

콘크리트 표면 균열 실링을 위한 로봇의 제어 방법에 관한 연구

조철주* · 임계영**

Cho, Cheol-Joo*, Lim, Kye-Young**

A Study on Control of Sealing Robot for Cracks of Concrete Surface

ABSTRACT

Since the crack in the surface of the concrete acts as the main reason influencing the life span of the structure, regular inspections and maintenance are required. The sealing required for maintenance of the concrete surface is a method of repairing the crack in the surface in the beginning, and is effective in preventing additional cracks and expansion that occurs with time. However, sealing on large sized structures such as tall buildings or bottom parts of bridges are difficult to ensure safety of the workers due to inadequate working environments. Due to this reason, the importance of the need for sealing automation for the maintenance of large sized concrete structures is emerging. This study proposes two control methods to apply robot systems to the sealing of cracks on the bottom parts of concrete bridges. First is the method of automatically tracking the trajectory of cracks. The robot gets the trajectory of the cracks using video information obtained from cameras. Comparing the previous several points and new point, the next point can be estimated. Thus, the trajectory of the crack can be tracked automatically. The other method is sealing by maintaining steady force to the contacting surface. The concrete surface exposed to an external environment for a long time gets an irregular roughness. If robots are able to carry out sealing while maintaining a steady contact force on these rough surfaces, complete equal sealing can be maintained. In order to maintain this equal force, a force control method using impedance is proposed. This paper introduces two developed control methods to apply to sealing robots, and conducts a Lab Test and Field Test after applying to a robot. Based on the test results, opinions on the possibilities of field application of the robot applied with the control methods are presented.

Key words : Concrete surface, Crack sealing, Crack tracking, Impedance force control

초 록

콘크리트 표면에 발생된 균열은 구조물의 수명에 영향을 미치는 주요원인으로 작용하기 때문에 주기적인 검사와 유지관리가 필요하다. 콘크리트 표면 유지관리를 위한 실링작업은 표면에 발생된 균열을 초기에 보수하는 방법으로 시간 경과에 따른 균열의 추가생성 및 확산을 방지하는데 효과적이다. 하지만, 교량 하부의 실링작업은 열악한 작업환경으로 인하여 작업자들의 안전성 확보에 문제가 있다. 이런 이유로, 콘크리트 구조물의 유지관리를 위한 실링자동화의 필요성이 부각되고 있다. 본 논문은 콘크리트 교량 하부에 발생된 균열의 실링작업에 로봇을 적용하기 위한 두 가지 제어방법에 대하여 제안한다. 하나는, 균열의 궤적을 자동으로 추적하는 방법이다. 로봇은 카메라로부터 취득되는 영상정보로 균열의 궤적을 파악하는데, 이전 시점의 궤적 정보를 통하여 다음 이동할 시점의 정보를 유추할 수 있다면, 실시간으로 변동되는 궤적 정보에 대응이 가능하면서 자동으로 균열을 추적할 수 있다. 다른 하나는 접촉면에 일정한 힘을 유지하여 실링하는 방법이다. 장기간 외부 환경에 노출된 거친 표면에서도 로봇이 일정한 접촉력을 유지하며 실링작업을 수행한다면, 균등한 완성도를 유지할 수 있다. 이러한 균일한 힘의 유지를 위하여 임피던스를 이용한 힘 제어 기법을 제안한다. 본 논문에서는 실링 로봇에 적용하기 위하여 개발한 두 가지 제어기법들을 소개하고, 그것을 적용한 Lab Test와 Field Test를 수행한다. 이 시험결과를 토대로 로봇의 현장적용에 대한 의견을 제시한다.

검색어 : 콘크리트 표면, 균열 실링, 균열 추적, 임피던스 힘 제어

* 정희원 · 교신저자 · 한국산업기술대학교 지식기반기술에너지대학원 박사과정

(Corresponding Author · Korea Polytechnic University · h2master@naver.com)

** 한국산업기술대학교 에너지전기공학과 교수, 공학박사 (Korea Polytechnic University · kylim@kpu.ac.kr)

Received November 2, 2014/ revised December 6, 2014/ accepted January 20, 2015

1. 서론

1.1 실링 로봇의 필요성

현대 건축 구조물은 산업기술의 눈부신 발전으로 초대형화, 초고층화 되어가고 있다. 그에 따라서 구조물의 안전성을 측정할 수 있는 검사와 보수관리 시설에 대한 관심도 높아지고 있다. 이러한 대형 구조물 시공의 주재료인 콘크리트는 압축력이 강한 반면, 인장력이 약하여 약간의 휨으로도 균열이 발생한다. 콘크리트 표면에 발생된 균열은 발생 위치, 유형, 크기에 따라서 구조물의 내구성과 안정성에 미치는 영향이 크게 달라지므로, 초기에 발견하여 보수대책을 수립한다면, 시간의 경과에 따른 균열의 추가생성 및 확산을 방지할 수 있다. 콘크리트 표면 보수 방법은 3가지로 구분되며, 균열의 크기(폭)에 따라 적용되는 공법이 다르다. 균열의 크기가 0.2mm이하인 경우에는 실링 공법(Sealing), 0.2-0.5mm인 경우는 주입 공법(Injecting), 0.5mm보다 큰 경우에는 충전 공법을 적용한다. 이 중, 실링 공법은 균열을 초기에 보수하는 방법으로 시간경과에 따른 균열의 추가 생성 및 확산을 방지하는데 효과적이다. 이런 이유로, 본 논문에서 로봇 시스템에 적용할 보수 방법으로 실링 공법을 선정하였고, 대상 균열의 폭은 0.2mm이하로 한다.

Fig. 1은 콘크리트 균열을 실링하는 현장의 모습이다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 대형 콘크리트 구조물 표면에 발생한 균열을 실링하는데 소요되는 시간과 비용을 최소화 하기 위해서는 많은 수의 작업자를 필요로 하게 된다. 그러나 많은 수의 작업자들이 현장에 동시에 투입되어 작업을 진행하는데 제약이 따르고, 열악한 작업 환경으로 인하여 작업자들의 안전을 보장받기 어려운 실정이다. 이를 해결하기 위한 방안으로 대형 구조물의 균열 실링 작업의 자동화를 위한 연구가 진행되어 왔다.

1.2 실링 로봇의 기술 동향

균열 실링 자동화에 관한 연구는 1990년대 초반부터 활발히 수행되어 왔다. 미국 텍사스에서는 카메라를 통하여 얻어진 아스팔트 도로면의 균열 정보를 트럭의 뒷 부분에 체결된 X-Y table에 전송하여 실링 작업을 하는 자동화 시스템을 개발하였고(Haas

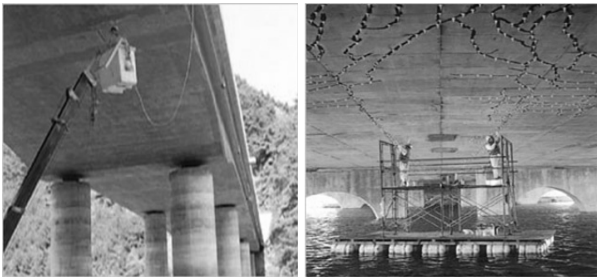


Fig. 1. Appearance of Sealing Cracks

et al., 1992), 이와 비슷한 형태로, 캘리포니아에서는 트럭에 telescoping 구조를 체결한 균열 실링 시스템을 개발 하였다(Feng et al., 2002). 국내의 경우, 차량에 일체화된 직교로봇을 이용하여 도로면 실링 작업이 가능한 시스템이 개발되었다(Kim, 1998). 이렇게 도로면의 균열을 실링하는 자동화 시스템에 대한 연구뿐만 아니라, 흡착 시스템으로 교량 하부에 고정되어 균열을 보수하는 로봇도 개발되었다(Lim et al., 2008). 현재는 각각의 연구 결과물에 대한 안정화 및 상용화에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다(Yoo et al., 2004; Yoo and Kim, 2012).

일반적으로 로봇을 이용한 자동화를 위해서는 로봇 제조사에서 제조한 상용의 로봇을 이용하여 카메라의 영상 신호를 이용하거나 추가적으로 적절한 센서를 부착하여 시스템을 구성하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 구성을 토대로 Lim et al. (2008)에 의하여 개발된 경량의 실험용 로봇을 이용하여 콘크리트 교량 하부의 균열을 실링하기 위하여 필요한 로봇 제어 기법들에 대하여 논한다. 2장에서는 실링 자동화를 위한 로봇의 구조와 실링 메커니즘에 대하여 설명하고, 3장에서는 효율적인 실링 작업을 위한 두 가지 제어 기법을 제시한다. 첫째, 로봇에 부착된 카메라에서 취득한 영상 신호를 이용하여 균열을 자동으로 추적하는 알고리즘을 제시한다. 둘째, 로봇 z축의 말단부에 힘 센서를 부착하여 거친 표면에서도 일정한 힘으로 실링 작업을 수행할 수 있도록 로봇의 외부에 힘 제어를 부가하고 수정된 로봇의 위치 명령으로 변환하여 로봇을 제어하는 방법을 제안한다. 마지막으로 4장에서는 3장에서 소개한 제어 기법의 Lab Test와 Field Test의 결과를 분석하고, 현장 적용의 가능성에 대하여 의견을 제시한다.

2. 시스템 구성

2.1 로봇 시스템

Lim et al. (2008)은 경량의 로봇이 콘크리트 교량 하부에 고정되어 균열 실링 작업이 가능케 하기 위하여, 위치제어 알고리즘이 내재된 일반적인 산업용 로봇에 실링 및 흡착 메커니즘을 결합한 형태로 설계하였다.

로봇의 전체적인 구조는 볼스크류를 사용한 3축 직교형이며, 스트로크는 x, y축은 300mm, z축은 200mm이다. 로봇의 전체 무게는 27kg이고, Tool kit 부착을 고려한 z축 말단의 하중은 7kg이다. Fig. 2는 개발되어진 로봇의 모습으로 z축 말단에는 균열 실링 공정을 위한 Tool Kit을 부착하였다.

Tool Kit은 균열 검출을 위한 카메라(CCD Camera), 실링재료인 실란트(Sealant), 실란트가 적재된 실링건(Sealing Gun), 콘크리트 표면에 대한 접촉력을 측정하기 위한 힘 센서(Force Sensor)가 포함되어 있다. Fig. 3은 로봇의 z축에 부착되어 있는 Tool Kit이다.

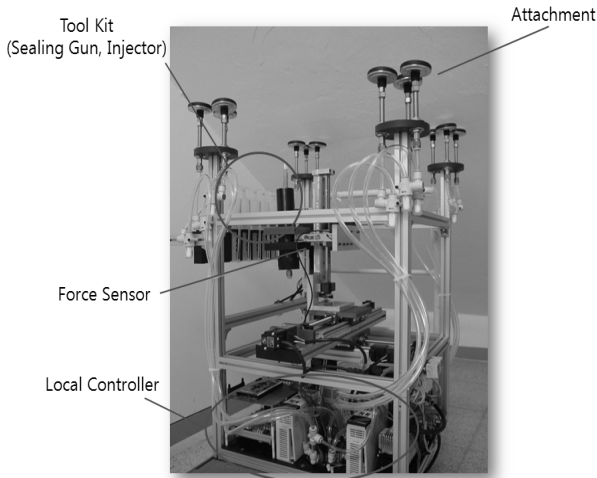
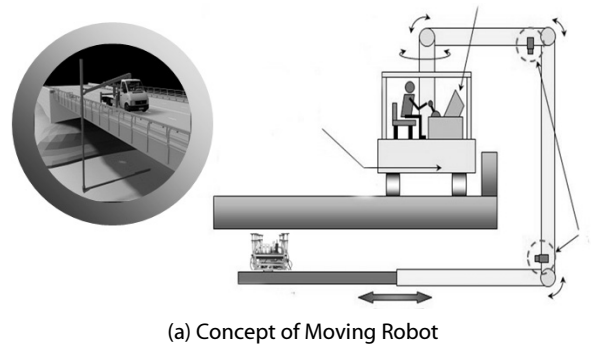
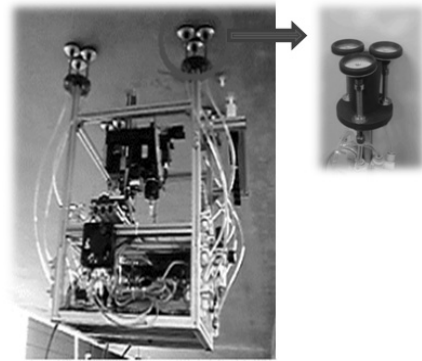


Fig. 2. Sealing Robot Mechanism



(a) Concept of Moving Robot



(b) Attached Robot under Bridge

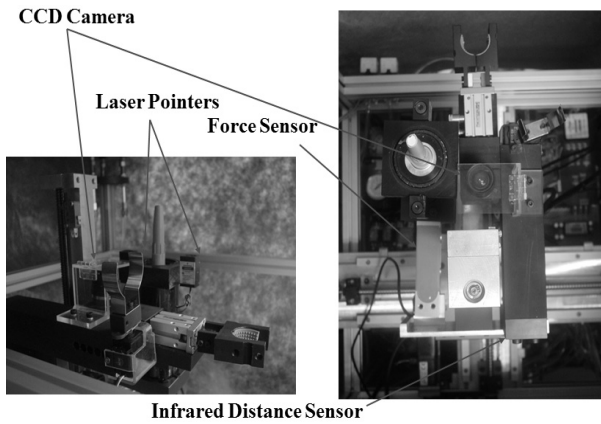


Fig. 3. Tool Kit

로봇은 Fig. 4(a)와 같이 굴절 차량의 붐 말단에 고정되어 작업 영역으로 이동한다. 그런데 교량 주변의 잦은 바람은 굴절차 붐에 진동을 유발하여 실링 작업 효율을 저하시킨다. 이러한 진동에서도 로봇을 안정적으로 운용하기 위하여 Fig. 4(b)와 같이 로봇 각각의 다리에 흡착 시스템을 추가하여 콘크리트 표면에 고정 가능한 구조로 설계하였다(Lim, 2009).

보수 로봇의 제어 시스템은 Fig. 5와 같이 메인 제어기인 PC에 모션 제어 보드와 데이터 수집 보드, 영상 보드가 포함되어 구성된다. 모션 제어 보드는 3축 직교 로봇의 전반적인 움직임에 활용되며, 데이터 수집 보드는 콘크리트 표면과 로봇의 접촉력을 측정하는 힘 센서 데이터 수집, 로봇을 고정하는 흡착 시스템의 압력을 측정하는 공기압 센서 데이터 수집, 디지털 I/O를 통한 시퀀스를 수행 등의 용도로 활용된다. 영상 보드는 실링작업이 필요한 균열을 감지하고 궤적을 추출하는 용도로 사용된다.

Fig. 4. Appearance of Working Robot

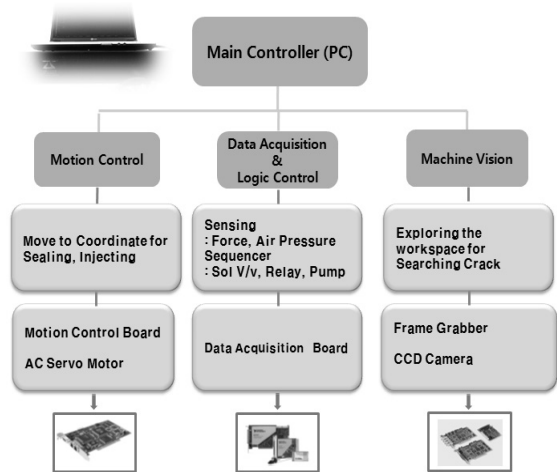


Fig. 5. Configuration of Main Controller

2.2 실링 메커니즘

실링 공법은 콘크리트 표면에 발생한 약 0.2mm 이하의 폭의 균열에 적용하는 방법으로 다수 발생한 균열의 개별적인 보수가 곤란한 경우에 주로 사용하며, 보수 현장에서 작업자들은 실링트가 장착되어 있는 실링건을 직접 사용하여 실링 작업을 수행한다. 이러한 실링 작업을 위한 로봇 시스템에서 기존의 실링 작업과

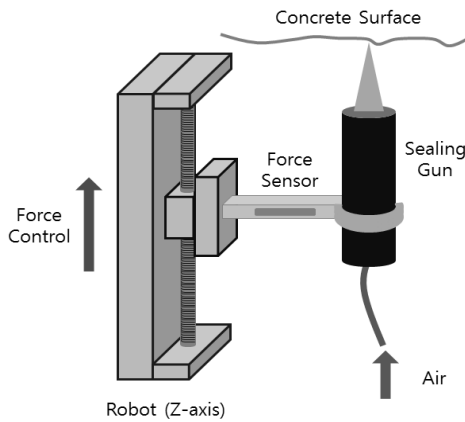


Fig. 6. Sealing Module

동일한 프로세스를 유지하기 위하여 로봇의 Tool Kit에 장착되는 실링 모듈은 실란트가 들어있는 실링건에 컴프레셔의 공기압을 주입하여 작업이 가능한 구조로 설계하였다. Fig. 6는 실링 장치의 구조를 보여준다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이, 로봇의 z축에는 콘크리트 표면과 일정한 힘을 유지하기 위한 빔(Beam)형태의 힘 센서를 고정하고 힘 센서의 밑단에 공기압으로 실란트의 토출이 가능한 실링건을 부착하였다.

실링건 내의 실란트를 토출하기 위한 공기압이 너무 높으면 토출되는 실란트의 양이 너무 많아 균열 주변으로 누액되게 된다. 이렇게 누액된 실란트는 균열을 교시하고 있는 카메라 영상의 판별력을 저하시키고, 실란트가 로봇에 떨어지는 경우에 높은 점성으로 인하여 장비의 운용에 악영향을 미치게 된다. 반면에 공기압이 너무 낮으면, 균열을 충분히 도포하지 못하는 경우가 발생한다. 따라서 이러한 이유로 적용 환경과 동일한 콘크리트 표면에 공기압을 단계별로 조절하여 로봇의 실링 작업에 적절한 압력(295 kPa)을 선정하였다.

본 논문의 실링 작업에 사용된 실란트는 실제 현장에서 사용되는 건축용 실란트를 사용하여 언제나 교체가 용이하도록 하되, 기존의 실란트보다 점성이 높은 모델을 사용하였다. 사용된 건축용 실란트는 Sika 社의 si-kaflex-11FC 모델이다.

3. 로봇 제어 시스템

3축 직교형으로 제작된 로봇은 각 축마다 수행하는 역할에 차이가 있기 때문에, 적용되는 제어 기법이 명확히 구분된다. x, y 축은 카메라의 영상 신호를 통하여 취득한 균열의 궤적을 추적하는 것을 수행하고, z 축은 콘크리트 표면과 일정한 접촉력을 유지하기 위한 임피던스 힘 제어 기법을 수행한다.

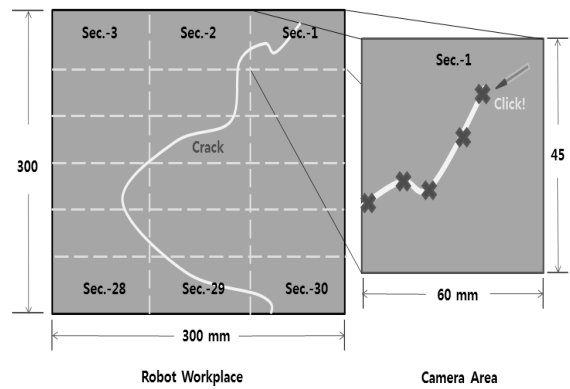


Fig. 7. Robot Workplace and Camera Area

3.1 균열 궤적 추적

로봇은 균열 실링 작업 수행 시, 카메라 교시 영역의 협소함으로 생기는 제한을 받는다. 로봇이 1 step에 작업 가능한 영역은 $300 \times 300 \text{ mm}$ 인데 비하여, 작업자에게 교시되는 실시간 영역은 $60 \times 45 \text{ mm}$ 이다.

현장에서 실제 적용하고 있는 작업 프로세스를 기반으로 로봇의 실링을 위하여 제안하는 프로세스는 Fig. 7과 같다. 로봇의 작업 영역은 카메라 교시 영역을 기준으로 30 구역으로 나눌 수 있으며, 작업자는 구역1 (Sec.-1)에서부터 순서대로 구역30 (Sec.- 30)까지 차례로 로봇을 이동하며 작업을 수행한다.

- ① 로봇은 구역1 (Sec.-1) 이 교시되는 지점에 위치하며, 작업자는 교시되는 화면을 통해 실링 작업을 할 균열을 판별한다.
- ② 작업자는 판별한 균열에 로봇이 이동할 위치를 표시하여 이동 궤적을 생성한다(Point To Point).
- ③ 로봇은 ②에서 저장된 위치를 순서대로 이동하며 실링 작업을 한다.
- ④ 구역1 (Sec.-1) 의 실링 작업이 완료되면, 로봇은 구역2 (Sec.-2) 가 교시되는 지점으로 이동하여 새로운 작업면을 교시한다.
- ⑤ 위의 ① ~ ④의 순서를 반복하여 구역30 (Sec.- 30) 까지 작업을 진행 한다.

로봇의 1 Step 작업을 위해서 최소 30번의 구역 이동이 이루어지며, 각 구역에서 시퀀스 ①~⑤를 반복한다.

시퀀스 ②에서 작업자는 교시된 화면상의 균열을 주시하여 로봇의 이동 궤적을 체크해주게 되는데, 이러한 수동 조작은 작업자의 숙련도에 따라 실링 작업의 완성도에 상이한 차이를 보인다. 이를 해결하기 위한 방안으로 영상 신호를 이용하여 로봇의 이동 궤적을 자동으로 생성하는 기법이 요구된다. 다음은 로봇이 자동으로 균열

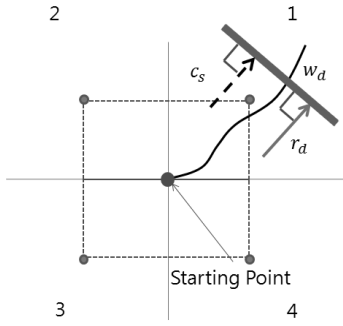


Fig. 8. Starting Point of Crack Tracking

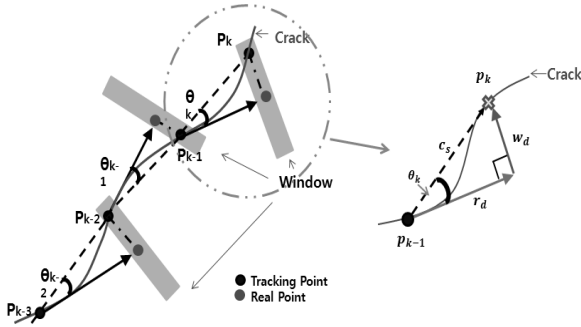


Fig. 9. Crack Tracking Direction

의 방향을 판별해나감에 실링을 수행하기 위한 균열 궤적 추적 기법이다.

로봇이 균열의 궤적을 자동으로 추적하기 위해서는 균열의 진행 방향 정보를 항상 획득하여야 한다. Fig. 8과 같이 균열의 시작점 좌표로 이동한 로봇은 상, 하, 좌, 우 방향을 검색하여 초기 균열의 진행 방향을 검출한다.

초기 균열의 방향이 검출되면, 균열의 방향 벡터(\$c_s\$)와 로봇의 방향 벡터(\$r_d\$)가 설정되며, 이 벡터에 수직인 가상의 윈도우(\$w_d\$)를 설정할 수 있다(\$r_d \perp w_d\$). 그러면, 로봇은 매 샘플링 시간마다 \$w_d\$의 크기와 방향을 검출하여 \$r_d\$와 \$c_s\$사이의 각도(\$\theta_k\$)의 정보를 얻는다.

Fig. 9는 로봇의 균열 추적 방향과 \$r_d, w_d, c_s\$의 관계를 보여준다. \$w_d\$를 통하여 \$c_s\$가 검출되면, 로봇의 진행 방향 벡터(\$r_d\$)를 이용하여 Eq. (1)을 도출할 수 있다.

$$\theta_k = \tan^{-1}\left(\frac{|w_d|}{|r_d|}\right), -45^\circ \leq \theta_k \leq +45^\circ \quad (1)$$

Eq. (1)에서 로봇이 균열을 정확히 추적하기 위한 조건은 \$r_d \equiv c_s\$이며, 이 조건이 만족되면 Eq. (2)가 성립한다.

$$\lim_{t \rightarrow T_s} \theta_k = 0 \quad (2)$$

위의 Eqs. (1) and (2)는 균열의 궤적을 추적하는 알고리즘의 기본 조건이 되며, 이를 토대로 Fig. 9와 같이 로봇은 초기 위치 \$p_{k-3}\$에서 출발하여 \$p_{k-2}\$와 \$p_{k-1}\$를 거쳐 \$p_k\$까지 이동하게 된다. 이 때, 획득한 정보 \$\theta_{k-2}, \theta_{k-1}, \theta_k\$와 변화량 \$\Delta\theta_{k-1}, \Delta\theta_k\$를 이용하면, \$p_k\$에서 다음 시점에 이동해야 하는 \$p_{k+1}\$의 위치와 방향 예측이 가능하다. 이와 같이 각각의 정보에 대한 예측이 가능하면, 로봇이 다음 단계로 이동할 경로에 대한 정보를 미리 인지하고 있기 때문에 더욱 빠르고 민감하게 실링 작업을 수행할 수 있으며 급격한 균열의 방향성 변화에도 대응이 가능해진다(Cho, 2010). 이를 위하여, 현재 시점의 센서 정보와 이전의 변화량을 이용하여 다음 시점에서의 정보를 예측할 수 있는 방법으로 칼만필터 기법을 채택하였다.

균열의 궤적을 추적하기 위한 로봇의 선형상태 모델은 Eq. (3)과 같다.

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= AX_k + W_k, Z_k = HX_k + C_k, \\ X_k^T &= [\theta_k \ p_k \ \dot{\theta}_k \ \dot{p}_k], Z_k^T = [\theta_k \ p_k] \end{aligned} \quad (3)$$

로봇이 균열을 추적하기 위하여, 필요한 정보는 샘플링 시간에 따른 \$r_d, c_s\$ 사이의 각도(\$\theta_k\$)와 로봇의 위치(\$p_k\$)이다. \$\theta_k\$는 카메라 영상 신호로 얻을 수 있고, \$p_k\$는 로봇 각 축의 엔코더를 통하여 얻게 되며, 이 두 가지 정보가 측정값(\$Z_k\$)이 된다. \$X_k\$는 \$Z_k\$의 두 가지 정보 외에 제어기 내부에서 계산 가능한 \$\dot{\theta}_k, \dot{p}_k\$를 포함한다. 이러한 정보들을 이용하여, 로봇이 이동해야 할 다음 시점의 각도(\$\theta_{k+1}\$)와 위치(\$p_{k+1}\$)을 얻기 위하여 Eq. (4)와 같이 바로 전단계의 추정값(\$\hat{X}_{k-1}\$)과 오차 공분산(\$\Gamma_{k-1}\$)을 이용하여 현재 단계의 예측값(\$\hat{X}_k, \Gamma_k\$)을 구하였다.

$$\hat{X}_k^- = A \hat{X}_{k-1}, \Gamma_k^- = A \Gamma_{k-1} A^T + Q \quad (4)$$

Eq. (5)는 Eq. (4)의 예측값(\$\hat{X}_k^-\$)과 측정값(\$Z_k\$)을 이용하여 새로운 추정값을 구하는 식으로, 가중치 \$K_k\$를 포함하고 있다.

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (Z_k - H \hat{X}_k^-) \quad (5)$$

Eq. (6)은 Eq. (5)의 가중치 \$K_k\$를 구하는 식으로 로봇의 작업 상황에 맞추어 계속 변화하며, 예측값을 얼마나 보정할 지를 결정하는 중요한 역할을 한다.

$$K_k = \Gamma_k^- H^T (H \Gamma_k^- H^T + R)^{-1} \quad (6)$$

Eq. (7)에서 Γ_k 는 칼만 필터의 추정값이 참값에서 얼마나 차이가 나는지를 나타내는 지표로 추정값의 정확도에 대한 척도가 된다. X_k 의 추정값에 대한 확률 분포를 따져서 가장 확률이 높은 값을 추정 값으로 선택한다.

$$\Gamma_k = \Gamma_k^- - K_k H \Gamma_k^- \quad (7)$$

로봇의 균열 계적 추적은 측정된 센서 데이터의 예측 오차로 예측값을 적절히 보상하여 최종 추정값을 구하였다.

3.2 콘크리트 표면 임피던스 힘 제어

장기간 외부 환경에 노출된 콘크리트 표면은 이물질 축적 및 풍화 침식으로 인하여 불규칙한 거칠기를 가진다. 이런 불규칙한 거칠기는 실링제의 도포 상태를 악화시키기 때문에, 실링제의 말단부에 빔(Beam) 형태의 힘 센서를 부착하여 표면과 직접적으로 접촉하는 실링제 말단부의 힘의 크기를 검출할 필요가 있다. Fig. 10은 힘 제어를 위한 로봇 z축의 구조를 보여준다.

표면의 균열을 실링하는 작업은 로봇이 콘크리트 표면에 접촉된 상태에서 움직이기 때문에 위치 제어만으로 원하는 실링 작업의 성과를 얻는 것이 불가능하다. 실링제 끝에 작용하는 힘은 접촉되는 표면 강성에 영향을 받기 때문에 실링제 말단의 위치와 실링제 말단에 작용하는 힘을 동시에 제어해야 한다. 이를 위하여, 로봇과 콘크리트 표면사이에 가상의 임피던스가 존재한다고 가정하고 이를 조작하여 실링제 말단의 힘을 간접적으로 제어하는 임피던스 힘 제어 기법을 사용한다(Jeon et al., 2003).

로봇이 작업할 콘크리트 환경은 Fig. 11과 같이 간단한 스프링 모델로 채택할 수 있다(Jung, 2000).

Fig. 11에서 로봇이 콘크리트 표면에 일정한 힘을 유지하기

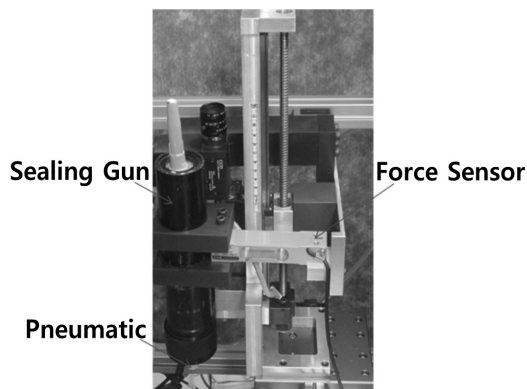


Fig. 10. Z-axis for Sensing Force

위해서는 일정 힘 f_d 와 접촉 힘 f_c 의 오차 Δf 가 Eq. (8)을 만족해야 한다.

$$\lim_{t \rightarrow T} \Delta f \cong 0, \quad \Delta f = f_d - f_c \quad (8)$$

여기서, Δf 는 콘크리트 표면의 불규칙한 거칠기와 정확히 측정이 불가능한 강성 k_{ze} 로 인하여 발생한다. Fig. 7의 로봇이 콘크리트 표면에 힘 f_d 를 가할 때 발생하는 위치 오차 Δx 와 Δf 는 Eq. (9)와 같은 관계를 보인다.

$$\Delta x = k_{ze}^{-1} \cdot \Delta f \quad (9)$$

Eq. (9)에서 k_{ze}^{-1} 는 로봇과 콘크리트 표면사이의 가상 임피던스를 나타내며, 위치오차(Δx)는 로봇의 현재위치에 더해져 로봇의 새로운 위치지령(\tilde{x}_d)이 된다(Eq. (10)).

$$\tilde{x}_d = x_d + \Delta x \quad (10)$$

이제 Eq. (9)를 Eq. (10)에 대입하면 \tilde{x}_d 는 임피던스 k_{ze}^{-1} 를 포함한 Eq. (11)로 나타낼 수 있다.

$$\tilde{x}_d = x_d + k_{ze}^{-1} \cdot \Delta f \quad (11)$$

Eq.(11)의 x_d 는 로봇의 엔코더를 통하여 얻을 수 있는 정보이고, $\Delta f = f_d - f_c$ 는 힘 센서를 통하여 얻을 수 있는 정보이지만, k_{ze} 는 위에서 언급한 것과 같이 정확한 값의 측정이 어렵다. 그렇기 때문에 k_{ze}^{-1} 를 Eq. (12)의 앞섬/뒤짐 제어기로 대체한다.

$$K_c \cdot \frac{1 + \alpha T_s}{1 + T_s} \quad (12)$$

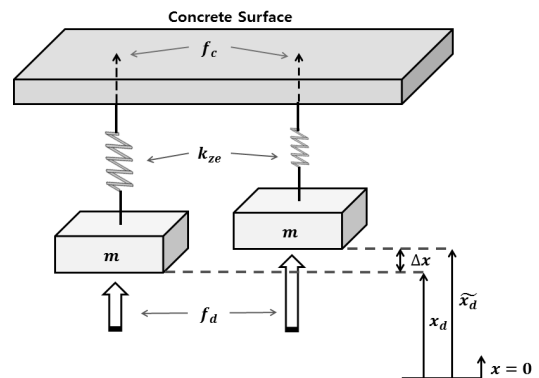


Fig. 11. Impedance Force Control Model

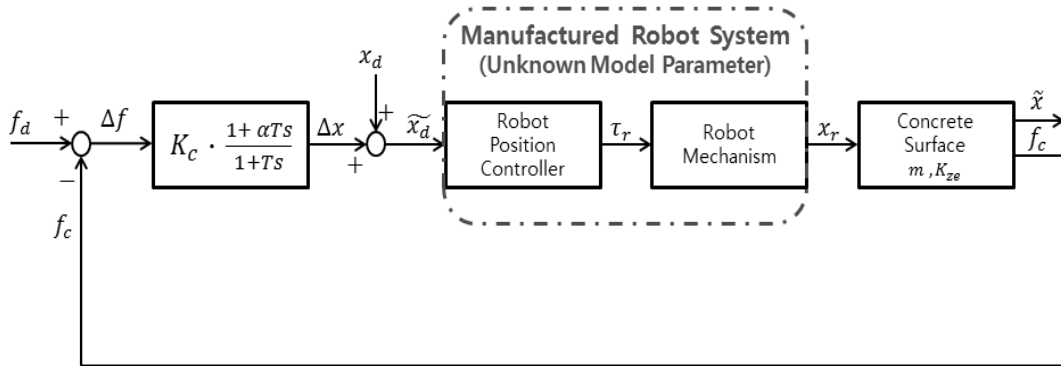


Fig. 12. Outer Feedback Loop for Impedance Force Control

Eq. (12)의 제어법칙 게인 K_c 와 시정수 T 및 앞섬/뒤집비 α 를 조정함으로써 임피던스 k_{zc}^{-1} 를 로봇의 강성으로 변경하는 방법을 채택한다. 마지막으로 Eq. (12)의 제어 법칙을 Eq. (11)에 대입하여 구하고자 하는 로봇의 위치 지령을 Eq. (13)과 같이 구할 수 있으며, 힘 제어의 구성도는 Fig. 12와 같다.

$$\tilde{x}_d = x_d + \left[K_c \cdot \frac{1 + \alpha Ts}{1 + Ts} \right] \cdot \Delta f \quad (13)$$

Fig. 12에서 점선의 표시선 부분인 로봇 시스템은 위치 제어기로써 로봇의 각 축은 제조사의 AC 서보 시스템으로 구성되어 있어, 내부의 위치 제어를 통하여 주어지는 위치 지령에 최적의 반응이 되게끔, 게인 값이 자체적으로 조정되어 있다. 그렇기 때문에 로봇의 구동은 최적으로 설계된 위치 제어기에 맡기고 외부 환경 모델에 따른 로봇의 동작은 임피던스 힘 제어의 결과인 Eq. (13)에서 계산된 로봇 위치 지령에 의하여 제어된다. 이러한 구성으로 힘 제어기에서 발생 가능한 로봇 모델과 외부 환경 모델의 불확실성으로 인한 오차 Δf 를 검증된 위치 제어 시스템으로 보완할 수 있게 하였다.

4. 로봇 성능 시험

4.1 실험 환경 설정

로봇의 성능을 시험하기 위한 장소는 경기도 고양시에 위치한 (구)행주대교의 교각이며, 로봇이 실험할 대상 균열은 콘크리트 표면에 랜덤하게 발생되어 있는 약 0.2mm 이하의 길게 뻗어있는 균열 중에 분기 또는 교차하는 부분이 없는 것으로 선정하였다. Fig. 13은 실제 시험 환경의 모습이다.

4.2 균열 궤적 추적

균열의 궤적을 추적하기 위하여 설정된 파라미터는 다음과 같다.

로봇 시스템의 운동 방정식을 나타내는 A 는 샘플링 시간 T_s (0.5초)를 포함하여 설정하였고, 상태변수(X_k)와 측정값(Z_k)의 관계를 H 로 설정하였다. 여러 오차가 복합적으로 작용하는 R 과 Q 는 로봇 시스템의 잡음과 센서의 측정 잡음에 대한 정보를 기준으로 보정하면서 적절한 값을 찾는 방법을 택하였다. 설정된 파라미터들은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

시스템 노이즈(W_k)는 로봇을 구성하는 서보 시스템의 노이즈가 크지 않아 $W_k^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 로 설정하였다. 측정 값 노이즈(C_k)는 카메라 픽셀(pixel)당 0.25mm의 분해능을 감안하여

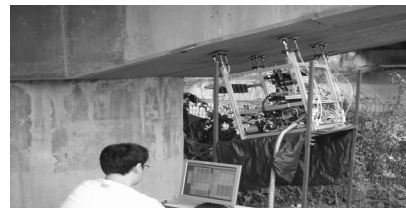
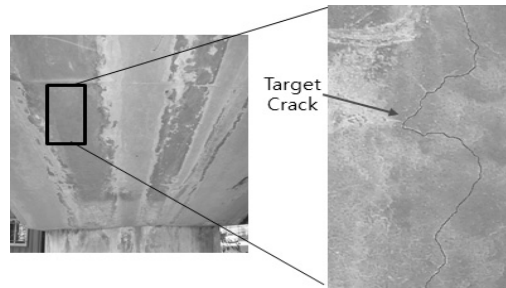
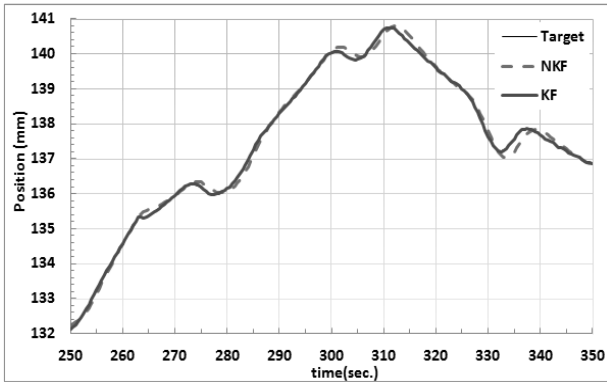


Fig. 13. Field Test Environment

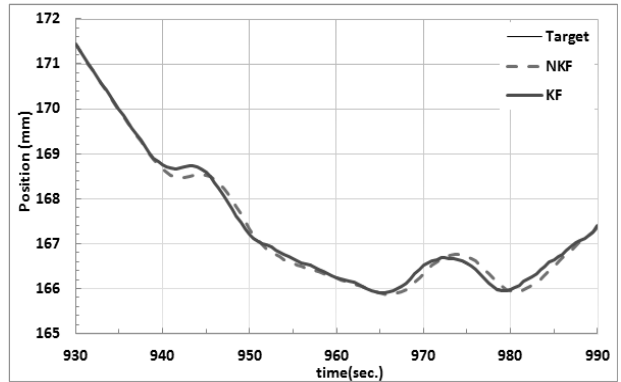
$C_k^T = [1.25 \ 0]$ 로 설정하였다.

Figs. 14 and 15는 로봇의 균열 궤적 추적 결과를 보여준다. 대상 균열의 실링 작업에 소요된 시간은 총 1000초이며 그 중, 균열의 방향 벡터(c_s)의 변화가 급격하게 발생하는 지점의 궤적 오차 및 추적 각도를 표시하였다. 본 논문의 균열 궤적 추적 기법이 적용된 결과를 KF로 표시하고, 적용하지 않은 결과를 NKF로 표시한다.

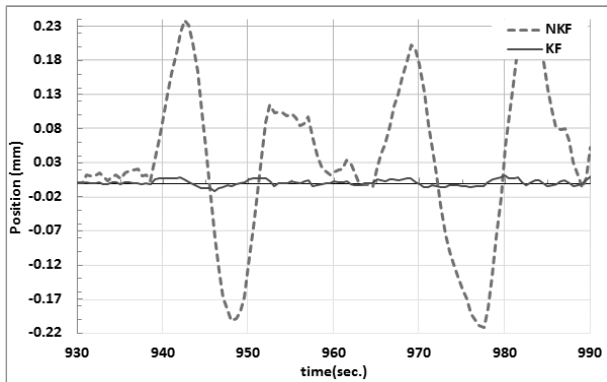
Fig. 14(a)는 실링 작업 중 250~350초에 해당하는 부분으로 대상 균열에 대한 NKF와 KF의 궤적을 보여주며, 궤적 오차는 Fig. 14(b)에 나타내었다. c_s 가 급격하게 변하는 구간인 280초에서 NKF는 약 0.2mm 오차를 보이고, KF는 약 0.01mm 오차를 보인다. 315초에서 NKF는 약 0.24mm의 오차를 보이고, KF는 약 0.02mm의 오차를 보인다. 이 때의 추적 각도의 오차는 Fig. 14(c)에 표시되어 있다.



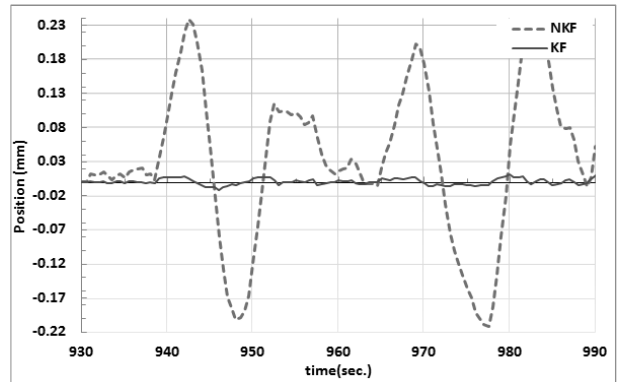
(a) Crack Trajectory and Tracking (250-350sec.)



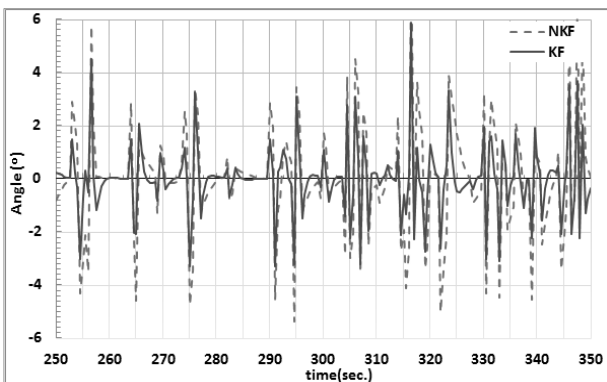
(a) Crack Trajectory and Tracking (930-990sec.)



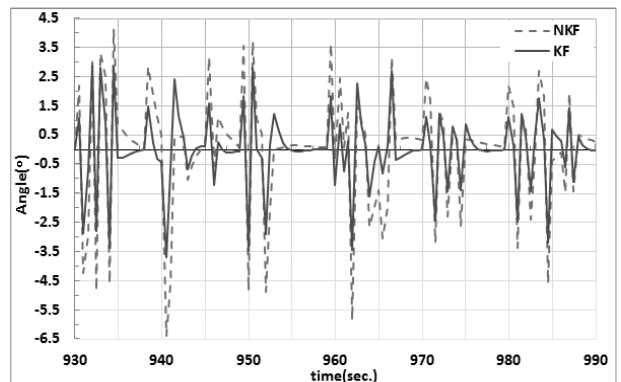
(b) Trajectory Position Errors (250-350sec.)



(b) Trajectory Position Errors (930-990sec.)



(c) Crack Angle Errors (250-350sec.)



(c) Crack Angle Errors (930-990sec.)

Fig. 14. Result 1 of Crack Tracking

Fig. 15. Result 2 of Crack Tracking

Figs. 15(a) and 15(b)는 930~990초에 해당하는 부분으로, 942초에서 NKF는 약 0.24mm의 오차를 보이고, KF는 약 0.01mm의 오차를 보인다. 978초에서 NKF는 약 0.21mm의 오차를 보이고, KF는 약 0.03mm의 오차를 보인다. 이 때의 추적 각도 오차는 Fig. 15(c)에 표시하였다.

Figs. 14(c) and 15(c)에 의하면 KF가 NKF보다 추적각도의 오차가 작은 값을 가진다. 추적각도(θ_k)는 로봇의 다음 시점에서의 진행 방향을 예측하기 위한 중요한 척도이며, 칼만필터에서는 예측 값과 추정값의 계산에 직접적인 영향을 미친다. KF는 로봇이 이동할 다음 시점의 방향을 미리 예측하고 현재 시점의 방향과의 관계를 가중치(K_k)를 이용하여 적절히 조정하였기 때문에 추적각도 오차가 NKF보다 작게 나타난다. 추적각도 오차가 작아짐에 따라 로봇의 이동이 유연해지면서 궤적의 오차도 작아지게 된다.

4.3 임피던스 힘 제어

로봇의 힘 제어를 위한 제어기는 Eq. (12)와 동일한 특성을 갖는 PI 제어기로 대체하여 사용하였다. Eq. (14)는 Eq. (13)의 뒤집비 $\alpha \cong 0$ 으로 설정하여 구성한 PI제어기이다.

$$K_p + \frac{K_i}{s} \tag{14}$$



Fig. 16. Lab Test

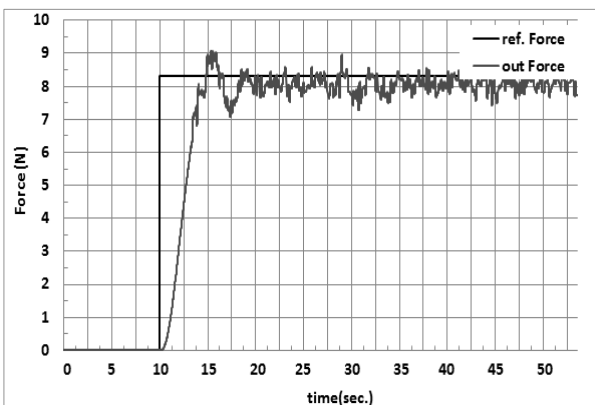


Fig. 17. Result of Lab Test

Eq. (14)에서 K_p 와 K_i 는 설계자에 의해 조정 가능한 이득으로, 콘크리트 표면 강성(K_{zc})에 따른 로봇의 반응 동작에 알맞게 조절을 하게 된다.

본 논문에서 실행하는 Lab Test와 Field Test에서는 $K_p = 20$, $K_i = 10$ 로 설정하였다. Fig. 16은 임피던스 힘 제어를 적용한 Lab Test상의 실링 모습이다.

Fig. 17은 로봇이 콘크리트 표면과 유지해야 할 힘 $f_d = 8.3N$ 일 때, Lab Test의 결과 데이터를 실시간으로 측정한 그래프이다. Fig. 17에 따르면, 13~17초 사이의 과도응답 부분이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 시점에 실링건의 말단이 콘크리트 표면과 맞닿는 순간으로 콘크리트 표면 강성의 정확한 값을 알 수 없기 때문에 발생한다. 측정된 과도 응답 부분은 최대 약 $\Delta f = 1N$ 정도의 크기를 보이며, 20초 후의 정상 상태에서는 초기 과도 응답 부분이 상쇄하여 $\Delta f = 0.2N$ 정도의 오차 범위를 보인다.

Fig. 18은 임피던스 힘 제어를 적용한 Field Test상의 실링 작업 모습이다.

로봇의 z축은 콘크리트 표면에서 일정한 거리로 이동을 한 후

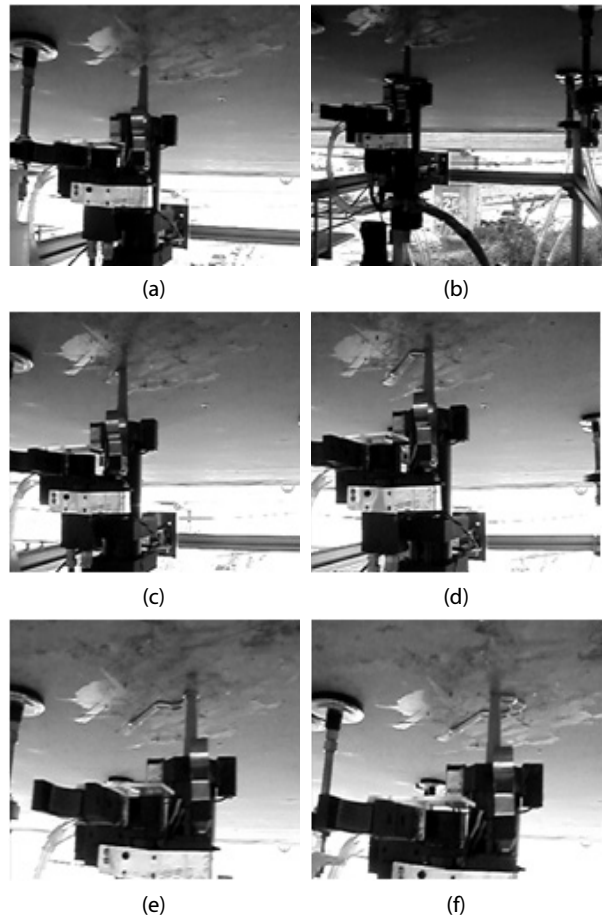


Fig. 18. Field Test

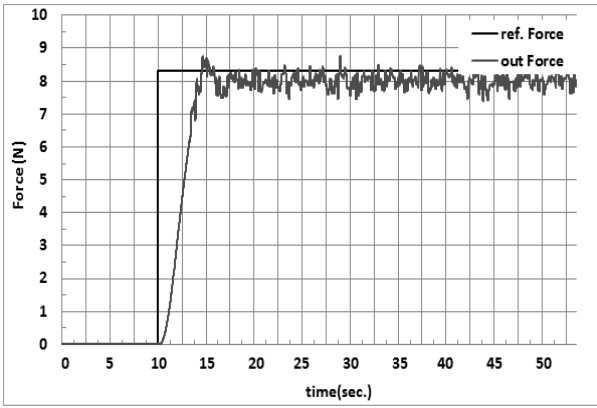


Fig. 19. Result of Field Test

(Fig. 18(a)), 콘크리트 표면과 접촉하여 약 8.3N의 힘을 유지하게 된다(Fig. 18(b)). 그러면, 로봇은 실란트를 공기압으로 토출하며 (Fig. 18(c)), 균열의 궤적을 따라 이동하게 된다(Figs. 18(d)-(f)).

Fig. 19는 로봇이 콘크리트 표면과 유지해야 할 힘 $f_d = 8.3N$ 일 때, Field Test의 결과 데이터를 실시간으로 측정된 그래프이다. 10~20초 사이에 발생한 과도응답의 크기가 최대 약 $\Delta f = 0.4N$ 정도이고, 정상상태에 도달하는 시간이 약 16초로 나타난다. 정상 상태 오차는 약 $\Delta f = 0.2N$ 정도의 범위를 보인다.

5. 결론

균열 궤적 추적 시험 결과, 궤적을 추적하는 로봇의 위치 오차는 최대 0.03mm의 범위 이내에서 동작하였다. 이는 균열의 폭이 0.2mm 이하이고 로봇 추적 오차가 최대 0.03mm 이하인 점을 감안하면 도포되는 실란트 폭의 10mm인 실링 작업을 수행하는데 충분한 정확성을 가지는 것으로 보인다.

임피던스 힘 제어의 결과, K_p 와 K_i 값을 동일하게 설정하였음에도 불구하고, Field Test에서의 결과가 Lab Test에서의 결과와 과도응답과 정착 시간의 차이를 보인다. 이는 Lab Test에서의 콘크리트 표면 강성과 Field Test에서의 콘크리트 표면 강성의 차이 때문으로 짐작되며 두 경우 모두 0.2N이하의 오차내로 동작한다.

결과적으로, 균열의 추적 오차는 최대 0.03mm 이하이고 힘 제어 오차는 0.2N이내이기 때문에 본 논문이 제시하는 균열 추적 기법과 임피던스 힘 제어 기법을 이용하여 현장 적용이 가능할 것으로 판단된다.

기호

A : 로봇 운동방정식 행렬, $(n \times n)$ 행렬
 C_k : 카메라에서 측정된 잡음, $(m \times 1)$ 벡터

H : X_k 와 Z_k 의 관계를 나타내는 행렬, $(m \times n)$ 행렬
 K_i : 제어기의 I 게인
 K_k : 예측값 보상 가중치
 K_p : 제어기의 P 게인
 K_{ze} : 콘크리트 표면의 강성
 K_{ze}^{-1} : 임피던스
 Q : W_k 의 공분산 행렬, $(n \times n)$ 대각 행렬
 R : C_k 의 공분산 행렬, $(m \times m)$ 대각 행렬
 T : 앞섬/뒤짐 보상기 시정수
 T_s : 로봇 샘플링 타임
 W_k : 로봇 위치제어기 잡음, $(n \times 1)$ 벡터
 X_k : 로봇의 위치, 각도를 포함한 상태변수, $(n \times 1)$ 벡터
 \hat{X}_k : 상태변수 추정값
 \hat{X}_k^- : 상태변수 예측값
 Z_k : 센서 정보(위치, 각도)
 c_s : 균열 방향 벡터
 Δf : 힘의 오차
 Δx : 위치값의 오차
 f_c : 접촉 힘
 f_d : 일정하게 유지하고 싶은 힘
 k_c : 앞섬/뒤짐 보상기 이득
 p_k : 로봇의 현재 위치(x, y 축 위치), $p_k = \sqrt{Rx_k^2 + Ry_k^2}$
 \dot{p}_k : p_k 의 변화량
 r_d : 로봇 방향 벡터
 w_d : 가상 윈도우 벡터
 x_d : 로봇의 현재 위치(z 축)
 \tilde{x}_d : 로봇의 위치지령
 α : 앞섬/뒤짐비
 Γ_k : 오차 공분산
 Γ_k^- : 오차 공분산의 예측값
 θ_k : c_s 와 r_d 사이의 현재 각도
 $\dot{\theta}_k$: θ_k 의 변화량

References

- Cho, C. J. (2010). *Development of bridge repairing robot by using vision tracking technology*, Master Dissertation, Korea Polytechnic University (in Korean).
- Feng, X., Bennett, D. and Velinsky, S. A. (2002). *Vehicle integration and testing of the operator controlled crack sealing*, AHMCT Reserch Report, UCD-ARR-02-06-30-06, Advanced Highway Maintenance and Construction Technology Research Center, University of California at Davis, California.
- Haas, C., Hendrickson, C., McNeil, S. and Bullock, D. (1992). "A

- field prototype of a robotic pavement crack sealing system.” *Proc. of 9th Int. Symp. Automation and Robotics in const.*, ISARC, Tokyo, Japan, pp. 313-322.
- Jeon, P. W., Cho, H. T. and Jung, S. (2003). “Experimental studies of force control for crack sealing robot.” *Proc. of Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, ICCAS2003, Gyeongju, Korea, pp. 1077-1081.
- Jung, S. (2000). “New robot force control technique for deburring and polishing process.” *J. of Control Automation and Systems Engineers*, Vol. 6, No. 9, pp. 786-795 (in Korean).
- Kim, Y. S. (1998). “Development and application of an automatic crack and joint sealing system.” *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 2, No. 4, pp. 407-417.
- Lim, K. Y. (2009). *Suction system of mechanism, and method thereof*, patent, No. 0891277 (in Korean).
- Lim, K. Y., Lee, W. W., Kim, K. T. and Cho, C. J. (2008). “A Concrete repair robot under the upper plate of bridge.” *Proc. of Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, ICASS, Coex, Seoul, pp. 488-491.
- Yoo, H. S. and Kim, Y. S. (2012). “Development of an optimal trajectory planning algorithm for an automated pavement crack sealer.” *J. of Const. Engrg. and Project Management*, KICEM, Vol. 2, No. 1, pp. 35-44.
- Yoo, H. S., Lee, J. H., Kim, Y. S. and Kim, J. R. (2004). “The development of a machine vision algorithm for automation of pavement crack sealing.” *J. of Const. Engrg. and Management*, KICEM, Vol. 5, No. 2, pp. 90-104.