

임팩트햄머 드릴의 슬립토크 설계 제어를 위한 분석 프로세스 고찰

Study on Analysis Process for Slip Torque Design Control of Impact Hammer Drills

김승현¹, 권상엽¹, 고동신¹, 허덕재^{1,✉}, 동광호²
Seung Hyeon Kim¹, Sang Youp Kwon¹, Dong Shin Ko¹, Deog Jae Hur^{1,✉}, and Kwang Ho Dong²

¹ 고등기술연구원 산연협력센터 (R&D Center for Research & Business Cooperation, Institute for Advanced Engineering)

² (주)계양전기 (Keyang Electronic Machinery Co., Ltd.)

✉ Corresponding author: djhur@iae.re.kr, Tel: +82-31-330-7436

Manuscript received: 2015.8.6. / Revised: 2015.12.21. / Accepted: 2015.12.29.

This paper describes the derivation methodology of the working torque predictive model that can be used in the initial design stages of the impact hammer tool. The working torque control mechanism is designed, taking into account various factors, such as the force of the spring and friction. Firstly, the analysis dynamic model for working environments was modeled as an additional bush and spring, and verified by comparing the test results of the working torque. Secondly, the main performance parameters of the working torque were theoretically defined by analyzing the operating mechanism. The equation to predict the working torque was derived using the dynamic analysis results according to the value changes of the parameters. The prediction equation of the working torque was validated by comparing the predicted results with the experimental data. The error difference between the experimental data and the predictive model results was found to be 8.62%.

KEYWORDS: Dynamic characteristics (동적 특성), Power tool (전동공구), Working torque system (작업 토크 시스템)

기호설명

k= Spring constant
 μ = Friction coefficient
 α = Angular acceleration of ring gear
r= Radius of ring gear
 θ = Angle of ring gear
F_{spr}= Force of spring
FG= Rotation force of ring gear

1. 서론

일반적으로 전동공구는 모터, 기어박스, 토크 조절장치, 충격부 등으로 구성되어 다양하고 복잡한 동력 전달구조를 가지고 있다.¹ 동력 전달구조 중 하나인 슬립 메카니즘 구조는 작업부로 전달되는 작업토크를 조절하는 역할을 한다. 회전형 슬립 메카니즘 구조는 스프링, 볼, 볼하우징과 홈이 있는 링기어 (Ring Gear)가 서로 상호접촉하며 회

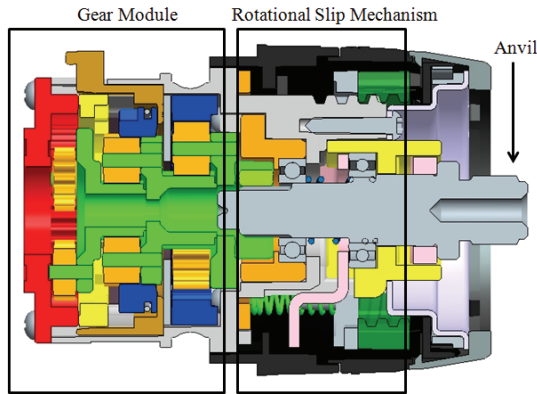


Fig. 1 Section view of the drive structure in impact hammer drill

전하는 형태이다. 작업부로 전달되는 토크는 스프링의 압축 길이에 따른 스프링력과 접촉과형 그리고 부품간의 마찰에 의해 결정된다.² 이러한 역학적 관계는 현재 이론적 정리가 부족하기 때문에 시험기반으로 프로토타입을 제작하여 작업토크를 조절하는 성능인자를 결정하는 시행착오적인 방법을 활용하고 있다. 따라서 시스템 구조의 동역학적 모델을 수립하고 주요 설계변수의 변화에 따른 영향을 분석하여 체계적인 해석방법 및 설계기준을 제시함으로써 슬립 메커니즘의 설계를 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구에서 대상으로 하는 임팩트햄머드릴의 구조는 Fig. 1과 같다.

본 연구의 목표는 임팩트 햄머 설계 초기 단계에서 슬립 메커니즘 구조의 설계인자 설정을 위한 가이드라인으로 활용될 수 있는 예측모델을 구축하는 것이다. 작동 토크를 해석에 활용한 동역학 해석 모델은 신뢰성을 향상시키기 위해 시험결과를 반영하여 해석모델을 구축하였으며, 모델링 프로세스를 제시하였다. 또한, 슬립 메커니즘의 동작을 분석하여 주요 성능인자를 선정하고 이론적으로 정리하였으며 그 특성을 고찰하였다. 성능인자의 변화에 따른 다물체 동역학 해석을 수행하여 다양한 경우에 따른 결과를 얻었으며, 이를 이용한 회귀식을 도출하였다.

본 논문의 연구 추진 프로세스를 Fig. 2에 나타내었다. 첫 번째로 작업토크 해석을 위한 동역학 모델링을 구축하였으며, 모델의 해석 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 시험특성 인자를 적용하였고, 시험 결과와 상관성 분석을 통한 모델을

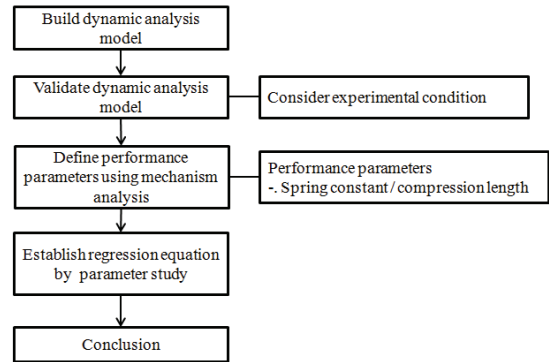


Fig. 2 Study procedures of the prediction equation for the initial working torque design parameters

검증 하였다. 두 번째는 슬립 메커니즘 분석을 통해 주요 성능인자를 정의하였다. 그리고 정의된 성능인자들을 3-4 수준으로 변경하여 동역학 해석을 수행하였으며, 이를 통해 도출된 결과를 바탕으로 설계 초기에 작업토크를 예측할 수 있는 회귀식을 도출하였다.

2. 본론

2.1 슬립 메커니즘 및 동역학 모델링

2.1.1 슬립 메커니즘

링기어는 모터에서 발생된 토크가 3단의 유성기어를 통해 전달된 동력에 의해 회전운동을 한다. 링기어가 회전하면서 볼 (Ball)이 경사면에 닿게 되는데, 이때 스프링이 누르는 힘에 따라 볼이 경사면을 넘지 못하고 고정되면서 토크 (Torque)가 최종 동력전달부로 전달이 되는 구조이다.

2.1.2 동역학 모델링

Fig. 1에서 나타난 바와 같이 슬립토크 구조의 링기어는 일반 유성기어의 링기어와 달리 링기어 위에 경사면과 볼 그리고 볼이 지나갈 수 있는 홈으로 구성 되어있다. 또한 볼 위에는 수직방향의 이동을 제외한 5개의 자유도가 구속된 고리 (Collar)와 고리를 밀어주는 스프링으로 구성 되어 있다. 총 6개의 경사면, 볼, 스프링으로 구성되어 있으며 그 형상을 간략하게 나타내면 Fig. 3과 같다.

다물체 동역학 해석은 상용 S/W인 DAFUL (Virtual Motion社, Korea)을 활용하였다. 그라운드 (Ground)와 하우징 (Housing), 하우징과 토크 너트 (Torque Nut)는 고정조인트 (Fixed Joint)로 6자유도

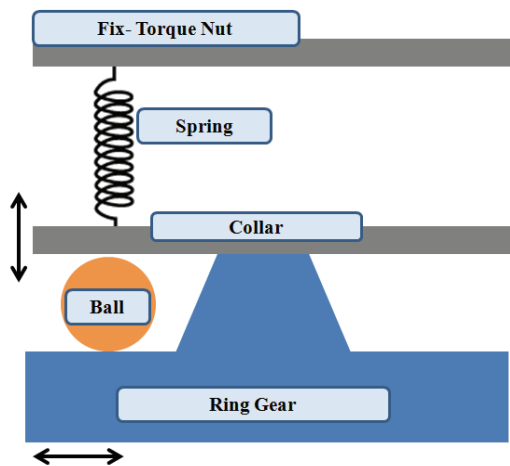


Fig. 3 Diagram of slip mechanism constructions

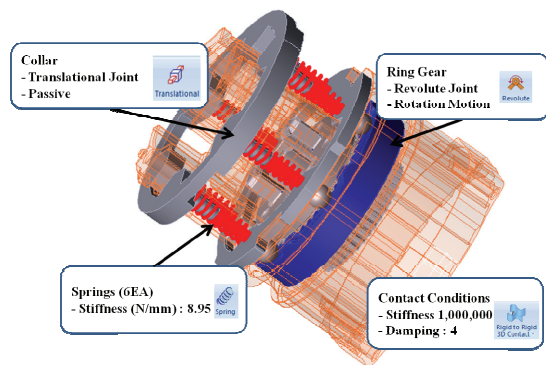


Fig. 4 Multi body dynamics modeling of working torque analysis

모두구속 하였다. 그리고 링기어는 하우징을 기준으로 회전조인트 (Revolute Joint)를 적용하여 1자유도의 회전 운동을 하도록 하였다. 고리는 하우징을 기준으로 병진조인트 (Translational Joint)를 적용하여 1자유도의 병진운동을 하도록 하였다.

스프링은 토크 너트와 고리 사이에 위치하고 있으며, 해석에 활용된 스프링 강성 값은 실제품의 측정값을 적용하였다. 볼의 경계조건은 볼과 접촉되는 링기어, 고리, 하우징에 대하여 접촉 조건을 부여하였다. 또한, 동력 전달부를 구현하기 위해 선 기어 (Sun Gear, 1개), 유성기어 (Planetary Gear, 5개), 캐리어 (Carrier, 1개)를 접촉 모델링하고, 접촉 조건은 윤활제와 굴림 마찰의 특성을 고려하여 마찰계수 0.01을 적용하였다.³ Fig. 4에 동역학 해석모델의 경계조건을 나타내었다.



Fig. 5 Measurement device configuration for working torque test

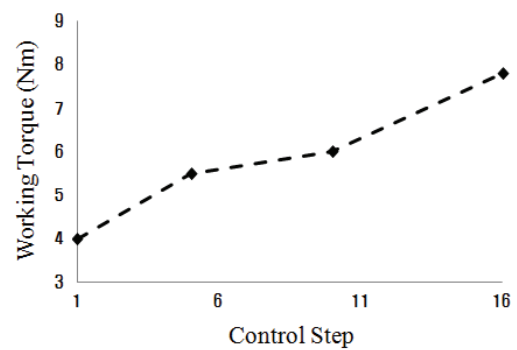


Fig. 6 Working torque measurement results in according to control step

2.2 시험환경 모사

2.2.1 작업 토크 시험

작업토크 실험은 유압식 피스톤을 사용하여 공구를 동작시키고, 0.5s 구동 후 작업부에 설치된 토크 미터 (UFR-16, URYU SEISAKU社, Japan)의 값이 변동없이 안정된 상태에서 값을 측정하였다. 작업 토크의 측정 오차를 최소화하기 위해 공구를 Fig. 5와 같이 지그로 고정하고 측정을 수행하였다.

슬립 메커니즘 구조를 살펴보면, 단수가 증가함에 따라 토크 너트가 압축된다. 이에 따라 스프링 초기 압축거리가 증가하여 작용하는 스프링 힘은 증가하고, 이들 인자는 슬립토크에 영향을 준다. 시험결과 단수 (Control Step)가 증가할수록 슬립토크가 증가하는 경향을 보이는 것을 확인하였다. Fig. 6에 1단과 5단 그리고 10단과 16단의 작업 토크 측정 결과를 나타내었다.

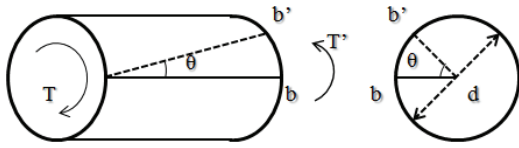


Fig. 7 Relation diagram between twist angle and torque

토크 미터의 측정 원리는 다음과 같다. 축에 토크 T가 작용하면 축은 θ 만큼의 비틀림이 발생한다. 따라서 토크 T와 비틀림 각 (Twist Angle) θ 사이의 관계는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다(Fig. 7). 이러한 비틀림각을 스트레인게이지 혹은 광전센서를 통해 검출하여 토크를 측정한다.⁴

$$\theta = \frac{32L}{\pi d^4 G} T \quad (1)$$

일반적으로 토크미터의 영향을 무시하고 강체로 모델링 하는 경우가 많으나 이는 큰 오차를 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 9). 본 연구에서는 이러한 측정 상황을 구현하고자 6 자유도에 대한 강성과 감쇄를 조절할 수 있는 부쉬 요소 (Bush Element)를 적용하였다.

2.2.2 작업환경 모사

Fig. 8과 같이 동력이 전달되는 끝단 (캐리어)에 부쉬 요소를 설정하고 회전축 회전의 강성과 감쇄를 조절하여 시험과 유사한 결과를 도출하는 수치를 선정하였다.

부쉬 요소의 감쇄 특성에 따른 작업 토크를 고찰 하기 위하여 감쇄 변화에 따른 해석결과 Fig. 9에 나타난 바와 같이 매우 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 감쇄값이 10 N·mm·sec/rad 이하 일 때는 캐리어가 정상적인 복귀를 하지 못하여 이상 거동이 나타난다. 그리고 100 N·mm·sec/rad 이상일 경우 과도한 토크가 발생하는 강체 모델과 유사한 현상이 발생한다.

또한 부쉬요소의 강성에 대한 특성을 고찰하였다. Fig. 10은 강성 변화 따른 작업 토크의 특성을 나타낸 것이다. 강성이 증가함에 따라 최대 토크가 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

실험장치의 강성 및 감쇄 값은 정확한 단일값을 얻을 수 없어 장비의 거동과 유사한 감쇄값 30 N·mm·sec/rad과 강성값 30,000-50,000 N·mm/rad을 적용하여 해석하였고 시험결과와 비교하여 최적의 값을 선정하였다. 시험환경을 적용한 해석으로 감

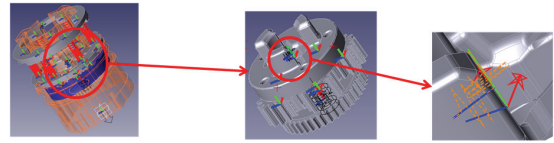


Fig. 8 Pictures of the application position and shape of the bush element

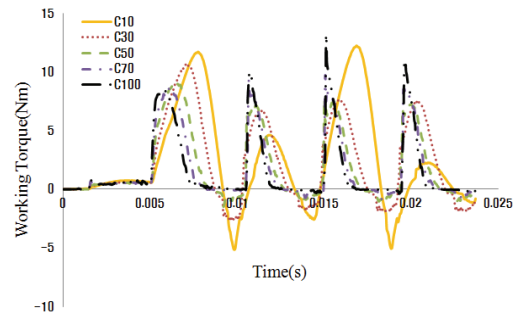


Fig. 9 Results of working torque according to damping values

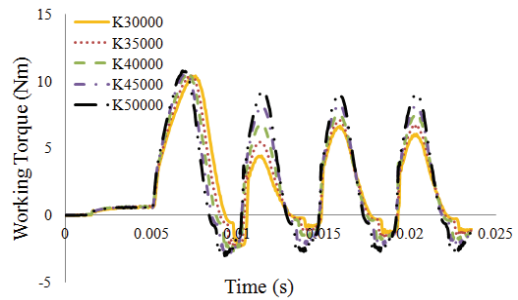


Fig. 10 Results of working torque according to stiffness values

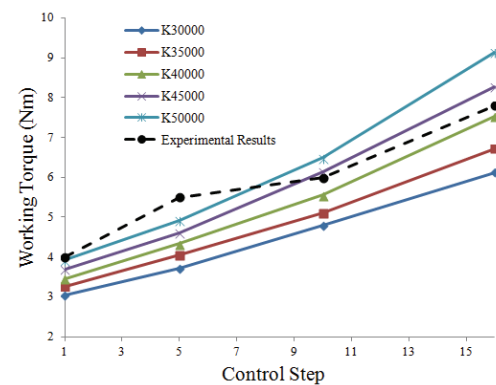


Fig. 11 Graph of comparing test result and analysis results

쇄값 30 N·mm·sec/rad, 강성값 45,000 N·mm/rad을 적용하여 해석한 결과 시험결과와 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 위의 강성 및 감쇄값을 적용한 결과와 실험 결과의 오차율을 계산한 결과 약 8% 이내의 오차를 확인하였다(Fig. 11).

2.3 주요 설계 인자 변경에 따른 회귀식 도출

2.3.1 메커니즘 분석

메커니즘은 정적인 상태의 작업 토크 (Torque_{Gear})와 동적인 상태의 작업 토크 (Torque_{Inertia})을 고찰하였다. 정적인 상태와 동적인 상태의 자유물체도 및 발생력을 Figs. 12와 13에 나타내었다.

스프링에서 발생하는 힘과 링기어에서 발생하는 힘의 관계를 이용하여 식(6)과 같이 정적 상태의 작업토크를 도출할 수 있다. 동적인 상황에서는 정적인 상황에서 발생하는 힘 외에 링기어회전 관성에 의한 토크의 영향(식(7))을 받으며 이를 반영한 수식들의 관계를 이용하여 최종 발생 토크를 계산하면 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.⁵ 이러한 분석을 통하여 작업토크에 영향을 미치는 인자를 고찰하였으며, 상대적으로 설계 변경이 용이한 인자들을 주요 성능인자로 정의하였다.

$$F_{spr} = k \cdot x \quad (2)$$

$$R \cdot F_{spr} \cdot \sin \theta + R \cdot \mu_G \cdot (F_G \cdot \sin \theta + F_{spr} \cdot \cos \theta) - R \cdot F_G \cdot \cos \theta - R \cdot \mu_C \cdot F_{spr} - R \cdot \mu_H \cdot F_G = 0 \quad (3)$$

$$F_G = F_{spr} \cdot \frac{\sin \theta + \mu_G \cdot \cos \theta - \mu_C}{\cos \theta - \mu_G \cdot \sin \theta + \mu_H} \quad (4)$$

$$Torque_{Gear} = r \cdot F_G \quad (5)$$

$$Torque_{Gear} = (k \cdot x) \cdot r \cdot \frac{\sin \theta + \mu_G \cdot \cos \theta - \mu_C}{\cos \theta - \mu_G \cdot \sin \theta + \mu_H} \quad (6)$$

$$Torque_{Inertia} = I \cdot \alpha \quad (7)$$

$$Torque_{Total} \doteq Torque_{Gear} - Torque_{Inertia} \quad (8)$$

$$Torque_{Total} \doteq (k \cdot x) \cdot r \cdot \frac{\sin \theta + \mu_G \cdot \cos \theta - \mu_C}{\cos \theta - \mu_G \cdot \sin \theta + \mu_H} - I \cdot \alpha \quad (9)$$

메커니즘 분석을 통해 나온 최종 이론식을 통해 도출된 주요 성능인자는 다음과 같다.

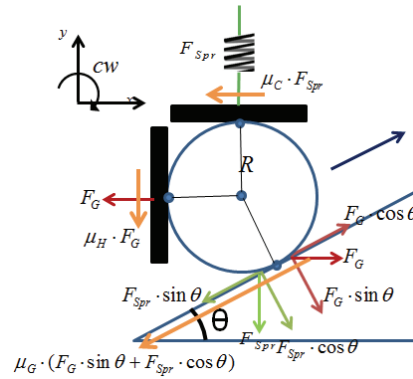


Fig. 12 Free body diagram of the slip mechanism at static state

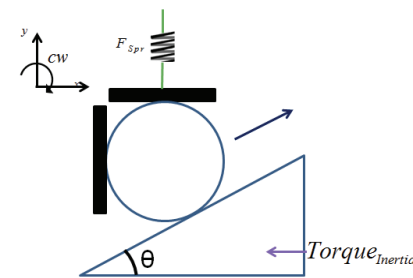


Fig. 13 Free body diagram of the slip mechanism at dynamic state

Table 1 Variable for analysis

Spring constant (k)	Phase (Spring compression distance, χ)	Ring gear inertia (I)
7000 N/m	1 (0.28 mm)	100 g
8950 N/m	5 (1.4 mm)	300 g
11000 N/m	10 (2.8 mm)	500 kg
	16 (4.4 mm)	

- (1) 정적인 상태에 영향을 미치는 인자
 - 스프링상수(k)
 - 스프링 압축거리(χ)
- (2) 동적인 상태에 영향을 미치는 인자
 - 링기어 관성 (Ring Gear Inertia, I)

이 외의 상수 인자인 링기어 반경(r)와 경사면 각도(θ), 링기어 회전 각가속도 (Ring Gear Angular Acceleration, α)는 설계 도면 및 모터 사양에서 정보를 확인하고 적용 하였다. 선정된 주요 성능인자를 위 표와 같이 3-4 수준으로 정의하고 해석을 수행하였다(Table 1).

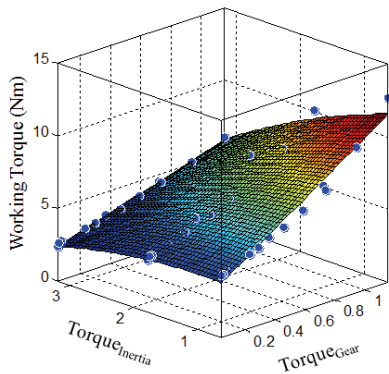


Fig. 14 Surface graph of comparing static and dynamic fitting results

2.3.2 회귀식 도출

설계 초기에 슬립토크를 예측할 수 있는 식을 도출하기 위해 주요 설계 변수 변경 해석을 수행하였다. 이를 통해 주요 성능인자와 작업토크의 관계를 분석하였다. 변수들의 이항을 포함하는 비선형 회귀분석을 수행하여 회귀식을 도출하였다.

회귀분석은 Matlab (MathWork社, USA)를 활용하여 진행하였다. 입력값은 메커니즘 분석을 통해 선정된 값 (식(11)과 식(12))이며 출력값은 동역학 해석을 통해 도출된 작업토크 결과를 활용하였다. 회귀식은 슬립토크 결과의 패턴을 고려하여 비선형 방정식으로 선정하였다. 도출된 회귀식의 상관도 (R²)는 0.96으로 높은 상관성을 확인 하였다.

$$Torque(x, y) = 3.154 + 7.979 \cdot x + 0.6384 \cdot y - 1.494 \cdot x \cdot y - 0.2918 \cdot y^2 \quad (10)$$

$$x = Torque_{Gear} = (k \cdot x) \cdot r \cdot \frac{\sin\theta + \mu_G \cdot \cos\theta - \mu_C}{\cos\theta - \mu_G \cdot \sin\theta + \mu_H} \quad (11)$$

$$y = Torque_{Inertia} = I \cdot \alpha \quad (12)$$

2.3.3 회귀식과 시험결과 비교

본 연구를 통해 도출된 회귀식을 활용한 결과와 시험결과 그리고 메커니즘을 통해 도출된 정적인상태의 슬립토크를 비교하였다(Fig. 15). 식(6)은 정적인 상태만 고려된 식이며, 시험결과와 경향은 유사하지만 약 3 Nm의 오프셋 (Offset)이 발생하는 것을 확인 할 수 있었으며, 오프셋이 발생하는 가장 큰 이유는 링기어의 동적 상태가 고려되지 않았기 때문으로 판단된다. 또한, 식(10)에서 스프링 상

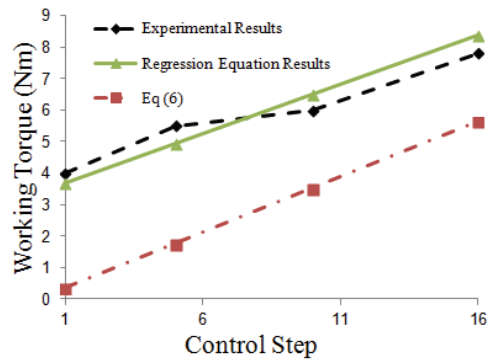


Fig. 15 Graph of comparing test result and prediction result from regression equation

수와 압축 거리로 형성된 변수 x에 대해서는 선형적인 특성을 보이고, 링기어의 관성과 속도에 대한 특성은 비선형적인 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 회귀식은 이론식 식(6)에 비해 시험결과와 유사한 결과가 도출되었으며, 시험결과와의 오차를 구한 결과 8.62% 오차를 확인 할 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 작업토크 시스템의 설계 초기 단계에서 설계인자에 대한 설계치를 예측 가능한 모델을 구축하고 분석하는 프로세스를 제안하였다. 해석모델은 시험결과를 활용하여 신뢰성 있게 구축하였으며, 작업토크 구조의 동작 메커니즘을 분석하여 주요 성능인자의 특성을 고찰하였다. 또한 다물체 동역학 S/W를 활용한 해석을 수행하고 해석결과를 통해 회귀식을 도출하여 간편식을 도출하였다. 본 연구에서 수행한 내용 및 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 임팩트햄머의 작업토크 해석을 위한 회전형 슬립 메커니즘을 해석할 수 있는 동역학 해석 모델을 구축하였다. 그리고 시험환경을 반영할 수 있도록 작업부에 부위 요소를 적용하여 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있었다. 또한 모델 검증은 해석결과를 토크 측정 결과와 비교하여 약 8%의 오차를 확인할 수 있었다. 이를 통해 해석 모델은 신뢰성을 확보함으로써 작업환경이 적용된 모델로 널리 활용 할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 작업 토크에 대한 슬립 메커니즘을 분석하여 주요 성능인자를 고찰하였다. 그리고 선정된 주요 성능인자를 3-4 수준으로 변경하며 동역학

해석을 수행하였다. 해석결과를 활용하여 작업토크를 예측할 수 있는 회귀식을 도출하였다. 회귀식은 비선형 함수로 상관도(R^2)는 0.96의 매우 높은 상관성이 나타남으로써 초기 설계시 매우 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

작업토크에 대한 회전 슬립 메커니즘의 설계시에 설계인자에 대한 스펙을 결정하는 과정에 회귀식을 활용하여 계산할 경우 효율적인 개발을 할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업기술혁신사업의 글로벌전문기술개발사업(World Class-300)의 일환으로 진행되고 있는 충전공구 개발과제로 진행된 것이다.

REFERENCES

1. Lee, J., Ko, D.-S., Chun, H.-H., and Hur, D.-J., "Control Strategies for Manipulating Contact Force of Impact Wrench to Generate High Level Torque," Proc. of 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), pp. 1758-1765, 2013.
2. Kim, S. H., Hur, D. J., and Dong, K. H., "Studies on the Mechanism Characteristics of Impact Hammer Drill for Slip Torque Design Control," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 672-673, 2015.
3. Lee, C.-H. and Jang, M.-G., "Development of Internal Friction Model in Automotive Constant Velocity Joints," Journal of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, Vol. 24, No. 5, pp. 215-220, 2008.
4. Lee, Y. and Han, S., "Development of Device Measuring Very High Torque via Torque Arm with Attached Load Cells," The Korea Society of Fluid Power & Construction Equipments, Vol. 7, No. 1, pp. 6-10, 2010.
5. Johnston, B., "Vector Mechanics for Engineers Third SI Metric Edition," McGraw-Hill Ryerson, pp. 436-488, 1995.