

힘순응 기능을 가진 덕트 청소용 로봇의 설계와 제어 Design and control of a duct cleaning robot with a force compliant brush

*#정우태¹, 전승우², 박덕신¹, 최용제³

*#W. Jeong¹(wjeong@krri.re.kr), S. W. Jeon², D. S. Park¹, Y. J. Choi³

¹한국철도기술연구원, ²과학기술연합대학원대학교 기상공학과, ³연세대학교 기계공학과

Key words : Force Compliance, Robot Control, Duct Cleaning Robot, Robot Design

1. 서론

지하 시설물과 현대의 고층화 된 대형건물들은 자연환기가 되지 않기 때문에 덕트 및 공기조화설비를 통한 급기 및 환기가 이루어지고 있다. 따라서 이러한 밀폐공간의 공기질 개선에 대한 관심이 높아지면서 청정 공기유지관리 기술개발이 진행되고 있다. 덕트 구조 및 운전특성에 따라 공조장치를 작동시키면 덕트 내의 진동과 기류의 충격으로 인해 퇴적된 섬유질과 탄소질 성분의 오염물질이 덕트 내부에서 다시 비산하고, 취출구를 통하여 실내로 유입되므로 간접적으로 실내공기의 오염도를 상승시키는 원인이 된다. 또한 덕트 내에 쌓인 분진은 냉난방의 열효율을 감소시키고, HVAC 시스템의 수명 또한 줄어들게 된다. 아울러 덕트 내부에 축적된 분진이 인체에 유해한 바이러스와 대장균과 같은 미생물 존재에 중요한 영향을 미친다고 하므로 주기적인 덕트의 위생관리가 필요한 실정이다.(Foarde et al. 2002) 본 논문에서는 덕트 내에 다양하게 퇴적된 오염물질의 효과적인 제거를 위하여 자동화된 덕트 청소 로봇의 브러싱 기구설계 및 제어방안에 대하여 서술하고자 한다.

덕트 면에 축적된 오염물을 효과적으로 털어내기 위해서 브러시를 일정한 힘으로 눌러서 회전시키는 장치가 필요하다. Fig 1에서 제시된 바와 같이 이동플랫폼 상면부에 장착되는 로봇암의 끝단과 브러시의 연결되는 부분에 브러시의 접촉력 제어를 위한 순응기구를 부착하였다. 이 장치를 이루는 두 스프링의 접점부는 덕트면과 항상 수직하게 만나게 된다. Fig 2는 힘순응 기구가 장착된 브러시가 덕트의 윗면 및 모서리까지 도달하도록 로봇암을 작동시키는 자유물체도를 나타낸다. 먼저 브러시가 한 면만 청소할 때를 고려하면 옆면의 F_s 와 그 힘에 대한 마찰력을 배제하고 다음과 같다. 2개의 스프링을 연결한 끝단은 브러시의 면과 일치한 위치까지 오게 하여 브러시가 덕트 면에 닿을 때, 그 누르는 힘은 스프링의 아래 식(1)과 같이 선형적 변형을 일으킨다.

$$\begin{cases} F_a = K_a \cdot \Delta x_a, \\ F_b = K_b \cdot \Delta x_b. \end{cases} \quad (1)$$

2. 힘순응 제어에 의한 로봇암 설계

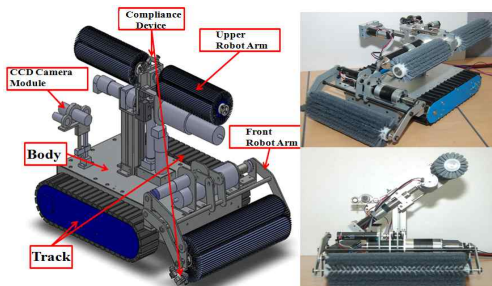


Fig. 1 Duct cleaning robot with brush and mobile platform

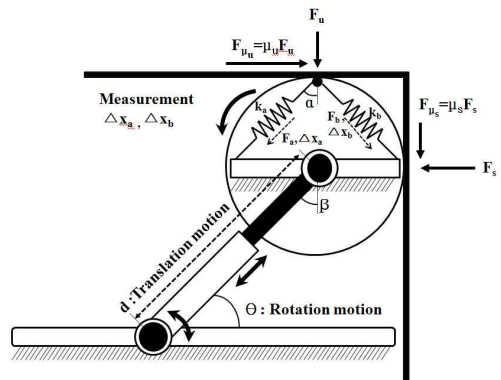


Fig. 2 Modeling and configuration of cleaning brush and force compliance device at the end of robot arm contacting two sides inside duct

두 개의 스프링이 서로 이루는 각이 2α 라고 가정하면, 브러시와 덕트 면이 만나는 지점에서의 힘 평형방정식은 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} F_u = F_a \cos \alpha + F_b \cos \alpha = (F_a + F_b) \cos \alpha, \\ F_{\mu_s} = F_b \sin \alpha - F_a \sin \alpha = (F_b - F_a) \sin \alpha \end{cases} \quad (2)$$

where F_{μ_s} : tangential force at the plane of contact 회전하는 브러시가 면과 닿을 때 생기는 마찰력은 $F_{\mu_s} = \mu_s F_u$ 가 되므로 $\Delta x_a, \Delta x_b$ 의 측정결과로부터 두 스프링의 사이각 α 를 이용하여 동적 마찰계수 μ_u 를 식(3)과 같이 구할 수 있다. 따라서 브러시가 덕트면을 누르는 힘 F_u 에 맞도록 로봇암의 병진운동량(d)와 회전운동량(θ)를 제어할 수 있게 된다.

$$\mu_u = \frac{F_{\mu_s}}{F_u} = \frac{(F_b - F_a) \sin \alpha}{(F_a + F_b) \cos \alpha} = \frac{(F_b - F_a)}{(F_a + F_b)} \tan \alpha \quad (3)$$

브러시가 덕트 내부의 윗면과 옆면이 만나는 모서리에 도달했을 때를 고려하면 다음 식(4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Horizontal: } \mu_u F_u - F_s = (F_b - F_a) \sin \alpha \quad (4)$$

$$\text{Vertical: } F_u + \mu_s F_s = (F_a + F_b) \cos \alpha \quad (5)$$

where F_s : side reaction force , μ_s : dynamic friction coefficient between brush and duct surface

덕트 면의 동적마찰계수는 모두 일정하다고 가정하면, $\mu = \mu_u = \mu_s$ 식 (4)와 (5)로부터 F_u 와 F_s 를 다음의 식 (6)과 같이 구할 수 있으므로, 이 두 힘을 목표값으로 하는 로봇암의 병진운동량(d)와 회전운동량(θ)의 제어가 가능하게 된다. 제시된 F힘순응 기구는 덕트의 상면, 옆면 뿐 아니라 모서리에서도 브러시 모가 눌리지 않고 원활히 회전할 수 있도록 함으로써 오염물 제거의 효율을 높일 수 있게 된다.

$$F_u = \frac{(F_a + F_b) \cos \alpha + (F_b - F_a) \sin \alpha}{1 + \mu^2}$$

$$F_s = \frac{\mu^2 (F_a + F_b) \cos \alpha - (F_b - F_a) \sin \alpha}{\mu(1 + \mu^2)} \quad (6)$$

3. 덕트청소로봇의 제어방안

지금까지 개발된 덕트청소로봇은 원격조정에

의한 작업자의 숙련도에 따라 청소시간 및 효율이 달라졌다(Wang et al, 2006). 따라서 Fig. 3에 제시한 구조도를 바탕으로 덕트 내부에서 자율주행 및 자동 청소운전이 가능하도록 구현하여 작업자의 숙련도와 관계없이 덕트 청소효율을 높일 예정이다. 로봇의 자율주행을 위한 위치제어를 수행하기 위하여 초음파 센서와 관성센서(Inertial Measurement Unit)를 사용하였다. 자동운전과 병행하여, CCD 카메라를 통해서 확보된 화면을 바탕으로 외부에서의 원격조종을 위한 조이스틱 모듈을 설치하였다.

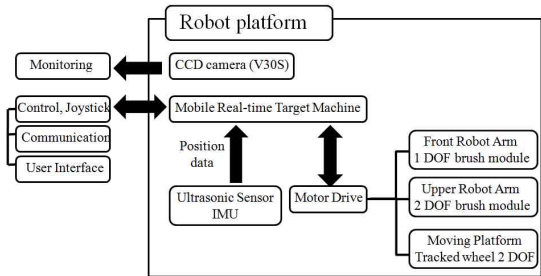


Fig. 3 Control scheme of the duct cleaning robot system

4. 결론

본 연구를 통하여, 덕트 내부 4면에 축적된 오염물을 제거할 수 있도록 로봇암과 힘순응 제어장치를 사용함으로써 청소작업의 자동화를 구현할 수 있게 되었다. 또한 제시된 제어방안을 바탕으로 자동운전 및 자율주행 청소로봇을 제작하였으며, 덕트의 청소효율 및 주행성 향상을 위해서는 설계된 제어기를 사용환경에 맞추어 보완할 필요가 있다.

후기

본 연구는 환경부 국가연구사업의 지원으로 한국철도기술연구원과 연세대학교에서 수행되었으며, 관련자료와 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Foarde, K., Menetrez, M., Evaluating the potential efficacy of three antifungal sealants of duct liner and galvanized steel as used in HVAC systems, Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 29, 38-43, 2002
2. Wang, Y, Zhang, J, Autonomous Air Duct Cleaning Robot System, MWSCAS, 510-513, 2006