

콘 크러셔의 전달 하중 및 기여도 분석 Transfer Force and Contribution Analysis of Cone Crusher

김대지^{1,2} · 정진태^{2*} · 이창선³ · 송창헌^{1*}

Dae Ji Kim, Jintai Chung, Ho Yeon Lee, Chang Sun Lee and Chang Heon Song

Received: 28 Jul. 2022 Revised: 30 Aug. 2022, Accepted: 12 Oct. 2022

Key Words : Cone crusher(콘 크러셔), Transfer force(전달 하중), Transfer path analysis(전달경로분석), Contribution analysis(기여도 분석).

Abstract: The aims of this study was to estimate transfer force delivered to cone crusher housing and contribution of force transmission. The rock crushing condition caused vibrations in the cone crusher housing, which were experimentally measured, and frequency response functions (FRF) were also found through modal impact tests. Vibration data and frequency response functions were applied to the transfer path analysis (TPA) model. Next, transfer forces delivered to the cone crusher housing were quantified via the TPA method. Contribution of force transfer was also analyzed based on force estimation results. Finally, this study describes basic concepts and components of the TPA method and reviews its applicability to rotating machinery that experiences impact vibrations and forces.

1. 서 론

크러셔(Crusher)는 채석장이나 광산에서 채광된 광물 및 암석을 파쇄하여 규격 골재를 생산하는 장비이다. 골재 생산용 크러셔(Crusher)는 암석의 1차 파쇄를 담당하는 조 크러셔(Jaw crusher)와 콘의 회전에 의한 2차 파쇄를 통해 규격 골재를 생산하는 콘 크러셔(Cone crusher)로 구분된다¹⁾.

콘 크러셔의 크기, 구조 및 주요 부품을 Fig. 1에 도식화하였다. 콘 크러셔의 암석 파쇄 원리는 모터 등 외부로부터 전달받은 구동력을 원동축(Driving shaft)을 통해 콘 맨틀(Cone mantle)이 장착되는 콘 샤프트(Cone shaft)로 전달한다. 이후 콘 샤프트는 회전

운동을 하고, 하우징에 고정된 콘 케이브(Cone cave)와 간극의 효과로 발생하는 압축력을 통해 암석을 파쇄하여 규격 골재를 생산하는 장비이다.

크러셔 관련 연구사례를 살펴보면, 조 크러셔의 작동시 발생하는 충격하중 추정, 구조 안전성 평가를 위한 부하 측정 방안, 동적해석을 통한 구조안정성 및 진동 특성에 대한 다양한 연구²⁻⁶⁾가 활발히 진행되었다. 그러나 회전운동을 통해 암석의 2차 파쇄를 통해 규격 골재를 생산하는 콘 크러셔 핵심 부품에 전달되는 하중 및 기여도 분석에 대한 연구는 미흡한 수준이다.

1차 파쇄된 암석을 회전운동을 통해 골재화하는 콘 크러셔의 특성상 극한의 작업환경에 노출되어 있다.

또한 암석 파쇄로 인한 지속적인 충격하중이 주요 부품에 가해지고 최종적으로는 하우징에 전달된다. 이때 발생하는 충격하중은 크러셔 시스템의 구조안정성, 장비 수명 및 핵심 부품의 파손으로 인한 규격 골재의 품질에 직접적으로 영향을 미치는 요인이기 때문에 중요한 설계인자 중 하나이다. 이에 따라 콘 크러셔의 내구성 및 골재 생산 성능에 밀접한 관련이 있는 핵심 부품의 구조안정성 검증 및 강건설계를 위해서는 암석 파쇄 작업시 발생하여 전달되는

* Corresponding author: sch8310@kitech.re.kr and jchung@hanyang.ac.kr

1 Construction Equipment R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology, Gyeongsan, 38408, Korea

2 Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Ansan, 15588, Korea

3 SAMYOUNG PLANT CO., LTD, Anseong, 17541, Korea

Copyright © 2022, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

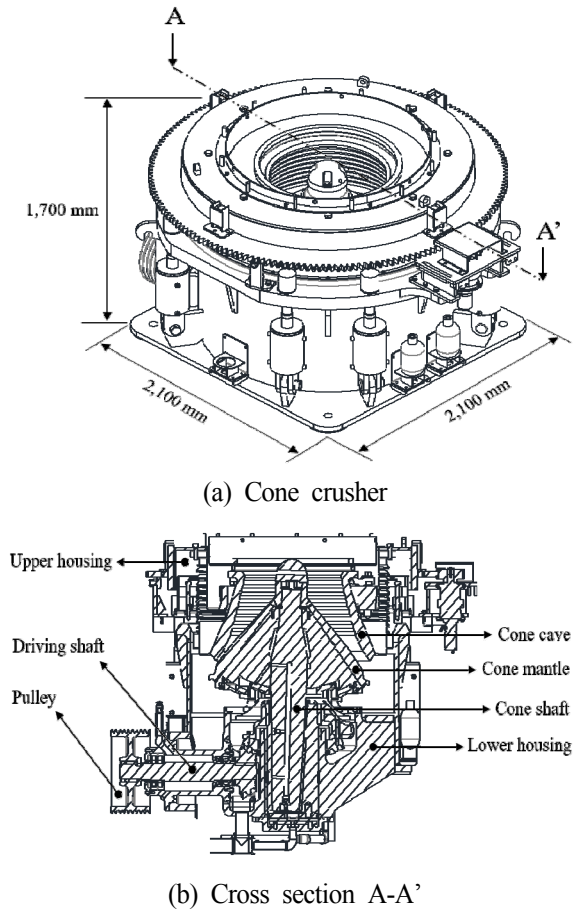


Fig. 1 Schematic diagram of cone crusher.

하중의 정량화 분석이 요구된다. 정량화된 하중은 건설장비 주요 부품의 강도설계를 위한 기준값 혹은 내구성 평가를 위한 시험하중으로 적용이 가능하기 때문이다⁷⁾.

하중이 발생하는 기계시스템에 대한 하중 측정 방법으로 로드셀 및 스트레인 게이지를 주로 이용하고 있다. 하지만 충격진동 및 하중이 발생하는 구조물⁸⁻⁹⁾이나 회전체에 적용하기에는 실험적 접근방법에 한계가 존재한다. 이는 스트레인 게이지의 이탈과 로드셀의 용량 초과를 비롯하여 회전부품에 센서 설치가 곤란하기 때문이다¹⁰⁻¹¹⁾. 따라서 본 연구에서는 진동기반 전달경로분석(Transfer path analysis, TPA) 방법을 채택하여 암석 파쇄시 콘 크러셔에 발생되고 최종적으로 하우징에 전달되는 하중 및 기여도 분석을 수행하였다.

2. 진동기반 전달경로분석법

2.1 진동기반 전달경로분석법의 이론적 배경

전달경로분석법은 가진원으로 부터 발생하는 소음

및 진동 에너지의 흐름으로 구조물의 주요전달경로를 파악할 수 있으며, 전달경로에 대한 각 부품의 하중 기여도의 실험적 평가가 가능한 방법이다⁷⁾.

진동기반 전달경로분석법은 기본적으로 전역시스템(Total system)을 능동부(Active system) 및 수동부(Passive system)로 구분된다(Fig. 2). 능동부는 진동 발생 주체가 되는 가진부, 수동부는 주요 하중의 전달경로 및 최종하중의 전달 위치가 포함된다⁹⁾. 이러한 능동 및 수동부의 상호작용을 통해 최종적으로 전달되는 하중의 추정과 기여도 분석이 가능한 기법이다. 전달경로분석법의 세부적인 내용은 Song et al. 2017의 연구⁸⁾를 참조하여 확인할 수 있다.

전달경로분석의 각 구성요소에 의한 수학적 관계는 식(1)에 나타내었으며, 최종적인 목표지점의 반응값은 구조 및 공기 기인에 의한 소음 및 진동으로 구성되어 있고, 각 소음원(가진력)과 전달경로에 대한 전달함수의 곱으로 정의 된다¹²⁾.

$$y_k(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{p}{F_i}(\omega) \cdot F_i(\omega) + \sum_{i=1}^n \frac{p}{Q_i}(\omega) \cdot Q_i(\omega) \quad (1)$$

여기서 y_k 는 최종적인 목표지점의 반응값, F_i 와 Q_i 는 각각 구조기인 가진력 및 음향 강도를 나타내며, p/F_i 와 p/Q_i 는 구조와 음향에 대한 전달함수를 나타낸다.

전달 하중 및 소음 강도의 정량화 방법에는 Fig. 3과 같은 과정을 거치며, 센서를 이용한 직접적인 측정 방법과 측정된 데이터를 이용하여 간접적으로 추출하는 방법이 있다. 소음 강도의 경우, 표면적과 표면속도를 이용하여 직접 측정하는 방법과 역행렬 기법과 같이 간접적으로 산출하는 방법이 있다. 또한 전달 하중의 경우, 동강성 기법, 역행렬 기법을 통해 간접적으로 분석이 가능하다.

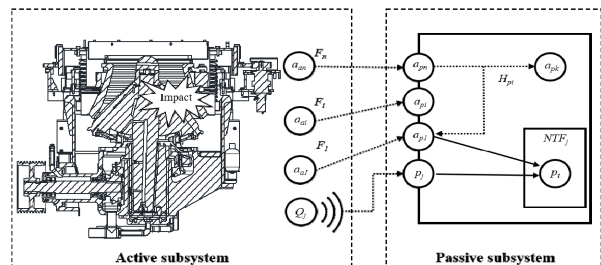


Fig. 2 Schematic of TPA model; active subsystem generating structural or acoustic loads and a passive subsystem responding to these loads¹⁰⁾

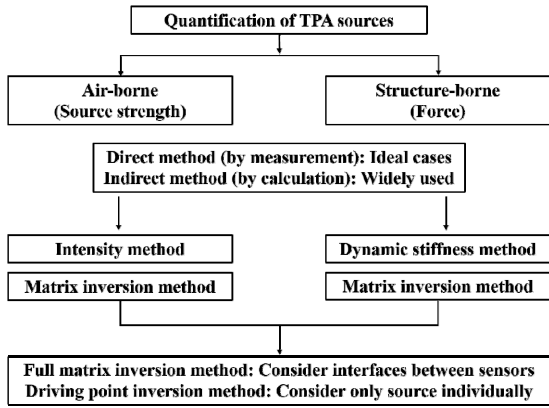


Fig. 3 Process for quantifying transfer forces via transfer path analysis techniques¹⁰⁾.

이때, 하중 계산에 중요한 인자로 작용하는 구조기인의 전달함수는 임팩트 해머 또는 가진기, 공기기인에 대한 전달함수는 소음 체적 속도를 이용하여 측정이 가능하다¹²⁻¹³⁾.

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 & \cdots & H_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M1} & \cdots & H_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 & \cdots & H_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{M1} & \cdots & H_{MN} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $[F_N]$ 는 해당 구조물의 전달 하중, $[H_{MN}]$ 는 $m \times n$ 전달함수 행렬로 모달 시험을 통해 얻어진 구조물의 고유특성인 전달함수를 나타내며 \ddot{x} 는 구조물의 진동응답 특성으로 정의된다.

3. 콘 크러셔 진동시험

3.1 콘 크러셔 진동시험 조건

본 연구는 암반 파쇄시 콘 크러셔의 발생 진동, 고유특성 및 최종적으로 각 부품으로 전달되는 하중의 정량적 도출을 목적으로 수행되었다. 콘 크러셔의 암반 파쇄조건에서 발생하는 진동 측정은 Fig. 4와 같이 충격용 3축 가속도 센서 72채널을 사용하여 시험을 수행하였다. 부착 위치는 상단, 중단, 하단으로 콘 크러셔의 전체적인 진동 부하 측정이 가능한 위치로 선정하였다. 데이터 계측 및 분석은 SIEMENS 사의 SCADAS Mobile DAQ System과 Test lab. S/W를 이용하여 전체적인 진동시험을 제어하였다. Table 1에는 진동시험의 조건과 시험에 적용된 콘 크러셔의 작동

조건을 제시하였으며, Table 2에는 시험에 사용된 콘 크러셔의 주요 사양을 나타내었다.

콘 크러셔의 암반파쇄 시험은 Fig. 5와 같이 대략 100~200mm 크기의 1차 파쇄된 암석을 적용하였다.

콘 크러셔 부하시험에 앞서 대상 암석의 역학적 물성 및 압축강도 측정이 선행되어야 한다. 이는 압중(연암, 보통암, 경암)별 상이한 압축강도¹⁴⁾의 효과로 콘 크러셔 주요 부품에 전달되는 하중 및 부하 특성의 분석을 위해서는 암석의 불균질성과 이방성의 효과를 최소화하고 명확한 대상 암종의 강도 기준이 수립되어야 하기 때문이다. 하지만 본 시험의 경우,

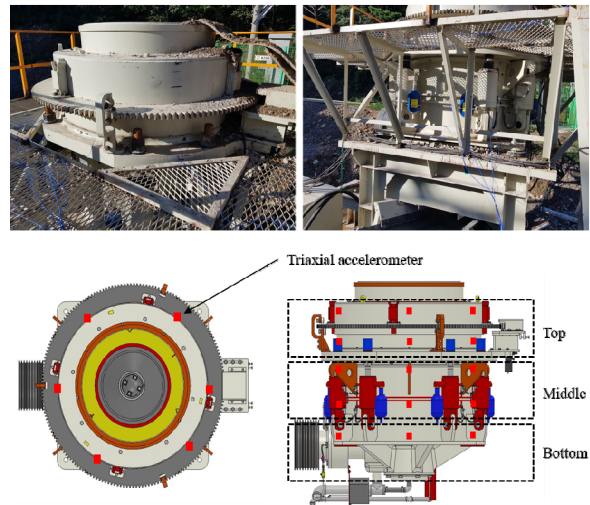


Fig. 4 Installation positions of tri-axial accelerometers for vibration test.

Table 1 Parameters for vibration test and operating condition for the cone crusher.

Item	Parameters	Value
Tracking	Measurement method	Time
	Duration	30 sec
	Increment	0.5 sec
Acquisition	Bandwidth	6,400 Hz
Cone crusher	rpm	600

Table 2 Specification of the cone crusher.

Model	Specification	Value
MC-300	Feeding size(close)	270 mm
	Feeding size(open)	305 mm
	Crushing capacity(min)	220 ton/hr
	Crushing capacity(max)	480 ton/hr
	Motor capacity	220 kW
	rpm	550-600



Fig. 5 Rock specimen used for cone crusher vibration test.

석산 현장이라는 특성상 시험에 적용된 암석의 물성 취득을 수행하지 못한 한계가 존재한다. 추후 상이한 역학적 물성을 가지는 암석(연암, 보통암, 경암)을 대상으로 압축강도 측정 후 암종별 강도 기준을 수립하여 암반 강도별 전달하중의 효과를 분석할 예정이다.

3.2 주요 하중전달경로 선정

콘 크러셔의 구조를 보면, 상부측으로 1차 파쇄된 암석이 투입되고, 콘 샤프트가 회전하면서 1차 파쇄된 암석을 골재화 시킨다. 따라서 콘 크러셔의 구조상 암반을 파쇄하는 주요 범위가 결정되고, 이 부위는 Fig. 6에 제시하였다.

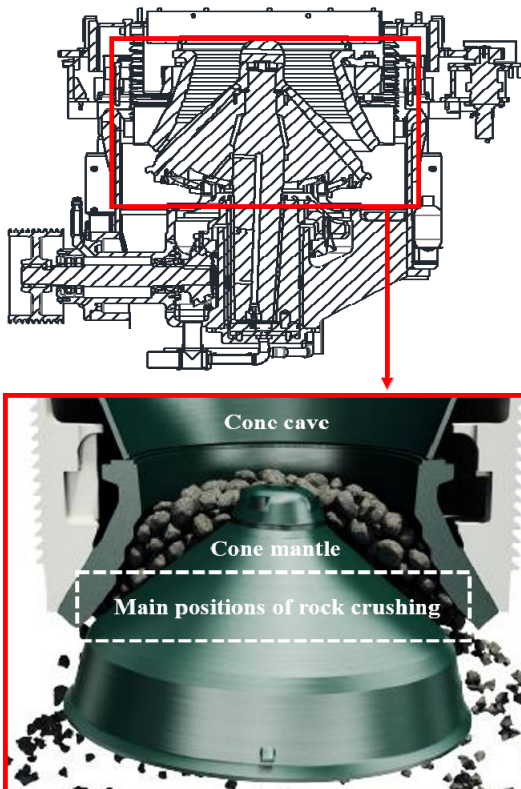


Fig. 6 Main positions of rock crushing work

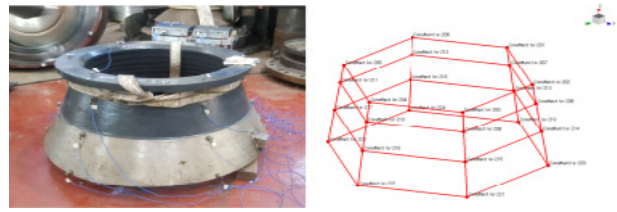


Fig. 7 Installation positions of triaxial accelerometers for modal impact test.

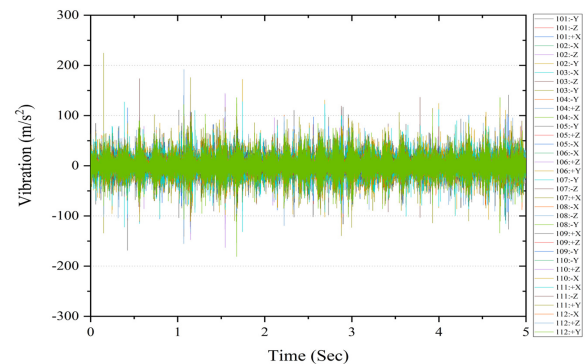
암석 파쇄작업이 진행될 때, 콘 샤프트와 콘 맨틀에 충격하중 및 반력이 발생하기 때문에 하중 발생과 전달에 기여가 높을 것으로 예상되는 부품 즉, 콘 맨틀을 하중의 주요 전달경로로 선정하였다.

여기서 주요 전달경로는 암반 파쇄 주체가 되는 콘 샤프트 즉, 가진원과 구성 부품 사이에서 하중전달에 기여하는 매개체이다. 이러한 하중 전달에 기여가 높은 매개체의 고유특성을 규명해야 매개체를 통해 전달된 하중의 산출이 가능하다.

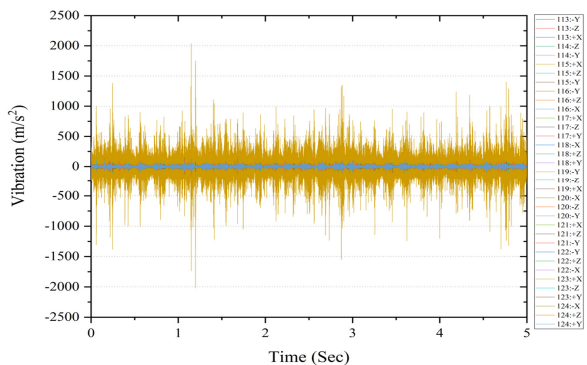
콘 맨틀의 진동시험을 위한 센서의 부착 위치는 Fig. 7에 제시하였으며, 총 72채널의 센서를 이용하였다.

3.3 콘 크러셔 암석 파쇄시 진동시험 결과

Fig. 8에는 부하 조건의 진동량 측정 결과를 제시하였다.



(a) Top position



(b) Middle and bottom positions

Fig. 8 Measured vibration signal from the operating cone crusher.

3.4 콘 크러셔 주요부품의 전달함수 취득

진동기반 하중의 전달경로분석을 위해서는 대상 시스템의 고유특성인 전달함수 취득이 필요하다. 시스템의 전달함수는 모달 시험을 통해 취득할 수 있으며, 그 결과는 주파수응답함수로 나타난다.

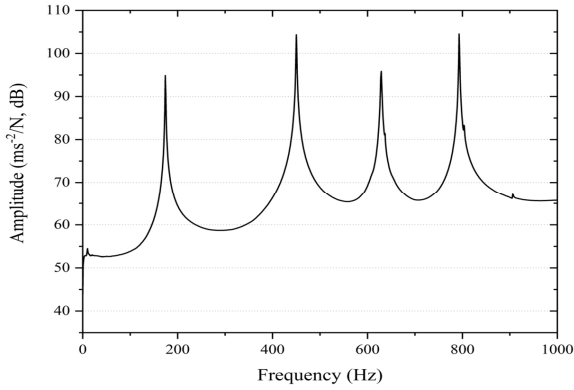
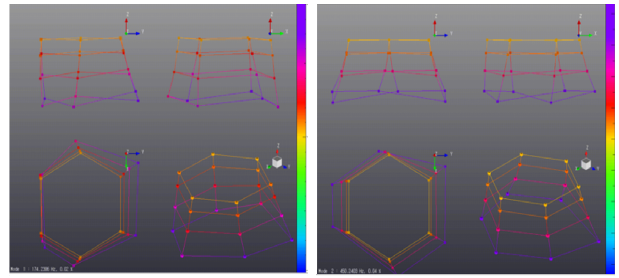
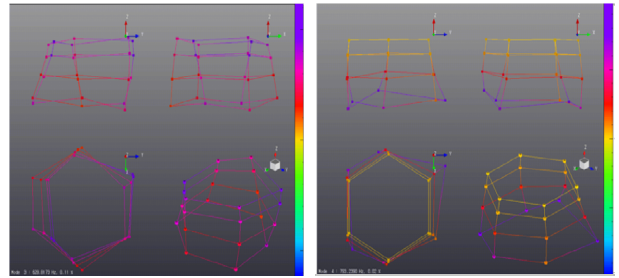


Fig. 9 Measured frequency response function based on modal impact test.



(a) 1st Mode (b) 2nd Mode



(c) 3rd Mode (d) 4th Mode

Fig. 11 Mode shapes of the cone cave.

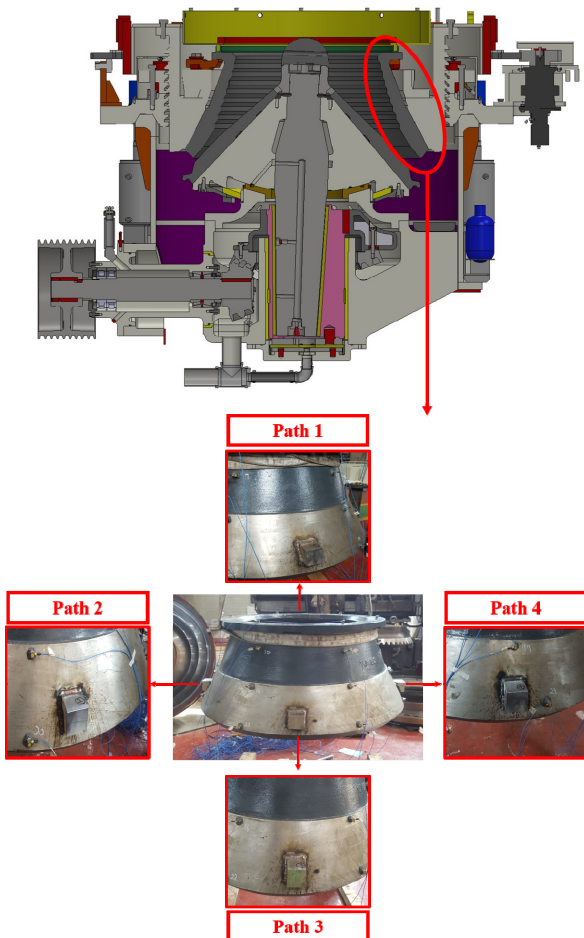


Fig. 10 Position of the key paths in the cone cave and tri-axial excitation jig for FRF acquisition.

Table 3 Results of mode shapes

Mode No.	Mode shapes	Hz
1	Bending and torsion	174.2
2	Torsion	450.3
3	Torsion	629.0
4	Torsion	793.2

콘 크러셔의 하중 전달에 기여가 높을 것으로 예상되는 콘 맨틀을 대상으로 모달 시험을 수행하여 취득한 전달함수의 결과는 Fig. 9에 제시하였다. 전달함수 취득을 위한 가진 위치는 가진용 지그를 통해 3방향 가진이 가능하도록 하였다 (Fig. 10). 이는 콘 크러셔의 작동시 주된 하중이 적용하는 방향은 수평이지만, 암석 파쇄로 인한 3방향 진동 효과(roll, pitch, yaw)로 각 부품에 충격하중이 전달된다. 따라서 전달되는 X, Y, Z 방향의 모든 충격하중을 고려하였다. Fig. 11에는 콘 케이브 모드형상의 분석 결과를 제시하였다. 콘 케이브의 지배적인 모드 특성은 비틀림 모드(Torsion mode)가 주로 발생함을 확인하였다.

비틀림 모드가 지배적인 이유는 콘 케이브의 형상의 효과로 판단된다. Table 3에는 각 모드형상과 이에 상응하는 주파수 대역을 정리하였다.

4. 콘 크러셔 전달하중 및 기여도 분석

본 연구의 주된 목적은 암석 파쇄 작업시 콘 크러셔에 발생하는 충격하중의 정량화와 하중의 전달기여도 분석에 목적이 있다. 이에 진동기반 전달경로분석법을 통해 콘 크러셔의 작동시 발생하는 방향별, 부위별 하중의 도출이 가능하였다.

Fig. 12에는 시계열 전달경로분석을 통해 암석 파쇄 작업시 주요 부품인 콘 케이브에 발생되고, 최종적으로 하우징에 전달되는 하중 이력을 제시하였으며, 정략적인 값은 Table 4에 정리하였다. 또한 방향별 하중 전달에 대한 기여를 정량적으로 분석하면 X, Y, Z방향으로 발생되고 전달되는 하중은 각각 347.8 kN, 604.0 kN, 94.1 kN으로 도출되었다.

Fig. 13은 주파수 영역에서 분석한 결과로, 각 주요 경로를 통해 최종적으로 하우징으로 전달되는 하중의 크기에 대한 주요 경로의 기여도를 나타내었다.

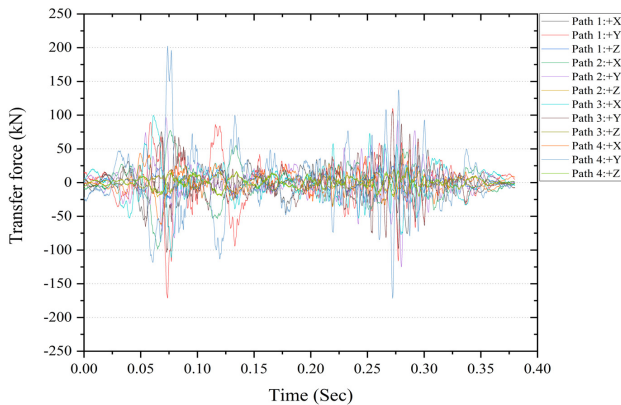
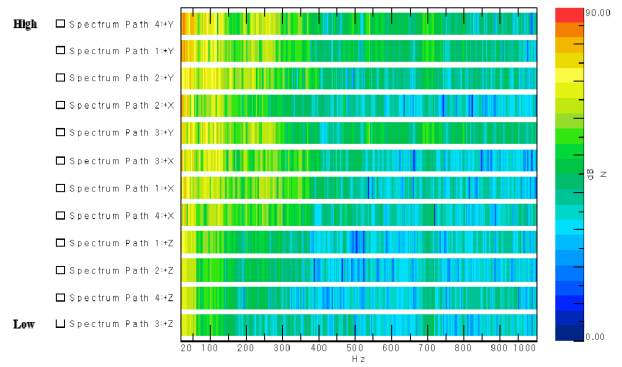


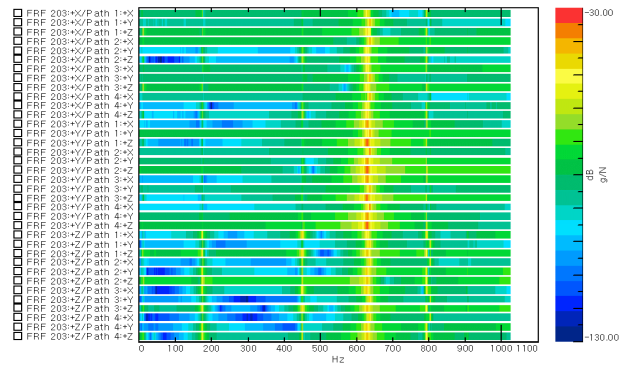
Fig. 12 The transfer force profile of cone crusher.

Table 4 Analysis results of transfer forces.

Path No.	Axis	Force (kN)		Max Force (kN)
		+ Dir.	- Dir.	
Path 1	X	75.6	75.7	75.7
	Y	110.1	171.2	171.2
	Z	24.6	28.8	28.8
Path 2	X	77.6	98.9	98.9
	Y	97.3	124.9	124.9
	Z	22.1	21.5	22.1
Path 3	X	99.7	111.0	111.0
	Y	105.6	103.5	105.6
	Z	19.7	18.3	19.7
Path 4	X	43.6	62.2	62.6
	Y	202.3	171.6	202.3
	Z	23.4	21.0	23.4



(a) Contribution of the forces delivered to the housing through the path.



(b) Vibration transfer function map.

Fig. 13 Analysis results of transfer force in the frequency domain.

Fig. 13은 주파수 영역에서 분석한 결과로, 각 주요 경로를 통해 최종적으로 하우징으로 전달되는 하중의 크기에 대한 주요 경로의 기여도를 나타내었다. 이러한 결과로 볼 때, 암석 파쇄시 발생하는 하중의 주된 기여 방향은 X, Y방향이며, Z방향은 하중 전달의 기여가 낮음을 알 수 있다.

Fig. 13(b)의 주파수별 하중 전달에 대한 기여를 확인할 수 있는 진동전달함수맵 (Vibration transfer function map)을 나타낸다. 진동전달함수맵의 결과로 볼 때, 최대 하중은 약 400 Hz이내의 저주파 대역에서 발생됨을 알 수 있다. 또한 고주파 영역대 즉, 2,000 Hz 이상의 주파수 대역에서는 하우징에 전달되는 하중의 영향은 상대적으로 미미함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 일반적인 하중 측정 방법인 로드셀 및 스트레인 게이지의 적용이 불가능한 회전체를 대상으로 전달경로분석법을 도입하여 발생하는 하중을

추정하였다. 콘 크러셔의 암석 파쇄 작업시 발생하는 방향별, 부위별 정량적인 충격하중을 도출하였으며, 각 부위별 발생하고 전달되는 하중의 기여도를 확인하였다. 본 연구의 결과는 제품 설계단계에서 수치해석 수행시 중요한 입력값으로 적용될 수 있으며, 구조안전성 평가 및 최적화에 중요한 데이터로 활용될 수 있을 것이다.

본 시험의 신뢰성을 위해서는 암석의 특성이 적용된 전산해석 기법과 물성 시험을 통해 대상 암석을 구성하고 있는 물질에 따른 발생 하중의 변동을 분석할 필요가 있다. 또한 본 논문에서 제안하는 회전체 하중 측정 방법의 대표성을 위해서는 추가적인 검증 시험이 필요하다. 더불어, 본 연구에서 수행한 회전체를 대상으로 진동기반 하중 측정 및 평가 방법을 기반으로 추가적인 연구가 진행된다면, 직접적으로 하중 측정이 상대적으로 어려운 다양한 회전기계의 작동 하중을 추정할 수 있는 새로운 개념이 제시될 수 있을 것이라 판단된다.

후 기

이 연구는 기계산업핵심기술개발사업 (20014563, 400ton/hr 골재생산 및 선별이 가능한 통합제어 기반 자동 공정용 Dual power 구동방식의 모바일 크러셔 시스템 개발)의 지원을 받은 연구결과입니다.

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) D. J. Kim, J. Y. Oh, J. J. Kim, C. S. Lee and C. H. Song, "Estimation of impact loads in a cone crusher by Transfer Path Analysis.," KSME Spring Conference, Paper No. KSME 21IT-Th01P04, pp. 65-66, 2021.
- 2) S. J. Hong and H. J. Yang, "A Study on the Impact Load Quantification of the Jaw Crusher," Journal of Drive and Control, Vol.16 No.2 pp.1-7, 2019.
- 3) K. B. Kwon, S. S. Kwon, K. Y. Kim, S. J. Hong and B. W. Choi, "Load measurement method for the structural safety assessment of Jaw Crusher," KSPE Autumn Conference, pp. 616, 2015.
- 4) C. H. Song, S. S. Kweon, M. G. Cho, D. G. Kim and B. W. Choi, "Vibration Analysis of Rock Fragmentation Device for a Jaw Crusher," KSPE Autumn Conference, pp. 621-622, 2015.
- 5) H. S. Lee, J. U. Ha and J. K. Park, "A Study on the Structural Safety Determination through Dynamic Analysis of Jaw Crusher," KSME Spring Conference, Paper No. KSME 2020R6012, pp. 23-24, 2020.
- 6) M. K. Seo and H. Y. Lee, "Development of Aggregate Recognition Algorithm for Analysis of Aggregate Size and Distribution Attributes," Journal of Drive and Control, Vol.19 No.3 pp.16-22, 2022.
- 7) D. J. Kim, J. W. Cho, J. Y. Oh, J. Chung and C. Song, "The Theory of Load Estimation Method and Case Study of Hydraulic Breaker for Rock Drilling," Tunnel and Underground Space, Vol. 29, No. 3 pp.135-147, 2019.
- 8) Y. K. Kang and J. S. Jang, "A Study on Manually and Continuously Variable Impact Force Control Device Development for Hydraulic Breakers", Journal of Drive and Control, Vol.17, No.4, pp.46-53, 2020.
- 9) Y. K. Kang, J. S. Jang, "Feasibility Study on the Vibration Reduction for Hydraulic Breaker by the Dynamic Vibration Absorber" Journal of Drive and Control, Vol.18 No.4 pp.65-71, 2021.
- 10) C. H. Song, D. J. Kim, S. S. Kweon, D. Y. Shin and Y. K. Kang, "Analysis of Impulse Loads in Hydraulic Breaker using Transfer Path Analysis (TPA) Method," Journal of Drive and Control, Vol. 13, No. 1 pp.72-77, 2016.
- 11) C. H. Song, D. J. Kim, S. S. Kweon, D. Y. Shin and Y. K. Kang, "Estimation of impact loads in a hydraulic breaker by transfer path analysis," Shock and Vibration, Article ID 8564381, Vol. 2017, pp.1-15, 2016.
- 12) P. Gajdatsy, K. Janssens, W. Desmet and H. V., Auweraer, "Application of the transmissibility concept in transfer path analysis," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 24, No. 7, pp.1963-1976, 2010.

- 13) D. S. Hwang, D. J. Hur and H. S. Hwang, "Understanding Algorithm of Time Domain Transfer Path Analysis," Proc. of the KSME Autumn Conference, pp.3173-3177, 2011.
- 14) C. Song, J. Chung, J. S. Cho and Y. J. Nam, "Optimal Design Parameters of a Percussive Drilling System for Efficiency Improvement," Advances in Materials Science and Engineering, Article ID 2346598, Vol. 2018, pp.1-13, 2018.