

고부하 롱피치 롤러체인과 스프라켓 접촉 위치에 따른 하중분석에 관한 연구

김창욱*, 박승빈*, 송정일*,#

*창원대학교 기계공학과

Study on the Load Analysis in Accordance with the Contact Position between a High-Load Long-Pitch Roller Chain and Sprocket

Chang-Uk Kim*, Seung-Bin Park*, Jung-Il Song*,#

*School of Mechanical Engineering, Changwon National UNIV.

(Received 25 July 2016; received in revised form 2 October 2016; accepted 3 October 2016)

ABSTRACT

In the present study, the long-pitch roller-chain of a continuous ship unloader is studied. It is the vertical excavating and transporting the cargo has carried in bulk amount. The size of the pitch in the long-pitch roller chain is about 350 mm. The finite element technique is used for the structural safety of the roller chain. The objective of the study is to perform a dynamic analysis of the load at the point of contact with the sprocket of the roller chain, and analyze each point in the stress of the chain's components by using load. From the tooth sprocket optimization analysis, the results show an optimal design. Static structural analysis was safe. Contact analysis results show the greatest stress on the sprocket. By increasing the tooth size, the stress was reduced.

Key Words : Roller Chain(롤러체인), Structural Analysis(구조해석), Sprocket(스프라켓), Optimization(최적화)

1. 서 론

벌크선(Bulk Carrier)으로 운반된 철광석, 석탄, 석회석 등의 벌크 화물을 굴삭 및 수직이송하기 위해 사용되는 버킷 엘리베이터(Bucket Elevator, BE)는 연속식 하역기(Continuous Ship Unloader, CSU)의 핵심 구성 요소이다. 버킷 엘리베이터용 롤러 체인은 벌크화물을 수직으로 고속 운반하는 장비에 사용되는 체인으로 고강도, 내충격성, 내피

로성을 요구하는 특수 체인이며, 버킷 엘리베이터 내의 체인 시스템은 크게 3개의 스프라켓으로 구성되며, 체인 이동경로를 가이드 하는 리테이너 2개를 포함하여 총 5개의 스프라켓으로 설계된 시스템이다. 상부 스프라켓에는 구동부 모터가 연결되어 있으며, 하부 스프라켓 2개는 수평하게 설계되어 수평 이동하면서 버킷에 화물을 담을수 있도록 되어 있다. Fig. 1에는 현장에서 사용 중인 연속식 하역기이며, 점선부분은 버킷 엘리베이터를 나타내었다.

화물을 하역을 하는데 중요한 역할을 하는 버킷과 롤러체인은 연속식 하역기의 작업 시간과 운

Corresponding Author : jsong@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3604, Fax: +82-55-275-0101

전자의 숙련도에 따라 체인의 수명이 결정되며, 롤러체인은 평균인장강도, 충격, 마모, 내구성 등의 요구조건을 만족하여야 한다.

연속식 하역기는 우리나라 업체에서 설계, 제작을 하고 있으나 롤러체인의 경우에는 수입을 하고 있는 실정이며, 보수 유지를 하는데 어려움이 있어 국산화 개발이 필요하다. 또한, 롤러체인과 스프라켓의 원활한 구동 및 접촉에 의한 충격 감소를 위한 설계가 필요하다.

Ryu와 Choi는 군수용 궤도차량 모델에서 스프라켓과 롤러체인 간에 접촉력이 고려된 정교한 롤러체인 모델을 개발하고 이에 대한 동특성을 연구하였다. Chen과 Freudenstein은 롤러체인 구동 메커니즘에서 롤러체인의 법선 방향에 거동에 의한 출력입과 접촉력을 갖는 현 운동 현상을 파악하기 위하여 기구학적 해석모델을 제시하였다.^[1-3]

Wang은 롤러체인 시스템의 안정성과 접촉력에 의한 효과를 연구하였다.^[4-5] Kim과 Johnson은 롤러체인 시스템에서 롤러체인과 스프라켓 접촉을 고려하여 정교한 모델을 개발하였다. 이 연구는 Kane의 동역학 수식을 기반으로 이루어졌다.^[6-7]

Choi와 Johnson은 회전하는 롤러체인 시스템에서 접촉력, 현 운동, 가이드 바의 효과와 롤러체인의 진행방향에 대한 진동특성을 연구를 수행하였다.^[8-10]

최근 체인에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있지만, 버킷 엘리베이터에 사용되는 고무하롱피치 롤러 체인에 대한 연구는 이루어지지 않고 있으며, 스프라켓 형상에 대한 연구도 이루어지지 않고 있는 실정이다.



Fig. 1 Continuous ship unloader

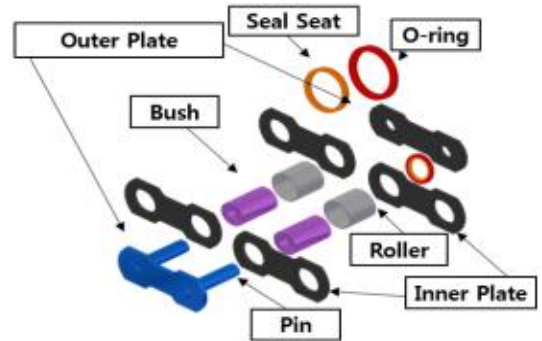


Fig. 2 Component of a roller chain

이에 본 연구에서는 버킷 엘리베이터 작동시 최대 하중을 받는 위치에서의 롤러체인의 구조 안전성을 검증하였으며, 스프라켓과 접촉하는 면압을 동역학 해석으로 확보하여 구조해석을 수행하고, 스프라켓의 최적형상 설계를 수행하였다.

2. 연구 방법

2.1 기계적 물성평가

버킷 엘리베이터의 핵심 구성은 구조물, 스프라켓, 롤러 체인으로 구성되며, Fig. 2는 롤러체인의 주요 부품도이며, 피치 간격은 350 mm 이다. 원소재에 대한 기계적 물성평가는 소재의 건전성 확보를 위해 수행하였다. 소재는 플레이트, 스프라켓에 사용되는 SCM440 소재와 핀, 부시, 롤러에 사용되는 SUS410 소재에 대해 평가하였다.

2.2 정적 구조 및 동역학 해석

Fig. 3은 롤러체인의 1/2모델이며 Solid Edge에서 3-D모델링한 지오메트리 파일을 ANSYS Workbench 14.5 환경에서 불러들여서 해석조건을 설정하였다. 정적 구조해석의 경계조건은 자동으로 설정되지만 실제 환경과 유사한 구조해석을 위하여 상부 핀에는 실린더 비회전 조건과 각 핀이 옆으로 이동하지 못하도록 구속조건을 적용하였다. 각각의 파트별 경계면에는 마찰(Frictional)조건으로 마찰계수 0.2로 설정하고, 하중 조건은 최대 인장력을 받는 하부 핀에 30.8 Ton의 1/2인 15.4 Ton을 적용하여 구조해석을 수행하였다.



Fig. 3 3-D model of a Roller chain

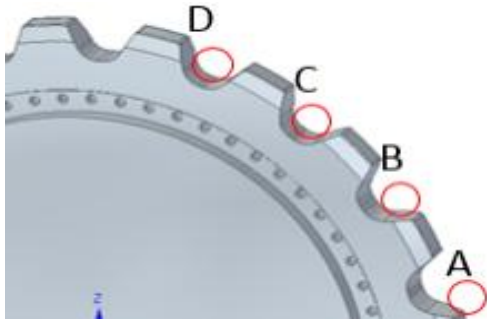


Fig. 4 Contact position of the sprocket

동역학 해석은 버킷 엘리베이터 구동 시 체인과 스프라켓이 접촉하면서 받는 힘을 구하기 위해 다물체 동역학 프로그램 ADAMS를 이용하였다.

Fig. 4와 같이 상부 스프라켓과 롤러 체인이 접촉하는 지점에서의 하중을 도출하여 접촉부 구조 해석 하중조건으로 적용하였다.

스프라켓과 롤러체인의 접촉지점에 따른 해석 경계조건은 롤러체인은 정적 구조해석과 동일하게 적용하였다. 접촉 부에는 스프라켓 치면과 롤러는 선 접촉으로 붙어있지만 미끄럼을 허용하는 조건 (No separation)을 적용하였다.

2.3 최적화 설계

버킷 엘리베이터의 상부 스프라켓에 대해 경량화 및 응력 분산을 위해 최적화 설계하였다.

최적화 기법은 해석 시간의 단축과 역설계를 통한 기존의 형태의 변형 없이 경량화를 위하여 Sizing Optimization 방법을 사용하였다. Fig. 5와

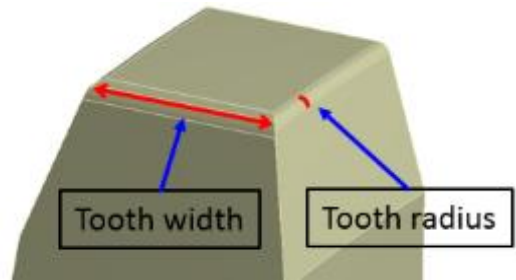


Fig. 5 Input parameters for optimization

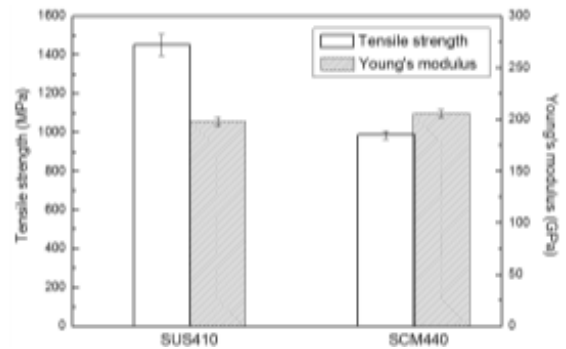


Fig. 6 Results of the tension test

같이 최적화 조건은 P1, 2로 설정하여 Priority parameter는 응력 분포를 최우선으로 그 다음 무게 감소를 목표로 수행하였다.^[11-13]

3. 연구 결과

3.1 기계적 물성평가

인장 시험 결과는 Fig. 6과 같이 인장 강도는 SUS410은 1452 MPa, SCM440은 987 MPa 로 나타났다. 인장 시험편은 현장에서 사용하는 롤러체인 소재와 동일한 것을 사용하여 열처리한 것으로 강도를 높여 놓은 상태로 설계상 요구하는 물성치를 만족하였으며, Table 1의 기계적 물성을 해석에 적용하였다.

3.2 정적 구조 및 동역학 해석

정적 구조 해석 결과 최대 응력은 232 MPa로

플레이트와 핀이 접촉하는 중앙부에서 나타났다. Fig. 7과 같이 최대응력이 플레이트 중앙부에 나타난 이유는 체인에 인장력을 전달 받아 핀, 부시와 함께 큰 하중을 지지하면서 나타났다.

동역학 해석 프로그램을 이용하여 롤러체인과 스프라켓이 회전 시에 접촉 위치에 따른 하중을 분석하였다. 그 결과 Fig. 8과 같이 이끝면(A)에서 209 kN의 최대 하중이 발생하였고, Table 2의 결과와 같이 이끝면의 평면(B)은 115 kN, 이끝면의 곡면(C)은 68 kN, 이바닥면(D)은 53 kN의 하중이 발생함을 확인하였다.

최대 하중이 발생한 이끝면은 스프라켓과 롤러체인이 처음 접촉하면서 체인의 인장력을 전달받는 부분으로 하중이 크게 작용하며, 이후 이끝면의 평면, 곡면에서는 체인의 인장력이 스프라켓의 다른 치형에서 분산하여지지 받으므로 점점 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1 Material properties of the roller chain

	SUS410	SCM440
Component	Plate	Pin, Bush, Roller
Density [kg/m ²]	7,850	7,750
Poisson's ration	0.3	0.31
Elastic modulus [GPa]	200	193
Yield strength [MPa]	892	955
Ultimate strength [MPa]	992	1,455

Table 2 Results of the adams analysis

Contact point	Load (kN)
A	209
B	115
C	68
D	53

Table 2에 나타난 접촉 위치에 따른 하중을 이용하여 해석하여 각 위치에서의 응력분포를 확인하였다. 이끝면 (A)에서의 접촉 응력해석 결과 롤러체인과 스프라켓의 부품 별 최대 응력을 Fig. 9에 나타내었다.

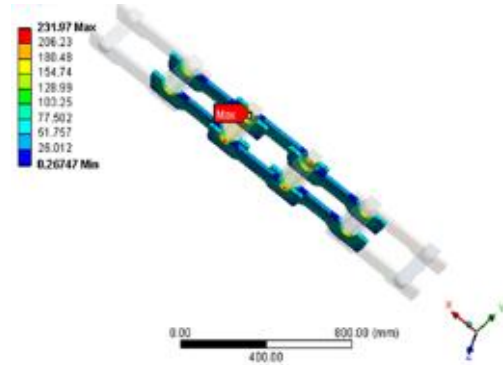


Fig. 7 The maximum stress in the plate

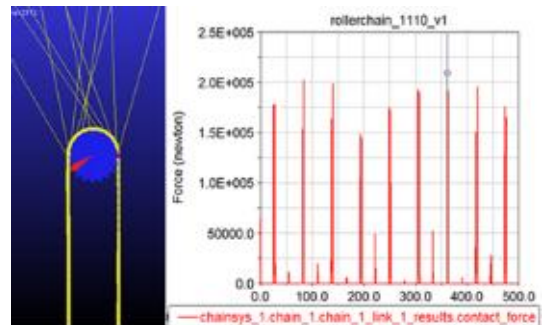
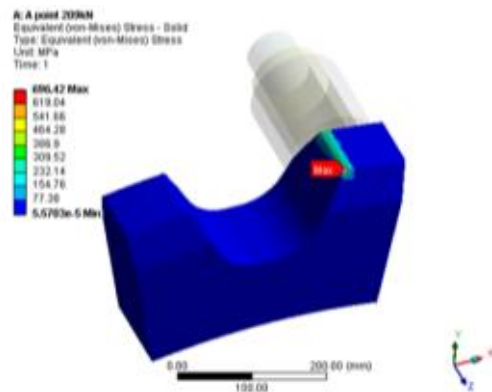
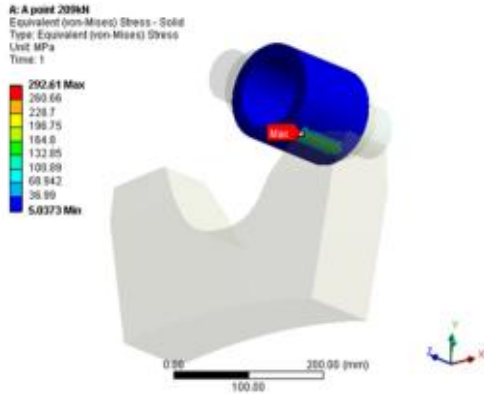


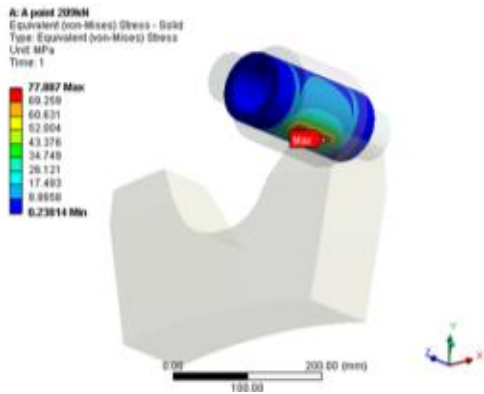
Fig. 8 Adams analysis result of a position A



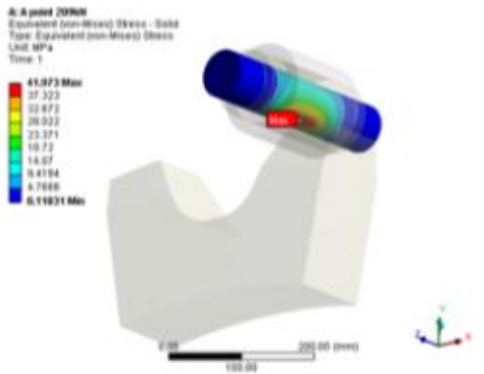
(a) Sprocket



(b) Roller



(c) Bush



(d) Pin

Fig. 9 Components stress distribution in the contact positions (a-d)

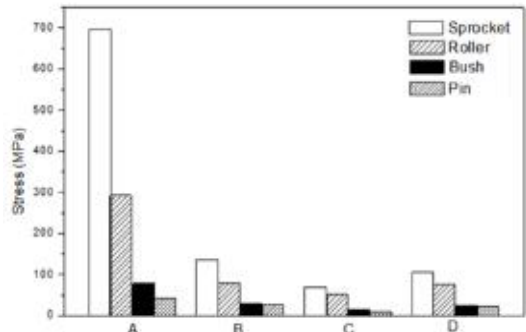


Fig. 10 Stress analysis result of the comparison contact positions

접촉력에 따른 해석 결과 스프라켓 696.4 MPa, 롤러 292.6 MPa, 부시 77.8 MPa, 핀 41.9 MPa로 발생하였다. 최대 응력이 발생한 스프라켓에서는 롤러와 직접적으로 접촉되어 스프라켓의 접촉지점인 이끝면에서 최대 응력이 발생되며, 핀과 부시는 스프라켓과 직접적으로 접촉되어 있지 않으므로 응력이 롤러와 스프라켓에 비해 낮게 발생된다.

Fig. 10은 스프라켓과 롤러 체인이 접촉하는 각 지점에서의 응력분포를 나타낸 것이다. 이 뿌리면의 평면 (B), 이 뿌리면의 곡면 (C), 이 바닥면 (D)의 해석결과도 스프라켓에서 최대 응력이 발생되며, 롤러, 부시, 핀에 걸리는 응력은 스프라켓에 비해 낮게 발생하였다.

3.3 최적화 설계

롤러체인과 스프라켓의 접촉응력 해석 결과 스프라켓의 이끝면 (A)에서 696.4 MPa의 최대 응력이 발생하여 이끝면의 형상을 변화시켜 최대 응력을 줄이고자 하였다. 이끝면의 폭은 3 mm, 반지름을 0.5 mm씩 변화시켜 변수로 적용하여 최적화 해석 수행 결과 스프라켓의 중량과 최대 응력의 차이가 나타났다.

이끝면의 폭과 반지름을 줄이면, 중량은 감소하나 스프라켓의 최대 응력은 기준에 비해 많이 증가 하게 된다. 이는 이끝면의 면적이 감소되어 스프라켓과 롤러가 접촉하는 면적이 작아지기 때문이다.

스프라켓 치형 최적화의 가장 중요한 이유는 스프라켓에 발생하는 최대 응력을 감소시켜 작용 하중을 분산 시킬 수 있으므로, 입력 변수인 이끝면의 폭과 반지름을 감소시키기 보다는 증가시키면서 최적화를 수행하였다.

Table 3 Results of the sprocket optimization

	Tooth radius (mm)	Tooth width (mm)	Weight (kg)	Sprocket stress (MPa)
Basic	5.0	72.4	57.9	696.2
1	5.0	75.4	58.2	738.9
2	5.0	78.4	58.4	619.2
3	5.0	81.4	58.6	675.0
4	5.5	72.4	58.0	720.8
5	5.5	75.4	58.3	705.1
6	5.5	78.4	58.5	677.5
7	5.5	81.4	58.7	606.7
8	6.0	72.4	58.1	718.0
9	6.0	75.4	58.4	670.5
10	6.0	78.4	58.6	737.9
11	6.0	81.4	58.8	606.0
12	6.5	72.4	58.2	791.0
13	6.5	75.4	58.4	679.0
14	6.5	78.4	58.6	590.3
15	6.5	81.4	58.8	672.7

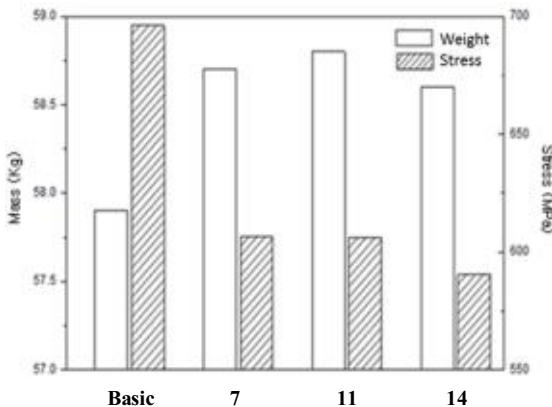


Fig. 11 Optimization analysis results

Table 3은 이끝면의 폭 3 mm, 반지름 0.5 mm를 변화시킨 최적화 해석 결과 값이다. Fig. 11은 최적화 해석 결과 7, 11, 14번을 나타내었으며, 그 결과는 스프라켓의 최대 응력이 기준과 비교해 약 100 MPa 정도 낮게 발생하였다. 변수 14번(이끝면 반지름 = 6.5 mm, 이끝면 폭 = 78.4 mm)의 경우 스프라켓의 최대 응력이 가장 낮게 발생하였다. 최대 응력과 중량은 기준보다는 응력이 감소하고, 중량은 늘어나는 값에서 최적화된 결과 값을 도출하였다.

4. 결론

본 연구에서는 버킷 엘리베이터 롤러체인을 구조해석을 통해 롤러체인의 부품 별 응력을 분포를 확인하고, 버킷 엘리베이터 구동 간 발생하는 롤러체인과 스프라켓 접촉지점에서 하중에 따른 부품 별 하중과 최대 응력을 분석하고, 이를 바탕으로 최적화 해석을 수행하여 최적의 형상을 도출하였다.

(1) 롤러체인 구조해석

롤러체인의 구조해석 결과 최대응력이 232 MPa로 나타났으며, 항복강도 기준 안전계수 4.1로 안전하다고 판단된다.

(2) 롤러체인과 스프라켓 접촉응력 해석은 동역학 해석을 이용하여 접촉하중을 분석하고, 하중을 이용하여 접촉 구조해석을 수행한 결과 이 끝면부 스프라켓에서 696.4 MPa이 나타났다. 항복 강도 기준 안전계수는 1.4로 나타났으며, 구조적으로는 안전하나 반복적인 하중에 의해 안전성 확보를 위해 최적화 설계가 필요하다고 판단된다.

(3) 형상 최적화 해석

버킷 엘리베이터 구동 시, 최대 응력이 발생한 스프라켓 이끝면의 손상이 예상되므로 이끝면에 대한 최적화 해석을 수행하였다. 그 결과 변수 14에서 기존 형상의 최대 응력인 696.4 MPa에 비해 15% 감소된 590.3 MPa로 스프라켓 치형의 최적 형상을 도출하였다. 반복하중을 받는 스프라켓의 응력 발생을 최소화하는 것이 수명에 큰 영향을

줄 것으로 판단되며, 고부하 롭피치 롤러체인의 롤러 형상 크기에 따라 스프라켓 치형 설계를 수행해야 할 것으로 판단된다.

본 연구결과를 바탕으로 연속식 하역기뿐만 아니라 대형 기계에 운송목적으로 사용되는 롭피치 롤러체인과 스프라켓 체인 시스템의 수명 및 안정성 향상과 설계제작 비용 절감에 도움이 될 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임 (No. 2014H1C1 A1067175), 일부 저자는 2015년도 정부(미래창조과학부) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2011-0030058)

REFERENCES

1. Choi, W., Vibration of Roller Chain Drives with and without a Tensioner, PhD Thesis, University of Michigan, 2009
2. Dubowsky, S. and Freudenstein, F., "Dynamic analysis of mechanical systems with clearances, part 1: Formation of dynamic model", Journal of Engineering for Industry, ASME Vol. 93, No. 1, pp. 305-309, 1971
3. Dubowsky, S. and Freudenstein, F., "Dynamic analysis of mechanical systems with clearances, part 2: Dynamic response", Journal of Engineering for Industry, ASME Vol. 93, No. 1, pp. 310-316, 1971
4. Wang, K. W. and Liu, S. P., "On the noise and vibration of chain drive systems", The Shock and Vibration Digest Vol. 23, No. 4, pp. 8-13, 1991
5. Wang, K. W., Liu, S. P., Hayek, S. I. and Chen, F. H., "On the impact intensity of vibrating axially moving roller chains", Vibration and Acoustics Vol. 114, No. 3, pp. 397-403, 1992
6. Kim, M. S., Dynamic Behavior of Roller Chain Drives at Moderate and High Speeds, PhD Thesis, University of Michigan, 1990
7. Kim, M. S. and Johnson, G. E., 'A general, multibody dynamic model to predict the behavior of roller chain drives at moderate and high speeds', Advances in Design Automation Vol. 1, pp. 257-268, 1992
8. Choi, W. and Johnson, G. E., 'Transverse vibrations of roller chain drive with tensioner', Vibrations of Mechanical Systems and the History of Mechanical Design, ASME, DE-Vol. 63, pp. 19-28, 1992
9. Choi, W. and Johnson, G. E., 'Vibration of the roller chain drives at low, medium and high operating speeds', Vibration of Mechanical Systems and the History of Mechanical Design, ASME, DE-Vol. 63, pp. 29-40, 1992
10. Conwell, J. C. and Johnson, G. E., 'Experimental investigation of link tension and the roller-sprocket impact in roller chain drives', Mech. Mach. Theory Vol. 31, No. 4, pp. 533-544, 1996
11. Chang-Uk Kim, Jin-Chul Park, Jung-Il Song. "Study of Structural Reliability of Pipe-Fitting Collet Tool." Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 4, pp. 140-145, 2015
12. C. U. Kim, J. C. Park, J. Y. Chung, J. I. Jung. "Long-pitch heavy-duty roller chain structural analysis and design of light weight." Proceedings of the KSMPE Conference, p13, 2015
13. C. U. Kim, M. S. Jun, J. C. Park, S. H. Cha, J. I. Jung.. "Structural Safety Assessment of Pipe Fitting Tool." Proceedings of the KSMPE Conference, p83, 2014