소프입자와 재생 후의 소프입자를 보여 준다. 사용된 시료는 독일 Traxit International사의 SL2050 소프입자이다. 건식 윤활제의 소프입자 성분은 융점이 높은 고급 포화 지방산의 알칼리와 금속염(Na)으로 이루어진다.

Fig. 9는 사용 후의 소프입자 성분분석 결과를 보여 준다. 성분분석 결과 C 75.24%, O 13.59%, Na 1.47%로서 Na 함유율이 낮아졌음을 보여 준다. Fig. 10은 재생 후의 소프입자 성분분석 결과를 보여 준다. 성분분석 결과 C 76.15%, O 14.80%, Na 9.05%로서 Na 함유율이 복원됐음을 보여 준다.

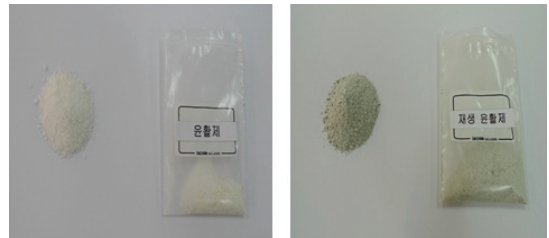
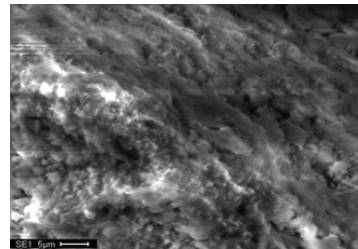
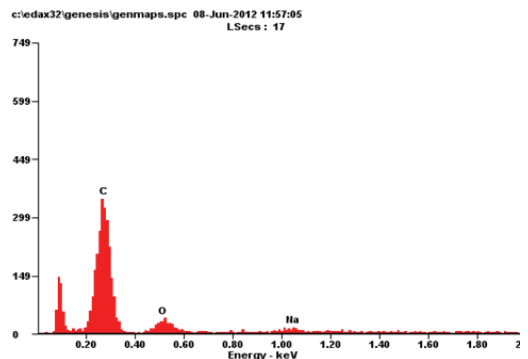


Fig. 8 New and recycled soap particle

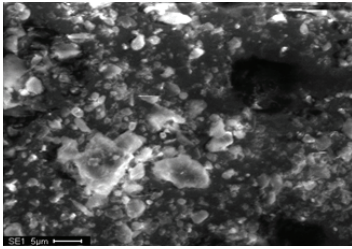


(a)

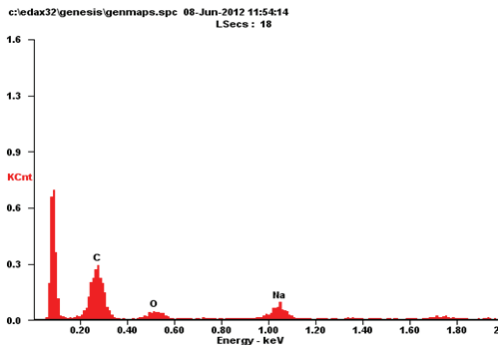


(b)

Fig. 9 Microscope picture for wasted soap particle (a) and result for ingredient analysis (b)



(a)



(b)

**Fig. 10** Microscope picture for recycled soap particle (a) and result for ingredient analysis (b)

제안한 기술을 적용해 폐윤활제를 재생하고 그 성능을 소프입자 복원율, 재생율 그리고 철분 함유량 측면에서 평가했다. 소프입자 복원율 측면에서는 정상 소프입자 대비 85.45%로 평가됐으며, 재생률은 폐윤활제 85.52kg을 재생했을 때 74.38kg이 재생되어 86.97%의 재생률로 평가되었다. 다음으로는 EPA 3050B, 6010C : 2002(ICP) 기준으로 철분 함유량을 분석했다. 사용 전 윤활제의 소프입자는 철분 함유량이 1kg 당 190mg 였으며 사용 후 폐윤활제는 1kg 당 2.4g으로 증가했다. 재생한 후의 철분함유량은 1kg 당 368g으로 분석되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 와이어 인발공정에 사용된 윤활제가 노화되어 폐기되는 상태에 이른 덩어리화 된

소프입자를 대상으로 적당한 크기로 만드는 파쇄 공정, 마그네틱을 이용한 철분의 분리공정 그리고 원하는 크기로 분류하는 선별공정을 통해 폐윤활제를 재생하고자 했다. 제안한 기술은 소프입자 복원율, 재생율 그리고 철분 함유량 측면에서 평가했는데, 복원율은 85.45%, 재생률은 86.97% 그리고 철분 제거율은 84.7%로 나타났다.

## 후 기

“이 논문은 2012학년도 동의대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음”

## 참고문헌

1. Moon, C. S., Kim, N., "Study on dimensional change in wire product during wire-drawing process," Journal of KSME, Vol. 36, pp.723-730, 2012.
2. Kim, K. H., Park, J. H., "Development of a Simulation Model for Separation Analysis and Design of Star Screen in Construction Wastes Recycling," Journal of SAREK, Vol 22., pp.213-218, 2010.
3. Chun, G. H., Lee, Y. S., "Screening efficiency of municipal solid waste by trammel using screen clogging prevention system," Proceeding of KORA, 2011 Fall Conference, pp.272-174, 2011.