

동역학 해석을 통한 송전선로 검사로봇 프레임 설계에 관한 연구

Dynamic Stiffness Design of Inspection Robot Frame Using Multi-body Dynamic Simulation

이 준 영*. 김 문 영*. 임 지 윤*. 김 창 환**. 임 홍 재†

Jun Young Lee, Moon Young Kim, Ji Youn Lim, Chang Hwan Kim and Hong Jae Yim

(Received November 25, 2014 ; Revised February 3, 2015 ; Accepted March 6, 2015)

Key Words : Sub-span Oscillation(서브스판 진동), Inspection Robot(검사로봇)

ABSTRACT

This study aims to improve the dynamic stiffness of an inspection robot frame to prevent derailment from transmission lines. Finite element models for the transmission lines and robot frame are developed for the multi-body dynamic simulation. Natural frequency analysis was conducted using the FE models. Three types of spacer damper clamps installed on 4-conductor transmission lines are used to evaluate the derailment of the robot. Multi-body dynamic simulations with FE models are demonstrated for sub-span oscillation. When the robot operates, derailment of inspection robot from the transmission lines is determined because of resonance. To prevent the resonance, body position was changed and thickness optimization was conducted. The results show that derailment was not occurred because of the natural frequency improvement.

1. 서 론

송전선로는 대부분 높은 곳에 위치하며 특히 다도체 선로의 경우 고지대의 송전탑에 설치되게 된다. 이 연구에서 사용된 송전선로 검사로봇은 이러한 고지대에 위치한 다도체 선로의 유지 및 보수 작업을 위해 제작된 프로토타입 모델이다. 송전선로 검사로봇은 고지대에 위치한 선로 위에서 작업을 수행하여야 하기 때문에 항상 바람에 의한 선로의 진동이 발생되게 되는데 이러한 진동에 의한 로봇의 공진현상이 발생하거나 그로 인해 선로로부터의 탈선이 발생할 위험이 있다. 따라서 이를 고유진동수

해석 및 동역학 시뮬레이션을 통해 거동 확인 및 개선이 필요하다.

앞서 진행된 연구로는 고지대에 설치되는 다도체 송전선로에서 사용되는 로봇이 없기 때문에 선로에서의 스페이서 댐퍼, 리브와 같은 로봇에게 장애물이 되는 물체를 극복을 위한 로봇의 구조적 변경에 대한 연구^(1,2)가 대부분이다. 따라서 이 연구에서는 송전선로 검사로봇을 바람에 의한 진동이 적용된 다물체 동역학 해석을 통해 거동을 확인하고 이를 통해 로봇 프레임의 설계변경을 수행한다.

먼저 4도체 송전 선로를 유한요소를 이용하여 구성하고 고유진동수 해석을 진행한다. 시뮬레이션에서 얻어진 결과를 선행연구에서 진행된 실험결과와

† Corresponding Author ; Member, School of Automotive Engineering, Kookmin University
E-mail : hjyim@kookmin.ac.kr
Tel : +82-2-910-5145, Fax : +82-2-910-5037

* Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University
** Korea Institute of Science and Technology

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

비교를 진행하여 모델을 검증한다. 또한 로봇 프레임에 유한요소를 이용하여 고유진동수 해석을 진행하고 두 모델을 이용하여 다물체 동역학 시뮬레이션 모델을 구성한다. 로봇 작업 시 실제 환경에서와 같은 조건을 통해 탈선에 대한 안정성을 평가하기 위하여 선행연구의 실험결과를 바탕으로 서브스판 진동을 구성한다. 이후 시뮬레이션을 통해 로봇의 거동을 파악한 후 로봇 본체의 위치를 조정하고 프레임의 두께를 이용한 최적화를 통해 최적화 모델을 도출한다. 도출된 최적화 모델을 이용한 다물체 동역학 해석을 이용한 안정성 평가를 통해 최적화 모델을 검증한다.

2. 송전선로 모델링

2.1 서브스판 진동

송전선로는 고지대에 위치하며 바람에 의해 많은 진동이 발생되는데 크게 미풍진동, 깎로핑 진동, 서브스판 진동으로 나눌 수 있다⁽³⁾. 미풍 진동의 경우 3~150 Hz의 주파수를 갖는 진동으로 진폭의 크기가 매우 미소하여 무시할 수 있으며 깎로핑 진동의 경우 0.08~3 Hz의 주파수범위를 갖는 진동으로 진폭의 크기는 도체 직경의 300배까지 커지는 진동이다. 깎로핑 진동의 경우 선로 전체가 하나가 되어 진동하는 형상을 가지며 발생풍속은 태풍과 같이 큰 풍속에서 발생하는 진동으로 이 연구에서는 고려하지 않도록 한다. 서브스판 진동의 경우 주파수의 범위는 0.5~10 Hz의 범위로 고차 모드 형상을 갖는 진동이고 진폭의 크기는 도체 직경의 20배까지 발생할 수 있는 진동이다. 서브스판 진동의 경우 두 개의 스페이스 댐퍼 사이에 거리인 소경간에서 각각의 도체가 독립적으로 발생하는 진동으로 송전선로 검사로봇 작업 시 서브스판 진동이 발생할 경우 탈선할 우려가 있어 매우 위험할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 송전선로 검사로봇이 서브스판 진동 시 해당 고유진동수 영역에서 공진현상 발생 시 탈선 여부를 통해 안정성을 판단하도록 한다.

2.2 유한요소 모델링 및 고유진동수 해석

로봇 주행 시 바람에 의한 진동을 시뮬레이션 하기 위해 송전 선로를 유한요소로 모델링하고 고유진동수 해석을 진행하였다. 송전선로는 직경이 30 mm인

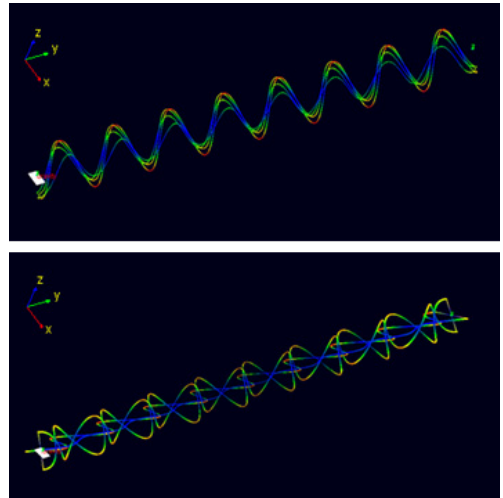


Fig. 1 Natural frequency mode shape of transmission lines

Table 1 Comparison of natural frequency between simulation and experiment

Length [m]	Experiment [Hz]	Analysis [Hz]	Difference [%]
36	1.61	1.63	1.7
42	1.38	1.40	1.8
51	1.03	1.05	1.9
53	1.09	1.09	0.1
58	1.13	1.16	2.5
60	0.96	0.98	1.3

알루미늄으로 구성되어 있으며 전체 선로 길이는 200~300 m로 다양하다 그러나 두 개의 스페이스 댐퍼 사이인 소경간의 길이는 36 m, 42 m, 51 m, 53 m, 58 m, 60 m로 구성되어 있기 때문에 실제 소경간과 같은 길이로 구성하여 해석을 진행하였다. 해석 결과 Fig. 1과 같이 서브스판 진동 영역에서는 고차 모드 형상을 갖는 것을 확인할 수 있었으며 Table 1과 같이 실제 실험의 측정 결과와 고유진동수가 2% 내외의 차이가 발생함을 확인하여 모델의 유용성을 확인하였다.

3. 프레임 모델링 및 고유진동수 해석

이 논문에서 구성된 송전선로 검사로봇의 형태는 Fig. 2와 같다. 현 로봇은 프로토타입으로 프레임

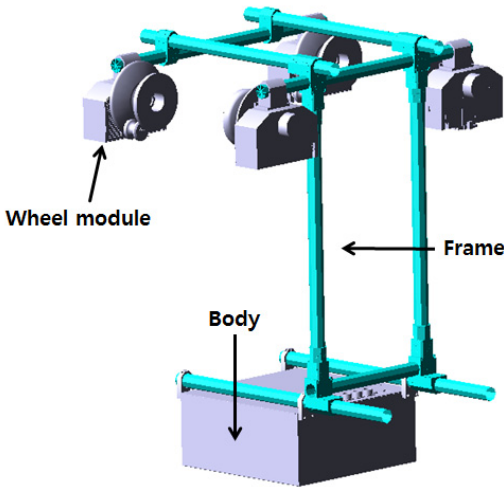


Fig. 2 Diagram of inspection robot

상단은 우물정(井) 형태로 휠 모듈이 부착될 프레임과 그것을 지지하는 수직방향 파이프가 있고 하단에는 로봇 본체가 4곳의 클램프 형태로 부착되어 있다. 수직방향의 파이프는 선로위에 설치의 용이성을 위해 한쪽방향에만 구성되어 있으며 현재 모델은 형태만 갖추어져 있고 검사로봇 주행 및 송전선로의 진동특성에 따른 거동 파악이 되지 않은 상태이므로 해석을 통한 거동 파악 및 설계변경이 필요하다고 할 수 있다. 로봇 상단에 부착되는 각 휠 모듈의 무게는 각각 12 kg이며 프레임 아래에 부착되는 본체는 약 40 kg이고 로봇 프레임의 무게는 10.56 kg 구성되어 있다.

로봇 프레임의 무게 대비 모듈과 본체의 무게가 매우 무겁기 때문에 로봇 프레임 또한 유한요소로 구성하여 해석을 진행하였다. 로봇 프레임은 단면의 형태는 튜브 형태이며 두께 2 mm인 탄소섬유 파이프로 지름은 50 mm로 제작되어 있으며 결합부 부분은 속이 비어있지 않은 알루미늄 합금으로 구성되어 있다. 따라서 파이프 부분은 쉘요소로 구성하고 결합부 부분은 솔리드 요소를 이용하여 구성하였다. 또한 로봇 본체의 경우 본체를 지지하는 파이프의 변위가 발생할 때 본체의 영향도 고려하기 위하여 본체 또한 쉘요소로 구성하였으며 두께 2 mm이고 재질은 결합부와 같은 알루미늄 합금으로 구성하였다. 프레임에 모든 모듈이 부착되었을 시의 고유진동수를 파악하기 위하여 휠 모듈과 본체의 무게중심점을 추출하여 포인트 매스를 부과하고 고유진동수

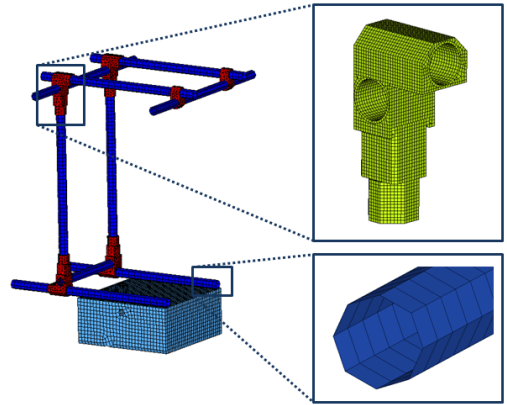


Fig. 3 Finite element model of inspection robot

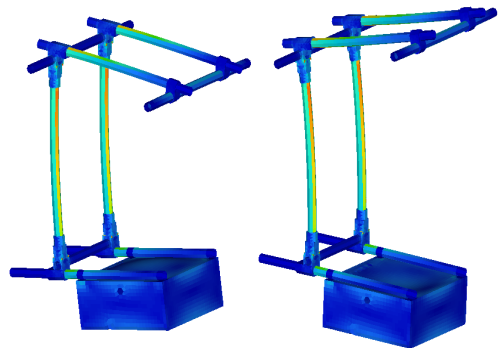


Fig. 4 1st natural frequency mode shape of base model

Table 2 Natural frequency of inspection robot frame

Mode	Frequency [Hz]
1st Bending mode	10.56
1st Torsion mode	12.86
2nd Bending mode	16.70
2nd Torsion mode	20.73

해석을 진행하였다. 해석결과 Table 2와 같이 첫 번째 고유진동수는 10.56 Hz인 것을 확인하였고 모드 형상은 Fig. 4와 같이 굽힘 모드로 확인 되었으며 수직방향의 파이프와 상단부분의 횡 방향 파이프 두 곳에서 대부분의 응력이 발생됨을 확인하였다. 현 로봇의 첫 번째 고유진동수는 서브스판 진동의 최대 주파수와 매우 가까우므로 공진이 일어날 가능성이 있다. 따라서 실제 거동해석을 통한 고유진동수 향상 설계가 필요하다고 할 수 있다.

4. 기본모델 다물체 동역학 해석

서브스판 진동 시 로봇의 거동을 확인하기 위하여 앞에서 구성된 선로 중 가장 짧은 소경간인 36 m 선로 모델을 이용하여 Fig. 5와 같이 다물체 동역학 시뮬레이션 모델을 구성하였다. 선로와 로봇 프레임은 유한요소 모델을 이용하였고 휠 모듈은 강체로 구성하여 질량을 부과하였다. 실제 소경간의 양 끝에 작용하는 장력을 선로 모델 양 끝에 2500 kgf 적용하였고 서브스판 진동환경과 같은 환경을 구성하기 위하여 각 라인에 독립적으로 힘을 적용하였다. 그 형태는 사인파의 형태로 0.5 Hz에서 10 Hz의 주파수 범위이고 크기는 유체 운동량 정리⁽⁴⁾를 이용하여 서브스판 발생 최대 풍속인 17 m/s 일 때 송전 선로에 작용하는 힘인 180 N을 가하였다. 서브스판 진동형태가 각 도체가 독립적으로 진동을 하는 형태이므로 힘의 방향을 수평, 수직, 비틀림 방향으로 총 세 가지로 구성하였다.

또한 송전선로 검사로봇은 선로 위에서 주행 시 스페이스 댐퍼를 지나가야 한다. 송전선로 검사로봇 휠 형상이 좌우 탈선방지에 초점이 맞추어져 있으므로 댐퍼의 클램프 부분에 올라서는 순간 서브스판 진동이 발생한다면 탈선의 위험이 있으므로 이에 대한 거동을 파악하기 위하여 Fig. 6과 같이 실제 4도체 송전선로에 쓰이는 3가지 대표적인 스페이스 댐퍼 클램프를 선로 모델에 부착하여 모델을 구성하였다. 실제 로봇 휠은 고무의 일종인 NBR로 이루어져 있으며 고무와 알루미늄 선로사이의 마찰계수는 2.5로 구성되어 있고 로봇의 속력은 0.5 m/s로 주행하도록 하였다. 이때 스페이스 댐퍼의 극복 여부와 선로로부터 휠의 탈선 여부를 확인하였고 진동 시 로봇의 안정성을 평가하기 위하여 본체의 좌우 변위를 측정하였다.

그 결과 Fig. 7과 같이 서브스판 진동 발생 시 로봇은 진자 형태로 좌우로 진동하는 형태를 띄며 본체에 의한 모멘트 발생으로 최대 좌우 변위는 1560 mm로 Fig. 8과 같이 측정되었으며 프레임의 고유진동수와 가까운 주파수로 서브스판 진동 발생 시 로봇 프레임의 공진현상에 의한 굽힘 모드가 발생함에 따라 한쪽 휠 모듈이 선로로부터 이탈하는 결과를 확인하였다.

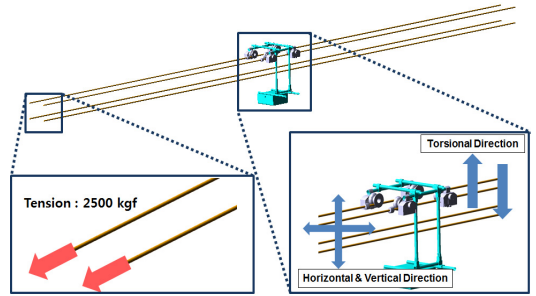


Fig. 5 Multi-body dynamic simulation model

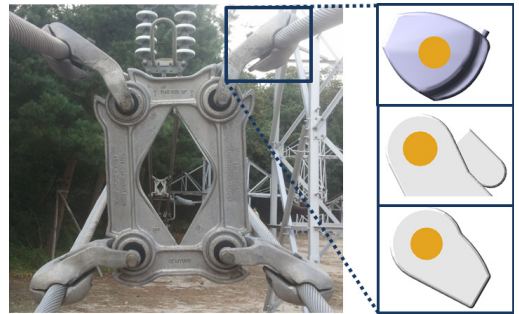


Fig. 6 3 type clamps of Spacer damper

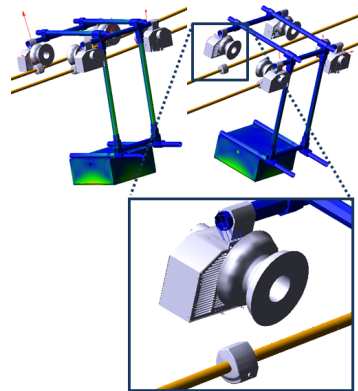


Fig. 7 Multi body dynamic simulation result of base model

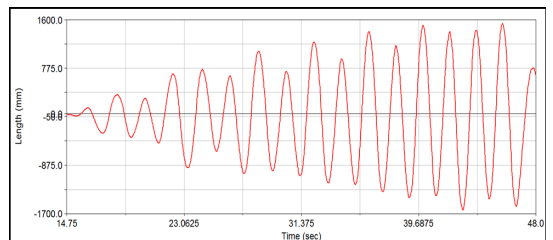


Fig. 8 Body displacement of base model

5. 프레임 설계변경

선로위에서 휠 모듈은 로봇과 선로의 지지점이 되고 본체는 하단에 부착된 질량이라므로 로봇이 진자 형태로 진동 시 휠 모듈과 본체 사이의 거리가 짧아 질수록 발생하는 모멘트의 크기가 줄어들고 본체의 좌우 변위가 감소할 수 있다. 그러나 송전선로의 고압 활선상태에서 전기적인 영향과 향후 본체 상단에 부착될 검사장비 등을 고려하여 아래 선로와 본체 사이에 최소 260 mm의 간격을 유지하여야 한다. 따라서 현재 520 mm의 간격을 260 mm로 수직 파이프의 길이를 줄여 Fig. 9와 같이 모델을 구성하였으며 무게는 기본모델 대비 감소한 9.71 kg으로 기본모델 대비 감소한 것을 확인하였다.

동강성 확인을 위해 고유진동수 해석 결과 첫 번째 굽힘모드 고유진동수는 11.48 Hz, 첫 번째 비틀림모드 고유진동수는 13.53 Hz로 기본모델 대비 향상된 것을 확인되었다. 해당 모델의 동적 거동을 확인하기 위하여 앞서 구성된 다물체 동역학 시뮬레이

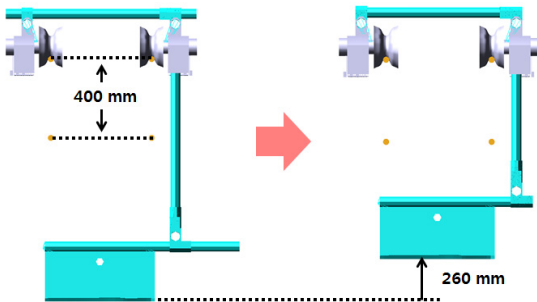


Fig. 9 Change of robot body position

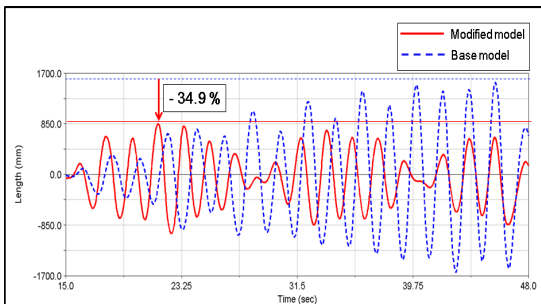


Fig. 10 Comparison of body displacement between base and modified model

션 모델에 대입하여 시뮬레이션을 진행하였고 그 결과 최대 진폭은 기본 모델 대비 약 34.9% 감소하였으며 이에 따른 로봇 휠의 탈선 또한 발생하지 않음을 확인하였고 이를 Fig. 10에 나타내었다. 그러나 해당 모델의 경우 모든 파이프의 두께가 3 mm로 동일하므로 최적 설계에 따른 동강성 향상 및 프레임의 경량화가 필요하다. 따라서 이 연구에서는 해당 수정된 모델을 이용하여 최적설계를 진행하도록 한다.

6. 두께 최적설계

수정된 모델의 각 파이프를 Fig. 11과 같이 각각의 파이프를 한 쌍씩 설계변수로 설정하고 변화 폭은 제작 가능한 두께인 1 mm부터 3 mm까지 변화 되도록 설정하였으며 실험계획법을 이용하여 근사함수를 도출하였다. 도출된 근사함수를 이용하여 식 (1)와 같이 정식화 수립 후 반응표면법을 이용한 최적화를 통해 최적화 모델을 도출하였다. 도출된 최적화 결과는 Table 3과 같이 확인할 수 있으며 결과를 보면 굽힘 모드를 향상시키기 위해 세로와 횡방향의 파이프 두께가 증가하고 다른 파이프들의 두께는 감소한 것을 확인할 수 있으며 이에 따라 모델의 질량은 9.64 kg으로 새로운 기본 모델의 질량인 9.71 대비 약 0.72% 감소하였고 고유진동수 해석을 진행한 결과 첫 번째 고유진동수는 약 12.61 Hz로 새로운 기본모델의 11.48 Hz 대비 약 8.96% 향상됨을 확인하였고 동역학 해석 진행 시 Fig. 12와 같이 선로로부터 로봇휠이 탈선되지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 본체 최대 변위는 Fig. 13과 같이 최적화모델이 수정된 모델 대비 25.0% 감소됨을 확인하여 제약조건을 만족함을 확인하였다.

Design variables

Thickness of each carbon pipe

Design constraints

Maximum displacement < base model -20% (1)

Natural frequency > base model +15%

Objective function

Minimize of robot frame mass

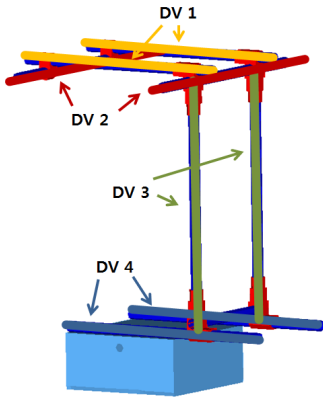


Fig. 11 Design variables of thickness optimization

7. 결 론

이 연구에서는 송전선로 검사로봇의 선로 서브스판 진동 시 거동 파악을 위한 동역학 해석 모델을 구성하고 이에 대한 로봇 프레임의 최적설계를 진행하였다. 먼저 송전 선로를 유한요소로 구성하고 고유진동수 해석을 진행하여 선행연구의 실험결과와 비교를 통해 모델의 유용성을 확인하였다. 로봇 프레임 또한 유한요소로 구성하고 고유진동수 해석을 진행하였다.

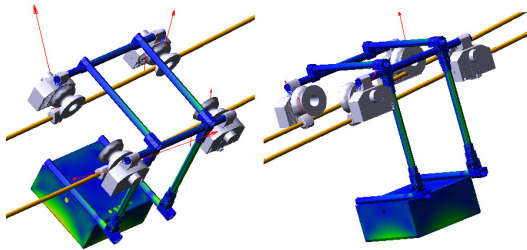


Fig. 12 Multi-body dynamic simulation result of optimal model

구성된 두 유한요소 모델을 대입하여 동역학 해석 모델을 구성하였으며 로봇 주행 시 장애물이 되는 스페이서 댐퍼 클램프를 선로에 부착하고 서브스판 진동을 구성하기 위해 사인파 형태의 진동을 0.5 Hz~10 Hz 영역의 주파수로 선로에 독립적으로 부과하였다. 이를 이용하여 기본 모델의 해석 결과 프레임의 고유진동수와 가까운 주파수에서 프레임의 공진현상으로 인한 로봇 휠의 탈선이 발생됨을 확인하였다.

로봇 프레임의 동강성 향상을 위해 로봇 본체의 위치를 상향 조정 하였으며 각 파이프의 두께를 변수로 제약조건은 고유진동수의 향상 및 본체의 좌우 변위 감소로 목적함수는 질량최소화로 설정 후 실험 계획법을 이용한 최적설계를 수행하였다. 그 결과 최적화 모델의 고유진동수는 최적설계 진행전 모델 대비 약 8.96 % 향상되었고 무게는 0.72 % 감소하였다. 최적화 모델을 이용하여 동일 조건의 다물체 동역학 해석 진행 시 서브스판 영역에서 탈선을 일으키지 않음을 확인하였고 본체의 좌우 최대 변위는 약 25.0 % 감소함을 확인하였다.

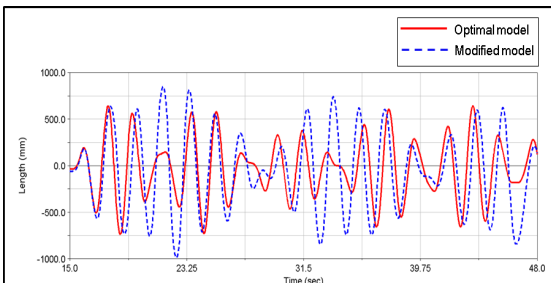


Fig. 13 Comparison of body displacement between modified and optimal model

후 기

이 연구는 한국 정부의 산업통상자원부가 지원한 로봇산업 원천기술 개발사업 프로그램(10041111)의 연구결과로 수행되었음.

Table 3 Comparison of thickness between modified and optimal model

Length [m]	Modified model [mm]	Optimal model [mm]
DV 1	2	3
DV 2	2	1
DV 3	2	3
DV 4	2	1.7

References

(1) Montambault, S. and Pouliot, N., 2006, LineScout Technology : Development of an Inspection Robot

Capable of Clearing Obstacles While Operating on a Live Line, International Conference on Robotics & Automation, pp. 1034~1040.

(2) Debenest, P. and Guarnieri, M., 2010, Expliner – From Prototype Towards a Practical Robot for Inspection of High-voltage Lines, International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, pp. 1~6.

(3) Sohn, H. K. and Lee, E. W., 2003, A Frequency Analysis of Subspan Oscillation on Verhead Transmission Lines, Korea Institute of Electrical Engineers, pp. 519~521.

(4) Potter, M. C. and Wiggert, D. C., 2009, Mechanics of Fluids Third edition, Cengage Learning, pp. 158~163.

(5) Lee, J. Y., Lim, J. Y., Kim, C. H., Lee, T. J. and Yim, H. J., 2013, A Study on Dynamic Stiffness Design of Frame Structure for Inspection Robot, Proceedings of the KSME Annual Autumn Conference, pp. 482~486.

(6) Desai, Y. M., Yu, P., Shah, A. H. and Popplewell, N., 1994, Perturbation - based Finite Element Analysis of Transmission line Gallpopping, Journal of Sound and Vibration, Vol. 191, No. 4, pp. 469~489.



Moon Young Kim received the B.S. degree in Mechanical and Automotive Engineering from Kookmin University, Seoul, Korea in 2012. He is currently working toward the Ph.D. degree in Automotive Engineering at Kookmin University, Seoul, Korea. His research interests in Nonlinear analysis of Finite element model.



Hong Jae Yim received the B.S. degree in Mechanical Design from Seoul National University, Seoul, Korea in 1979. the M.S degree in Mechanical Design from Seoul National University, Seoul, Korea in 1983 and the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from University of Iowa, Iowa City, USA in 1990. He is a professor in Automotive Engineering and the director of Computer Aided Engineering Laboratory in Kookmin University, Seoul, Korea. His research is focused on the Automotive Structure Analysis and Design.



Jun Young Lee received the B.S. degree in Mechanical and Automotive Engineering from Kookmin University, Seoul, Korea in 2011. He is currently working toward the Ph.D. degree in Automotive Engineering at Kookmin University, Seoul, Korea. His research interests in Dynamic analysis and Design of Mechanism.