

자동화 시스템 구축을 위한 케이블 체인 가이드 설계 및 구조적 안정성 평가

Novel Design and Structural Stability Evaluation of Cable Chain Guide for Automation System

이재영* · 김경민* · 곽지현** · 배원준** · 이정희** · 곽재섭** †

Jae-Young Lee*, Kyung-Min Kim*, Ji-Hyeon Kwak**, Won-Jun Bae**,
Jung-Hee Lee** and Jae-Seob Kwak** †

(Received 07 August 2024, Revision received 28 October 2024, Accepted 04 November 2024)

초록 : 스마트 팩토리에 대한 수요와 관심이 증가함에 따라 생산 효율성 및 제품의 품질향상을 목적으로 케이블 체인 및 케이블 체인 가이드의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 현재 사용되고 있는 고정형 케이블 체인 가이드는 시스템의 자유도를 제한하여 공정 효율성을 저하시킨다. 따라서, 본 연구에서는 새로운 형태의 케이블 체인 가이드를 제안하고자 한다. 설계 모델의 구조적 안정성 및 산업 적용 가능성을 평가하기 위하여 비선형 유한요소해석을 통해 케이블 체인과 케이블 체인 가이드 충돌 시 von-Mises 응력과 변형량을 평가하였다. 해석 결과, 케이블의 움직임을 원활히 할 수 있게 하는 moving plate의 pin에서 최대 응력과 최대 변형량이 각각 9.59 MPa, 10.94 μm 로 발생됨을 알 수 있었다.

키워드 : 케이블 체인 가이드, 비선형 유한요소해석, 최적화, 지능형 공장

Abstract : With the increasing demand and interest in smart factories, the significance of cable chains and cable chain guides is becoming more prominent in improving production efficiency and quality. The currently used fixed guides have the drawback of restricting the system's degrees of freedom of system, leading to reduced efficiency. Therefore, this study aims to suggest a novel type of cable chain guide using a simulation approach. The results indicated that the maximum von-Mises stress and maximum deformation were observed at the pin, about 9.59 MPa and 10.94 μm , respectively.

Key Words : Cable Chain Guide, Nonlinear Finite Element Analysis, Optimization, Intelligent Factory

** † 곽재섭(<https://orcid.org/0000-0003-2456-2000>) : 교수, 국립부경대학교 기계공학부 기계공학전공
E-mail : jskwak5@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6139

*이재영(<https://orcid.org/0009-0004-5461-2309>) : 연구소장, 씨피시스템(주)

*김경민(<https://orcid.org/0009-0001-2046-1213>) : 대표이사, 씨피시스템(주)

**곽지현(<https://orcid.org/0009-0000-9079-3742>), 배원준(<https://orcid.org/0009-0000-7368-6101>) : 대학원생, 국립부경대학교 기계공학부 기계공학전공

**이정희(<https://orcid.org/0000-0001-8771-1996>) : 연구원, 국립부경대학교 기계공학부 기계공학전공

** † Jae-Seob Kwak(<https://orcid.org/0000-0003-2456-2000>) : Professor, Mechanical Engineering, Pukyong National University.
E-mail : jskwak5@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6139

*Jae-Young Lee(<https://orcid.org/0009-0004-5461-2309>) : Direct of research, CP System Co., Ltd.

*Kyung-Min Kim(<https://orcid.org/0009-0001-2046-1213>) : President & CEO, CP System Co., Ltd.

**Ji-Hyeon Kwak(<https://orcid.org/0009-0000-9079-3742>), Won-Jun Bae (<https://orcid.org/0009-0000-7368-6101>) : Graduate student, Mechanical Engineering, Pukyong National University.

**Jung-Hee Lee(<https://orcid.org/0000-0001-8771-1996>) : Researcher, Mechanical Engineering, Pukyong National University.

1. 서론

생산 시간 단축, 비용 절감, 품질 향상, 경쟁력 유지 등을 목표로 자동화 및 스마트 제조 환경 구축에 대한 관심과 중요성이 크게 증가하고 있다.¹⁾ 이에 따라, 반복적인 동작을 제어하기 위해 다양한 크기의 케이블이 활용되고 있다. 그러나 케이블이 외부에 노출되면 기계장치의 반복적인 움직임으로 인하여 케이블의 꼬임 및 늘어남, 외부 부식 물질과 파손 인자에 의한 케이블의 손상이 발생될 수 있다. 이러한 이유로 케이블을 보호하기 위하여 일반적으로 Fig. 1과 같이 케이블 체인과 고정형 케이블 체인 가이드가 사용되고 있다.²⁾

현재 다양한 공정에서 활용되고 있는 고정형 케이블 체인 가이드는 케이블 체인의 처짐을 방지하고 안정적이며 정확한 구동을 위하여 일정한 간격으로 배열된다. 그러나 고정된 가이드 형태는 케이블 체인의 움직임과 자유도를 제한하여 체인의 길이가 불필요하게 늘어나거나 파손을 유발한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 케이블 체인의 가동 범위를 늘리고, 효율적인 공정 관리를 가능하게 하는 새로운 형태의 케이블 체인 가이드를 개발하고자 한다. 이를 위하여, 케이블 체인의 작동 조건을 분석하여 운전 특성을 분석하였다. 또한 본 연구에서 고안한 케이블 체인 가이드의 구조적 안정성과 효율성을 검토하기 위하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다.

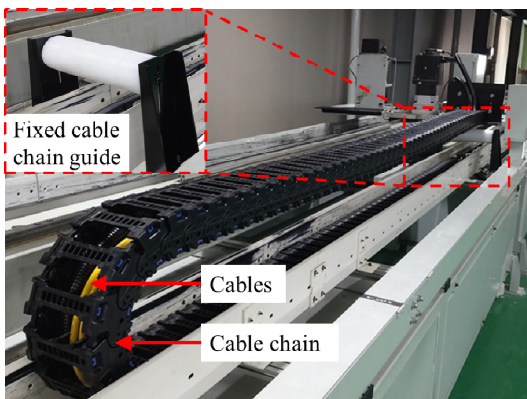


Fig. 1 Cable chain and cable chain guide

비선형 유한요소해석은 부품 요소 및 구조물의 개발 단계에서 구조적 안정성을 평가하기 위하여 사용되는 일반적인 시뮬레이션 기법이다.

Gholipour 등³⁾은 선박 충돌에 노출된 사장교 교각의 비선형 수치 해석 및 진형성 손상 평가를 수행하였다. 연구 결과, 충돌 에너지가 20% 증가할 때마다 교각의 손상 정도가 평균 25% 증가하였으며, 실험 결과와 약 94% 이상의 일치함을 보였다. Jeong 등⁴⁾은 기동 측면 충돌 시험을 고려한 전기 자동차 차체 및 배터리 팩 통합 구조물의 비선형 유한요소해석을 수행하고 구조 최적화를 수행하였다. 연구 결과, 충돌 에너지와 변형량은 비례관계임을 확인하였다. 또한 실제 실험 결과와 약 92% 이상의 일치도를 보여 제안한 연구방법이 구조물의 안전성 평가와 최적화 설계에 유효함을 입증하였다. Lu 등⁵⁾은 볼 베어링으로 지지되는 듀얼 로어 시스템의 회전 속도와 진동 진폭과의 상호작용을 분석하였다. 해석 결과, 회전 속도와 진동 진폭은 비례관계임을 확인하였고, 실제 실험 데이터와 비교한 결과, 약 95% 이상 정확도를 나타냄을 확인하였다. 이를 통해 비선형 유한요소해석이 복잡한 기계 시스템의 성능 평가 및 설계 최적화에 적합함을 알 수 있었다. Luo 등⁶⁾은 각도를 가지고 접촉하는 볼 베어링의 비선형 정적 및 동적 강성에 대해 수치적, 실험적 분석을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 실험적으로 검증함으로써 비선형 유한요소해석 모델이 효과적임을 판단할 수 있었다.

본 연구에서도 비선형 유한요소해석 결과의 효율성을 검증하기 위하여 해석 결과를 바탕으로 새롭게 설계한 케이블 체인 가이드의 시제품을 제작하여 실제 환경에서 검증하고 적용 가능성을 평가하였다.

2. 케이블 체인 가이드 설계

본 연구에서 제안하는 새로운 형태의 케이블 체인 가이드는 Fig. 2와 같으며, 케이블 체인 이동 시 자중 및 충돌에 의해 체인 가이드를 관통할 수 있도록 고안하였다. 고안한 케이블 체인 가이드는

case, base plate, moving plate, pin, roller, spring 등 총 6개의 주요 부품 요소로 구성되어 있으며, 다음과 같은 동작 원리로 작동한다. 케이블 체인의 이동 시 케이블 체인 가이드와 충돌이 발생하면 moving plate에 xy축 방향으로 하중이 가해진다. 이 하중으로 인해 moving plate는 직경 Ø4.5 mm의 4개의 고정 pin을 따라 y축 방향으로 이동하며 중앙에 위치한 spring의 복원력에 의해 원래 상태로 복귀한다. 케이블 체인의 원활한 이동을 위하여 moving plate는 경사면으로 설계하였고, 회전하는 roller를 이용하여 케이블 체인과 가이드 사이에 미끄럼 운동이 발생하게 하였다. Case와 base plate는 충돌 시에도 moving plate와 roller가 원활하게 작동할 수 있도록 지지하는 역할을 수행한다. 각 부품의 형상 및 치수는 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

각 부품 요소의 기능적 요구를 충족시키기 위하여 물리적 및 기계적 특성을 고려한 재료를 선정하였다. Moving plate는 PA6, roller는 UWMH-PE, spring은 stainless steel (SS) 304, pin, case, base plate는 structure steel로 선정하였다. PA6은 높은 내구성과 경량성을 제공하여 moving plate의 신속한 움직임과 강도를 보장하며, 다양한 작업 조건에서 안정적인 동작이 이루어질 수 있게 한다. SS는 높은 인장 강도와 우수한 내식성을 제공하여 장기간 spring의 안정적인 작동을 가능하게 한다. Structure steel은 높은 강도와 우수한 내마모성을 갖추고 있어, pin, case, base plate의 지지 및 보호 역할을 효과적으로 수행할 수 있다.

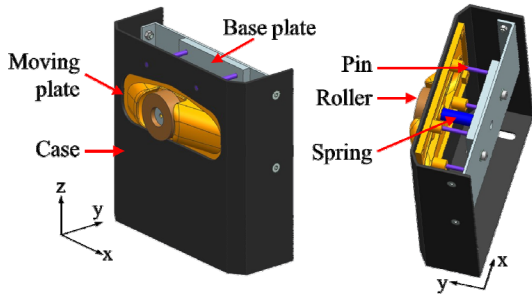


Fig. 2 Schematic view of cable chain guide

3. 비선형 해석을 위한 충돌 하중 분석

케이블 체인 가이드의 구조적 안정성을 평가하기 위하여 케이블 체인과 케이블 체인 가이드 충돌 시 발생하는 충돌 하중을 정확히 분석하는 것이 중요하다. 이론적으로 운동량 보존 법칙 및 충돌 이론을 적용해야 하지만 매우 복잡하고 많은 시간이 소요되므로 아래와 같은 가정으로 단순화하여 비선형 해석을 수행하였다.

- 1) 충돌은 매우 짧은 시간 동안 일어나며 물체의 큰 움직임은 없다. 따라서 충돌하는 동안 각 물체의 선형 충격만 고려한다.
 - 2) 충돌 중에는 두 물체에 작용하는 외력이 없다. 이는 전체 선운동량이 보존된다는 것을 의미한다. 즉, 두 물체 중 하나에 작용하는 외력이 없다면 충돌 전후의 궤적은 직선이 된다.
 - 3) 충돌하는 물체는 극히 작고, 각 물체를 질량 중심에 위치한 균일한 밀도의 극히 작은 구체로 모형화한다.
 - 4) 충돌하는 물체 사이에는 마찰력이 없다.
- 위의 가정을 바탕으로 두 물체가 충돌할 경우, 뉴턴의 제 2법칙에 따라 유도되는 선형운동량의 보존 법칙은 식 (1)과 같다.

$$m_c \vec{v}_{ci} + m_g \vec{v}_{gi} = m_c \vec{v}_{cf} + m_g \vec{v}_{gf} \quad (1)$$

여기서, m_c 와 m_g 는 각각 케이블 체인과 케이

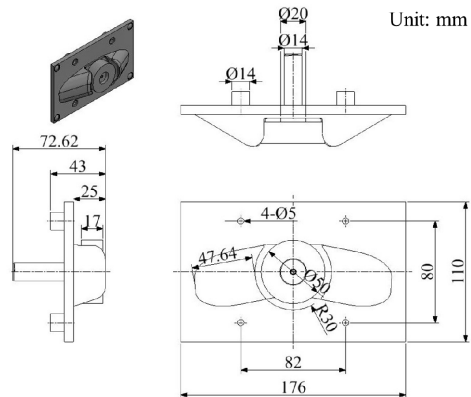


Fig. 3 Schematic geometry of moving plate

블 체인 가이드의 질량, \vec{v}_{ci} 와 \vec{v}_{gi} 는 충돌 직전 속도, \vec{v}_{cf} 와 \vec{v}_{gf} 는 충돌 직후의 속도를 의미한다.

충돌 후 속도 \vec{v}_{gf} 와 \vec{v}_{cf} 를 구하기 위해서 식 (2)와 같이 반발계수⁷⁾ e 를 활용하였다. e 값은 0에서 1 사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 충돌이 탄성적이며 에너지 손실이 적다는 것을 의미한다.

$$e = \frac{v_{cf} - v_{gf}}{v_{ci} - v_{gi}} \quad (2)$$

위 식을 바탕으로 충돌 후 속도 \vec{v}_{gf} 와 \vec{v}_{cf} 에 대한 식을 유도할 수 있으며, 이는 식 (3)과 식 (4)로 각각 나타낼 수 있다.

$$v_{cf} = \frac{m_c - e m_g}{m_c + m_g} v_{ci} + \frac{m_g (1 + e)}{m_c + m_g} v_{gi} \quad (3)$$

$$v_{gf} = \frac{m_g - e m_c}{m_c + m_g} v_{gi} + \frac{m_c (1 + e)}{m_c + m_g} v_{ci} \quad (4)$$

케이블 체인 가이드가 정지해 있는 상태이므로, \vec{v}_{gi} 의 값은 0이며, 케이블 체인의 초기 속도 \vec{v}_{ci} 는 실제 산업 현장에서 사용되는 평균 속도를 기준으로 3 m/s로 가정한다. 또한, 케이블 체인 가이드의 질량 m_g 는 3.5 kg이며, 충돌은 1초 동안 진행된다. 그러나 케이블 체인의 질량 m_c 와 반발계수 e 값은 내부 구조의 복잡성 때문에 정확히 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 m_c 와 e 값을 각각 5~20 kg, 0.1~0.3으로 변화시키며 두 물체의 충돌 직후의 속도 \vec{v}_{cf} 와 \vec{v}_{gf} 를 도출하였다. 산출된 케이블 체인 가이드의 최종 속도를 바탕으로 케이블 체인과 케이블 체인 가이드 충돌 시 발생하는 하중 F 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{m_g v_{gf}}{t} \quad (5)$$

Fig. 4는 케이블 체인 가이드의 질량 m_g 와 반발계수 e 의 변화에 따른 충돌 하중을 도식화한 것으로 대략 8~11 N으로 산출되었다. 따라서 본 연구에서는 평균값인 10 N을 충돌 하중으로 설정하고 비선형 유한요소해석을 수행하였다.

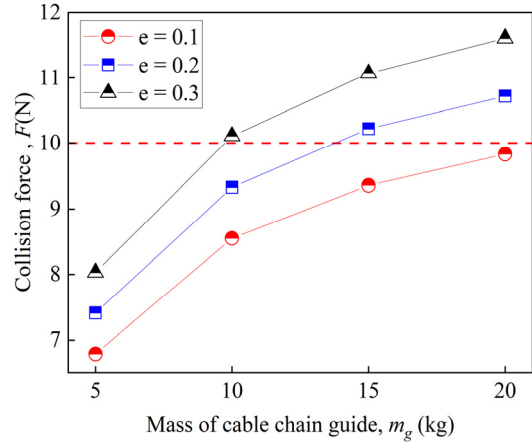


Fig. 4 Variation of collision force in varying restitution coefficient and cable chain guide mass

4. 구조적 안정성 평가 및 검증

4.1 비선형 유한요소해석 조건 및 설정

본 연구에서 제안한 케이블 체인 가이드의 안정성을 확인하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 활용하여 von-Mises 응력과 변형량을 분석하였다. Case의 변형은 발생하지 않으므로, 시뮬레이션 시간 단축 및 효율성 향상을 위하여 case를 제외한 부품 요소에 대한 비선형 해석을 수행하였다.

구속 조건으로 base plate의 뒷면을 고정하고, moving plate와 케이블 체인이 충돌하는 면의 수직 방향으로 10 N의 충돌 하중을 1초 동안 가하였다. Moving plate의 원활한 작동 및 실제 거동과 유사한 시뮬레이션 결과를 얻기 위하여 측면에 frictionless support를 부여하였고, 슬라이딩 운동이 발생하는 pin과 moving plate 간의 마찰 계수는 0.2로 설정하였다. 사전 시뮬레이션을 통해 마찰이 발생하는 가장 많이 발생하는 구간인 pin과 pin에 접하는 bush의 mesh size는 각각 1.5 mm, 1.0 mm로 Fig. 5와 같이 다른 부품 요소 대비 조밀하게 설계하였다. 유한요소해석에 사용된 절점의 수는 108,631개이며, 요소의 수는 59,554개이다.

Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 비선형 해석을 바탕으로 도출된 변형량과 von-Mises 응력을 도식화한 것이다. 케이블 체인이 원활하게 작동하기 위하여 설계된 케이블 체인 가이드의 moving plate는 y축 방향으로 약 20 mm 이상 이동해야 하고 동시에 제품에 가해지는 응력과 변형량은 최소화되어야 한다. 시뮬레이션 결과, moving plate의 이동량은 약 22 mm로 케이블 체인이 원활하게 이동할 수 있게 설계되었음을 알 수 있었다. 또한 pin은 가장 큰 변형과 응력이 나타나는 부품 요소로 1초 동안 최대 변형량과 von-Mises 응력은 각각 10.94 μm , 9.59 MPa임을 확인할 수 있었다. 이는 pin의 재질인 structure steel의 인장응력인 250 MPa를 초과하지 않아 본 연구에서 고안한 케이블 체인 가이드가 안정적인 상태임을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제안하는 케이블 체인 가이드의 효율성을 검토하기 위하여 시제품을 제작하여 실제 산업 현장에 적용하였다. 시뮬레이션과 동일한 조건에서 실험 결과, 케이블 체인과 케이블 체인 가이드의 반복적인 충돌로 인해 분진이 생성되거나 케이블 체인이 파손되어 제품의 수명이 단축되는 문제점이 발생하였다. 따라서 추후 연구에서는 pin과 moving plate에 작용하는 하중 및 응력을 줄이기 위하여 moving plate의 형상 최적화를 진행하고자 한다. 이러한 최적화 작업을 통해 케이블 체인의 수명 및 시스템의 안정성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

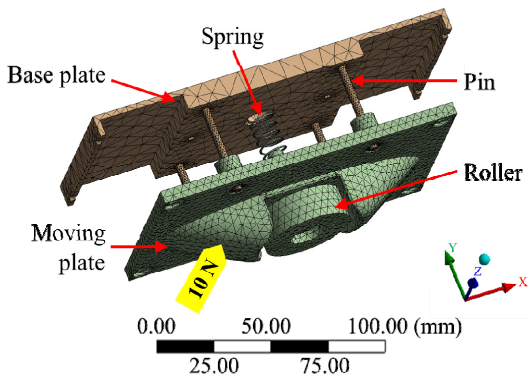
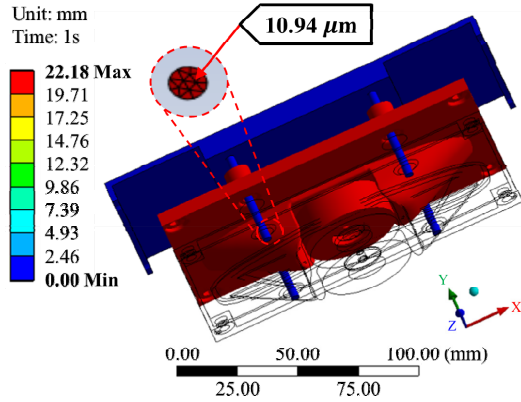
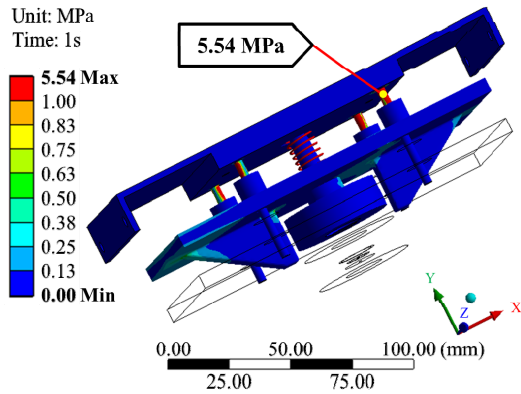


Fig. 5 Target area of interested in simulation



(a) Deformation



(b) von-Mises stress

Fig. 6 Simulation results of cable chain guide

5. 결론

본 연구에서는 현재 산업 현장에서 사용되는 고정형 케이블 체인 가이드의 단점을 극복하기 위하여 새로운 유형의 케이블 체인 가이드를 제안하고자 한다. 구조적 안정성을 검증하기 위하여 비선형 유한요소해석을 통해 von-Mises 응력과 변형량을 분석하였다. 또한 시제품 제작을 통해 실제 산업 현장의 적용 가능성을 판단하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론은 아래와 같다.

1) 본 연구에서 설계한 케이블 체인 가이드는 선형 운동량 보존 법칙 및 반발 계수를 바탕으로 케이블 체인과 접촉 시 충돌 하중이 평균 10 N으로 산출되었다.

2) 이를 바탕으로 비선형 해석을 수행한 결과, 최대 von-Mises 응력과 최대 변형량은 pin 부품 요소에 각각 9.59 MPa, 10.94 μm 로 나타남을 알 수 있었다. 이는 pin의 재질인 structure steel의 인장 강도인 250 MPa을 초과하지 않아 설계된 케이블 체인 가이드가 안정한 상태임을 확인할 수 있었다. 또한 moving plate의 이동량은 약 22 mm로 실제 제품의 동작이 잘 반영됨을 확인하였다.

3) 시제품을 제작하여 시뮬레이션과 동일한 조건에서 구동한 결과, 반복적인 충돌로 인하여 pin에 과도한 응력이 집중되어 케이블 체인의 손상 및 파손을 유발하였다.

Author contributions

J. Y. Lee; Conceptualization, Manufacturing. K. M. Kim; Conceptualization, Investigation. J. H. Kwak; Simulation, Writing-original draft. W. J. Bae; Simulation, Writing-original draft. J. H. Lee; Data analysis, Writing-review & editing. J. S. Kwak; Supervision, Writing-review & editing.

References

1. M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh and R. Suman, 2021, "Substantial Capabilities of Robotics in Enhancing Industry 4.0 Implementation", *Journal of the Cognitive Robotics*, 1, 58-75. (<https://doi.org/10.1016/j.cogr.2021.06.001>)
2. P. Bortnowski, W. Kawalec, R. Krol and M. Ozdoba, 2022, "Types and Causes of Damage to the Conveyor Belt - Review, Classification and Mutual Relations", *Journal of the Engineering Failure Analysis*, 140, 106520. (<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106520>)
3. G. Gholipour, C. Zhang and A. A. Mousavi, 2020, "Nonlinear Numerical Analysis and Progressive Damage Assessment of a Cable-Stayed Bridge Pier Subjected to Ship Collision", *Journal of the Marine Structures*, 69, 102662. (<https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2019.102662>)
4. M. H. Jeong, Y. I. Kim and K. J. Park, 2021, "Nonlinear Dynamic Response Structural Optimization for the Structure Integrating the Body-In-White and Battery Pack of an Electric Vehicle Considering a Side Pole Impact Test", *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, 29(7), 683-691. (<https://doi.org/10.7467/KSAE.2021.29.7.683>)
5. Z. Lu, S. Zhong, H. Chen, X. Wang, J. Han and C. Wang, 2021, "Nonlinear Response Analysis for a Dual-Rotor System Supported by Ball Bearing", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 128, 103627. (<https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103627>)
6. H. Luo, Y. Li, C. Yu, G. Liu and X. Mao, 2023, "Numerical and Experimental Analysis of Nonlinear Static and Dynamic Stiffness of Angular Contact Ball Bearing", *Journal of the Nonlinear Dynamics*, 111(3), 2281-2309. (<https://doi.org/10.1007/s11071-022-07946-x>)
7. M. Dehghani and H. Samet, 2020, "Momentum Search Algorithm: A New Meta-Heuristic Optimization Algorithm Inspired by Momentum Conservation law", *Journal of the SN Applied Sciences*, 2(10), 1720. (<https://doi.org/10.1007/s42452-020-03511-6>)