한국소음진동공학회 2014년 춘계학술대회논문집, pp. 495~499

로봇 케이블의 동적 특성에 관한 연구

A Study on Dynamic Characteristic of Robot Cables

김진규† · 김재봉* · 강대선** · 최웅섭** · 김문영* · 이상범*** · 임홍재***

Jin Kyu Kim, Jae Bong Kim, Dae Sun Kang, Woong Sub Choi, Moon Young Kim, Sang Beom Lee and Hong Jae Yim

Key Words : Robot Cable(로봇 케이블), Finite Element Model(유한요소모델), Dynamic Stiffness(동강성)

ABSTRACT

In this study, the finite element modeling for the signal cable and pneumatic hose of the industrial robot is developed. The modulus of elasticity of signal cable and pneumatic hose is predicted by deflection test. Finite element model for the signal cable and pneumatic hose is developed by using the modulus of elasticity obtained from the tests. The developed finite element model is estimated through the vibration analysis. This study shows that the developed finite element model can be effectively utilized in the dynamic analysis.

1. 서 론

케이블은 현대 산업 공정에서 널리 쓰이고 있으며 특히 공장 자동화 시스템에서 로봇에 부착되어 전기 신호 및 유체의 흐름을 연결하는데 유용하게 쓰이고 있다.

로봇을 이용한 자동화 공정의 특성상 케이블의 특정 부위에 반복 하중이 빈번하게 가해지기 때문에 피로 파괴의 원인이 되고 있다. 특히 장착되는 케이블의 길이에 따라 동적 거동에 많은 차이를 보이게 되는데 이는 케이블의 수명에 많은 영향을 미친다. 따라서 수명을 최대화시키기 위해 케이블에서 발생하는 동응력을 최소화시키는 최적의 길이를 결정하는 것이 중요하다. 특히 로봇의 티칭 단계 초기에 케이블의 피로와 관련하여 수명이 짧은 구간을 예측하고, 설계 개선이 요구되는 경우에 설계 엔지니어가 적절히 대응하기 위해서는 로봇 케이블의 움직임에 따른 적절한 진동특성의 분석과 더불어 이와 관련한 최적설계기법을 이끌어내는 것이 필요하다.

본 연구와 관련된 선행 연구로서는 유한요소모델을 이용한 케이블의 굽힘 내구해석을 수행한 것이 있으며, 케이블과 같은 탄성체의 대변형 해석을 위해 절대노드좌표계(absolute nodal coordinate)를 이용한 굽힘 해석 방법이 제시되었으나 비틀림 해석은 고려되지 않았다.[(1)~(4)]

로봇 케이블에서 발생하는 비틀림 현상은 케이블의 수명을 단축시키는 주요 원인 중 하나이다. 본 연구에서는 굽힘뿐만 아니라 비틀림도 고려한 피로수명을 예측하기 위해 케이블을 유한요소로 모델링한 후 비틀림 모드를 고려한 동특성을 분석한다. 먼저 케이블의 탄성계수를 구하기 위해 처짐 시험을 수행하였으며 실험값과 오차를 비교하여 유한요소모델의 탄성계수 값을 도출한다. 실험을 통해 얻어진 결과를 이용하여 유한요소모델을 구성하고 고유진동해석을 통해 동특성을 파악한다.

---

† 교신저자; 국민대학교 자동차공학전문대학원
E-mail : triangulum85@gmail.com
Tel : 02-910-5145
* 국민대학교 자동차공학전문대학원
** 기아자동차
*** 국민대학교 자동차공학과

2. 로봇 케이블의 구조

Fig.1은 차체 조립 공정에 쓰이는 로봇에 부착되는 케이블의 구조를 나타낸다. 파란색으로 나타낸 부분이 케이블의 경로로서 로봇 하단으로부터 상단 끝 부분까지 연결되어 로봇 시스템에 전기 신호와 공기압을 공급하는 역할을 한다. 이 부분은 신호 케이블과 공압 호스로 구성된다. 신호 케이블은 전선 다발 주위로 고무 재질의 피복이 덮여 있으며 공압 호스는 중공 단면을 가지고 있다. 본 연구에서는 이 케이블과 호스를 고려하여 시험을 진행하였다. 케이블은 내부 구성이 매우 복잡하기 때문에 모든 구성 요소를 실제와 똑같이 유한요소 모델링하기가 어렵다. 따라서 단면을 단순화한 빔 구조로 가정하여 모델링하였으며 탄성계수를 구하기 위해 실제 케이블의 처짐 시험을 실시하였다.

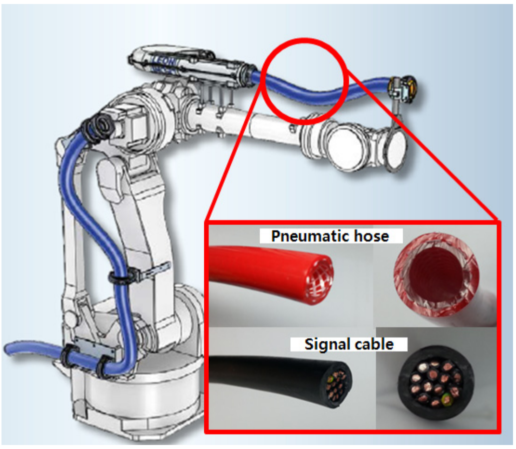


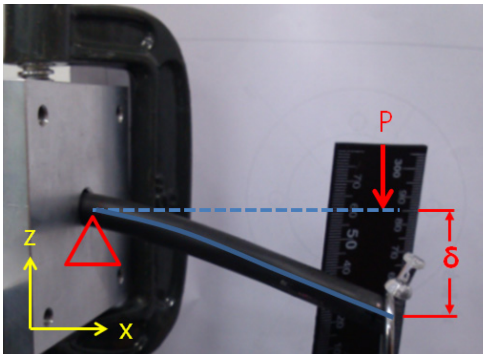
Fig. 1 Robot Cable

3. 케이블 처짐 시험 및 탄성 계수 계산

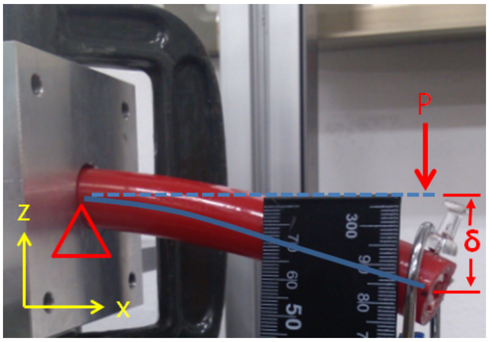
케이블 및 호스의 탄성 계수를 도출하기 위하여 Fig. 2와 같이 빔 구조에 적합한 처짐 시험을 수행하였다. 신호 케이블과 공압 호스 모두 한쪽 끝단을 6-자유도 구속을 하였고, 나머지 끝단을 z축 방향으로 하중을 가하여 처짐량을 측정하였다. 시험에 사용된 시편의 길이는 100mm이며, 시험 결과의 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. 이 결과로부터 케이블 및 호스의 하중과 처짐량의 상관관계가 선형에서 비선형으로 바뀌게 됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 선형 구간만을 다루며 이 구간의 강성을 이용하여 탄성계수를 구한다. 아래의 식 (1)은 빔의 처짐 공식을 나타내고 있다.

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \tag{1}$$

여기서 δ는 처짐량, E는 탄성 계수, I는 케이블의 단면 2차 모멘트, P는 케이블 끝단에 가해지는 하중, L은 시편의 길이이다. 실험에서 얻은 값을 식 (1)에 대입하여 탄성계수를 계산하였다. 사용된 물성치와 계산된 탄성계수 값을 Table 1에 나타내었다.

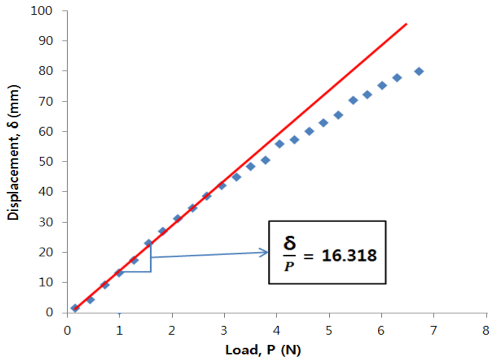


(a) Signal cable

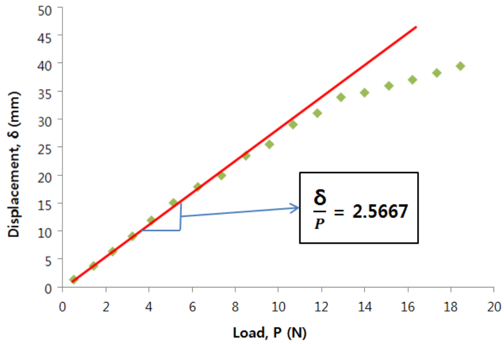


(b) Pneumatic hose

Fig. 2 Bending Test



(a) Signal cable



(b) Pneumatic hose

Fig. 3 Cable stiffness

Table 1 Cable property

Cable	Signal	Pneumatic
Length, L	100 mm	100 mm
Moment of inertia, I	718.69 mm^4	5379.69 mm^4
$\frac{\delta}{P}$	16.318 mm/N	2.5667 mm/N
Young's modulus, E	26.631 N/mm^2	33.129 N/mm^2

3. 유한요소모델 생성

3.1 신호 케이블

먼저 Table 2의 물성치를 가지는 신호 케이블의 솔리드 유한요소모델을 Fig. 4와 같이 생성하였다. 여기서 탄성계수는 앞서 시행하였던 처짐 시험에서 얻은 값이다. 실제 케이블의 단면 형상을 적용하여 피복이 전선을 둘러싸고 있는 형상으로 단면을 구성하였다. 또한 해석시간 단축을 위해 모델을 단순화하여 Fig. 5와 같은 원형 단면의 유한요소모델을 구성하였다. 실제 케이블의 처짐 시험 결과와 유한요소모델 해석 결과가 최대한 근접하도록 밀도와 탄성계수를 보정하였다. 그 결과 14개의 전선 형상을 적용한 단면 모델보다 유한요소의 수가 85.1% 감소하였다. 등가 유한요소모델의 물성치를 Table 3에 나타내었다.

앞서 제작하였던 모델과 비교·검증을 위해 Fig. 6과 같이 고유진동해석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 솔리드 모델과 등가 솔리드 모델의 고유진동수는 모두 5% 이내의 차이를 보였다.

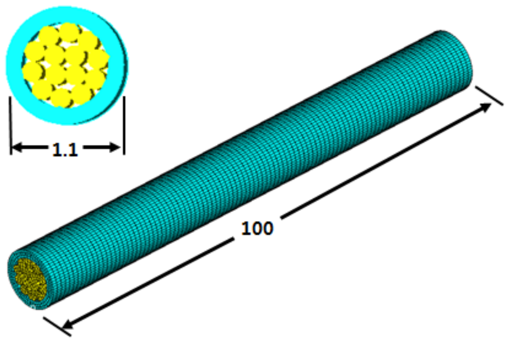


Fig. 4 FE model of signal cable

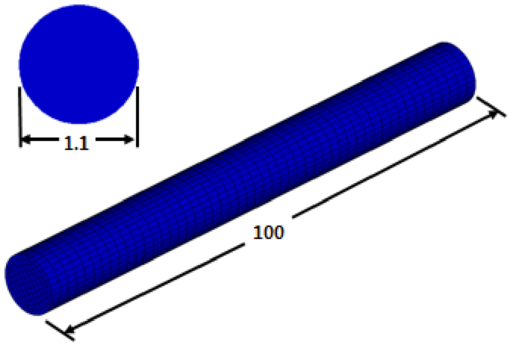
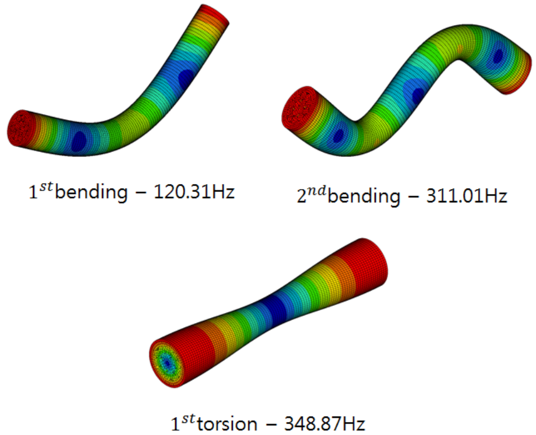


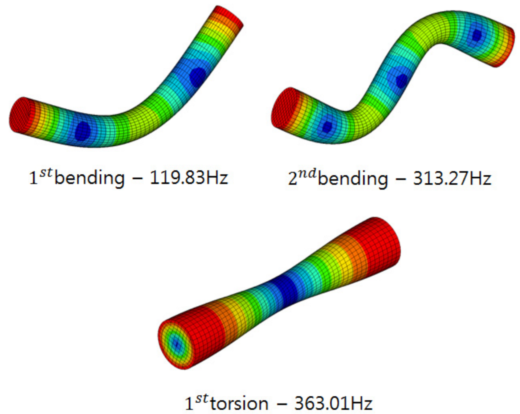
Fig. 5 Equivalent FE model of signal cable

Table 2 Material properties of signal cable

Model	Equivalent signal cable
Young's modulus	33.129 N/mm^2
Poisson's ratio	0.49
Density	1.06E-06 kg/mm^3



(a) solid signal cable



(b) equivalent signal cable

Fig. 6 Normal mode analysis of equivalent signal cable

Table 3 Material properties of equivalent signal cable model

Model	Equivalent signal cable
Young's modulus	30.5 N/mm²
Poisson's ratio	0.49
Density	1.91E-06 kg/mm³

Table 4 Comparison of natural frequencies of signal cable model

Mode	Natural frequency (Hz)		Percent change (%)
	solid	equivalent solid	
1^{st}bending	120.31	119.83	0.39
2^{nd}bending	311.01	313.27	0.72
1^{st}torsion	348.87	363.01	4.05

3.2 공압 호스

먼저 처짐 시험을 통해 도출하였던 Table 2의 탄성 계수 값을 이용하여 Table 5의 물성치를 가지는 솔리드 요소 모델을 만들었다. 단면을 튜브 형상으로 구성하였고 Fig. 7에 나타내었다. 해석시간을 줄이기 위해 모델을 단순화하여 Fig. 8과 같은 셸 요소로 구성된 모델을 모델링하였다. 그 결과 솔리드 요소 모델보다 요소의 개수가 59.0% 감소하였으며 질량은 차이를 보이지 않았다. 셸 요소 모델의 물성치는 솔리드 모델과 동일한 값을 가졌다. 앞서 제작하였던 모델과 비교 검증하기 위해 Fig. 9와 같이 고유진동해석을 수행하였으며, 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 솔리드 모델과 셸 모델의 고유진동수는 모두 4% 이내의 차이를 보였다.

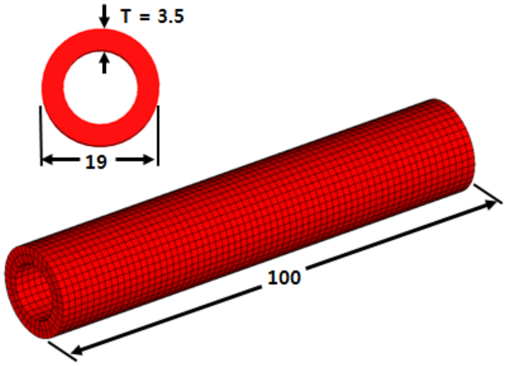


Fig. 7 Solid FE model of pneumatic hose

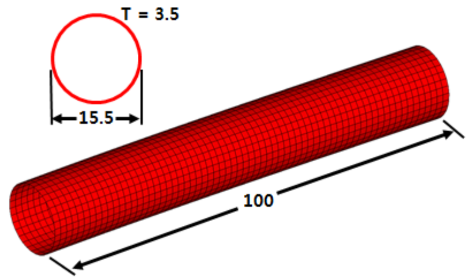
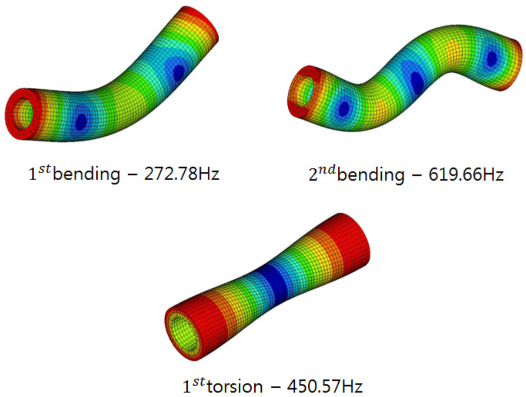
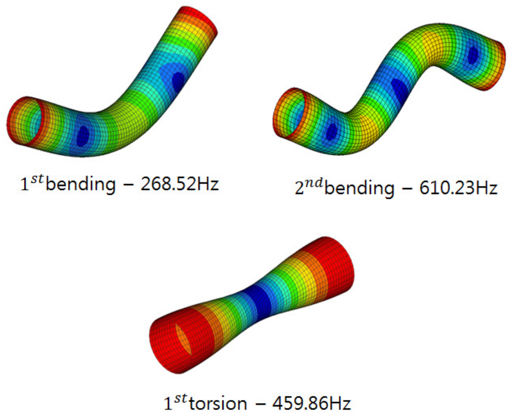


Fig. 8 Shell FE model of pneumatic hose



(a) solid pneumatic hose



(b) shell pneumatic hose

Fig. 9 Normal mode analysis of pneumatic hose

Table 5 Material properties of pneumatic hose

Model	Pneumatic hose
Young’s modulus	26.0 N/mm²
Poisson’s ratio	0.49
Density	1.06E-6 kg/mm³

Table 6 Comparison of natural frequencies of pneumatic hose model

Mode	Natural frequency (Hz)		Percent change (%)
	solid	shell	
1^{st}bending	272.78	268.520	1.59
2^{nd}bending	619.66	610.23	1.55
1^{st}torsion	450.57	459.86	2.02

4. 결 론

본 연구에서는 로봇에 사용되는 신호 케이블 및 공압 호스의 탄성계수를 처짐 시험을 통해 도출하였으며, 이를 이용하여 유한요소 솔리드모델을 생성하였다. 또한 해석시간을 줄이기 위하여 셸 모델과 등가모델을 만들었으며 고유진동해석을 통해 신뢰성을 검증하였다.

참 고 문 헌

(1) Won, J. H., Lee, S. K., Lee, H. S., Choi, E. Y., Cho, C., Seo, H. J., Kim, S. D., Seo, H., Kim, Y. G., 2009, Durability Analysis of Automotive Wire Harness System and its application, KSAE 2009 Annual Conference and Exhibition, pp. 1786~1790.

(2) Kim, B. S., Kang, K., Park, K., Noh, K. D., 2009, Life Prediction of Automotive Vehicle's W/H System Using Finite Element Analysis, Transactions of KSAE, Vol. 18, No. 1, pp. 139~144.

(3) Lee, J. H., Sohn, J. H., Kim, K. S., Yoo, W. S., 2002, Comparison of Large Deformation of Cantilever Beam with Computer Simulation using Modal Coordinates, Proceedings of the KSME 2002 Fall Annual Meeting, pp. 212~216.

(4) Yoon, J. W., Jung, S. P., Jun, Y. H., Park, T. W., Seo, J. H., Choi, Y. W., Hwang, J. C., 2006, The development of fatigue life prediction method of a cable harness in multibody dynamics, Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting, pp. 310~315.