

◆ 특집 ◆ 직선 · 회전모터 구동 이송 · 회전체 연구 XIV

## 해석적 방법을 통한 Rotary Discharge Machine 의 성능 분석

### Performance Investigation of Rotary Discharge Machine by Analytical Method

정연호<sup>1</sup>, 정대만<sup>2</sup>, 이권재<sup>2</sup>, 조영태<sup>1,✉</sup>, 정윤교<sup>1</sup>  
Yeon Ho Jeong<sup>1</sup>, Dae Man Jung<sup>2</sup>, Kwon Jae Lee<sup>2</sup>, Young Tae Cho<sup>1,✉</sup>, and Yoon Gyo Jung<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Changwon National University)

<sup>2</sup> ㈜오토엔 (AUTOEN Co., Ltd.)

✉ Corresponding author: ytcho@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-3601

Manuscript received: 2016.10.14. / Revised: 2016.10.20. / Accepted: 2016.11.8.

*Fuel used in the steel metallurgy industry is stored in huge stage systems called SILO. Fuel is released by RDM (Rotary Discharge Machine), at the place of utilization. RDM is located in the Silo, and is constituted of a main frame, driving part, discharging part and control part. RDM is combined to a direct motion on the rail in tunnel, having a rotary motion enabled by a motor. In this paper, we calculate the theoretical discharging capacity of RDM to confirm the correlation between design element and discharging capacity of RDM. Also, through structure analysis, we confirm the vulnerable point of RDM when it discharges the storage materials. We hope to apply these results to design a more efficient RDM.*

KEYWORDS: Rotary discharge machine (회전 제거 장치), Theoretical calculation (이론적 계산), Structure analysis (구조 해석)

#### 기호설명

$v$  = Feed speed of rotary center

$\omega$  = Angular speed of rotary blade

$\theta$  = Angle between blade and horizontal line

$\theta_1$  = Angle between blade and horizontal line when blade starts discharging

$\theta_2$  = Angle between blade and horizontal line when blade finishes discharging

$r$  = Length of blade

$h$  = Height of blade

#### 1. 서론

제철산업 또는 발전소에 사용되는 원료나 연료는 선박에서 하역되어 대형 저장 시스템인 사일로(Silo)에 적재된다. 사일로 내부에 적재된 원료는 회전 블레이드를 가진 RDM (Rotary Discharge Machine)을 통해 지상의 사용 개소로 이동된다. RDM은 원료나 연료를 배출하기 위해 사일로 내부에 이동 및 제거 (Travelling, Discharging) 하는 기능을 가진 자동화 시스템을 말한다.

사일로 내부에 설치된 RDM은 메인 프레임

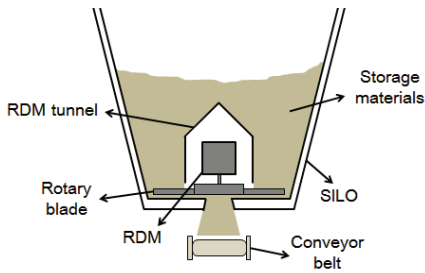


Fig. 1 Rotary discharge machine in silo

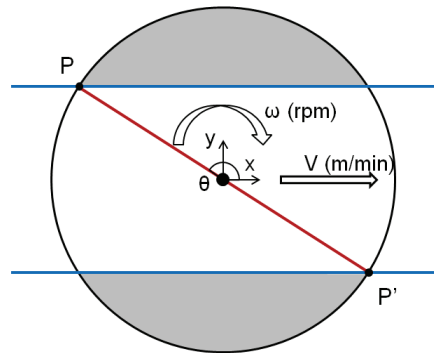


Fig. 2 Schematic of rotary blades

(Main Frame) 부, 휠 (Wheel) 을 회전시키는 구동 부, 휠을 포함하는 제거 (Discharge) 부, 사일로 내부 전후 주행하기 위한 주행 부, 제어 부 등으로 구성되어 있다. Fig. 1은 사일로 내부에 설치된 RDM 모습의 개략 도를 나타낸 것이다.

본 논문에서는 RDM이 사일로 내부 레일 (Rail) 을 주행함과 동시에 회전 블레이드 (Rotary Blades) 가 회전하면서 저장매체를 제거할 때 제거되는 저장매체의 양을 이론적으로 계산하여 RDM의 설계요소와 배출 능력과의 상관관계를 분석하였다. 또한, 구조해석을 통해 저장매체 제거 시 RDM의 구조적 취약부분을 파악하였다.

## 2. RMD의 저장매체 제거능력 계산

### 2.1 이론적 모델

Fig. 2 에 RDM이 사일로 내부 레일을 운전하면서 저장매체를 제거할 때 회전 블레이드의 움직임 을 나타내었다.

회전 블레이드가 회전하며 제거되는 저장매체의 양을 계산하므로 블레이드의 형상은 직선으로 가정하였다. Fig. 2에서 위아래 부분이 저장매체가 제거되는 부분이며, 이를 제외한 곳은 저장매체가 컨베이어 벨트로 떨어질 수 있도록 비어있는 공간이다. RDM의 회전 블레이드는  $v$ 의 선 속도로 직선운동하며, 동시에  $\omega$ 의 각속도로 회전한다. 또한, RDM은 블레이드가 운동방향과  $\theta_1$ 의 각도를 가질 때 저장매체를 제거하기 시작하며,  $\theta_2$ 의 각도를 가질 때 저장매체 제거가 완료된다.

### 2.2 이론적 계산

RDM은 두 개의 블레이드로 구성되어 블레이드의 회전방향과 RDM 진행방향이 같은 부분과 다른 부분으로 나누어서 제거능력을 계산하였다.

RDM의 저장매체 제거능력을 계산하기 위해

먼저 블레이드가 회전하며 저장매체를 제거하는 넓이를 구하고 블레이드의 높이를 곱하여 제거되는 양을 계산하였다.

#### 2.2.1 진행방향이 같은 부분

먼저 블레이드가 저장매체를 제거하기 시작하는 순간부터 저장매체 제거가 끝나는 순간까지 넓이를 적분하기 위해 이동 방향과 블레이드가 이루는 각  $\theta$ 와 회전속도  $\omega$ 의 관계를 구하면 식(2)와 같다.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{2\pi\omega}{60} \text{ (rad/s)} \quad (1)$$

$$dt = \frac{30}{\pi\omega} d\theta \quad (2)$$

블레이드의 끝점을  $P(x,y)$ 라고 가정하면 점  $P$ 의 좌표와  $dx$ 는 다음의 식으로 표현된다.

$$x = r \cos \theta + vt \quad (3)$$

$$dx = -r \sin \theta d\theta + vdt \quad (4)$$

$$y = r \sin \theta \quad (5)$$

여기서  $r$ 은 블레이드하나의 길이 이고  $v$ 는 이송속도 이다.  $\theta_1$ 에서  $\theta_2$ 까지 블레이드가 회전 할 때 블레이드가 지나가는 넓이 ( $S_a$ )를 구하는 적분 식은 식(6)-(9)와 같다.

$$S_a = \left| \int y dx \right| \quad (6)$$

$$= \left| \int_{\theta_1}^{\theta_2} r \sin \theta \times \left( -r \sin \theta + \frac{30v}{\pi\omega} \right) d\theta \right| \quad (7)$$

$$= \left[ \frac{r^2}{4} \sin 2\theta - \frac{r^2}{2} \theta - \frac{30vr}{\pi\omega} \cos \theta \right]_{\theta_1}^{\theta_2} \quad (8)$$

$$= \frac{r^2}{4} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) - \frac{r^2}{2} (\theta_2 - \theta_1) - \frac{30vr}{\pi\omega} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad (9)$$

블레이드에 의해 저장매체가 제거되는 부분의 넓이를 계산하기 위해서는  $S_a$  에서 원료가 없는 부분의 넓이 ( $S_a'$ )를 빼야 한다.  $S_a'$  을 구하기 위한  $y$ 값은 식(10)과 같다.

$$y = r \sin \theta_2 \quad (10)$$

$\theta_1$  에서  $\theta_2$  까지 회전 할 때 원료가 없는 부분의 넓이 ( $S_a'$ )를 구하는 식은 식(11)-(13)과 같다.

$$S_a' = \left| \int y \, dx \right| \quad (11)$$

$$= \left| \int_{\theta_1}^{\theta_2} r \sin \theta_2 \times \left( -r \sin \theta + \frac{30v}{\pi\omega} \right) d\theta \right| \quad (12)$$

$$= r^2 \sin \theta_2 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) + \frac{30vr}{\pi\omega} \sin \theta_2 (\theta_2 - \theta_1) \quad (13)$$

$S_a$  와  $S_a'$ 을 통하여 블레이드의 회전방향과 RDM의 이동방향이 같을 때 저장매체가 제거되는 넓이  $S_1$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_1 = S_a - S_a' = \frac{r^2}{4} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) - (\theta_2 - \theta_1) \left( \frac{r^2}{2} + \frac{30vr}{\pi\omega} \sin \theta_2 \right) - (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \left( \frac{30vr}{\pi\omega} + r^2 \sin \theta_2 \right) \quad (14)$$

### 2.2.2 진행방향이 반대인 부분

블레이드의 끝점을 P(x,y)로 가정하면 좌표  $x$  및  $dx$ 의 값은 다음과 같다. 좌표  $y$ 의 값은 식(5)와 같다.

$$x = r \cos \theta - vt \quad (15)$$

$$dx = -r \sin \theta d\theta - vdt \quad (16)$$

$\theta_1$ 에서  $\theta_2$ 까지 블레이드가 회전 할 때 블레이드가 지나가는 넓이 ( $S_b$ )를 구하는 적분 식은 식(17)-(19)와 같다

$$S_b = \left| \int y \, dx \right| \quad (17)$$

$$= \left| \int_{\theta_1}^{\theta_2} r \sin \theta \times \left( -r \sin \theta - \frac{30v}{\pi\omega} \right) d\theta \right| \quad (18)$$

$$= \left[ \frac{r^2}{4} \sin 2\theta - \frac{r^2}{2} \theta + \frac{30vr}{\pi\omega} \cos \theta \right]_{\theta_1}^{\theta_2} \quad (19)$$

$$= \frac{r^2}{4} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) - \frac{r^2}{2} (\theta_2 - \theta_1) + \frac{30vr}{\pi\omega} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \quad (20)$$

블레이드에 의해 저장매체가 제거되는 부분의 넓이를 계산하기 위해서는  $S_b$ 에서 원료가 없는 부분의 넓이( $S_b'$ )를 빼야 한다.  $S_b'$ 을 구하기 위한  $y$ 값은 식(10)과 같으며,  $\theta_1$ 에서  $\theta_2$ 까지 회전 할 때  $S_b'$ 을 구하는 적분 식은 식(21)-(23)과 같다.

$$S_b' = \left| \int y \, dx \right| \quad (21)$$

$$= \left| \int_{\theta_1}^{\theta_2} r \sin \theta_2 \times \left( -r \sin \theta - \frac{30v}{\pi\omega} \right) d\theta \right| \quad (22)$$

$$= r^2 \sin \theta_2 (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) - \frac{30vr}{\pi\omega} \sin \theta_2 (\theta_2 - \theta_1) \quad (23)$$

$S_b$ 와  $S_b'$ 을 통하여 블레이드의 회전방향과 RDM의 이동방향이 반대일 때 저장매체가 제거되는 넓이  $S_2$ 을 구할 수 있다.

$$S_2 = S_b - S_b' = \frac{r^2}{4} (\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) - (\theta_2 - \theta_1) \left( \frac{r^2}{2} - \frac{30vr}{\pi\omega} \sin \theta_2 \right) - (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \left( -\frac{30vr}{\pi\omega} + r^2 \sin \theta_2 \right) \quad (24)$$

### 2.2.3 RDM의 저장매체 제거능력

회전 블레이드가 반 바퀴 회전할 때 제거되는 저장매체의 면적  $S$ 는  $S_1$ 과  $S_2$ 의 합이다.

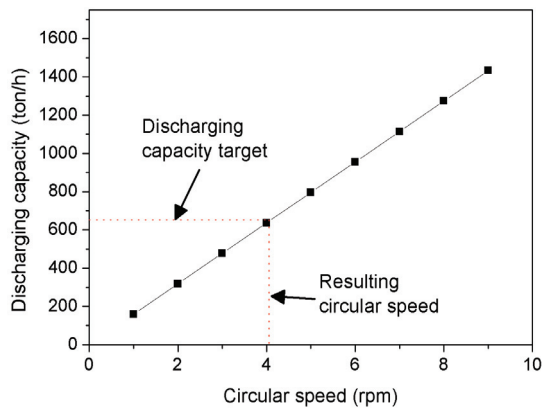


Fig. 3 Discharge capacity as circular speed

$$\begin{aligned}
 S &= S_1 + S_2 \\
 &= \left\{ \left( \frac{\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1}{2} \right) - (\theta_2 - \theta_1) \right. \\
 &\quad \left. - 2\sin\theta_2(\cos\theta_2 - \cos\theta_1) \right\} \times r^2
 \end{aligned} \tag{25}$$

RDM의 저장매체 제거능력은 단위시간당 제거되는 저장매체의 무게이다. 이를 계산하기 위해 단위 시간당 제거되는 저장매체의 부피( $V$ )를 구하면 식(26)과 같다.

$$V = 2S \times h \times \rho \times \omega \tag{26}$$

여기서  $h$ 는 블레이드의 높이,  $\omega$ 는 블레이드의 회전 속도,  $\rho$ 는 제거되는 저장매체의 밀도이다. 이를 통해 RDM의 저장매체 제거 능력(Discharging Capacity)은 RDM의 이송속도  $v$ 와 무관함을 확인하였다.

기본 구상된 석탄 제거에 사용되는 RDM의 설계 값으로 블레이드의 길이  $r$ 은 200 cm, 블레이드의 높이  $h$ 는 15 cm,  $\theta_1=150^\circ$ ,  $\theta_2=30^\circ$ , 석탄의 밀도  $\rho=1.8 \text{ g/cm}^3$  이다. 이 때 RDM의 블레이드 회전 속도에 따른 저장매체 제거 능력은 Fig. 3과 같다. 이 RDM의 요구되는 저장매체 제거 능력은 약 650 ton/h 이므로 계산 결과에 따르면 약 4 rpm 이상의 회전 속도로 블레이드를 회전시켜야 한다.

### 3. RDM의 블레이드구조해석

RDM이 저장매체를 제거할 때 블레이드를 회전시키는 구동부의 취약부분을 파악하고 설계가 안전한지 파악하기 위해 구조해석을 진행하였다.

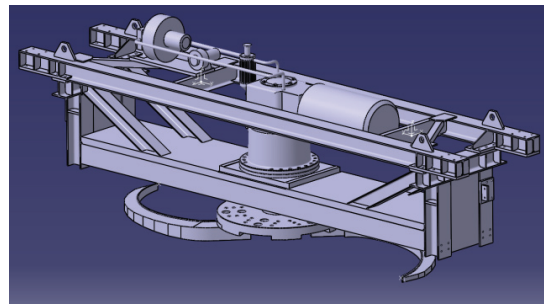


Fig. 4 Design of rotary discharge machine for coal silo

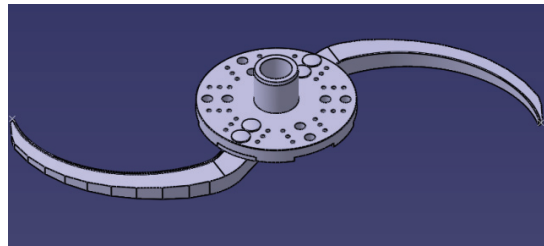


Fig. 5 Design of blade part

#### 3.1 모델링

Fig. 4에 RDM의 메인 프레임, 모터, 블레이드 허브, 블레이드의 파트 (Part)를 어셈블리 (Assembly) 한 모습을 보여주고 있다. 특별히, 하중이 집중될 것으로 예상되는 회전 블레이드와 허브가 체결된 부분은 Fig. 5에서 자세히 보여주고 있다.

#### 3.2 해석조건

##### 3.2.1 구속조건 및 접촉조건

RDM은 사일로 내부 터널을 주행하지만 본 논문에서는 블레이드의 구조해석만을 진행하고자 하므로 전체 프레임은 Fix로 고정하였다.

프레임 간의 접촉조건, 프레임과 모터부 간의 접촉조건은 블레이드 조건을 주어 용접을 한 것과 같은 조건을 주었다. 블레이드 허브와 모터부는 ‘역지 끼워 맞춤’ 조건을 주었다.

Fig. 6은 블레이드 허브와 블레이드가 체결된 모습을 자세히 보여주고 있는데 허브, 블레이드, 볼트 간의 접촉에 대한 경계조건은 ‘No Separation’ 과 ‘Bonded’ 조건을 적절히 주었다.

##### 3.2.2 하중조건

회전 블레이드가 회전하며 저장매체를 제거할 때 블레이드에 걸리는 하중을 계산하기 위해 앞선 설계 값을 이용하여 블레이드가 반 바퀴 회전할

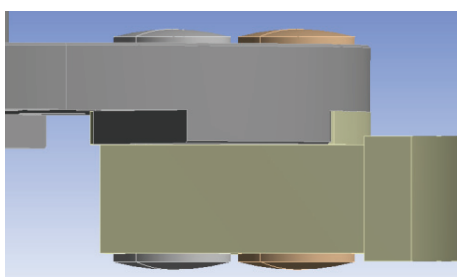


Fig. 6 Modeling of bolt locking part

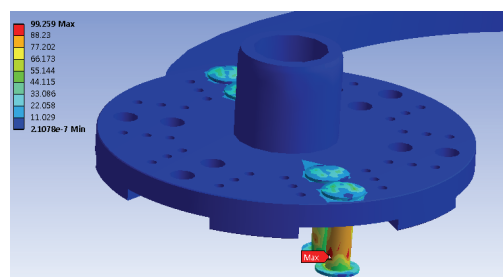


Fig. 9 Maximum point of equivalent stress

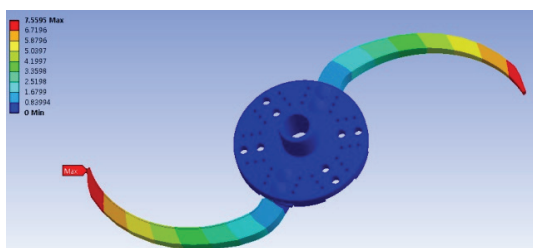


Fig. 7 Result of deformation analysis

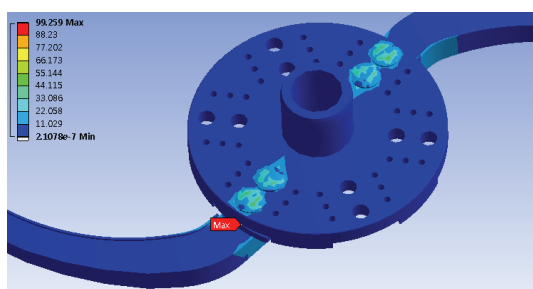


Fig. 8 Result of equivalent stress

때 제거되는 저장매체의 무게를 계산하면 제거되는 저장매체의 무게는 약 1320 kg 이다.

따라서, 회전 블레이드가 반 바퀴 회전 할 때 블레이드에 약 1320 kg의 하중이 걸리는 것을 해석의 하중조건으로 주었다.

### 3.3 해석결과

Fig. 7은 변형해석 결과이고 Fig. 8는 응력해석 결과이다. Fig. 9은 응력 최대값이 나타나는 부분을 나타내었다. 변형은 회전 블레이드의 가장 끝 부분에서 가장 크게 나타났으며 약 7.5 mm의 변형이 생겼다. 응력은 블레이드와 허브를 체결해주는 볼트 부분에서 가장 큰 응력인 약 99.2 MPa의 결과를 얻었으며 이는 항복강도인 245 MPa 보다 매우 작아 안전한 설계임을 알 수 있었다.

## 4. 결론

본 논문에서는 RDM의 저장매체 제거능력을 이론적으로 도출하고, 회전 블레이드의 구조해석을 통해 구조적 취약 부와 설계의 안전성을 파악하였다.

첫째로, RDM의 저장매체 제거능력은 이송속도  $v$ 와 연관이 없으며, 회전속도  $\omega$  및 블레이드의 형태에 따라 좌우된다. 석탄을 불출하기 위한 RDM의 모델의 요구되는 제거 능력은 650 ton/h이며, 이를 만족하기 위한 회전속도는 4 rpm임을 구할 수 있었다.

다음으로 구조해석 프로그램을 이용하여 구조적으로 취약한 회전 블레이드와 허브의 접촉부 구조해석을 수행하였다. 회전 블레이드가 저장매체를 제거할 때 블레이드에 약 1320 kg의 하중이 걸리게 되며 이를 하중 조건으로 주었을 때 최대 등가응력은 허브와 블레이드의 볼트 체결 부에서 약 99.2 MPa로 나타났다. 이는 항복강도보다 매우 낮은 값으로 본 모델은 안전함을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업단지공단 의 “산업집적지경쟁력강화사업” 으로 수행된 연구 결과물입니다. (과제명: SILO의 원료불출을 위한 회전 Wheel 형태의 Discharge 장치 기술 개발, 과제 번호: RGNC16005)

## REFERENCES

1. CAD Graphics Editorial Department, “Structure Analysis of Bolt,” CAD & Graphics, pp. 144-147, 2010.
2. Erwin, Kr., “Advanced Engineering Mathematics,” John Wiley & Sons, 10<sup>th</sup> Ed., pp. 15-46, 2012.

3. Yun, S. H. and Kim, Y. Y., "Analysis for the Structural Flexible Joint," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 643-644, 2013.
4. Hwang, J. and Namgung, S., "A Study on the Finite Element Analysis of Tire under Rolling and Loading Conditions," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 12, No. 3, pp. 101-109, 1995.
5. Jang, I. S., "The 3-Dimensional Finite Element Analysis of Minimum Implant Structure for Edentulous Jaw," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 2, pp. 148-155, 2008.
6. Kim, J. J., Kim, K., Seo, Y. S., Kim, J. W., Kim, J. N., et al., "Structural Analysis of the Gait Rehabilitation System of a Rail Type for Body-Weight Support Function," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 33, No. 9, pp. 761-768, 2016.
7. Son, I.-S., Kim, C.-H., Bae, S.-H., and Lee, J.-Y., "Rescue Lift Development Using Structural Analysis," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 1, pp. 111-116, 2015.
8. Bae, J. H., "A Study on the Structure Analysis of Window Bracket by Using Fluid-Structure Interaction Method," M.Sc. Thesis, Mechanical Engineering, Changwon National University, 2014.
9. Yoon, S. C., Kim, W. K., Jun, C. S., and Kim, M. Y., "Structural Strength Evaluation of a Carbody by Finite Element Analysis and Tests," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 60-65, 2005.