

의료용 가이드 와이어의 테프론 코팅 장치 개발

최정주
동아대학교 산학협력단

Development of Teflon Coating Equipment Used in Medical Treatment

Jeongju Choi

Research Foundation for Industry-Academy Cooperation, Dong-A University

요약 본 논문은 의료용 시술에 사용되는 가이드 와이어의 테프론 코팅 장치의 주요 설계변수 설정방법에 대해 제안하였다. 제안된 장치는 가이드 와이어가 코팅 및 열처리 등을 연속적으로 수행하는 릴투릴(Reel to reel)방식으로 진행되도록 제작되었다. 이때 이송되는 가이드 와이어는 롤러 사이에서 진동을 하게 되고 이는 코팅 품질에 영향을 주게 된다. 따라서 본 논문에서는 길이방향으로 이송되는 가이드 와이어의 동역학 식을 제안하고 이를 바탕으로 이송 시 가이드 와이어의 진동 진폭이 최소화 될 수 있는 이송 속도 및 와이어를 지지하는 롤러의 간격을 설계하였다. 제안된 방법에 의해 제작된 코팅 장치를 바탕으로 의료용 가이드 와이어의 테프론 코팅을 진행하였다. 본 연구에서는 가이드 와이어의 코팅 두께 목표를 원주방향으로 $10\mu\text{m}$ 이내로 제작될 수 있도록 설정하였고 광학현미경을 사용하여 그 결과를 검토하였다.

Abstract This paper proposes a method of designing the main parameters of the Teflon coating equipment of a guide wire used in medical treatment. The proposed device was designed to be guided by a reel-to-reel method in which the guide wire performs all processes continuously, such as Teflon coating and heat treatment. At this time, the conveyed guide wire vibrates between the rollers, which affects the quality of the coating. Therefore, this paper proposes a dynamic equation of the guide wire to be transported in the longitudinal direction, and design parameters setting method of the feed speed and the interval of the roller supporting the wire is proposed to minimize the vibration amplitude of the guide wire during transport. The Teflon coating of the medical guide wire was carried out based on the developed coating equipment. The target coating thickness of the guide wire was set to less than $10\mu\text{m}$ in the circumferential direction, and the results were examined by optical microscopy.

Keywords : Feed rate, Guide wire, Reel to Reel, Teflon coating, Vibration

1. 서론

가이드 와이어는 의료 시술용 코어 와이어의 길안내 및 이송을 보조하는 와이어로써 SUS T304V의 재질을 일반적으로 사용하고 있다. 가이드 와이어는 의료 시술 중 인체 기관과 직접 접촉하는 관계로 금속과의 접촉 및 반응을 차단하기 위하여, 가이드 와이어 외측부에 테프론(PTFE) 코팅 작업을 한다. 의료 시술용 가이드 와이어

의 테프론 코팅을 위해서 일반적으로 사용되는 생산 방법은 가이드 와이어를 절단 후 테프론을 분사하여 코팅하는 스프레이 방식과, 압출기계로 테프론을 코팅하는 압출방식이 사용되고 있다. 이러한 기존의 테프론 코팅 방법은 $15.0\mu\text{m}$ 이하의 극박막 테프론 코팅이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 테프론 코팅의 두께가 $4.0 \sim 10.0\mu\text{m}$ 이하의 극박막 테프론 코팅이 가능한 릴투릴(Reel-to-reel) 코팅 장치 개발에 대하여 연구하였다. 릴

본 논문은 한국대학교 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Jeongju Choi(Dong-A Univ.)

Tel: +82-51-200-1489 email: jchoi72@dau.ac.kr

Received August 13, 2018

Revised (1st September 14, 2018, 2nd September 20, 2018, 3rd October 11, 2018)

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018

투릴 코팅기술은 릴 상태로 공급된 와이어를 절단하지 않고 연속적으로 코팅 및 열처리하여 다시 릴에 감기도록 하는 생산 방식이다. 릴투릴 코팅 시 와이어는 테프론 용액이 담긴 용탕을 통과하므로 테프론 코팅의 두께가 4.0 ~ 10.0 μ m이하로 시술용에 적합한 가이드 와이어의 제조가 가능하다. 이때 가이드 와이어는 전처리, 테프론 코팅 및 열처리 등의 공정을 톨 위에서 연속적으로 수행하며 이송됨으로 그 진동을 최소화하여야 와이어 표면에 균일한 코팅 품질을 가질 수 있다. 따라서 와이어의 이송에 따른 진동을 최소화할 수 있는 장치개발이 주요한 변수이다. 길이 방향으로 이동하는 가이드 와이어는 와이어 직경이 0.5mm이하이로 길이 방향에 비해 그 직경이 상당히 작으므로 가이드 와이어를 길이방향으로 이동하는 현으로 간주하여 그 동특성을 분석하였다.

길이 방향으로 이동하는 현의 진동 제어와 관련해서는 경계제어방법을 이용하여 제어성능을 향상시키는 연구가 시작되었고[1], 그린함수(Green function)을 이용하여 이동하는 현에 대한 전달함수를 유도하는 방법 등이 초기에 연구되었다[2]. 이후 이동하는 현에 대한 제어 시스템은 경계제어 방법에 근거하여 최적제어 알고리즘이 적용되었고[3,4] 이동 현의 제어영역과 비제어영역으로 나누어 설계하는 기법 등이 제안되었다.[5,6]. 이동 현의 수학적 모델링에 근거하여 적응제어기와 최적제어기의 적용 또한 제안되었다[7,8]. 본 논문에서는 가이드 와이어의 코팅 성능 향상을 위해 가이드 와이어를 이동하는 현으로 간주 하고 이를 무차원화된 분포매개변수 시스템으로 고려하여 그 동특성을 파악하였다. 이를 바탕으로 이송 중 발생하는 와이어의 진동 진폭에 영향을 미치는 주요변수를 와이어의 이송 속도와 톨과 톨 사이의 거리로 간주하여 진동이 최소화 될 수 있는 설계 변수를 선정하여 릴투릴 코팅 장치를 제작하였다. 개발된 코팅 장치의 성능은 가이드 와이어의 외측에 코팅된 테프론의 두께를 계측하여 그 평균이 10.0 μ m이내가 되도록 설정하고 그 품질을 검증하였다.

2. 가이드 와이어 코팅 시스템

의료용 가이드 와이어는 코어 와이어의 길안내를 도와주는 용도로 주로 사용되며 그 구성은 Fig. 1과 같다.

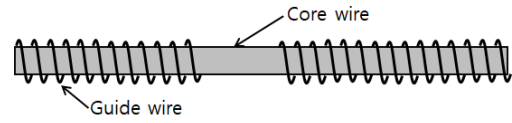


Fig. 1. Structure of core and guide wire

가이드 와이어의 테프론 코팅공정은 크게 와이어표면에 대한 전처리, 테프론코팅 및 열처리 공정을 거쳐 최종적으로 제작된 와이어를 권취한다. 이러한 연속 공정을 일괄 진행하기 위해서는 릴에 권취된 원소재를 연속적으로 코팅 및 전후공정을 수행하고 다시 권취하여야 함으로 이를 위한 연속 공정 시스템을 Fig. 2와 같이 제안하였다.

제안된 코팅 장치에서 가이드 와이어의 이송 시 일정한 장력이 유지 될 수 있도록 장력제어 시스템을 Fig. 3과 같이 와이어의 풀림 및 감김 장치 전후단에 장착하였다. 테프론 코팅 공정은 테프론 용액을 담가놓을 수 있는 용탕과 코팅 후 1차로 건조할 수 있는 장치로 구성하여 Fig. 4와 같이 제작하였다. 1차 건조된 코팅 와이어를 열처리하기 위해 Fig. 5와 같이 열처리 장치를 구성하였다. 열처리 장치의 작동 온도는 400 $^{\circ}$ C이내에서 이루어지도록 설계하였다. 열처리 장치 내에 가이드 와이어의 처짐을 방지하기 위해 롤러를 설치하였다.

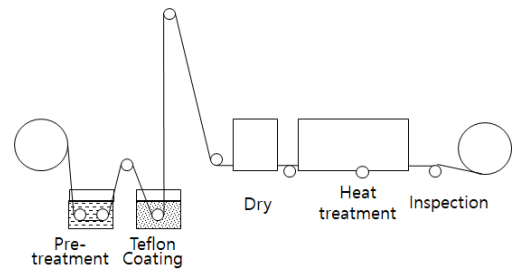


Fig. 2. Concept design for the proposed coating equipment

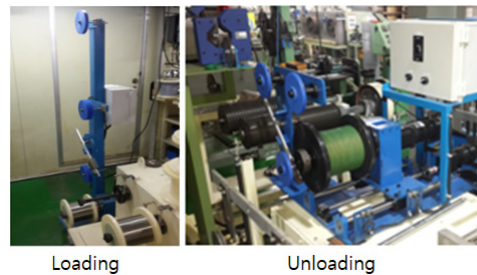


Fig. 3. Tension control unit

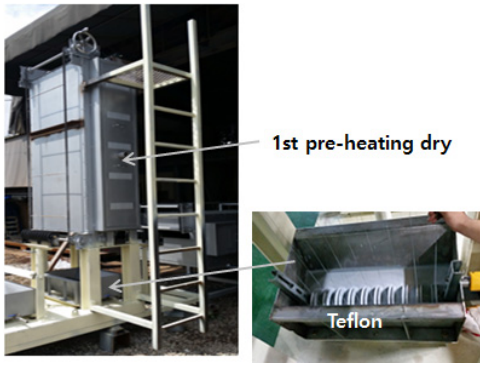


Fig. 4. Teflon coating equipment



Fig. 5. Heat treatment device

이후 코팅된 가이드 와이어는 후처리 공정을 거쳐 검사 후 권취될 수 있도록 제작하였다.

제작된 코팅 장치는 연속적으로 공정이 이루어지므로 와이어의 이송에 따라 진동이 발생하게 되고 이는 코팅 품질에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 제안된 코팅 장치의 진동을 최소화 할 수 있는 방안을 제안하였다. 이를 위해 진동에 영향을 미치는 주요 변수를 처짐 방지 및 이송을 돕기 위해 장착한 롤러(Roller)사이의 거리와 와이어의 이송 속도로 선정하였다

3. 가이드 와이어의 진동 및 코팅 결과

본 논문에서 제안된 가이드 와이어 코팅 장치는 전처리, 테프론 코팅 및 열처리 등의 공정이 연속적으로 이루어지므로 와이어의 처짐과 이송을 돕기 위해 공정 중간에 롤을 설치하였다. 그러나 롤러 간 거리 및 이송 속도에 따라 이송되는 가이드 와이어의 진동 특성이 상이하고 이는 코팅 품질에 영향을 미치므로 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서 이동하는 가이드 와이어를 Fig. 6과 같이 축 방향으로 이동하는 현으로 간주하여 롤과 롤 사이를 Eq. (1)과 같이 분포매개변수시스템으로 고려하였다.

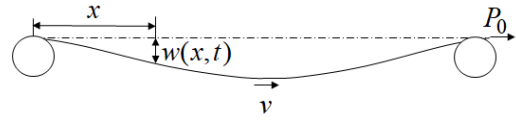


Fig. 6. Schematic diagram of axially moving wire

$$\rho A(w_{tt} + vv w_{xt} + v^2 w_{xx}) - P_0 w_{xx} = 0 \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도, A 는 단면적, v 는 이송속도, P_0 는 장력, $w_{tt} = \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$, $w_{xx} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$, $w_{xt} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t}$ 이고 경계 조건은 다음과 같다.

$$w(x,0) = w_0(x), \quad w_t(x,t) = w_t(x), \quad w(0,t) = 0$$

그리고 $P_0 w_x(L,t) = 0$ 이다.

Eq. (1)에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 위해 준 식을 Eqs. (2)-(4)와 같이 중앙 차분법을 이용하였다.

$$w_{tt} = \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{w_i^{j+1} - 2w_i^j + w_i^{j-1}}{\Delta t^2} \quad (2)$$

$$w_{xx} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{1}{2} \frac{w_{i+1}^{j+1} - 2w_i^{j+1} + w_{i-1}^{j+1}}{\Delta x^2} + \frac{1}{2} \frac{w_{i+1}^{j-1} - 2w_i^{j-1} + w_{i-1}^{j-1}}{\Delta x^2} \quad (3)$$

$$w_{xt} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} = \frac{w_{i+1}^{j+1} - w_{i+1}^{j-1} - w_{i-1}^{j+1} + w_{i-1}^{j-1}}{4\Delta x \Delta t} \quad (4)$$

차분화된 와이어의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho A \frac{w_i^{j+1} - 2w_i^j + w_i^{j-1}}{\Delta t^2} + 2v\rho A \frac{w_{i+1}^{j+1} - w_{i+1}^{j-1} - w_{i-1}^{j+1} + w_{i-1}^{j-1}}{4\Delta x \Delta t} + \frac{1}{2}(\rho A v^2 - P_0) \left[\frac{w_{i+1}^{j+1} - 2w_i^{j+1} + w_{i-1}^{j+1}}{\Delta x^2} + \frac{w_{i+1}^{j-1} - 2w_i^{j-1} + w_{i-1}^{j-1}}{\Delta x^2} \right] = 0 \quad (5)$$

여기서 i 는 격자 점(index of spatial variable), j 는 시간 스텝(index of time)이다.

Eq. (5)에서 시간 스텝 j 번째의 w_{xx} 의 차분화는 시간 간격 $j-1$ 번째와 $j+1$ 번째의 평균으로 표시하여 Eq. (6)과 같이 고려하였다.

$$w_{xx}^j = \frac{1}{2} \left\{ w_{xx}^{j-1} + w_{xx}^{j+1} \right\} \quad (6)$$

따라서 Eq. 5는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &(-C_2 + C_3)w_{i-1}^{j+1} + (C_1 - 2C_3)w_i^{j+1} \\
 &\quad + (C_2 + C_3)w_{i+1}^{j+1} \\
 &= 2C_1w_i^j + (-C_2 - C_3)w_{i-1}^{j-1} \\
 &\quad + (-C_1 + 2C_3)w_i^{j-1} \\
 &\quad + (C_2 - C_3)w_{i+1}^{j-1}
 \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $C_1 = \frac{\rho A}{\Delta t^2}$, $C_2 = \frac{\rho A v}{2\Delta x \Delta t}$, $C_3 = \frac{\rho A v^2 - P_0}{2\Delta x^2}$.

Eq. (7)과 같이 차분화된 시스템에 대하여 코팅 장치의 주요 설계 변수인 롤러간 거리와 이송 속도를 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 바탕으로 선정하였다. 시뮬레이션을 위해 초기 와이어는 최대 1mm 처짐을 가지는 것으로 가정하였다. 또한 코팅 장치의 설계 변수인 롤러와 롤러사이 거리와 이송 속도는 700~1300mm 와 15~35m/min 구간에 대해 3레벨 수준으로 나누어 수행하였다. 이 중 롤러사이 거리 1300mm와 이송속도 35m/min에 대한 시뮬레이션 결과를 Figs. 7~8에 나타내었다.

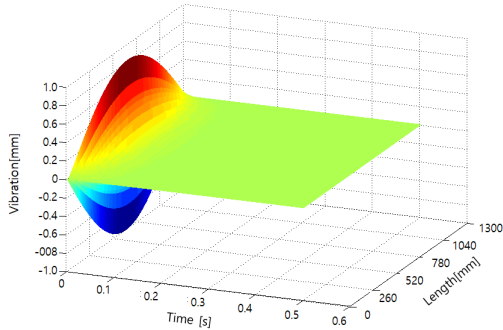


Fig. 7. Vibration according to time

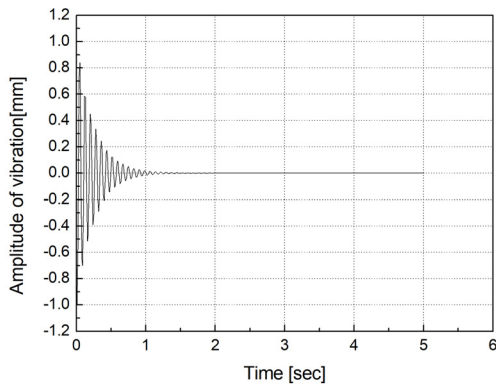


Fig. 8. Maximum variation of axially moving wire

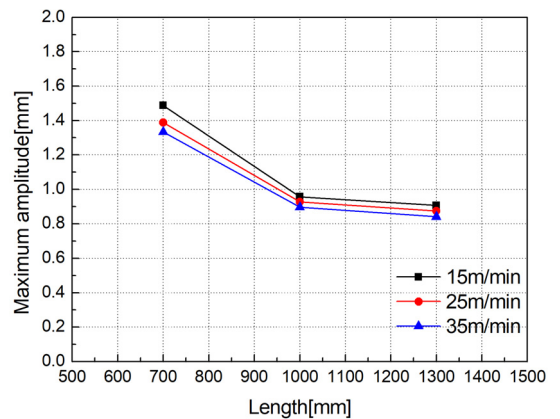
Fig. 8은 Fig. 7의 해석 결과에서 와이어의 최대 진폭을 시간에 대한 그래프로 나타내었다. Fig. 8의 해석 결과는 Eq. (8)의 함수로 가정하여 응답시간과 진동의 감쇠정도를 추정하였다.

$$M = a_1 e^{-a_2 t} \sin(2\pi w t + \phi) \tag{8}$$

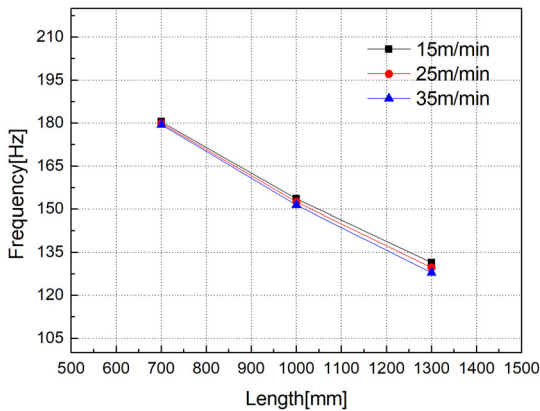
진동의 감쇠를 나타내는 Eq. (8)의 파라미터는 Matlab nonlinear curve fitting 함수를 이용하여 추정하였고 이때 각 조건에 대한 시뮬레이션 조건과 추정 파라미터는 Table 1과 Fig. 7에 나타내었다.

Table 1. Estimated parameters for vibration

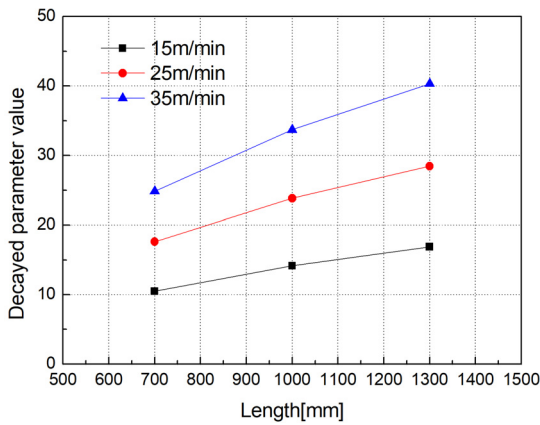
| conditions | | a_1 [mm] | a_2 | w [Hz] | t_s (s) |
|------------------|-------------|------------|-------|----------|-----------|
| velocity [m/min] | length [mm] | | | | |
| 15 | 700 | 0.1487 | 10.50 | 180.49 | 0.42 |
| 15 | 1000 | 0.0956 | 14.16 | 153.61 | 0.28 |
| 15 | 1300 | 0.0906 | 16.88 | 131.44 | 0.23 |
| 25 | 700 | 0.1388 | 17.63 | 179.96 | 0.25 |
| 25 | 1000 | 0.0926 | 23.83 | 152.54 | 0.17 |
| 25 | 1300 | 0.0873 | 28.46 | 129.73 | 0.14 |
| 35 | 700 | 0.1333 | 24.86 | 179.42 | 0.18 |
| 35 | 1000 | 0.0895 | 33.70 | 151.43 | 0.12 |
| 35 | 1300 | 0.0840 | 40.32 | 127.94 | 0.10 |



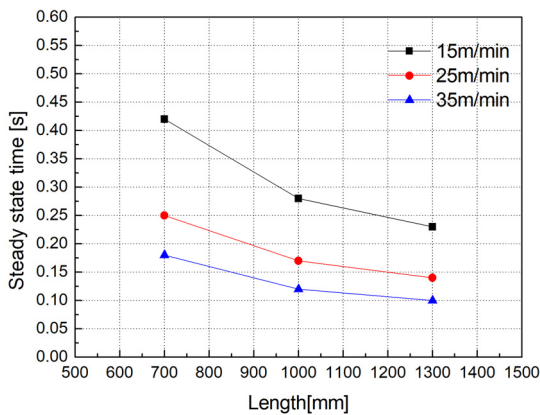
(a) Maximum variation of vibration



(b) Frequency of vibration



(c) Variable a_2 of exponential function



(d) Steady state time until 2% of amplitude of vibration

Fig. 9. Vibration properties

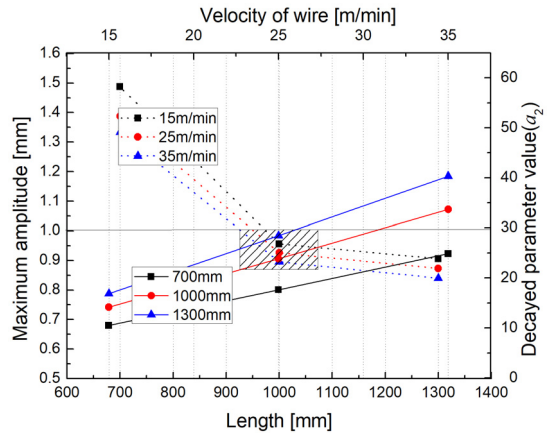


Fig. 10. Determine the design parameters

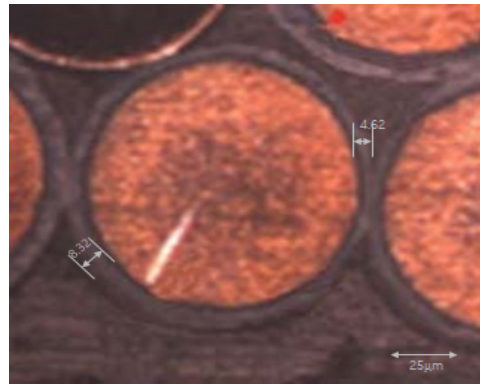


Fig. 11. Thickness of coated wire

시뮬레이션 결과를 바탕으로 물간 거리와 이송 속도를 결정하기 위해서 물간 거리에 대한 진동 진폭의 최대 값을 좌측 y축에 와이어의 이송속도에 대한 감쇠정도 변수를 우측 y축에 Fig. 10과 같이 나타내었다. 이를 바탕으로 진폭의 크기는 초기 조건을 초과하지 않고, 감쇠정도 계수 a_2 는 30이내인 조건을 검색하여 Fig. 10에 빗금으로 표시하여 설계변수의 범위를 정하였다. 또한 초기 진폭의 2% 이내로 감소는 정착시간이 0.2s 이내에 진동이 감쇠되는 조건을 추가로 고려하여 코팅 장치의 물간 거리는 950mm, 와이어의 이송 속도는 35m/min으로 선정하였다. 제작된 코팅 장치를 통해 생산된 가이드 와이어의 코팅 품질은 전자 현미경을 통해 검토하였다. Fig. 11은 코팅 단면을 절단하여 와이어와 코팅면의 길이를 측정하였다. 측정결과 코팅 두께는 원주방향으로 4~10 μ m이내에서 코팅된 것을 확인 할 수 있다.

4. 결론

의료용 가이드 와이어는 시술용으로 사용하기 위해 테프론 코팅을 한다. 이러한 테프론 코팅을 위해 본 논문에서는 릴투릴 방식의 테프론 코팅 장치를 제안하였다. 제안된 장치의 주요 설계변수를 결정하기 위해 축 방향으로 이송되는 가이드 와이어의 운동 방정식을 고려하였다. 가이드 와이어의 동특성을 분석하기 위해 이송 와이어를 분포매개변수시스템으로 간주하였고, 운동방정식을 차분화하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 코팅 장치의 주요 설계 변수는 와이어의 이송 속도와 와이어를 지지하는 롤간 거리로 선정하였다. 각 설계 변수는 15m/min ~ 35m/min와 700mm ~ 1300mm의 범위 내에서 3레벨 수준으로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 진동의 최대진폭 감소를 나타내는 함수식을 제안하였고 이를 바탕으로 코팅 장치의 롤러간 거리와 이송 속도를 결정하였다. 이때 고려된 설계사양은 최대 진폭의 감소가 2%이내에 도달하는 시간이 0.2s이내가 되도록 하였다. 시뮬레이션 결과와 더불어 현장작업의 노하우를 바탕으로 설계변수를 최종 결정하여 코팅 장치를 제작하였다. 제안된 코팅 장치를 통해 생산된 와이어의 코팅품질은 전자현미경을 이용하여 검증하였다. 전자현미경을 통한 테프론 코팅의 두께는 원주 방향으로 코팅된 두께를 측정하였고, 측정결과 평균 두께 5.05 μ m로 본 연구의 목표치인 10 μ m이내 임을 확인하였다. 그러나 본 논문에서 제시한 코팅장치의 설계 변수 선정 방법은 이송되는 와이어의 진동 진폭이 코팅 품질에 직접적인 영향을 미칠 것으로 가정하여 진행하였으나, 진동 특성이 실제 코팅 품질의 직접적인 상관관계를 규정하지 못하였다. 향후, 개발된 장치의 수정 보완 시 이에 대한 상호 영향도를 추가적으로 분석할 필요가 있을 것으로 사료된다.

References

[1] J. A. Wickert and C. D. Mote, "On the Energetics of Axially Moving Continua", *Journal of Acoustic Society of America*, Vol.85, No.3, pp.1365-1368, 1988.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1121/1.397418>

[2] B. Yang and C. D. Mote, "Active Vibration Control of the Axially Moving String in the S domain", *Journal of Applied Mechanics*, Vol.58, pp.198-196, 1991.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1115/1.2897147>

[3] G. Chen, "Energy Decay Estimates and Exact Boundary Value Controllability for the Wave Equation in a Bounded Domain", *Journal of Math*, Vol.58, pp.249-273, 1979.

[4] O. Morgul, "Dynamics Boundary Control of an Euler-Bernoulli Beam", *Transactions on Automatic Control*, Vol.37, No.5, pp.249-261, 1992.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/9.135504>

[5] Y. Li, D. Aron and C. D. Rahn, "Adaptive Vibration Isolation for Axially Moving Strings: Theory and Experiment", *Automatica*, Vol.38, No.3, pp.379-389, 2002.
DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0005-1098\(01\)00219-9](https://dx.doi.org/10.1016/S0005-1098(01)00219-9)

[6] Y. Li and C. D. Rahn, "Adaptive Vibration Isolation for Axially Moving Beams", *Transactions on Mechanics*, Vol.5, No.4, pp.419-428, 2000.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/3516.891053>

[7] R. F. Fung, J. H. Chou and Y. L. Kuo, "Optimal Boundary Control of an Axially Moving Material System," Vol.124, No.1, pp.55-61, 2002.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1115/1.1435364>

[8] R. F. Fung, J. W. Wu and P. Y. Lu, "Adaptive Boundary Control of an Axially Moving String System", *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol.124, No.3, pp.435-440, 2002.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1115/1.1476381>

최 정 주(Jeongju Choi)

[정회원]



- 2001년 8월 : 부산대학교 공과대학 원 지능기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 부산대학교 공과대학 원 지능기계공학과 (공학박사)
- 2008년 3월 ~ 2009년 2월 : University of Michigan 포스터닥터
- 2013년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 산학협력단 조교수

<관심분야>

지능형 기계시스템, 제어시스템 설계