

폐기물 자원회수용 트롬멜 스크린 설계기술



최 갑 석(KIMM 환경기계기술연구부)

- '64 - '72 한양대학교 기계공학과(학사)
- '78 - '80 인하대학교 기계공학과(석사)
- '81 - '87 충남대학교 기계공학과(박사)
- '72 - '74 인천제철(주) 사원
- '74 - '76 한국과학기술연구소 연구원
- '76 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서 언

Trommel Screen은 Rotary Screening, 단순히 Trommel 등으로 알려져 왔으며, 원래 광산에서 선광(Minerals Processing)을 위한 목적으로 4세기 이상 사용되어 온 것으로 알려지고 있으며, 미국에서는 1920년대부터 도시폐기물(MSW: Municipal Solid Waste)에서 자원의 회수(Resource Recovery)를 목적으로 폐기물로부터 자원의 분리 방법(Separation Method)으로 사용이 시도 되었으며, 근래에 들어와 폐기물의 자원화 인식이 높게 인식되면서 이 분야에 맞도록 트롬멜을 개발해 오고 있다.

국내에서는 일부를 외국에서 수입하여 사용, 개량 사용해 오고 있으며, 국내 폐기물의 특성에 맞게 아이디어를 내어 중소기업 위주로 신기술 등록을 하고 있는 중이다. 특히 위생 매립 폐기물이나 비위생 매립 폐기물의 경우, 최근까지 매립된 폐기물의 악영향과 도시 확장에 따른 매립지의 정비 필요성이 매우 높아지고 있어, 국내 지방 자치체에서도 년차적인 계획수립에 의한 매립지 정비를 추진하고 있다.

이러한 매립지 폐기물을 처리하기 위해서는 매립 폐기물을 굴착하여 토사를 일차적으로 분리하고 가연성과 불연성 물질을 이차적으로 분리하는 기술이 주로 이용되고 있는데, 일차적으로 토사를 분리하는 장치로서 트롬멜 장치를 활용하고 있다. 광산에서 선광을 목적으로 하는 경우의 대상 물질의 특성과 매립 폐기물을 대상으

로 하는 경우의 트롬멜의 분리 특성은 많은 차이를 나타낸다.

대상물질에 포함된 성분과 크기에 의해서도 성능의 차이가 나타나기 마련이나 그 중에서도 수분의 함량에 따라 분리 특성이 많은 차이를 나타내고, 트롬멜 원통 주위에 있는 많은 구멍을 토사들이 통과 하면서 막아 버림으로써 분리 성능이 떨어지고 한편으로는 작업을 중단하여야 하기 때문에 작업성이 현저하게 떨어지게 된다.

지금까지 폐기물의 분리 목적으로 사용하고 있는 트롬멜 장치는 폐기물의 성상이 복잡하고 여러 종류의 혼합물을 대상으로 하고 있으며, 트롬멜 설계인자로서는 직경, 길이, 구멍(hole or opening)의 크기, 회전수, 트롬멜 경사각, 폐기물의 투입율, 폐기물의 조성과 함수율, Lifter 등의 많은 변수가 관계되어 있기 때문에, 트롬멜 장치의 완전한 설계기술은 아직까지 정립되어 있지 않은 상태이다.

보고 되고 있는 논문에서는 크게 두가지의 설계 기술이 소개되고 있으며, 그 하나는 기존 트롬멜 장치의 성능 실험에 의한 자료를 활용하는 경험적인 설계방법이고 다른 하나는 트롬멜 내에서 토사가 분리 되기 까지 토사의 분포 확률에 대한 예측으로 토사의 분리 성능을 예측하는 내용으로 본고에서는 이 두 가지 방법을 소개하며, 국내 매립 폐기물의 굴착·정비를 위한 트롬멜 장치 설계기술 개발에 조금이라도 도움이 될 수 있기를 기대한다.

2. 트롬멜 스크린 설계기술

Trommel Screen 설계 방법에는 앞에서 언급한 두 가지 방법외에도 Computation Process 방법이나 Integrated Beam-Shell Model에 의한 방법 등이 있다. 그러나 이들 방법도 이론적으로 modeling 하는데 있어서 다음과 같은 문제점들은 완전히 반영시키지 못 하고 있는 실정이다.

- Breakage of Friable Component and the Liberation of Entrained Undersized Particle
- Particle/Particle Interaction interfering with Particle Presentation to the screen
- The Probability of a particle Passing through a given Aperture Size
- The heterogenous Nature of the Materials
- The simulation of the effort of Lifters

본고에서는 상기 문제점들을 고려하지 않은 상태에서, 지금까지 보고되고 있는 Trommel Screen 설계기술중 대표적인 두 가지 방법에 대하여 소개한다.

2.1 Empirical Data 이용방법

이 방법은 미국의 NCCR(the National Center for Resource recovery), the European Community and the Department of Trade and industry의 후원으로 Warren Spring Laboratory(WSL)에서 수행한 내용이다.

기본 개념은 이전까지 Trommel Screen에 투입된 폐기물 양에만 의존하던 개념에서 실험 데이터를 분석한 자료를 활용하는 것이다. Trommel Screen에서 일정 크기 이하의 분리된 양이나 단위 시간당 투입된 양에 따라 Feedrate와 Recovery to Undersize 사이의 관계식의 상수 R값에 착안한 방법이다. 트롬멜 스크린 망을 통과하는 입자들의 Volumetric Feedrate와 관계를 지은 것이다. 일정 크기 이상의 물질들은 트롬멜 체적을 대부분 차지하지만 미세 입자들은 큰 입자들 사이의 공극을 채우거나, 극소 체적만을 차지하게 되는 점을 반영 시킨 방법이다.

한편 Trommel Screen Operation 변수는 아래 표와 같으며, 수학적인 관계식보다 실험적 자료를 사용하여, 독립 변수의 일부 또는 모두를 Incorporate 할 수 있는 Model을 도모하는 노력을 하고 있으나 모든 변수를 다 반영하는 것은 현실적으로 어려운 실정이다.

표 1. 트롬멜 스크린 설계인자

<p>- Machine variable, Rotational speed, Screen aperture size, Screening length, Trommel Diameter, Open fractional area, Angle of Inclination, Presence of lifters,</p> <p>- Feed Variable Feedrate, Particle size distribution, Particle shape Particle/Particle Interaction</p> <p>* A lifter is a plate mounted perpendicular to the screen surface lifting material higher than would normally be achieved by the rotational speed alone</p>
--

이 Empirical Data 이용 방법은 트롬멜 스크린 직경과 길이로 Recovery Index(Trommel Screen의 길이 방향에서 Screening Rate가 일정하다는 전제하에서 정의 하였으나 실제로 그렇지 않기 때문에 길이가 길거나 짧은 경우에는 적용시 재고 하여야 한다)와 Feedrate Index(The Particle transport velocity : flowrate of true oversize/cross-sectional area of the trommel)를 정의하여 해석하는 방법으로 Trommel Screen의 회전수, Trommel Screen의 경사각, 스크린 망(구멍)크기 등은 제외하였으며, 특히 Trommel Screen의 회전수는 설계 사양에서 사전에 정해지고 망크기는 실험 자료에서 결정되는 것으로 간주하고 있다.

Feedrate Index(Flowrate density of true oversize)를 Flowrate of true oversize/ the trommel cross-sectional area로 정의하고, Recovery Index(Ru:the recovery to under-

size per meter)를 다음과 같이 정의한다.

$$Ru = 1 - \exp[\ln (1 - Rt) / L] \text{ ----- (1)}$$

여기에서 Rt는 단위 길이당 Total recovery to undersize이고, L은 Trommel Screen의 길이(meter)를 나타낸다.

Oversize Flowrate의 계산은 목표 회수량과 Loss를 고려하고, Feedstock size distribution과 Feedrate양을 가지고 한다. Trommel diameter의 결정은 기존의 실험 data로 사전에 작성한 Optimal density of true oversize의 Graph(Unit recovery 와 Flowrate density의 관계)에서 해당 값을 읽어 결정하여 길이를 계산한다. 즉 Trommel Length L은 다음 식으로 계산한다.

$$L = \ln (1 - Rt) / \ln (1 - Ru) \text{ ----- (2)}$$

2.2 토사의 분포확율에 의한 해석방법

이 방법은 트롬멜 내에서 대상 물질이 분리 되기까지 트롬멜 내벽면과의 충돌할 수 있는 충돌 횟수를 예측하는 식을 유도하고, Hole을 통해 입자들이 통과할 확율과 충돌횟수에 따른 입자 크기의 분포에 대한 표현에 바탕을 두었다. 트롬멜 내에서 입자들의 Dynamics를 묘사하여 트롬멜의 크기와 회전속도를 예측하는 식이라 할 수 있다.

2.2.1. The size separation process

우선적으로 대상 물질의 최소 크기와 Screen Hole이 결정되면, 전제 효율을 충족시킬 수 있는 조건에서 물질이 Screen Surface에서 충돌할 수 밖에 없는 횟수를 결정하는 것이 필요하다.

충돌 횟수의 결정은 확율 문제가 된다. 직경이 d인 구형의 물질이 일변이 a(a>d)인 사각형의 hole을 빠져나갈수 있는 확율 p 는

$$p = [1 - d/a]^2 \times Q \text{ ----- (3)}$$

이며, 이식은 입자가 직경 a인 circular hole 을 통과하는 확율을 나타내기도 한다.

Factor Q는 Screen 전 표면적에 대한 구멍의 단면적을 나타낸다.

입자가 n회 충돌 후 통과할 수 있는 누적 확율은

$$p = \sum_{i=1}^n p (1-p)^{i-1} = [1 - (1-p)^n] \quad \text{--- (4)}$$

i = 1 ~ n로 나타나며

이 식은 입자간의 간섭이 없을 때, 입자 크기가 크고 대다수의 물질이 n회 충돌후 구멍을 빠져나갈 확율을 나타낸다. 입자 크기가 크지 않다면 크기 xi입자가 n회 충돌 후 통과할 수 있는 확률은

$$P(x_i) = [1 - (1-p)^n] f(x_i) \quad \text{----- (5)}$$

여기에서 f(x_i)는 크기 x_i입자의 수량 (Number Fraction)이다.

크기 x₀ ≤ x ≤ x_m의 모든 입자에 대한 확률은

$$P(x_0, x_m) = \int_{x_0}^{x_m} f(x) [1 - (1-p)^n] dx \quad \text{-- (6)}$$

트롬멜에 투입된 대상물질에서 일정 크기 범위안에 있는 입자들의 전체 량은

$$F(x_0, x_m) = \int_{x_0}^{x_m} f(x) dx \quad \text{----- (7)}$$

x₀ ≤ x ≤ x_m 사이에서의 분포를 나타낸다.

$$\text{트롬멜 효율은 } E(x_0, x_m) = P(x_0, x_m) / F(x_0, x_m) \quad \text{----- (8)}$$

이 되며 그 의미는 공급량에 대한 걸러진 양을 나타낸다. 중량으로 나타내지 않고 걸러진 양(Number Fraction)으로 나타낸 점이 매우 중요한 점을 시사한다.

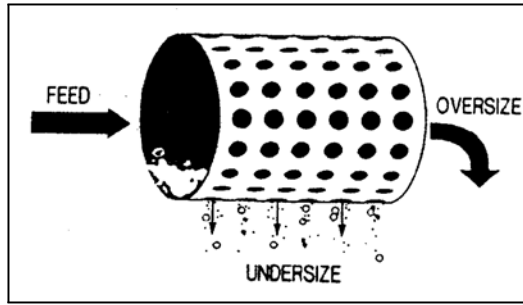


그림 1. 트롬멜 스크린 모형

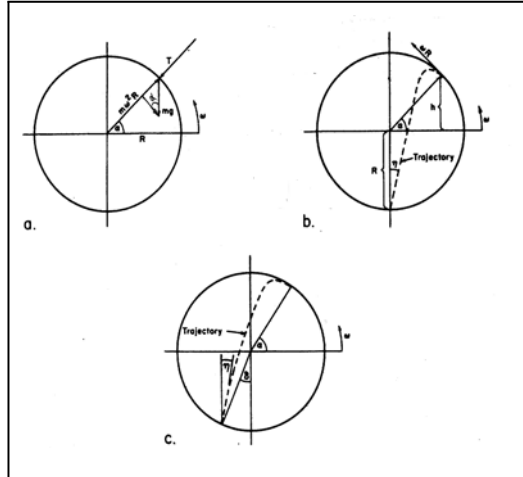


그림 2. 트롬멜 내부에서 물질의 운동 궤적

2.2.2. The Riding Angle

질량 m인 입자가 수평 방향 직경 상에서 이동하여 움직이는 각도 (α)는 각속도 ω, 트롬멜 반경 R의 함수가 된다. 그림 2a에서 입자가 표면에 붙어 있는 한 원심력 mRω²은 중력의 법선 방향의 합력 T와 같다. T=0일 때 입자는 비로소 바닥으로 떨어지게 된다. 그 조건은

$$R \omega^2 / g = \text{Sin } \alpha \quad \text{----- (9)}$$

α = π/2(수직)에 이르기 위한 각속도는 임계각속도(Critical angular velocity)이고 입자가 떨어지지 않고 정점까지 트롬멜 내부 표면을 타고 갈 수 있는 각도가 된다.

실제, 수평 방향에 대해 Barrel(or Drum)은 경사를 이루고 있기 때문에 식(9)에 그림의 경사각β

에 해당하는 $\cos \beta$ 를 분모에 곱해주어야 한다.

보통 β 값은 $\pi/36(= 5^\circ)$ 정도로, 즉 $\cos \beta \approx 1$ 이기 때문에 무시한다.

2.2.3. The Flight Trajectory

바렐 바닥에 떨어지는 점과 각도 α , 그리고 체류중에 걸린 시간 간격 t 사이에 관계식은 입자가 바렐표면을 떠나 부딪힐 때까지의 수직거리는 그림 2b에 나타낸바와 같이

$$(R+h) = R(1 + \sin \alpha + \frac{gt^2}{2} - \omega Rt \cos \alpha) \text{ ----- (10)}$$

가 되고 여기에서 바렐의 경사각 β 를 무시하면

$$\omega t = \sin \alpha \times \cos \alpha + [\sin^2 \alpha \times \cos^2 \alpha + 2 \sin \alpha (1 + \sin \alpha)]^{1/2} \text{ ----- (11)}$$

우변의 첫 항은 궤적이 정점에 도달할 때까지 걸리는 시간이고 두 번째항은 정점에서 바렐이 바닥에 떨어지는 데 걸리는 시간을 나타낸다.

여기서 R 은 트롬멜 반경을 나타낸다

2.2.4. The Feedrate

트롬멜을 설계할 때 네 개의 파라메타 ω , R , L , β 의 관계식이 필요하다. 바렐 입구 부근의 단면에서 두께 b 를 가지고 angular section $(\delta + \pi/2 + \alpha)$ 에 따라서 바렐을 타고 있는 물질은 단면적 $bR(\delta + \pi/2 + \alpha)$ 를 차지한다.

비행중에 있는 물질은 시간 t 또는 $bR\omega t$ 시간 동안에 바렐을 타고 있는 물질의 양에 해당한다. 물질은 속도 $(\omega/2\pi) \ell/f$ 로 바렐의 길이 방향(Longitudinally)으로 이동한다. f 는 충돌주기, ℓ 은 매 충돌에 따른 물질의 축방향 움직인 거리를 나타낸다.

물질이 차지하고 있는 단면적과 입구부근의 바렐을 따라가는 속도를 곱하면 Volumetric feedrate가 된다. 여기에 그 층의 밀도 ρb 를 곱

하면 질량유량 M (Mass feedrate)가 된다.

$$M = \Psi g^{1/2} b \rho b \beta R^{2/3} \text{ ----- (12)}$$

$$\Psi = (\sin \alpha)^{1/2} (\omega t \cos \alpha + \sin \alpha + \cos \delta) \text{ ----- (13)}$$

t 는 식 (11)에서 β 가 작기 때문에 $\sin \beta = \beta$ 로 대체한 것이다.

일정한 R 값에서 b 가 증가하면 입자간 간섭의 증가, 구멍막힘 등이 빈번해짐으로 인해 효율이 감소된다.

길이 b 를 결정하기 위하여 서로 다른 Type의 공급 물질에 대한 실험적인 고찰이 필요하다.

3. 설계방법의 고찰

이상 소개한 두 가지의 트롬멜 스크린 설계기법은 아직 트롬멜에서 요구되는 성능을 완전하게 반영시켜 줄 수 있는 설계 기법이라고는 할 수 없는 단계이다.

2.1절에서 소개한 Empirical data 이용방법은 실제 설계 및 해석 단계에서 물질의 크기를 변수로 취하여 Unit Recovery to Undersize vs. Feedrate of True Oversize/Cross Sectional area of Trommel의 관계를 많은 자료를 분석하여 표로 만들어 활용해야 하기 때문에 기존의 Trommel장치의 성능을 위주로 한 자료의 활용방법이 되고 있다.

또한 해석을 위한 변수가 단순하여 실험자료에 의한 해석용 자료를 확보할 경우, 설계하는 방법은 쉽지만 한정된 범위내에만 적용해야 하는 문제점도 가지고 있다.

그림 3에는 이 방법을 활용할 경우 참고를 하여야 할 Unit Recovery to Undersize vs. Feedrate of True Oversize/Cross Sectional area of Trommel의 관계를 예로 제시한 것이다.

2.2절에서 소개한 토사의 분포확율에 의한 해석방법에서는,

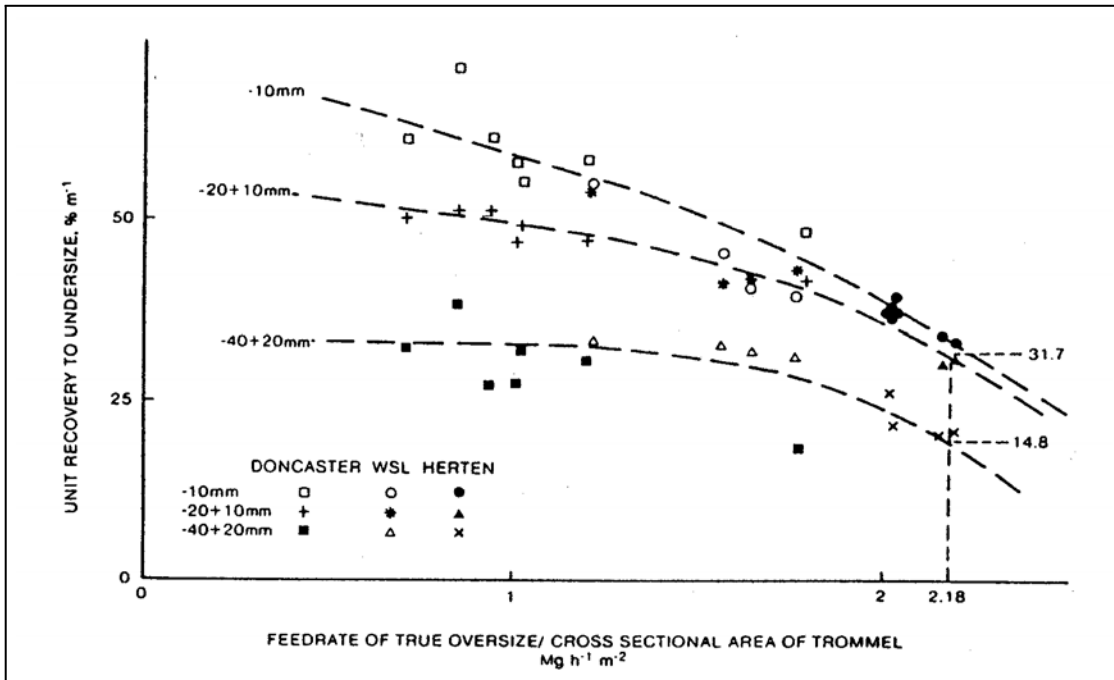


그림 3. 40 mm망을 가진 두 개의 트롬멜 스크린 비교
경사각 A 4.5°, B 5°

- a. 트롬멜로 공급되는 물질에서 구멍이하의 입자를 분리하기 위해 필요한 충돌횟수, 구멍크기의 범위에서는 어느 크기가 되었던, 분리 효율의 함수. 분리효율은 공급된 물질 중에 분리된 량의 비율로 정의된다.
Fraction을 계산하기 위해서는 공급물량에 대한 distribution of particle size를 알아야 한다. 구멍을 빠져나가는 확률을 계산하는 두가지 방법을 구별하기는 어렵다.
- b. 정해진 공급율에서 물질을 처리하기 위해 필요한 트롬멜 반경의 계산. -- 바렐 표면을 타는 물질의 두께와 밀도를 알고 또 트롬멜의 경사각도를 알았을때
- c. 충돌횟수에 필요한 트롬멜 길이의 계산 등을 할 수 있게 하였으나

트롬멜 장치 설계를 위해 유도된 몇 개의 중요한 변수는 완전한 것이 아니다. 즉,

- a. Particle shape factor가 없고 식을 유도하

- 면서 구멍 가장자리로부터 반사(reflection) 효과를 제외시켰으며,
- b. 설계시 법선방향의 충돌을 고려 하였는데 실제 최적 효율은 다른 충돌각도에서 일어날 수도 있다.
- c. 바렐 표면을 타는 물질의 두께는 --주어진 효율에서 분리와 공급을 최적설계로 유도하는-- 공급 물질의 평균 치수(mean dimension)와 동등한 것이 아니다.

또한 자원회수 과정에서 불확실한 내용을 소개하는 자료가 부족하다.

- a. Raw MSW와 여타 process stream의 Size Distribution은 무게 위주로 보고는 되는데, Number Fraction으로는 보고되지 않고,
- b. 자원회수 공정에서 트롬멜로 반입되는 불균일한 (Irregularly shaped materials)물질의 Shape Factors는 알려지지 않고 있으며,
- c. 바렐 표면을 타는 밀도도 알려지지 않고 있

기 때문에 완전한 설계가 가능 한 것이 아니고 설계기술을 개발해 나가는 단계에서 많은 진전을 보여준 설계기법으로 인식하고 잘 활용하면서 Modifying을 하는 것도 좋은 방법이 될 것이다.

4. 결 언

최근 국내·외에서 위생 매립 폐기물이나 비위생 매립 폐기물의 경우, 최근까지 매립된 폐기물의 악영향과 도시 확장에 따른 매립지의 정비 필요성이 매우 높아지고 있어, 국내 지방 자치체에서도 년차적인 계획수립에 의한 매립지 정비를 추진하고 있는데 효율적인 정비작업을 위해서는 성능이 인정된 장비를 일차적으로 사용하는 것이 중요한 관건이 될 것이다.

본고에서 소개한 트롬멜 장치는 이러한 목적으로 활용되고 있는 장치로서 지금까지 현장에서 경험에 의한 설계 및 제작으로 트롬멜 장치를 만들어 사용하고 있었으나 보다 논리적이고 이론적인 배경을 가지고 성능을 개량하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

이러한 국내·외 상황에 맞추어 트롬멜 장치의 성능향상을 도모하고 현장에서 작업 성능을 올릴 수 있는 장치를 설계 및 생산할 수 있는데 본고가 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. P.A. Wheeler, J.R. Barton and R. New, "An Empirical Approach to the Design of Trommel Screens for Fine Screening of Domestic Refuse", Resource, Conservation and Recycling, 2(1989)
2. Harvey Alter, Jerome Gavis and Marc L. Renard, "Design Models of Trommels for Resource recovery Processing.
3. Ni-Bin Chang and Ying-Hsii Chang, "Performance Testing of the Solid Waste Sorting Plants", Proceedings of the 17th Biennial Waste Processing Conference ASME 1996
4. Ni-Bin Chang and Ying-Hsii Chang, "Evaluation of he Impacts of Solid Waste Presorting on Municipal Incinerators".