

고하중용 버킷 롤러체인 시스템의 다물체 동역학 해석 및 내구성 연구

Study on Multibody Dynamic Analysis and Durability of Heavy Load Bucket Roller Chain System

김창욱¹, 박진철¹, 이동우¹, 송정일^{1,✉}
Chang Uk Kim¹, Jin Chul Park¹, Dong Woo Lee¹, and Jung Il Song^{1,✉}

¹ 창원대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Changwon National University)
✉ Corresponding author: jsong@changwon.ac.kr, Tel: +82-55-213-3604

Manuscript received: 2016.3.23. / Revised: 2016.8.18. / Accepted: 2016.8.18.

In this study, multibody dynamic and mechanical analyses were conducted for the structure of roller chain bucket elevator system. The fatigue life of the roller chain elevator system was determined under static and fatigue loadings. Results of multibody dynamic analysis suggested that the maximum contact force occurred at the drive sprocket engagement point with the roller chain due to maximum tension. Fatigue analysis results suggest that the high load roller chain system is durable and safe because its life time is more than 700,000 cycles, close to its designed value (1,000,000 cycle). However, the contact portion of plate and pin needed a safety factor. The dynamic analysis of the heavy load roller chain was conducted with a multibody dynamic analysis program. The results obtained in this study can be utilized for dynamic analysis of roller chain systems in all industries.

KEYWORDS: Continuous ship unloader (CSU, 연속식 하역기), Roller chain (롤러 체인), Multibody dynamic analysis (다물체 동역학), Fatigue analysis (피로 해석)

1. 서론

버킷 엘리베이터용 고하중용 롤러체인은 연속식하역기 (Continuous Ship Unloader, CSU)의 핵심 구성요소이며, 해상 및 육상에서 수송되는 벌크 화물을 굴삭 및 수직 이송하기 위해 사용된다. 롤러체인의 피치는 350 mm 롱피치 체인으로 스프라켓과 맞물려 회전하면서 일정한 각도를 가지고 다양한 형태로 회전을 하게 된다. 이때 각도 차이에

의해 스프라켓과 롤러체인이 접촉하면서 충격을 받게 되어 큰 진동과 소음이 발생한다. 이는 운전자의 편의성이 제공되고 있지 않은 실정이며, 20 - 30년전 정적인 이론계산을 통해 설계가 되어 고중량화 되어있는 실정이다.¹⁻⁴

연속식 하역기 (CSU) 구동 시 나타나는 롤러체인의 다양한 동적 거동에 대해 다물체 동역학 해석을 통해 분석하여, 초기 설계 단계에서의 과대 설계된 부분을 줄일 수 있고, 롤러체인의 결함의

원인을 분석하고자 한다. 동적 상태에서 발생하는 롤러체인 링크 간의 장력 및 스프라켓과 롤러체인이 맞물릴 때 발생하는 접촉력과 동적 거동을 예측하여 이를 설계에 반영하는 것은 매우 중요하다.^{5,6}

따라서 본 연구에서는 다물체 동역학 해석 프로그램을 이용하여 고하중용 롤러체인 시스템의 동적 거동을 분석하고, 정적 및 피로해석을 통해 고하중용 롤러체인 시스템의 내구성을 평가하고자 한다.



Fig. 1 Roller chain system of CSU

2. 고하중용 롤러체인 시스템 동역학 해석

고하중용 롤러체인 시스템을 Fig. 1에 나타내었으며, ADAMS / Machinery를 이용하여 모델링 및 롤러체인 시스템의 동적 해석을 수행하였다. 위저드 방식으로 스프라켓, 롤러체인, 버킷 순으로 모델링하여, 구동 경계조건을 적용하여 다물체 동역학 해석을 수행하였다.

2.1 롤러체인 시스템 모델링

롤러체인 시스템의 스프라켓은 롤러체인과 기구적으로 결합하기 때문에 톱니의 형상을 결정하기 위해서는 피치원 지름 (D_p)과 이끝원 지름 (D_o), 이뿌리원 지름 (D_B)이 필요로 하며, 본 연구에서는 아래 식(1)~ 식(3)을 이용하여 스프라켓을 모델링 하였다.

$$D_p = \frac{P}{\sin \frac{180^\circ}{Z}} \tag{1}$$

$$D_o = P \left(0.6 + \cot \frac{180^\circ}{Z} \right) \tag{2}$$

$$D_B = D_p - d_r \tag{3}$$

여기서 P 는 체인의 피치 (mm), Z 는 스프라켓 잇수, d_r 은 롤러체인의 바깥지름이다. 구동부 스프라켓과 하부 스프라켓의 사이즈는 Table 1을 참고하여 Fig. 2와 같이 모델링을 하였다.

롤러체인은 Fig. 3과 같이 플레이트, 핀, 부시, 롤러 등으로 구성되어 있으며, 피치 (350 mm)로 롤러체인을 모델링 하였다. 위저드 방식을 이용한 모델링은 스프라켓을 먼저 모델링 한 후, Table 2를 참고하여 Fig. 4와 같이 롤러체인을 모델링 하였다. 버킷은 Fig. 5와 같이 모델링 하여 4링크에 1개의 버킷을 롤러체인에 고정되도록 하고, 버킷의 화물은 구동 시 최대 하중을 받도록 적재율 100%인

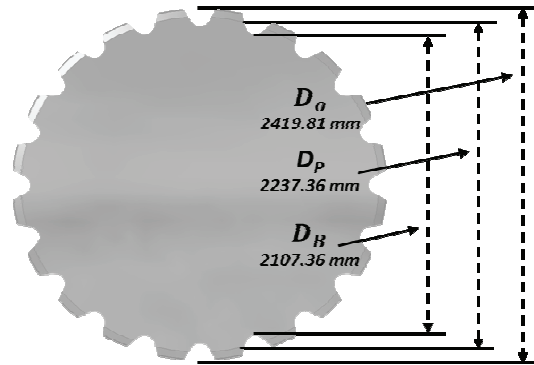


Fig. 2 Sprocket modeling design

Table 1 Sprocket modeling

	Drive sprocket	Bottom sprocket
Sprocket teeth (EA)	20	16
Diameter of the pitch circle (D_p) (mm)	2237.36	1794.04
External diameter (D_o) (mm)	2419.81	1969.57
Diameter of teeth circle (D_B) (mm)	2107.36	1664.04

Table 2 Roller chain modeling

Chain pitch (mm)	350
1 Link weight (kg)	47.925
Total number of chain (EA)	268

무게 (1176 kg)를 적용하여 전체 롤러체인 시스템을 Fig. 6과 같이 구성하여 해석을 수행하였다.

2.2 다물체 동역학 해석

ADAMS / Machinery를 이용하여 고하중용 롤러체인 시스템의 구동 시 최대 접촉력 및 최대 장력을 확인하기 위해 Fig. 6과 같이 모델링하여 다물체 동역학 해석을 수행하였다. 스프라켓과 롤러체

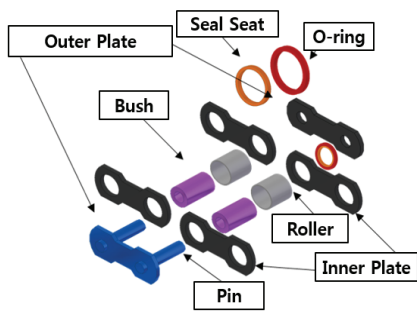


Fig. 3 Roller chain components

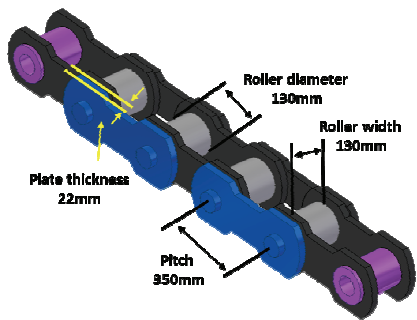


Fig. 4 Roller chain modeling design

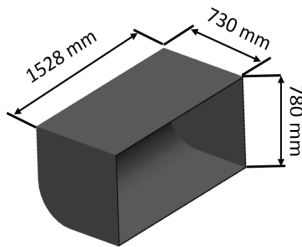


Fig. 5 Bucket modeling

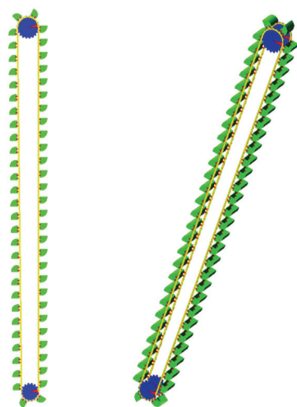


Fig. 6 Bucket elevator roller chain system modeling

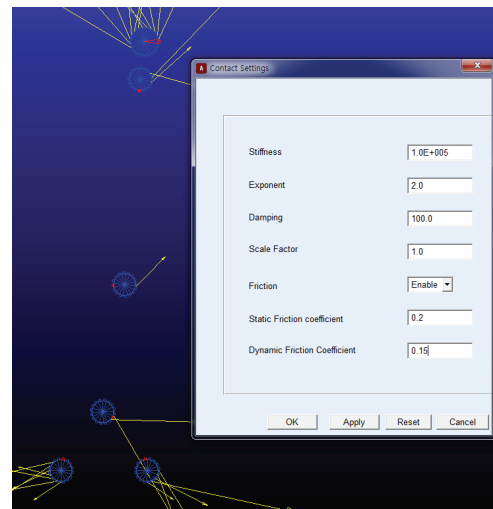


Fig. 7 Bucket elevator roller chain system modeling

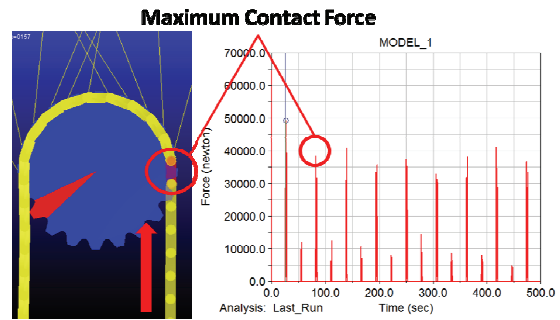


Fig. 8 Maximum contact force position

인 구동간의 경계 조건은 Fig. 7과 같이 정지마찰 계수는 0.2, 운동마찰계수는 0.15로 적용하였으며, 구동 조건은 구동부 스프라켓을 반 시계 방향으로 1.5 m/s 속도와 다른 스프라켓은 반경 방향 회전이 되도록 설정하여 해석을 수행하였다.

Fig. 8은 고하중용 롤러체인 시스템의 접촉력 데이터 결과로서 상부 구동부 스프라켓과 맞물릴 때 가장 큰 접촉력을 받는다. 또한, 최대 접촉력 값은 일정하지 않은데, 이는 롤러체인 시스템 동적 거동이 일직선으로 방향이 아닌 법선방향 변위에 의해 스프라켓과 맞물리는 롤러체인의 초기 압력각이 달라져 접촉력 값이 달라지는 것을 확인하였다.

Fig. 9는 고하중용 롤러체인 시스템의 장력 데이터 결과로서 최대 장력은 체인 링크의 중력을 포함한 구동부 스프라켓과 맞물리기 전 가장 큰 장력을 받게 된다.

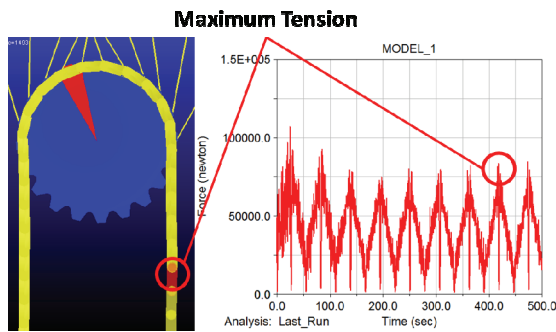


Fig. 9 Maximum tension position

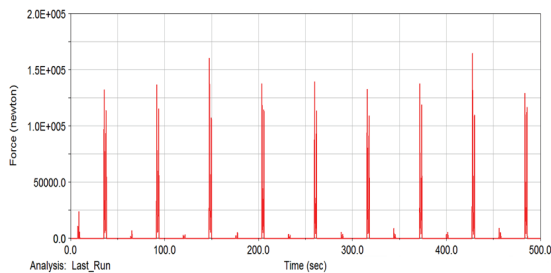


Fig. 10 Contact force result of bucket elevator roller chain system

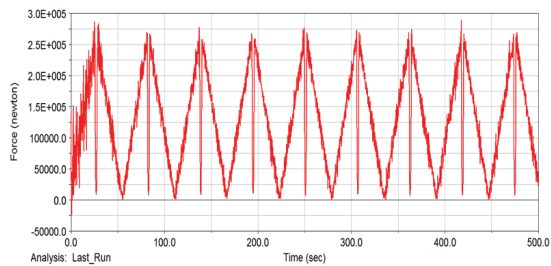


Fig. 11 Tension result of bucket elevator roller chain system

Fig. 10은 고하중용 버킷 엘리베이터 롤러체인 시스템의 접촉력 해석 결과로, 롤러체인과 스프라켓이 맞물리기 전 롤러체인의 초기 압력각이 달라짐에 의해서 최대 접촉력 값은 약 137 kN - 165 kN 이 나오는 것을 확인 하였다. 접촉력 값이 10 kN - 15 kN일 때는 하부 스프라켓과 맞물릴 때 나타나는 결과 값이다.

Fig. 11은 고하중용 버킷 엘리베이터 롤러체인 시스템의 장력 해석 결과값으로, 롤러체인의 최대 장력 값은 구동부 스프라켓과 맞물리기 전 상부에서 약 275 kN을 확인 하였다. 다물체 동역학 해석

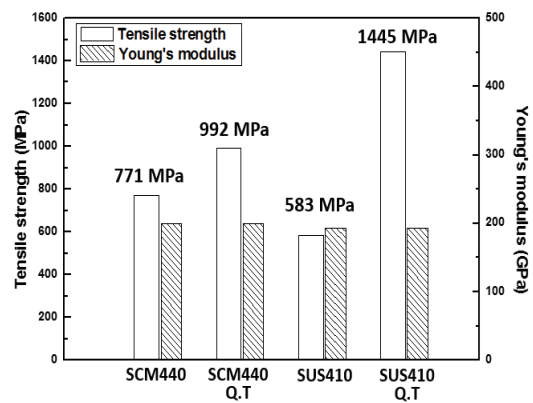


Fig. 12 Results of tensile test

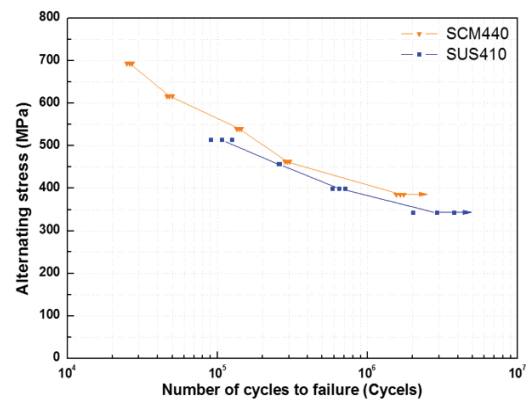


Fig. 13 Results of fatigue test

을 통해 나온 데이터를 이용하여 고하중용 롤러체인의 정적 해석 및 피로 해석을 수행하였다.

3. 내구성 연구

3.1 기계적 물성평가

고부하 롤러체인 부품별 소재에 대한 기계적 물성 확보를 위해 소재별 열처리, 비열처리 시편을 제작하여 기계적 물성평가를 수행하였다. 플레이트는 SCM440, 핀, 부시, 롤러에는 SUS410이 사용된다. 시험편은 원 소재에서 ASTM 규격에 따라 제작하여 인장시험 및 피로시험을 만능시험기 (MTS810, USA)를 이용하여 기계적 물성평가를 수행하였다.

인장시험은 3 mm/min속도로 설정하여 상온에서 인장 시험을 수행하였으며, 그 결과 Fig. 12와 같이 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 열처리 시편

Table 3 Material properties

	SCM440	SUS410
Density [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	7850	7750
Poisson's ration	0.3	0.31
Elastic modulus [GPa]	200	193
Yield strength [MPa]	892	955
Ultimate strength [MPa]	992	1,455

SCM440, SUS410의 최대 인장강도는 각 992 MPa, 1,445 MPa 로 나타났다.

인장시험 결과를 바탕으로 SCM440, SUS410 소재에 대해 단축 피로시험을 실시하였다. 작용하중은 하중 비 (R) 0.1로 설정하고 항복응력의 90 - 50%에 해당하는 하중으로 시험을 진행하였다. 그 결과 Fig. 13과 같이 SCM440은 400 MPa 이하, SUS410은 350 MPa 이하에서 10^6 Cycle 이상의 피로수명을 가졌다.

3.2 정적 구조해석 및 피로해석

다물체 동역학 해석 결과인 롤러체인 of 최대장력 데이터를 가지고 롤러체인 내구성에 대하여 연구를 수행하였다. 롤러체인은 Solid Edge ST4로 모델링 하였으며, 해석시간의 손실을 줄이고 원활한 해석 진행을 위해 구조를 단순화 하여 롤러체인의 구성요소 (플레이트, 핀, 부시, 롤러)를 어셈블리 하였다. 정적 구조해석은 ANSYS WB를 이용하여 모델링 된 롤러체인을 Import 시킨 후 재료의 물성치를 정의하고 격자생성을 하고 경계조건을 설정하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 재료 물성은 Table 3의 물성을 적용하였다.

Fig. 14는 정적 구조해석에 적용한 작용하중 및 경계조건을 나타내었다. 다물체 동역학 해석에서 나온 롤러체인의 최대 장력 값인 275 kN을 수직하중으로 적용하였다. 마지막으로 롤러체인의 핀에 회전운동에는 자유로우나 X, Y, Z축으로 구속되어 있는 Cylindrical Support조건을 적용하여 경계조건을 설정하였다.

Fig. 15는 플레이트의 정적 구조해석 결과로 최대 응력은 234 MPa로 핀과 접촉하는 플레이트의 홀 부위에서 나타났다. 이는 피로 시험 결과 공칭응력 385 MPa보다 낮은 결과로 피로수명은 이론적으로 안전함을 알 수 있다. 최대 응력이 홀 부위에 나타나는 이유는 핀과의 접촉을 하기 위한 단면적 감소로 이 부분에서 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 16은 정적 구조해석의 핀에 대한 결과로

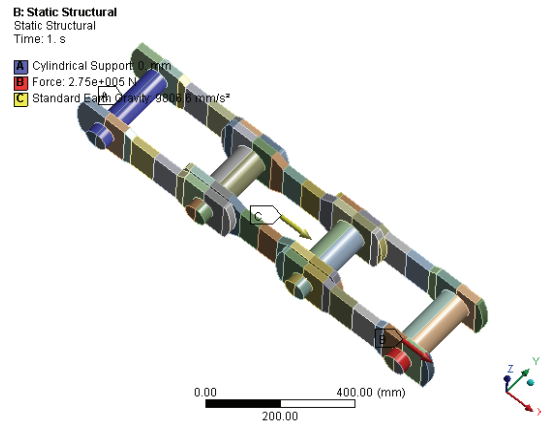


Fig. 14 Boundary conditions for static analysis

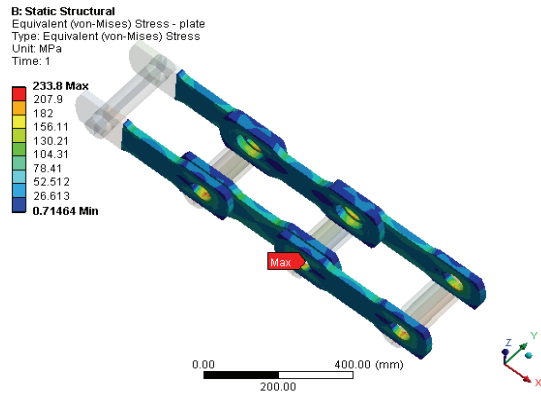


Fig. 15 Equivalent stress of plates

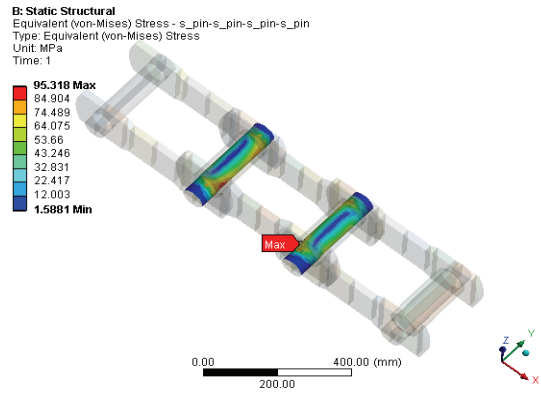


Fig. 16 Equivalent stress of pins

최대 응력은 95 MPa로 플레이트와 맞닿는 부위에서 나타났다. 이는 피로 시험 결과 공칭응력 342 MPa보다 낮은 결과로 안전함을 알 수 있다.

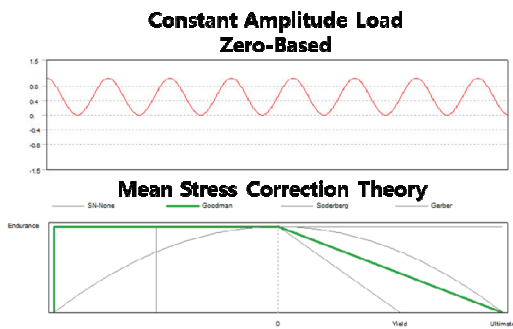


Fig. 17 Goodman mean stress correction theory

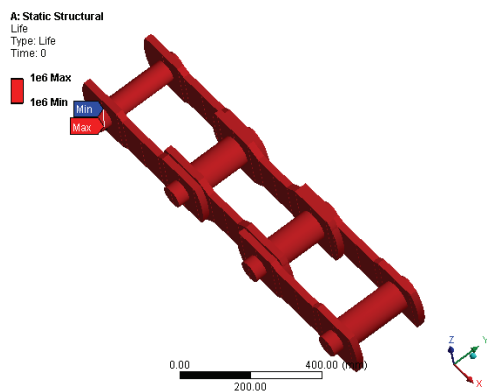


Fig. 18 Life of fatigue

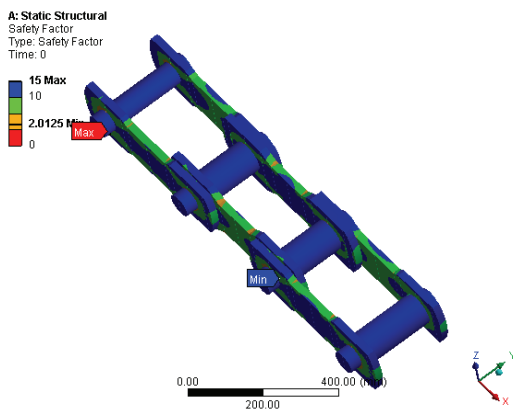


Fig. 19 Safety factor

고부하 툴러체인을 피로해석은 정적 구조해석의 경계조건과 동일하게 적용하고, 피로해석을 위해 Fig. 13의 S-N선도를 적용하였다. 피로해석 이론은 Fig. 17과 같이 Goodman 이론 식을 사용하여 해석을 수행하였다.

피로해석 결과 피로수명은 Fig. 18과 같이 플레

이트와 핀이 접촉하는 쪽에서 최소값이 나타났으며 최대 10^6 Cycle을 가졌으며, Fig. 19는 안전계수 결과로써 핀, 부시, 플레이트의 외각 부에는 안전계수가 10 이상을 가지지만 플레이트와 핀이 접촉하는 쪽에서는 큰 안전계수를 요하는 것으로 나타났다. 설계 코드에 의한 툴러체인의 평균수명은 $0.7 * 10^6$ Cycle 이상이기 때문에 안전하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 버킷 엘리베이터 툴러체인 시스템의 다물체 동역학 해석 및 기계적 특성 시험을 수행하여, 이를 반영한 툴러체인의 정적 구조해석 및 피로해석을 수행하였다. 피로수명을 예측하기 위해 수행한 버킷 엘리베이터 툴러체인 시스템의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 고하중용 버킷 엘리베이터 툴러체인 시스템 다물체 동역학 해석 결과 구동부 스프라켓과 툴러체인이 맞물릴 때 최대 접촉력이 발생하였으며, 구동부 스프라켓과 맞물리기 전 툴러체인이 가장 큰 최대 장력을 받는 것을 확인하였다.

(2) 피로해석 결과, 고하중용 툴러체인 시스템은 10^6 Cycle 이상으로서 설계 코드에 의한 수명시간 700,000 Cycle 이상이기 때문에 안전하였으며, 플레이트와 핀의 접촉부는 큰 안전계수를 필요로 하는 것을 확인하였다.

(3) 다물체 동역학 해석을 통해 고하중용 툴러체인에 작용하는 하중을 분석하여, 구조해석을 통해 설계 검증을 하였으며, 과 설계된 툴러체인의 플레이트, 핀 부품에 대한 최적 설계를 통해 향후 설계에 반영한다면 큰 도움이 될것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 2014H1C1A1067175), 2013년도 정부(미래창조과학부) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2011-0030058).

REFERENCES

1. Pedersen, S. L., "Model of Contact between Rollers and Sprockets in Chain-Drive Systems," Archive of Applied Mechanics, Vol. 74, No. 7, pp. 489-508, 2005.

2. Fritz, P. and Pfeiffer, F., "Dynamics of High Speed Roller Chain Drives," ZAMM-Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Vol. 76, No. 5, pp. 151-152, 1996.
3. Pedersen, S. L., "Model of Contact between Rollers and Sprockets in Chain-Drive Systems," Archive of Applied Mechanics, Vol. 74, No. 7, pp. 489-508, 2005.
4. Liu, S., Hayek, S., and Chen, F., "On the Impact Intensity of Vibrating Axially Moving Roller Chains," Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 114, pp. 397, 1992.
5. Choi, W. and Johnson, G. E., "Transverse Vibrations of Roller Chain Drive with Tensioner," Vibrations of Mechanical Systems and the History of Mechanical Design, Vol. 63, pp. 19-28, 1993.
6. Veikos, N. and Freudenstein, F., "On the Dynamic Analysis of Roller Chain Drivers, Part II - Case Study," Mechanical Design and Synthesis, Vol. 46, pp. 441-450, 1992.