

그리스 충전 덕트 내 탐상을 위한 스크류 추진 로봇

Screw-Propelled Robot for Detecting Grease Pipe

김 호 중¹ · 김 동 선¹ · 김 진 현[†]

HoJoong Kim¹, Dongseon Kim¹, Jinhyun Kim[†]

Abstract: Post-tension duct in nuclear reactor containment building is filled with grease to prevent steel strand from corroding. If grease leaks by break of duct, steel strand will corrode and cause problem in building safety. Therefore, grease leak should be checked preventatively. But currently used method is inefficient, since it has to remove grease and strand to check. And other methods for checking post-tension duct are not well-researched. In this paper, we develop screw-propelled robot that can move in grease and detect grease duct directly. Also, we make the test environment that is similar to real post-tension duct of containment building and test robot in that environment to verify that our robot is feasible in the post-tension duct. The robot can move forward and backward in grease duct by twin screw mechanism and has mount for sensors to detect grease leakage and strand corrosion.

Keywords: Screw-Propelled Robot, Grease, Post-Tension Pipe

1. 서 론

원자로 격납건물은 건물의 강도를 높이기 위하여 [Fig. 1]^[1]과 같은 형태로 외벽 내부에 포스트 텐션 공법을 적용한다. 포스트 텐션 공법은 덕트 내부에 강연선 다발을 삽입한 후 인장력을 가한 상태로 고정시키는 공법으로, 이 인장력은 사고 등의 이유로 건물 내부로부터 압력이 발생할 때 압력을 상쇄하여 건물의 손상을 방지하고 건물의 안전성을 높여준다. 격납 건물의 포스트 텐션 덕트는 내부 강연선의 부식 및 파손을 방지하기 위해 그리스로 충전되어 강연선을 공기 및 수분, 기타 이물질과의 접촉으로부터 보호한다. 덕트의 파손에 의하여 이 그리스가 누출될 경우 강연선이 부식, 파손되어 건물 안전성이 저해될 수 있다. 실제로 한빛 원자력 발전소 3,4 호기 등 국내의 원전에서 그리스 누유 및 그로인한 강연선 부식이 발견되어 그리스 누유 및 강연선 부식 검측 방안이 중요한 이슈

가 되고 있다. 하지만 덕트 내부를 그리스로 충전하는 포스트 텐션 공법은 거대 구조물 중에서는 원자로 구조물에 한정되는 방법이므로 관련 연구가 미비하다. 현재에는 미국에서 사용하는 검사 방식대로 직접적으로 덕트 내의 그리스와 강연선을 제거하여 검사한 뒤 되돌리는 방식을 사용중이다^[2]. 이 방법은 덕트 내부 그리스의 양을 계산하여 그리스 누유 및 공극 발생 유무를 판단하고, 강연선을 육안으로 검사하여 부식여부를 판단하므로 시간과 비용이 많이 들어 비효율적인 문제가 있다.

본 논문에서는 그리스와 강연선을 제거하지 않은 상태로 충전된 덕트 내부를 직접 탐상할 수 있는 스크류 추진로봇을 개발하고, 실제 포스트텐션 덕트와 유사한 환경을 제작하여 추진로봇 기술의 실현성을 검증한다. 이 로봇은 그리스 덕트 내부에서 전/후진이 가능하고, 그리스 공극 및 강연선 부식을 검출할 수 있는 센서를 탑재하여 이동과 동시에 덕트 내부를 탐상할 수 있으므로 기존 방식보다 검측에 필요한 시간과 비용을 줄일 수 있다.

2. 로봇 모델링

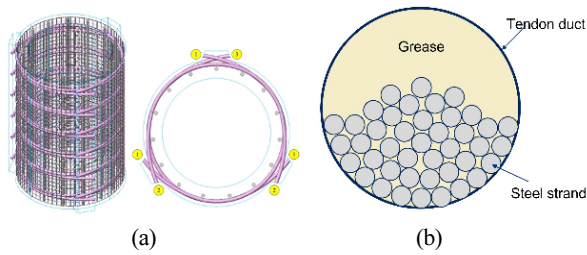
기준에 일반적으로 사용되는 배관로봇은 바퀴가 장착되어 배관 내벽과 바퀴 사이의 마찰력을 이용해 배관 내부를 진행한다^[3]. 하지만 그리스로 충전된 덕트를 진행해야 하는 환경의

Received : Mar. 24. 2022; Revised : Apr. 6. 2022; Accepted : Apr. 6. 2022

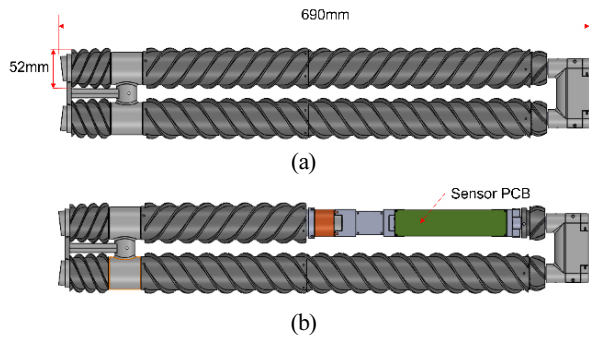
※ This paper was supported by Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) (P0008473, HRD Program for Industrial Innovation)

1. Master's Course, Seoul national University of science and Technology, Seoul, Korea (khj9634@g.seoultech.ac.kr, kds0603@seoultech.ac.kr)

† Full Professor, Corresponding author: Seoul national University of science and Technology, Seoul, Korea (jinhyun@seoultech.ac.kr)



[Fig. 1] (a) Tendon duct locations in containment building, (b) Cross section of the Tendon duct



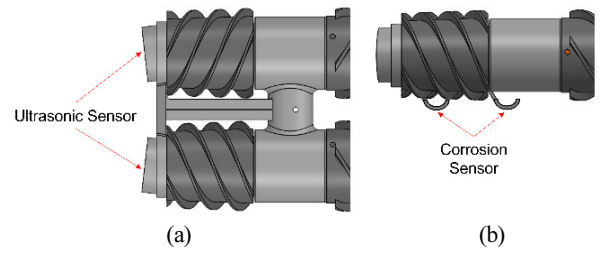
[Fig. 2] (a) Modeling of Screw-propelled robot, (b) PCB board for sensor data communication

특성상 윤활효과에 의해 마찰력이 감소하고, 그리스가 채워져 있어 저항이 크므로 바퀴를 사용하는 추진방법을 사용할 수 없다. 또한 포스트텐션 덕트는 [Fig. 1]과 같이 내부에 강연선 다발이 삽입되어 있어 로봇이 통과할 수 있는 공간은 활꼴에 가깝고 중심부가 솟아오른 형태가 되므로 중앙을 기점으로 좌우로 나뉘어 있는 좁은 공간에서 작동할 수 있도록 설계되어야 한다.

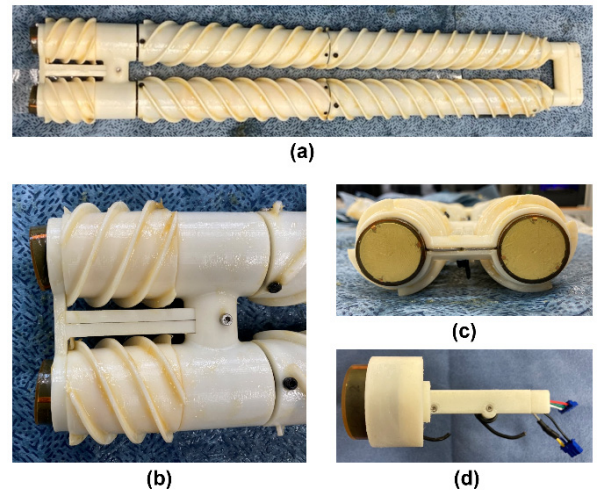
이러한 환경 조건에서 로봇이 추진하기 위해서는 마찰력에 의존하지 않고, 그리스로 채워진 공간을 뚫고 들어갈 수 있어야 한다. 따라서 twin screw extruder의 원리를 적용하여 두 개의 스크류가 서로 반대 방향으로 회전하여 그리스를 파고들며 후방으로 밀어내고, 그 반작용으로 그리스 내부를 추진할 수 있도록 추진방법을 결정하였다.

또한 로봇의 구동을 위한 모터, 센서 검출 데이터 송수신을 위한 보드를 로봇 내부에 탑재할 수 있는 범위에서 스크류 원통 직경을 최소화하였고, 스크류의 피치를 조정하여 로봇이 그리스 내부를 잘 파고들 수 있도록 [Fig. 2]와 같이 전체 구조를 결정하였다.

그리스 공급 및 강연선 부식을 검출하기 위한 센서 마운트를 [Fig. 3]과 같이 로봇 전방에 설치하였다. 그리스 공급 검출 센서^[6]는 초음파 센서를 사용하여 로봇 전방에 존재하는 그리스 공급을 검출한다. 이 때 두 초음파센서 송수신 모듈간에 일정 각도를 유지하여야 신호를 정상적으로 수신할 수 있으므로 초음파 센서의 표면이 한 방향을 바라보도록 마운트를 제작하



[Fig. 3] Modeling of Sensor mount



[Fig. 4] (a) Assembled Screw-propelled robot, (b) Sensor part of robot (Top view), (c) Sensor part of robot (Front view), (d) Sensor mount

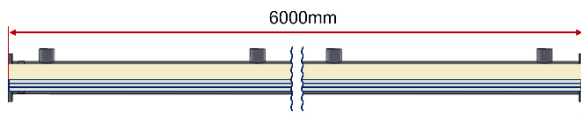
여 설치한다. 부식 검출 센서^[6]는 두 개의 전극 탐침이 강연선에 접촉하고, 두 접점 사이의 전위차를 측정하는 방식으로 작동한다. 부식 측정 센서의 작동 원리상 두 탐침이 항상 강연선에 접촉해야 하므로 로봇의 두 스크류 사이에 하우징을 제작하고 스프링으로 제작된 탐침을 일렬로 탑재하여 [Fig. 4]와 같이 제작하였다. 탐침은 덕트 중심부 강연선에 접촉하고, 주행 중 강연선의 배치 변화 등이 발생하여도 탄성에 의해 강연선과 접촉을 유지할 수 있어 부식 측정을 정상적으로 진행할 수 있으며, 탐침을 등글게 굽혀서 검측 후 로봇을 후진시켜 덕트에서 배출시킬 때 주행에 방해가 되지 않도록 제작하였다.

로봇의 후방에는 전원/통신 공급케이블(이하 Tether)이 연결된다. 이 Tether를 통해 로봇에 전원을 공급하고 모니터링 시스템과 통신을 하므로 필수적인 요소이지만, 그리스에 직접적으로 노출되므로 그리스와 Tether 사이에 저항이 발생하여 로봇이 추진하는데 방해가 될 것이다. 이 문제는 로봇이 추진하며 그리스에 노출되는 Tether의 면적이 증가할수록 커진다. 이를 해결하기 위해 Tether의 저항을 줄이는 방법과 Tether 자체에 강성을 부여하고 로봇의 추진에 맞춰 Tether를 밀어넣어 로봇의 보조 추진력으로 사용하는 방법을 개발 중이다.

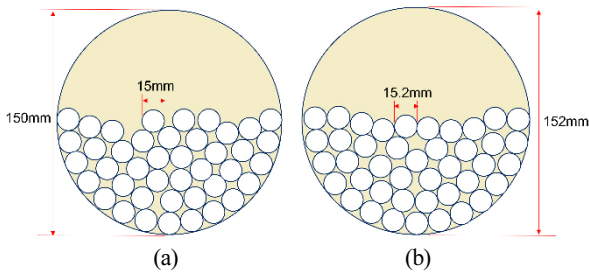
3. 실험환경 모델링

실험 환경의 구조는 [Fig. 5], [Fig. 6], [Fig. 7] 과 같이 길이 6 m, 내경 150 mm 아크릴 파이프와 직경 15 mm 아크릴봉 42개로 구성하였다. 실제 환경은 길이 100 m, 내경 152 mm 덕트에 직경 15.2mm 강연선 42개가 삽입되어 있다. 실험 환경에서 아크릴봉이 차지하지 않는 여유공간 단면적은 약 10724 mm², 실제 환경에서의 여유공간 단면적은 12717 mm²으로 실제 환경과 유사한 형태이나 더 불리한 조건으로 실험환경이 구성되어 추진 로봇 기술의 실현성을 검증하는데 충분하다고 판단하였다.

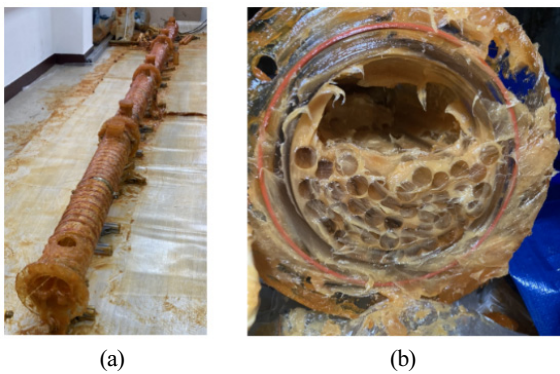
또한 원자로 격납건물 외벽 내부 텐던 덕트의 온도는 20°C 내외이므로^[6] 파이프 외부에 열선을 설치하여 실험 중 그리스 온도를 20°C로 유지한다.



[Fig. 5] Modeling of test environment



[Fig. 6] (a) Cross section of the pipe for test, inner diameter 150 mm, acryl rod 42 pcs, (b) Cross section of the Real tendon duct, inner diameter 152 mm, steel strand 42 pcs

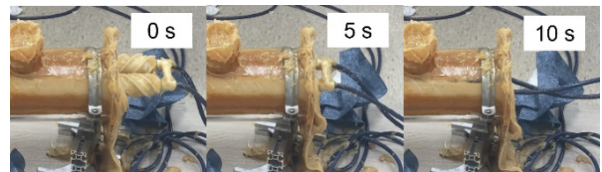


[Fig. 7] (a) Test environment, (b) Cross section of the pipe for test

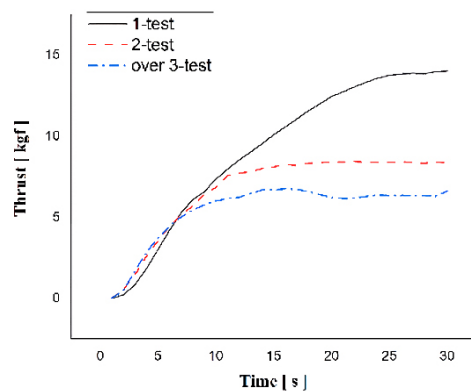
4. 추진실험

앞서 설계한 대로 6 m 길이의 실험 환경을 구성한 뒤, 파이프에 그리스를 주입하여 로봇의 추진 실험을 진행하였다. 실험 결과 [Fig. 8]에서 보이는 것처럼 로봇이 정상적으로 그리스 파이프 내부를 파고들며 추진하였고, 이후 로드셀을 사용해 추진력을 측정하는 결과 [Fig. 9]처럼 최대 14 kgf, 반복실험시 7 kgf의 추진력을 발생시킬 수 있음을 확인하였다^[7].

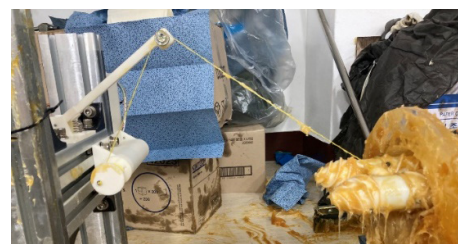
하지만 로봇이 약 1 m 추진한 이후 추진 속도가 감소하고 잠시 후 정지하는 것을 확인하였는데, 이는 로봇 모델링 단계에서 상정하였던 대로 로봇에 연결된 Tether와 그리스 사이에서 발생하는 저항력이 로봇이 추진함에 따라 점차 증가하여 로봇 자체의 추진력으로는 더 이상 추진할 수 없는 상태가 되었기 때문으로 확인되었다. 현재 Tether의 저항을 줄이는 방법과 보조 추진력으로 사용하는 방법 모두 개발 진행중인 상태이므로 실제로 적용이 불가능하다. 따라서 이러한 저항 문제를 해결하기 위해 외부에서 보조적인 추진력을 공급하여야 했



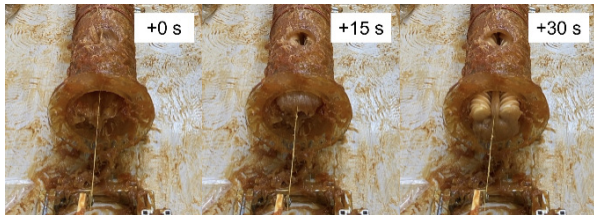
[Fig. 8] Robot propelling in grease



[Fig. 9] Propelling force of robot in grease



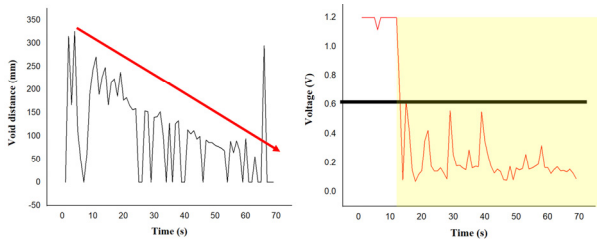
[Fig. 10] Winch to pull robot



[Fig. 11] Robot passing through 6 m pipe. 15 sec interval



[Fig. 12] Sensor testing environment with grease void structure



[Fig. 13] Sensor data collected during robot propelling

고, [Fig. 10]과 같이 전방에서 일정한 속도로 와이어를 감아 로봇을 견인하는 방식으로 추진력을 확보하였다. 와이어를 이용해 견인하며 실험한 결과 로봇이 [Fig. 11]처럼 정상적으로 6 m 배관을 진행하는 것을 확인하였다.

또한 로봇의 추진과 센서 검측의 동시 작동을 확인하기 위해 [Fig. 12]와 같이 그리스 파이프 내부에 공극의 역할을 하는 구조물을 삽입하고, 파이프 내부 아크릴봉을 부식구간이 존재하는 강연선으로 교체한 1.5 m 실험 환경을 제작하였고, 초음파센서와 부식센서가 스크류 회전과 동시에 작동하여 [Fig. 13]과 같이 데이터를 송신할 수 있는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서 개발한 screw-propelled robot은 포스트텐션 덕트와 유사한 조건으로 제작된 그리스 배관에서 덕트 내부 탐상을 위한 센서를 탑재한 상태로 추진 및 검측을 진행할 수 있었고, 자체적으로 7 kgf 이상의 추진력을 발생시킬 수 있음을 보여 그리스 덕트 내부를 직접적으로 탐상하는 추진로봇 기술의 실현성을 입증했다.

현재까지의 실험은 그리스가 가득 차 있는 덕트를 전제로 실험을 진행하였다. 하지만 실제 환경에서는 Tether의 저항이 증가하여 추진력이 부족해지는 경우 이외에도 그리스 누유로 인해 로봇 추진에 필요한 그리스가 부족하여 추진력이 부족해지는 경우 등 추가적인 추진력 감소 원인이 있을 수 있다.

이를 해결하기 위해서는 보조 추진력 공급이 필요하다. 이번 연구에서는 Tether 저항 감소 및 보조 추진력 확보 연구가 진행중이어서 Tether 저항에 의한 추진력 감소를 보충하기 위하여 전방에서 와이어를 이용해 로봇을 견인하였지만, 실제로 기술을 적용할 때에는 와이어를 이용한 견인이 불가능하므로 진행중인 연구에 더하여 추가 추진 모듈을 일정 거리마다 연결하는 형태로 보조추진력을 확보하는 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] J. H. Choi, S. J. Choi, D. H. Yang, and J.-H. J. Kim, "Experimental Evaluation of Internal Blast Resistance of Prestressed Concrete Tubular Structure according to Explosive Charge Weight," *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, vol. 39, no. 3, pp. 369-380, Jun., 2019, DOI: 10.12652/Ksce.2019.39.3.0369.
- [2] J.-H. Park, J.-G. Hong, B.-H. Lee, and B.-U. Park, "Current status of domestic nuclear containment system and inspection," *Machines and Materials*, vol. 19, no. 1, pp. 40-49, 2007, [Online], <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200773336084508.page>.
- [3] S.-H. Hong, K. Jung, J.-Y. Lee, and M.-S. Jeong, "Development of embedded control system for untethered in-pipe inspection robot," *2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, Jeju, Korea, 2013, DOI: 10.1109/URAI.2013.6677473.
- [4] K. T. Lee, J. B. Lee, and J. K. Kim, "Grease Void Detection in the Post-Tensioning Duct," *KSCE 2020 CONVENTION*, pp. 1171-1172, 2020, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10569882>.
- [5] M.-H. Seong, K. T. Lee, and J. K. Kim, "Corrosion Detecting of PS Strands in a Duct," *Korea Concrete Institute*, vol. 33, no. 2, pp. 289-290, 2021, [Online], <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10665855>.
- [6] T. Gasch, L. Ahmed, and R. Malm, "Instrumentation and Modelling of a Reactor Containment Building," *Energiforsk*, 2018, [Online], <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1253003&dswid=2714>.
- [7] D. Kim, "Screw-Propelled robot for internal inspection of tendon duct in Atomic pile," M.S thesis, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea, 2022, [Online], <http://snut.dcollection.net/common/orgView/200000602209>.



김 호 중

2021 서울과학기술대학교 기계자동차공학과
(공학사)

2021~현재 서울과학기술대학교 기계공학과
석사과정 재학중

관심분야: Design of Robotic Mechanisms, Control, Actuators



김 동 선

2020 서울과학기술대학교 기계자동차공학과
(공학사)

2022 서울과학기술대학교 기계공학과
(공학석사)

관심분야: Robotic Mechanisms, Design of Control System



김 진 현

1998 POSTECH 기계공학과 학사

2000 POSTECH 기계공학과 공학 석사

2005 POSTECH 기계공학과 공학 박사

2005~2007 한국생산기술연구원 선임연구원

2007~2014 서울과학기술대학교 기계공학과
조교수

2014~현재 서울과학기술대학교 기계 자동차
공학부 부교수

관심분야: Redundant Manipulator, Underwater robots, Hovering
robots, Neuro Robotics