

# 건설폐기물 선별 해석을 위한 치차형 스크린 해석모델 개발

김 광 훈\*, 박 정 홍\*, 문 병 영†, 박 용 기\*\*

군산대학교, \*부산대학교 기계기술연구소, \*\* (주)거산기계

## Development of a Simulation Model for Separation Analysis and Design of Star Screen in Construction Wastes Recycling

Kwang-Hoon Kim\*, Jung-Hong Park\*, Byung-Young Moon†, Yong-Ki Park\*\*

Dep't of Naval Architecture, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea

\*RIMT, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\*Keossan Machinery Co., LTD, Gimhae 500-700, Korea

(Received December 5, 2009; revision received January 28, 2010)

**ABSTRACT:** In this study, a star screen model was constructed to predict the dynamic characteristics of interactive waste particles and to simulate separation capability of the particle using geared type screen(star screen). In order to approach this model, it is necessary to determine the design parameters of the screen such as driving torque, percentage of open space, and capability. Thus, a dynamic star screen model was developed with a total of 32 columns of geared assembly including screen part, wastes guide, and extra joints to rotate the screen using ADAMS. Each parameter was simulated to predict the screening capability for particle size, rotating speed, and particle condition. From the results, separation ability was predicted according to the affecting variables by using the dynamic star screen model.

**Key words:** Star screen(치차형 스크린), Recycling(재활용), Dynamic modeling(동적모델링), Particle screening(입자선별)

### 1. 서 론

최근 환경 문제와 더불어 자원 재활용이라는 관점에서 건설 폐기물의 처리는 그 중요성이 날마다 증대되고 있다. 그리고 꾸준히 산업현장에서 폐기물 처리량이 증가하고 있다. 국내에서 처리하고 있는 폐기물의 종류는 다양하며 이에 따른 선별기, 즉 스크린 설비 또한 다양하다. 건설폐기물의 처리에 주로 많이 사용되는 스크린은 진동식 스크린(vibrating screen)<sup>(1,2)</sup>이다. 진동식 스크린은 경사

에 따라 계단식으로 판을 만들고 이를 가진하여 골재를 무게에 따라 선별한다.

이에 반해 치차형 스크린은 치차의 회전에 의하여 골재가 이송되고 분리되는 선별기이다. 이 스크린은 치차와 치차 사이의 공간보다 더 큰 이물질에 대해서 치차를 이용하여 강제적으로 분리시켜 골재를 선별한다. 이러한 선별 방식의 차이 때문에 치차형 스크린은 함수율이 매우 높은 골재에 대해서도 선별하고자 하는 입자의 크기에 맞추어 강제적으로 선별해낼 수 있는 이점이 존재한다. 따라서 이물질이 많이 포함된 골재의 선별이나 고품수율을 지닌 골재 선별에 이용될 수 있다. 이러한 이유로 현재 골재 재활용 처리업계에서는 치차형 스크린의 수요가 발생하고 있다. 또한 국외에서는 다양한 크기를

† Corresponding author

Tel.: +82-63-469-1854; fax: +82-63-469-1851

E-mail address: moonby20@gmail.com

갖는 산업폐기물의 선별에 관한 연구를 수행하고 있다.<sup>(3,4)</sup> 하지만 국내에서는 치차형 스크린을 개발한 사례가 없어 설계와 개발에 필요한 기초 연구가 필요하였다. 따라서 본 연구에서는 국산 치차형 스크린을 개발함에 앞서 치차형 스크린의 기본 설계와 선별 성능을 예측해 볼 수 있는 동역학 시뮬레이션을 수행하고자 하였다.

우선 치차형 스크린의 설계 치수에 따라 선별 성능이 일차적으로 결정되기 때문에 치차의 크기와 두께 및 사이 공간 등의 치수 변수를 결정하였다. 치차의 두께와 치차 사이의 공간에 대한 거리는 치차형 스크린의 선별 성능과 개공율(percentage of open area)에 가장 큰 영향을 미치는 변수이다. 개공율은 망 전체 면적에 대하여 막히지 않고 비어 있는 면적의 비율이다. 즉, 개공율이 높으면 시간당 선별량이 늘어나게 된다.

설계 기초자료의 확보를 위해 치차 및 기타 변수에 대한 다른 형상 설계 변수를 정의하고 이들 변수의 변화에 따른 개공율을 먼저 계산하였다. 그리고 선별 성능 및 치차의 동역학 해석을 위해 ADAMS를 이용하여 치차형 스크린을 모델링하였으며 다음과 같은 순서로 해석을 수행하였다. 1) 기본 치차 모델을 모델링하고 토크를 주어 전체 시스템을 구동하고 이로부터 시스템을 구동하기 위한 최소 토크를 계산하였다. 또한 골재 선별을 위해 필요한 동력을 예측하였다. 2) 구성된 시뮬레이션 모델에 over size 이물질을 얹어 배출하는 상황을 재현하였다. 이것으로부터 60, 90, 120 rpm 속도별 배출 시간 및 성능을 예측하였다. 3) 마지막으로 선별 크기에 따른 분리 성능을 시뮬레이션하였다. 3 mm, 5 mm의 골재 입자와 7 mm 이상의 입자 크기에 대한 선별 해석 수행하여 이로부터 선별 성능을 평가하였다.

## 2. 치차형 스크린 설계 및 모델링

### 2.1 개공율

치차형 스크린의 각 설계 변수를 정의하고 정의된 변수에 따른 계산식은 다음과 같다.

#### 2.1.1 길이방향 치수변수

이에 대한 독립변수로는 Fig. 1과 같이 축간거리(DA), 길이방향 공간거리(SL), 치차축의 개수(NA)가 되며 종속변수는 치차 외경(DO), 치차축 내경(DI), 전체길이(L)가 된다. Fig. 1로부터 치차 외경

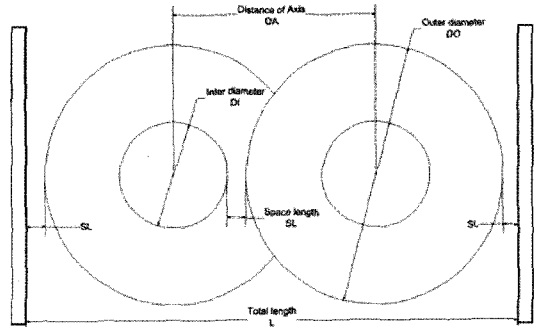


Fig. 1 Distance parameters between gears(side view).

과 내경은 다음식과 같이 얻어진다.

$$DO = \sqrt{2} DA$$

$$DI = (2 - \sqrt{2})DA - 2SL \approx 0.5858DA - 2SL$$

$$(\because SL = DA - \frac{DO}{2} - \frac{DI}{2})$$

$$L = DA \cdot NA + DO + 2SL$$

#### 2.1.2 폭 방향 길이 변수

폭 방향의 독립변수는 Fig. 2와 같이 치차두께(T), 폭 방향 공간거리(SW), 치차의 개수(N)이며 종속변수는 스페이서 두께(TS), 치차간 거리(C), 폭(W)이 된다. 여기서 Fig. 2의 그림과 같이 스페이서 두께와 치차간 거리와 전체 폭은 아래의 식과 같이 결정된다.

$$TS = T + 2SW$$

$$C = T + TS$$

$$= 2(T + SW)$$

$$W = (N - 1)C + T + TS + SW$$

#### 2.1.3 망면적 계산

전체 망면적(Area)은 Fig. 2와 같으므로 다음과 같이 계산된다.

$$A = W \cdot LC$$

여기서,  $LC = (NA - 1)DA$ 이며 개공면적(AS : open area)은 아래의 식과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} AS &= (NA - 1) \cdot ((2N + 1)SW \cdot LS + N \cdot SL \cdot TS \\ &\quad + SW \cdot SL) + 2(SL \cdot W + TS \cdot TLS \cdot N + SW \cdot LS) \\ &= (NA - 1)(2N \cdot SW \cdot LS + SW \cdot LS \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ N \cdot SL \cdot TS + SW \cdot SL) \\
 &+ 2(SL \cdot W + LS(TS \cdot N + SW)) \\
 = &(NA - 1)(N(2SW \cdot LS + SL \cdot TS) + SW(LS + SL)) \\
 &+ 2(SL \cdot W + LS(TS \cdot N + SW))
 \end{aligned}$$

여기서,  $LS = (DO - DI) / 2$ 이다. 그리고 개공율 (POS: percentage of open space)은 다음과 같다.

$$POS = \frac{AS}{A} \times 100$$

### 2.2 시뮬레이션 모델 구축

치차형 스크린의 모델링과 해석은 동역학 및 시스템 해석 전문 소프트웨어인 ADAMS(version 2005, U.S.A.)<sup>(5,6)</sup>를 사용하였다. 동역학 모델을 구성하기 전에 먼저 치차 형상의 CAD 파일을 parasolid(.x\_t)

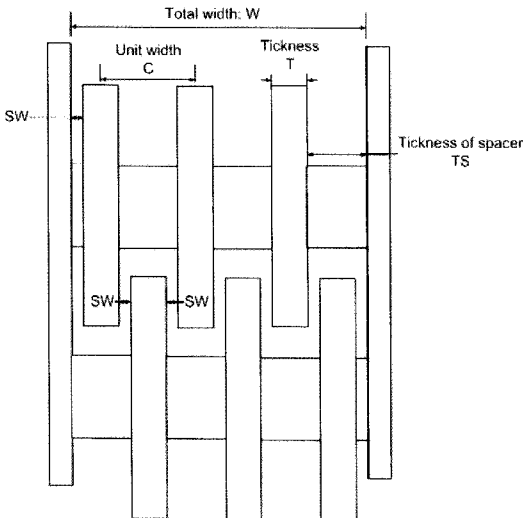


Fig. 2 Distance parameters between gears(top view).

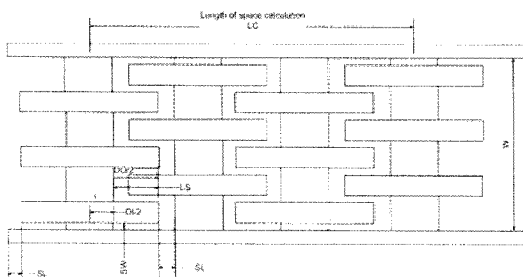


Fig. 3 Parameters for calculation of open space.

파일로 변환하여 ADAMS에 입력하였다. Fig. 4는 구성된 치차 모델을 나타낸다. 본 해석에서 설정한 기본 모델은 치차 두께 16mm 치차 사이 공간을 5mm로 설정하였다.

### 2.3 소요 동력 계산

소요 동력은 금속 재질의 치차를 1열당 34개로 부착하고 총 18열을 한 조합으로 하는 스크린에 대하여 계산하였다. Fig. 5와 같이 직렬로 놓여진 치차열을 ADAM에서 제공하는 기어 연결로 연결하고 왼편의 가장 첫 번째 축을 토크를 주어 구동하였다.

## 3. 선별 성능 해석 시뮬레이션

### 3.1 선별 모델 설정

1열당 34개의 치차를 가지는 모델은 그 해석 모델의 용량이 일반 전산해석 컴퓨터의 용량을 초과하는 제한점이 발생하였고 해석 시간의 단축을 위해서는 단순화한 모델을 재구성할 필요가 있다. 이를 위하여 Fig. 6과 같이 1열에 3개의 치차를 가지는 모델을 구성하였다. 치차의 개수를 줄여도 개공율은 일정하기 때문에 선별 성능 해석에는 차이가 없다.

구성된 1열 치차 모델을 18열로 확장하고 각 치차에 회전 운동을 주어 속도별 해석이 가능하도록 설정하였다. 그리고 투입되는 골재 알갱이와의 접촉을 정의하여 재구성된 18열 치차 모델에서 선별되는 상황을 동역학적으로 시뮬레이션할 수 있도록



(a) oblique view



(b) front view

Fig. 4 A constructed star screen model using ADAMS.

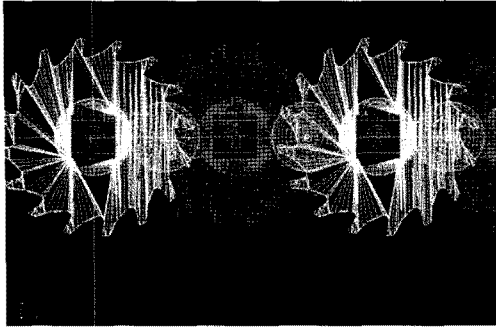


Fig. 5 Linked joint model between gears.

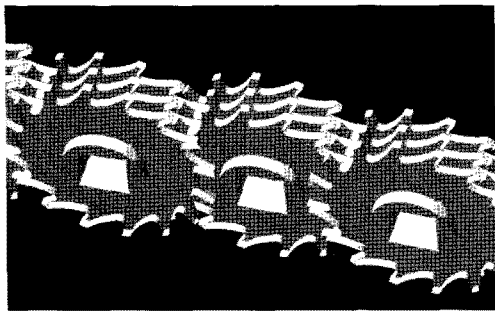


Fig. 6 Reconstructed gear model with three-gear per column.

록 하였다(Fig. 7). 또한, 시뮬레이션 해석을 위해서 투입 입자가 치차에 부딪혀 측면밖으로 나가지 못하도록 하기 위하여 가이드 면을 가상으로 설정하였다.

### 3.2 선별 성능 해석

스크린의 물리적인 선별 현상을 실제와 동일한 상황으로 모델링하는 데에는 한계가 있기 때문에 단순화 하거나 대표적인 물리적 상태만을 고려하여 해석할 수밖에 없다. 따라서 본 해석에서는 스크린의 선별 성능을 알아보기 위하여 속도를 세 단계로 나누었고, 골재는 구 형태의 입자 모양으로 단순화하였다. 선별 속도는 60, 90, 120 rpm을 설정하였고 크기는 60 rpm에 대해서 3, 5, 7, 9, 11 mm를 90, 120 rpm에 대해서는 7, 9, 11 mm 크기의 입자에 대한 선별해석을 수행하였다.

현재 구현된 모델의 입자는 개별적으로 치차면과 접촉하여 튀어 나오거나 구르도록 모델링되어 있는데(정적 마찰계수 0.3, 동적 마찰 계수 0.1) 이것은 골재에 대하여서는 매우 건조한 상태라고 할

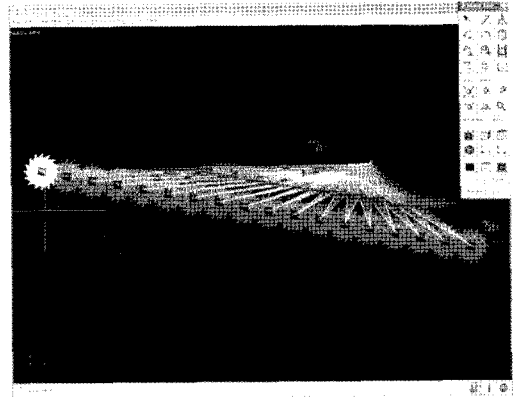


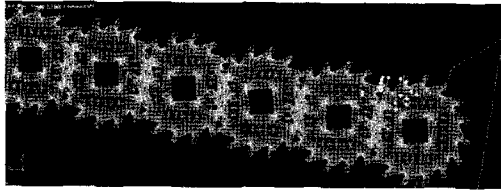
Fig. 7 Tilted(10°) star screen model with 18 columns and defined contact functions between gears and particles.

수 있다. 즉 건조하여 부딪혀 나가면 입자 하나가 날아갈 수 있는 상태임을 뜻한다. 그러나 실제로 선별될 골재는 물기에 의하여 어느 정도 덩어리를 이루고 있기 때문에 이러한 상태를 실제와 유사하게 모델링할 필요가 있다. 실제와 유사한 입자의 상태에 대하여서도 해석하기 위하여 90 rpm, 9mm 입자에 해석 경우에 대해서 입자의 접촉 특성을 변화시켜 재해석하였다. 습식 상태, 즉 어느 정도 물기를 포함하고 있는 상태를 구현하기 위해 입자의 접촉 성질 가운데 정적 마찰 계수를 0.8, 동적 마찰 계수를 0.7로 설정하였다.

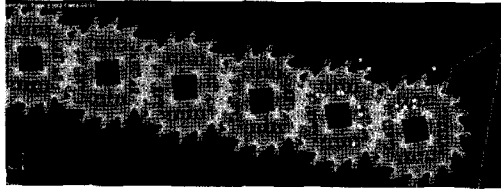
### 4. 결과 및 토의

제 2.1절의 치차형 스크린의 설계 치수 인자들을 이용하여 개공율을 계산하였다. 치차간 거리를 0.5 mm 간격으로 5~10 mm사이로 설정하고 치차의 두께를 1 mm씩 13~19 mm로 하였을 때 개공율을 계산하였다. 치차사이의 폭이 재생 골재의 선별 크기에 해당하기 때문에 5~10 mm의 치차간 거리는 목표하는 선별 크기가 된다. 개공율을 높이기 위해서는 치차의 두께를 줄이게 되는데 본 해석에서 13~19 mm의 두께로 설계할 경우 개공율이 최소 10%에서 최대 25%까지 확장할 수 있음을 알 수 있었다.

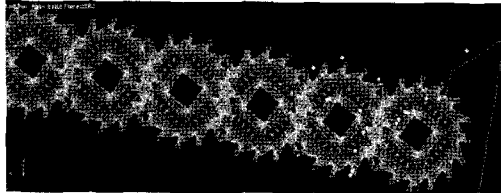
두 번째로 스크린의 구동력을 계산하였다. 치차의 구동 회전수(rpm)는 60~120 rpm까지 10 rpm 간격으로 계산하였다. 구동 토크는 모든 회전수에 대하여 약 4.1 kNm로 일정하였으나 120 rpm으로 갈



(a) Initial dropping(1.19 sec.)



(b) Most particles moves around spacer rim(0.36 sec.)



(c) Most particles are dropped through the space between gears(0.45 sec.)

Fig. 8 A representative simulation result for 90 rpm, particle size 9 mm, and wet condition.

Table 1 Simulation results

RPM	Size(mm)	Maximum proceeded distance(column)
60	3, 5, 7, 9, 11	3
90	7, 9, 11	5
	9(wet)	3
120	7, 9, 11	16

수록 필요한 일률(동력)은 최소 25.8kW(34.6 HP)에서 최대 51.6kW(69.2 HP)가 필요하였다. 계산된 동력은 순순히 전체 치차를 구동하기 위한 최소 동력임을 고려할 때 골재를 부어 넣었을 때 선별시 필요한 동력은 최소 2~3배의 동력이 필요함을 예측할 수 있었다.

세 번째로 치차형 스크린의 선별 성능을 예측하는 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 8은 입자를 투입하여 이송되는 상태를 나타내기 위해 치차회전 속도 90 rpm, 입자 크기 9 mm, 그리고 습식상태에 대한 경우를 시뮬레이션한 결과를 그림으로 나타내었

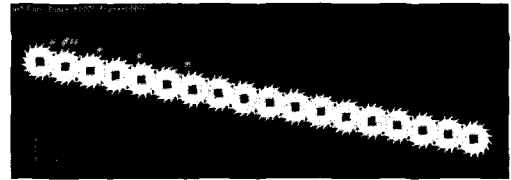
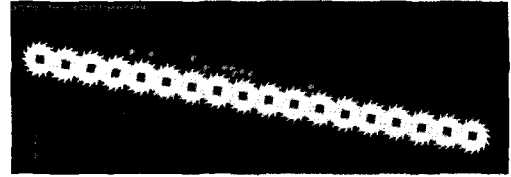
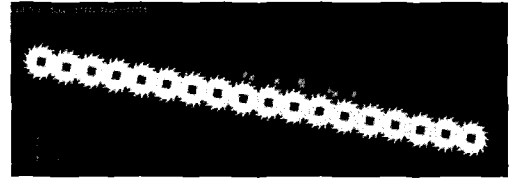


Fig. 9 An example of screening over size particles (rotation speed : 60 rpm).

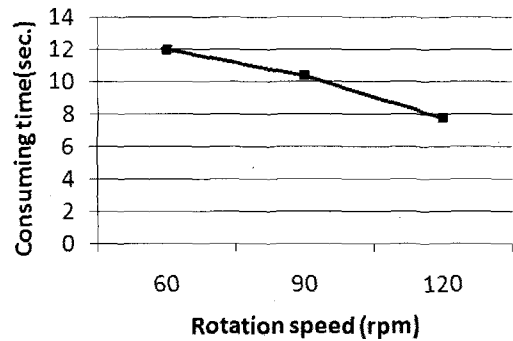


Fig. 10 Screening time for over size particles.

다. 해석 결과 건조한 상태에서는 입자와 습식 상태의 입자 모두 대부분의 입자들이 투입한 치차열에서 멀리 가지 못하고 대부분이 스페이서와 치차의 골면으로 유입되어 낙하되었다. 이는 3~11 mm 크기의 입자들이 모두 선별되지 못하고 낙하됨을 의미한다. 건식 상태의 입자와 습식 상태의 입자에 대한 차이는 다음과 같이 나타났다. 건식 상태의 입자는 대부분 투입될 때 부딪힌 치차면의 각도에 따라 제각각 튀어 나가 위로 산포되었고 이후 각각 떨어진 위치에서 가까운 스페이서 사이로 낙하되었다. 습식 상태의 입자는 낙하되어 접촉이 일어난 후 접촉 특성에 의해 넓게 산포되지 않았고 덩이를 이루었으나 역시 스페이서 사이로 모두 낙하되었다.

Table 1에 이에 대한 선별 성능 예측 시뮬레이션 결

과를 정리하여 나타내었다. 저속 회전사인 60 rpm에서 입자는 치차열 3열까지 진행하다가 대부분의 입자들이 선별되었고 120 rpm에서는 16열까지 진행한 후 선별되었다. 그리고 90 rpm 조건에서 9 mm 크기의 입자에 대한 경우에 대해서 습식 조건을 주었을 때에는 3열까지 진행한 후(건식인 경우 5열) 모두 선별되었다.

속도별 이송 성능을 확인하기 위하여 60, 90, 120 rpm의 속도로 치차를 구동하였을 때의 물질 이동 상태를 계산하였으며 60 rpm의 속도로 이송하는 경우의 예를 Fig. 9에 나타내었다. 해석 결과 치차의 회전 속도가 60 rpm에서 120 rpm으로 빨라질수록 일반화한 구형상의 over size 이물질(입자)은 빠른 속도로 배출됨을 알 수 있었다(Fig. 10). 치차형 스크린의 해석 결과 입자들이 치차의 날과 날 사이 면에 들어간 경우가 발생하였다. 이 경우는 투입된 입자가 대부분 튕겨져 앞 열로 넘어가지만 입자가 앞으로 전진하는 힘을 잃은 입자들은 대부분 치차날 사이에 들어가게 되어 아래로 빠지게 된다. 그리고 스페이서의 정점에서 후면에 위치한 입자가 스페이서의 면을 타고 뒤로 빠지는 경우가 발생하였다. 치차날 사이에서 배출되는 입자는 원하는 목표 크기에 대한 정확도를 낮추어 목표 선별량을 높이는데 방해가 되는 요소 중 하나가 될 수 있다. 즉, 치차날 사이 공간에 들어 갈 수 있는 크기면 무엇이든 선별되지 못하고 배출 될 가능성이 있어 이 부위에 대한 선별 기능은 매우 제한적이라고 할 수 있다. 또한, 본 해석을 통해 치차두께를 16 mm로 할 경우 3 mm 이하의 입자에 대한 선별 기능을 80% 이상 높이는 것은 이론적으로 어려웠다. 치차의 두께가 두꺼울수록 그 면적에 해당하는 만큼 선별기능을 잃기 때문에 가능한 치차의 두께를 줄여야 함을 알 수 있다. 3 mm 이상의 선별 기능을 갖기 위해서는 치차의 두께가 이론적으로 3 mm가 되어야 하겠지만 이를 동역학적 모델링으로 구성하여 전산해석 결과로 정확한 퍼센트를 추정하기 어렵기 때문에 간단한 모형을 제작하여 실험을 통한 검증이 필요하다고 사료된다.

투입되는 입자는 치차의 회전 속도에 의해서 전진하는 힘을 공급받을 수 있기 때문에 회전 속도에 대한 영향 역시 실험적 검증이 필요하다. 또한 입자가 힘을 잃고 스페이서를 타고 뒤로 빠지는 것을 해결하기 위해 스페이서에 골이나 홈을 넣어 뒤로 빠지는 입자를 막아주는 등의 형태 등의 설계 변경

등도 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 해석 결과로부터 치차두께를 6~19 mm로 하고 공간 폭을 3~10 mm로 하였을 때 스크린의 개공율은 10~35% 범위 내에 있음을 알 수 있었다. 치차 두께 16 mm, 1열당 34개의 치차를 갖고 총 18열에 대한 치차 시스템을 120 rpm으로 구동하기 위한 최소 동력은 약 69 HP가 필요하였다. 입자의 크기가 치차날 사이보다 큰 over size 입자의 경우 100% 배출됨을 알 수 있었고 이때는 속도가 빠를수록 단시간에 입자가 배출되었다. 향후 치차형 스크린의 설계인자를 고려하여 실험을 통해 선별 성능의 검증과 향상 방법에 대한 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 2007 ‘지역산업기술개발사업(공통기술개발사업, 과제번호 : 70002177-2007-01)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Kim, K. K., Son, K., Kim, K. H. and Moon, B. Y., 2007, Vibration Analysis of Separation Screen for a Construction Wastes, Proceedings of KSME '2007 Conference, p. 802.
2. Moon, B. Y., Bae, H. D., Kim, K. H., 2008, Vibration Analysis of Separation Screen in a Recycling Plant of Construction Wastes, Korean Journal of Air-Conditions and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 8, pp. 526-533.
3. Solding, M., 1999, Interrelation of Stratification and Passage in the Screening Process, Mineral Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 497-516.
4. Solding, M., 2000, Influence of Particle Size and Thickness on the Screening, Minerals Engineering, Vol. 13, No. 3, pp. 297-312.
5. ADAMS, Mechanical Dynamics Inc., U.S.A.
6. Song, C.K, 2003, ADAMS ver.12 for analysis of Kinematics and Dynamics, Interscience.