

아황산나트륨을 이용한 스프링클러 동배관 공식 부식 방지

서상희^{1,†} · 서영준¹ · 권혁상²

¹한국과학기술연구원 전자재료연구단, 서울시 성북구 화랑로 14길 5, 02792

²한국과학기술원 신소재공학과, 대전시 유성구 대학로 291, 34141

(2017년 9월 22일 접수, 2017년 10월 11일 수정, 2017년 10월 20일 채택)

Inhibition of Pitting Corrosion of Copper Tubes in Wet Sprinkler Systems by Sodium Sulfite

Sang Hee Suh^{1,†}, Youngjoon Suh¹, and HyukSang Kwon²

¹Center for Electronic Materials, Korea Institute of Science and Technology, 5 Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Republic of Korea

²Dept. of Materials Science & Eng., KAIST, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea

(Received September 22, 2017; Revised October 11, 2017; Accepted October 20, 2017)

Inhibition of pitting corrosion of the copper sprinkler tubes by removing dissolved oxygen in water with sodium sulfite was studied on the wet sprinkler systems operated in 258 household sites. First, air in the sprinkler tubing was removed by vacuum pumping. The tube was then filled with sodium sulfite dissolved in water. Sodium sulfite was very effective in maintaining a very low dissolved oxygen concentration in water in the sprinkler tube for the observation period of six months. Water leakage from the copper sprinkler tube was reduced significantly by using sodium sulfite. Both pitting corrosion process and pitting corrosion inhibition mechanism were investigated by examining microscopical and structural aspects of corrosion pits formed in failed copper sprinkler tube. Pitting corrosion was caused by pressurized air as well as sediments such as sand particles in copper tubes through oxygen concentration cells. It was confirmed microscopically that growth of corrosion pits was stopped by reducing dissolved oxygen concentration to a very level by using sodium sulfite.

Keywords : pitting corrosion, copper sprinkler tube, sodium sulfite, corrosion inhibition, SEM

1. 서 론

우리 나라의 상당 수 아파트는 스프링클러 동배관의 공식 부식에 의해 생긴 핀홀(pin hole)에 의해 누수 피해를 겪고 있다. 수도관으로 사용되는 동배관의 공식 부식 원인에 대해서 미국, 영국 등에서 많은 연구를 하였으며 물의 화학성분으로는 높은 산성도(pH), 높은 자유 염소량(free chlorine)과 낮은 알칼리도(alkalinity)의 조합이 동배관의 공식 부식을 일으키는 원인으로 확인되고 있다 [1-4]. 물의 화학성분 외에 동배관 상부에 공기 층이 존재하거나 또는 동배관 내에 물을 일시적으로 정지 상태로 방치하면 공식 부식이 발생한다고 알려져 있다 [5,6]. 또한 영국과 유럽은 탄소막

을 공식 부식의 원인으로 지목하여 동관 내에 탄소막이 형성되지 않도록 하는 것을 규격화하고 있다 [7].

전 세계적으로 스프링클러 동배관의 공식 발생 원인에 대한 연구는 거의 없으며 한국에서는 최근에 빈번히 발생한 스프링클러 동배관의 누수가 계기가 되어 3, 4 개의 연구그룹에서 관련 연구를 수행한 바 있다. 이재봉 등 [8]은 동배관 내에 남아 있는 탄소막이 공식을 발생시키는 주 원인이라고 주장하고, 서상희 등 [9]은 스프링클러 동배관 상부에 남아 있는 가압 공기층이 산소농도차전지 현상을 일으켜 공식 부식이 발생한다고 주장하고 있다. 김정구 [10]는 서상희 등 [9]와 유사한 결론을 얻었으며 배관내의 침전물과 가압 공기에 의한 산소농도차로 부식이 발생한다고 주장하고 있다.

각 연구그룹들은 스프링클러 동배관의 공식 부식을 방지

[†] Corresponding author: shsuh@kist.re.kr

하는 처방도 다르게 제안하고 있다. 이재봉 등 [8]은 동배관 표면에 탄소막이 형성되는 것을 방지하여야 하며, 스프링클러 설비의 운전 중에는 규산염이나 인산염 같은 부식억제제를 투입하여 산화피막의 건전성과 치밀성을 제고하여야 한다고 주장하고 있다. 이 방법은 부식 반응 중에 양극반응을 억제하는 방안이다. 한편, 서상희 등 [9]은 산소농도차 전지 현상을 일으키는 근본 원인인 배관 내 공기를 없앴과 동시에 용존산소 농도를 0.1 ppm 이하로 매우 낮은 값으로 유지하여 공식 부식을 멈추게 하는 방법을 제안하고 있다. 이것은 부식 반응 중에서 산소환원반응인 음극반응을 정지시켜 전체 부식 반응을 정지시키려는 시도이다. 한편, 김정구 [10]는 배관 내 이물질을 제거한 후 소방수에 BTA (Benzotriazole)을 첨가하는 방법, 침전물이 발생하지 않도록 소방수를 순환하는 방법, 물리적 탈기를 통해 매우 낮은 용존산소 농도를 유지하는 방법을 제안하고 있다.

본 연구에서 저자들은 국내에 설치된 스프링클러 동배관에 상당수의 공식이 이미 형성되어 있는 점을 고려하여 소화용수의 용존산소 농도를 0.01 ppm 이하로 낮추어 공식 부식의 생성은 물론 성장을 정지시켜 누수의 발생을 획기적으로 줄이는 방안을 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 공식 부식 억제 실험

스프링클러 동배관의 누수피해를 겪고 있는 입주한지 8년이 지난 총세대 수 870의 아파트를 선정하여 이 중에서 258세대 (2세대당 1개의 알람벨브, 알람벨브 개수: 129개)에 대해 저자의 특허 기술 [11] 또는 특허 출원 중인 기술 [12]을 적용하였으며, 이에 의해 누수 빈도가 줄어드는지를 확인하였다. 이 기술을 요약하면 ‘진공펌프를 이용하여 배관내의 공기를 잔류 소화용수와 함께 제거하고 배관내에 아황산나트륨(Na_2SO_3)을 용해시킨 물을 별도의 펌프를 이용하여 넣어준 후에 급수벨브를 열어 가압한다.’와 같다. 이 방법에 의해 배관 내에 용존산소가 거의 완벽하게 제거된 소화용수를 채워 넣을 수 있었다. 이 기술을 적용한 모든 세대의 알람벨브에서 1, 2 달 간격으로 최대 6 달간 소화용수를 7 ml 정도 빼내어 용존산소 농도를 측정하였다. 용존산소 농도의 측정에는 미국 OHAUS사의 Starter300D 모델을 사용하였으며 측정 정밀도는 0.01 ppm 이며 측정 전에 표준 용액을 이용하여 교정을 하였다.

기술을 적용한 아파트 중 1 세대에서 기술 적용 2 달 후에 누수가 발생하였으며 이 세대의 배관을 채취하여 공식 내부와 부근의 조직과 성분을 분석하였다. 또한 비교를 위하여 기술을 적용하지 않은 세대 중에서 누수가 발생한 1 세대의 배관을 채취하여 공식 내부 형상을 관찰하였다.

2.2 동배관의 분석

미국 FEI사의 Inspect F50 모델의 SEM을 이용하여 20 kV의 가속 전압으로 스프링클러 동배관의 내면과 공식의 외부 및 내부를 관찰하였으며 SEM에 부착된 EDS를 이용하여 각 부분의 성분도 함께 분석하였다.

2.3 동전위 분극시험

아황산나트륨 수용액 속에 담근 동관(1cm × 1cm)의 전기화학적 특성을 측정하기 위하여 동전위 분극시험을 실시하였다. 기준전극은 포화 칼로멜 전극(SCE), 상대전극으로는 백금을 사용하였고 시험 중에는 질소가스를 물 위로 불어 주어 수용액 위를 질소 분위기로 만들어 공기 중의 산소가 물에 녹아 들어가는 것을 방지하였다. 전위차계(Potentiostat)는 한국 WonATech사의 Smart Interface로 컴퓨터 제어되는 WPG100 모델을 사용하였다.

3. 결과 및 검토

3.1 용존산소 농도와 누수빈도

본 기술을 적용한 129개의 알람벨브 중에서 4 개의 알람벨브로부터 채취한 물 만이 0.01 ppm 이상의 용존산소 농도를 보이고 나머지는 모두 0.00 ppm을 가리키며 측정할 수 없을 정도로 낮았다. 이렇게 낮은 농도가 측정기간인 6개월간 지속되었다. 한편, Fig. 1과 같이 스프링클러 배관에서 채취한 시편 조각을 아황산나트륨 수용액과 함께 100 ml PVC 용기에 넣어 14 개월 째 실험을 진행하고 있으며 절단면과 배관 외부 표면에 부식이 전혀 일어나지 않고 초기의 광택을 유지하고 있다. 이것은 용존산소 농도가 0.01 ppm 보다 훨씬 낮은 값으로 유지되고 있는 것을 의미한다. 이 PVC 용기가 뚜껑 틈새를 통한 산소의 확산 유입을 완전히 차단할 수 없는 구조임을 감안하면 산소의 유입이 더 제한적인 스프링클러 배관에서는 최소한 2년 이상 장기간

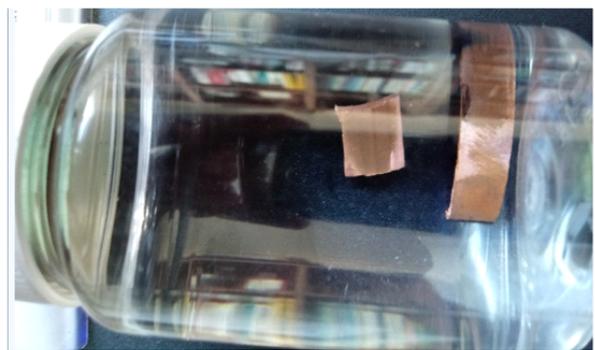


Fig. 1 Sprinkler tube specimens soaked in the sodium sulfite dissolved water for 14 months: the surface remains bright because almost no corrosion is occurring.

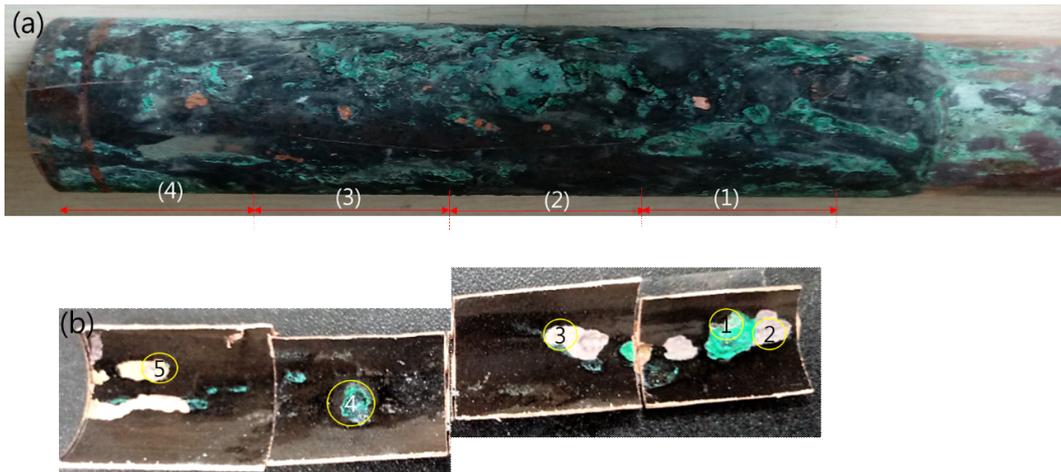


Fig. 2 (a) Outer and (b) inner bottom surfaces of an 8 years old copper sprinkler tube which was found leaking water through a pin hole two months after the water in the sprinkler tubing was replaced with the sodium sulfite dissolved water. From the widespread black corrosion product on the outer surface of the tube, it is assumed that a small pin hole leaking water already existed before the tubing was replaced with the sodium sulfite dissolved water.

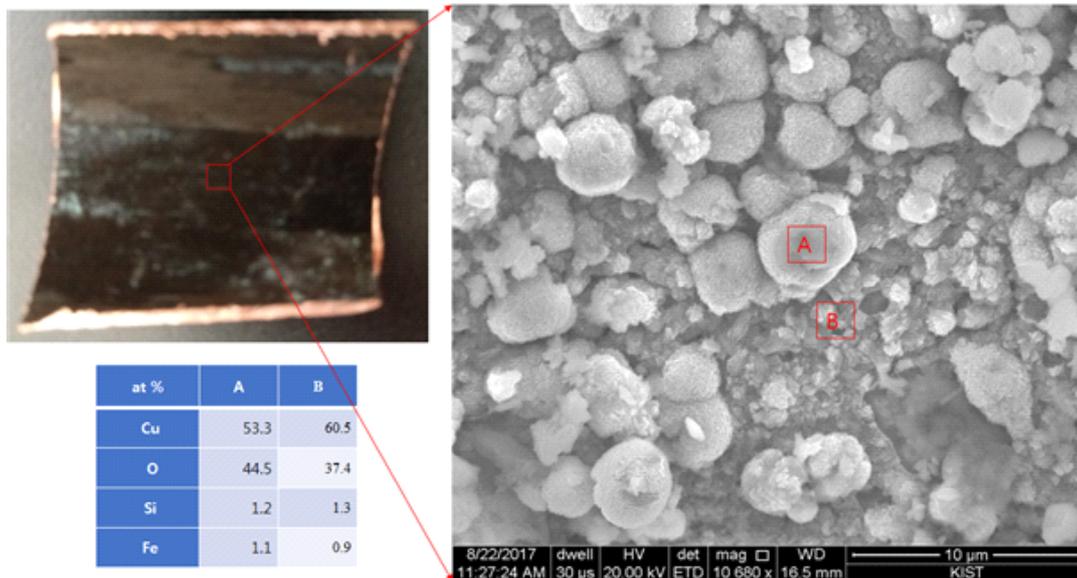


Fig. 3 An SEM image and EDS analysis results of a dark brown area of the sprinkler tube shown in Fig. 2 (b).

이러한 낮은 용존산소 농도 값이 유지될 것으로 예상된다.

4 달의 관찰 기간 동안에 기술을 적용한 258세대 중에서 1 개의 세대에서 기술 적용 후에 배관 누수가 발견되었으며, 기술을 적용하지 않은 612 세대에서 총 9 차례 누수가 발생하였다. 이러한 결과로부터 본 기술이 동 배관의 공식 부식을 방지하는데 상당히 유효한 것을 확인할 수 있었다.

3.2 핀홀 주위의 공식 모습과 공식 성장 메커니즘

Fig. 2는 기술을 적용하였으나 누수가 발생한 1 세대의 스프링클러 동배관의 겉모습과 공식이 분포한 내부의 모습

을 보여주고 있다. 이 동배관의 겉이 까만 녹으로 넓게 입혀진 것으로 보아 누수가 실제 시작된 후 상당 기간이 지나서야 발견된 것으로 보이며 기술 적용 이전에 이미 핀홀이 발생했을 가능성이 높다.

이 동배관의 상부를 절개한 모습에 의하면 공식 부식 생성물이 절단 과정에서 상당 부분 떨어져 나간 것을 볼 수 있다. 공식들은 배관 바닥의 짙은 고동색 밴드에 거의 일렬로 배열되어 있으며 스프링클러 설치 시에 발생한 이물질들이 이러한 밴드를 형성하며 배관 밑에 가라앉아 공식의 생성에 도움을 준 것으로 보인다.

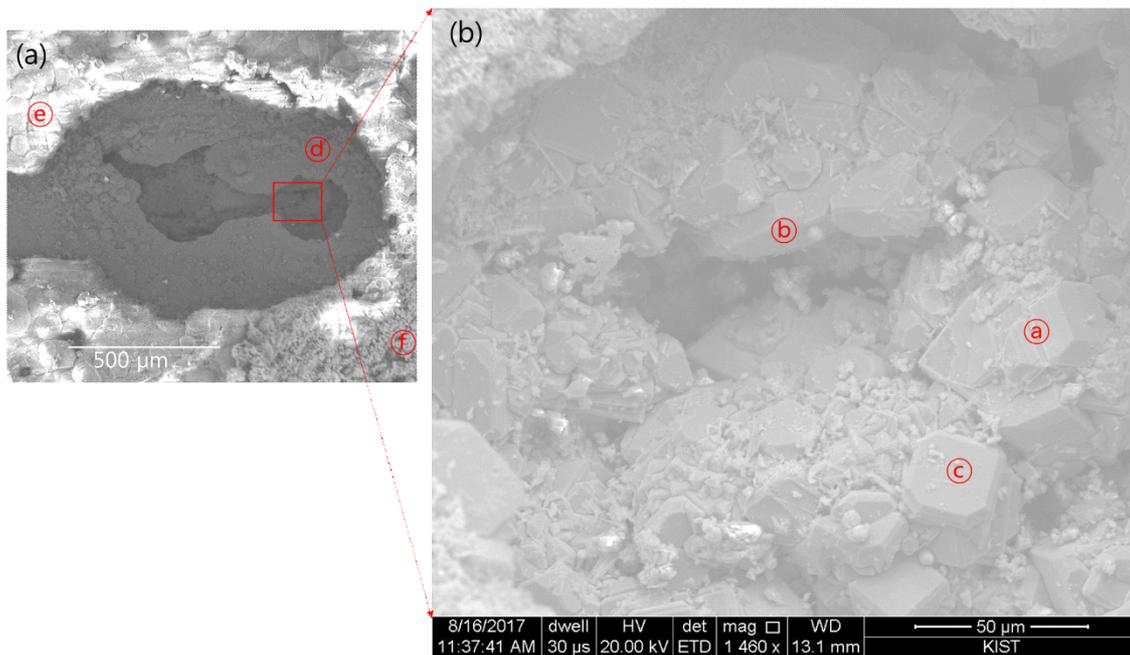


Fig. 4 (a) Low magnification and (b) high magnification SEM images of the corrosion pit ① observed in the sprinkler tube shown in Fig. 2(b). It is thought that water leakage occurred through the pin hole formed in the corrosion pit ①.

Table 1 EDS analysis results of the locations of the corrosion pit ① shown in Fig. 4

at%	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Cu	87.0	87.0	67.1	95.5	41.8	70.5
O	12.1	11.3	31.1	3.2	56.8	28.4
S	0.3	1.1	1.2	0.1	0.6	0.5
Fe	0.7	0.7	0.6	1.2	0.8	0.6

* Elemental atomic percents were rounded off to the first decimal place.

Fig. 3는 Fig. 2b의 짙은 고동색 밴드 부분의 SEM 이미지와 EDS 성분 분석결과를 보여준다. 공 모양의 A는 CuO와 가까운 성분으로 분석되었고, 바탕인 B 부위는 Cu₂O와 가까운 성분으로 분석되었다. SEM 이미지로 보아서 CuO가 Cu₂O보다 약간 많다고 판단된다. EDS 분석 결과에서 주목할 점은 Si이 1 at% 이상 검출된 것이며 아마도 스프링클러 설치 시에 모래가 미량 섞여 들어 간 때문으로 추정된다. 저자들은 누수가 발생한 다른 아파트의 스프링클러 배관 내면의 부식 생성물을 분석하여 보았으며 Si이 3 at% 이상 7 at%까지 검출되었다 [13]. 이 모래 성분(SiO₂)이 공식의 생성에 관여했을 가능성이 크며 이에 대해서는 이 절의 후반부에서 검토하기로 한다.

다음에 여러 개의 공식 중에서 핀홀로 발전한 것으로 생각되는 ①번 공식을 분석하였다. Fig. 4a와 4b는 누수가 발생한 것으로 추정되는 ①번 공식의 저배율과 고배율 SEM 이미지이며, Table 1은 이 공식의 각 부분에서 측정된 EDS

분석 결과를 보여준다. Fig. 4a의 동그란 구멍을 확대한 이미지인 Fig. 4b에서 보듯이 깊숙이 파인 구멍이 있으며 이런 핀홀을 통하여 누수가 발생한 것으로 보인다. Fig. 4b에서 결정립 (a), (b)는 Cu에 가깝게, 결정립 (c)는 Cu₂O에 가깝게 분석되었다. 결정립 (a), (b)와 그 주변의 Cu 입자들은 단결정 형태를 갖고 있으며 이것은 인접한 결정립(grain)들이 결정면(facet)을 유지하면서 녹아 나갔기 때문이다. 또한 Fig. 4b에서 Cu 결정립들이 분리되어 있는 것이 보이는데 이것은 Cu 입자의 입계(grain boundary)가 Cu 입자 자신보다 더 잘 녹아 나가기 때문이다. 이러한 과정을 통하여 Cu 입자들이 분리되고 핀홀이 생기는 것으로 보인다. 이 과정에서 구리가 녹아 형성된 구리 이온(Cu²⁺)은 인접한 위치에서 곧 바로 결정립 (c)와 같은 정육면체의 Cu₂O로 석출되게 된다. Fig. 4a의 (d)는 공식 부식이 진행됨에 따라 부식 생성물이 덮인 면적이 점차 커져서 생겨 나는 부위이며 (e)는 부식 생성물인 공작석(malachite)과 Cu₂O의 혼합물로 보이며

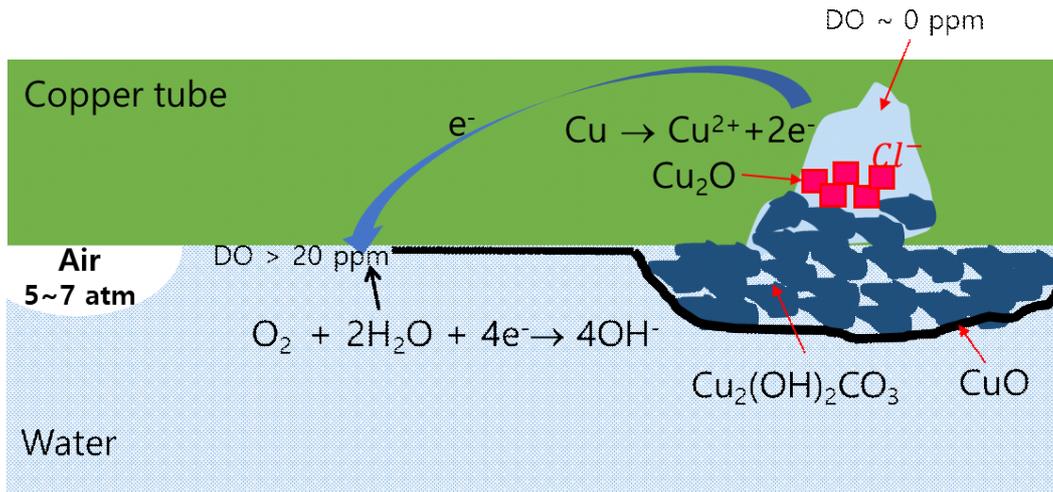
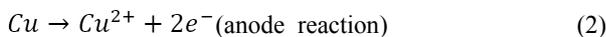
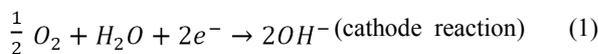


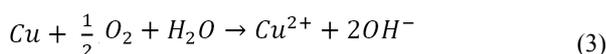
Fig. 5 Mechanism of pitting corrosion due to an oxygen concentration cell formed in the copper tube of the wet sprinkler system [9].

①는 주로 Cu_2O 이다.

동배관의 공식 생성 메커니즘에 대해서는 여러 다른 의견이 있으나 공식의 성장에 산소농도차전지 현상과 공식 내부 물의 산성화 및 배관 내부의 이물질이 중요한 역할을 한다는 것에 대부분의 연구자들이 동의한다 [3-6, 8-10]. 동배관의 공식 성장 메커니즘을 본 연구결과와 이미 알려진 이론들을 바탕으로 Fig. 5를 이용하여 좀 더 자세히 살펴보기로 한다. Fig. 2의 스프링클러 동배관 바닥에서 발견된 모래와 같은 이물질 밑에 일단 형성된 공식의 내부 공간 물은 공식 외부의 물과 잘 섞이지 못하기 때문에 낮은 용존산소 농도를 유지하게 된다. 한편 스프링클러 배관의 가압 공기층에 의해 공식 외부의 물은 높은 용존산소 농도를 유지하게 될 것이다. 이 상태에서는 산소농도가 높고 넓은 면적을 갖는 공식 외부의 동배관 내면이 음극으로 작용하여 산소환원반응 (equation (1))이 일어날 것이며, 용존산소 농도가 낮은 공식 내부의 Cu는 양극으로 작용하여 구리이온으로 녹게 될 것이다. (equation (2))



이 두 반응을 합친 전체 반응식은 equation (3)으로 주어진다.



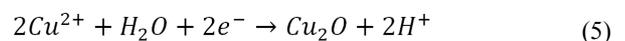
이 반응의 기전력은 equation (4)로 주어지며 여기서 P_{O_2}

는 음극 부위의 용존산소 농도와 평형을 이루는 산소 분압이다 [9,13]. 이 식에서 보듯이 이 기전력은 산소 분압이 높을수록, 산성도 pH가 낮을수록 높아진다.

$$\Delta E = 0.89 + 0.015 \log P_{O_2} - 0.059 pH - 0.029 \log ([Cu^{2+}]) \quad (4)$$

스프링클러 배관 내의 산소분압을 1 atm (공기 압력 5 atm), 소화용수 pH를 8로 가정하면, 음극 쪽에 위치한 물은 Fig. 6a의 Pourbaix 다이어그램에서 위쪽 흑색 점선상에 파란색 사각형으로 표시된다. 공식 내부의 농도를 10^{-4} 몰 농도를 가정하면 파란색 사각형과 초록색 수평선과의 전위 차이인 $\Delta E = 0.53 V(volt)$ 의 기전력이 계산되며 이것이 공식을 성장시키는 원동력이다. 이 기전력 ΔE 을 Fig. 6a에 파란색 화살표로 표시하였다.

양극반응에 의해 생성된 Cu^{2+} 이온은 H_2O 와 반응하여 Cu_2O 입자를 석출하게 된다 (equation (5)).



이 반응에서 생성된 H^+ 이온은 공식 내의 물을 산성화시켜 Cu의 Cu^{2+} 이온화를 더욱 촉진할 것이다. 또한 공식 내부에 축적된 Cu^{2+} 이온은 공식 외부에 있는 Cl^- 이온을 전기적 힘으로 끌어 들여 공식 내부의 구리가 녹는 것을 촉진할 수 있다. 공식 밖으로 빠져 나간 Cu^{2+} 이온의 일부는 equation (5)의 반응으로 Cu_2O 가 되거나 또는 OH^- 이온과 CO_3^{2-} 과 반응하여 $Cu_2(OH)_2CO_3$ (공작석) 층을 만들게 된다 (equation (6)). Fig. 2의 공식 ①과 ④에서 청녹색 공작석 층을 볼 수 있다.

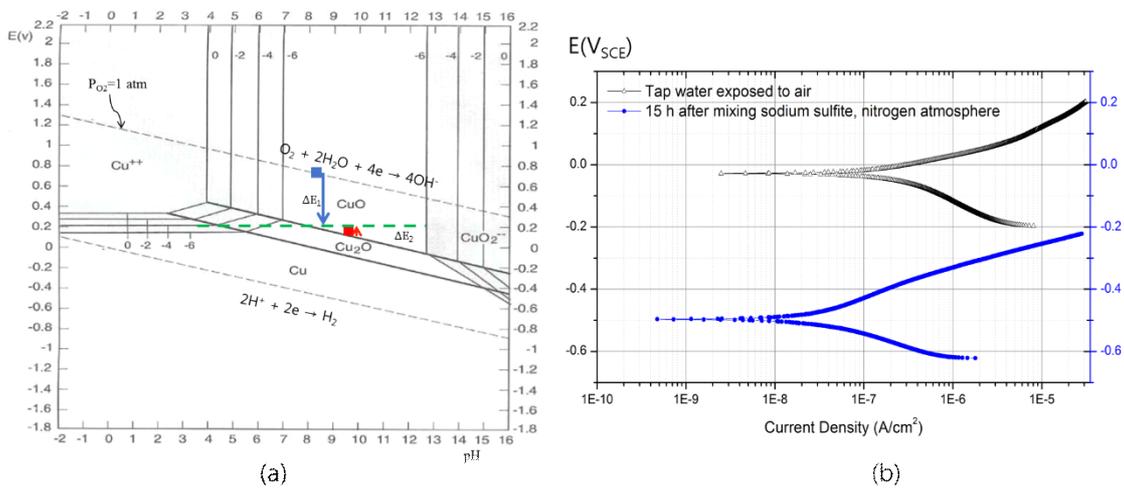


Fig. 6 (a) Pourbaix equilibrium diagram of copper-water [14]. The blue and red squares indicate the potential and pH of the water and the sodium sulfite dissolved water, respectively in the pressurized sprinkler copper tube. The dotted green line indicates the potential inside a corrosion pit when Cu^{2+} mole concentration is 10^{-4} . (b) Potentiodynamic polarization curves of a copper plate obtained with the tap water and the sodium sulfite dissolved water.

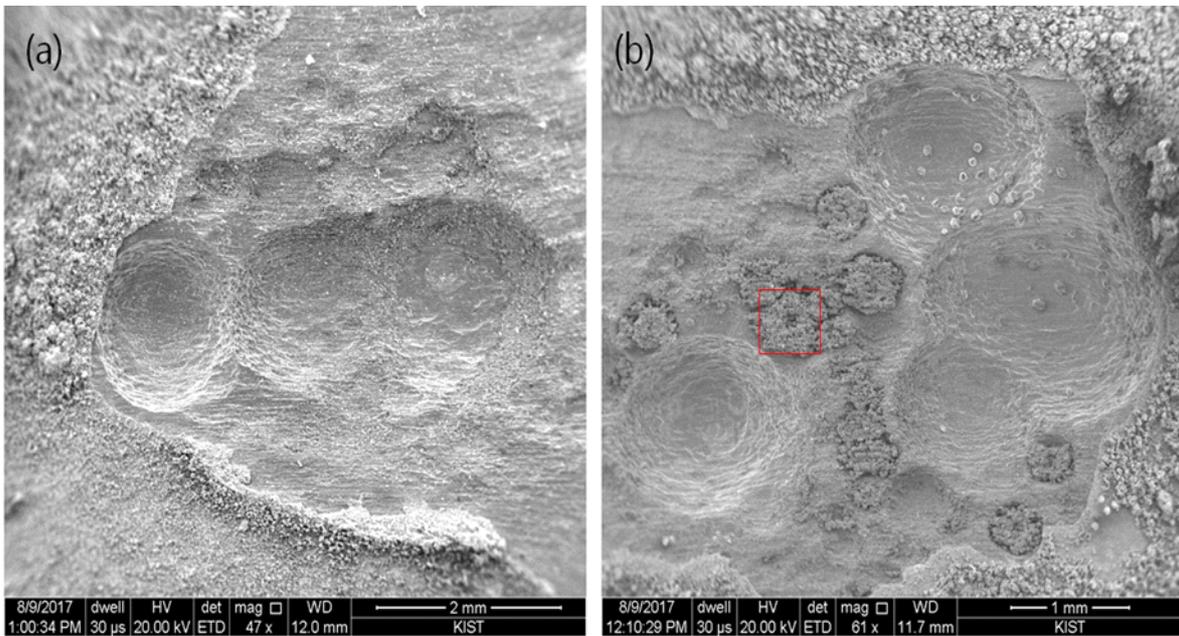
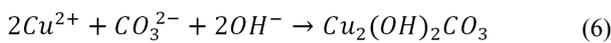


Fig. 7 (a) Magnified SEM image of the corrosion pit ② and (b) the similar image of the corrosion pit ⑤ in the sprinkler tube shown in Fig. 2.



Cu^{2+} 이온이 공식으로부터 빠져 나가면서 공작석 층이 성장하여 공식 외부의 산소가 내부로 확산해 들어 오는 것을 차단하여 내부의 낮은 산소농도 상태를 유지하게 된다. 공작석 층이 넓어짐에 따라 인접 부분도 새롭게 공작석 층으로 덮이게 되고 산소농도가 낮아져서 공식으로 발전된다. Fig.

7은 Fig. 2b의 공식 ②와 ⑤의 고배율 SEM 이미지로서 처음 형성된 공식은 성장하면서 서로 합체가 되어 반구 형태에서 벗어나 길쭉하게 되는 것을 볼 수 있다. 공식 내에서 구리가 계속 녹아나가 점점 깊숙이 파이게 되면 결국에는 편홀로 발전되게 된다. (Fig. 4)

3.3 용존산소 제거에 의한 공식 성장 정지 메커니즘

한번 생성된 공식의 성장을 멈추게 하는 방법들 중 하나는

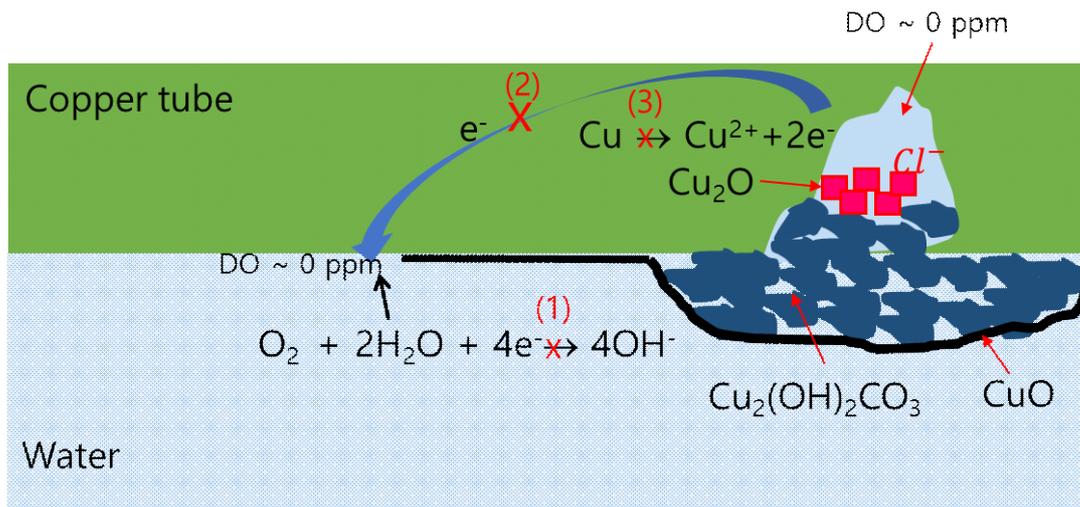


Fig. 8 Inhibition mechanism of pitting corrosion in the copper tube of the wet sprinkler system by removing dissolved oxygen in water.

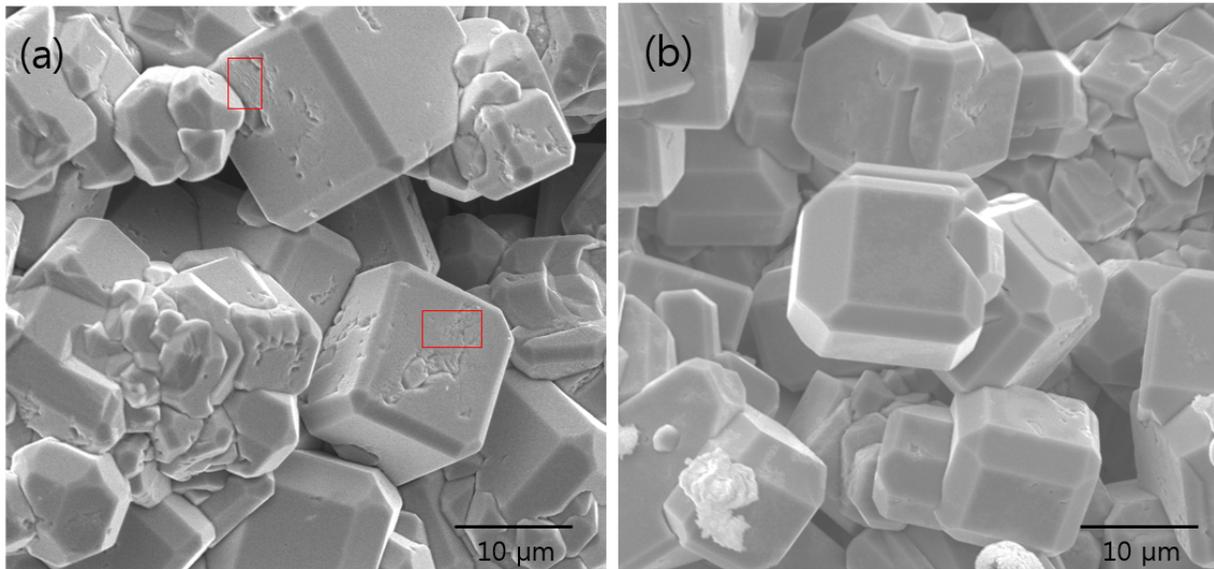


Fig. 9 (a) Magnified SEM image of Cu_2O particles in the open red square area of the corrosion pit ⑤ of the 8 years old copper sprinkler tube of Fig. 2 filled with the sodium sulfite dissolved water for two months for this test and (b) magnified SEM image of a corrosion pit observed in a failed 8 years old copper sprinkler tube which was not treated with the sodium sulfite dissolved water.

산소분압, 즉, 공식 외부의 용존산소 농도를 매우 낮은 값으로 만들고 pH를 높은 값으로 하여 equation (4)의 기전력을 음의 값을 갖게 하는 것이다. 한편, equation (3)의 전체 반응 속도는 산소분압의 제곱근에 비례하므로 용존산소 농도를 매우 낮은 값으로 유지하면 실질적으로 공식 부식 반응이 정지될 것이다. 즉, 용존산소 농도를 아주 낮은 값으로 유지할 수 있다면 열역학적으로나 반응속도론적으로 공식의 성장을 멈추게 할 수 있을 것이다. 이것을 Fig. 8을 이용하여 설명하면, (1) 음극반응인 산소환원반응이 실질적으로 정지되고, 이에 따라 (2) 전자의 이동이 없어지며, (3)

양극반응인 구리산화반응도 정지되는 것이다.

Fig. 6b는 구리 분극실험을 이용하여 아황산나트륨 수용액 (pH = 9.5)에서 용존산소 농도가 어느 정도까지 낮아지는지 확인한 결과로서 부식전위 E_{corr} 이 -0.5 V (volt)가 되는 것을 볼 수 있다. 이 값과 pH 값 9.5를 이용하여 아황산나트륨 수용액의 위치를 Fig. 6a의 Pourbaix 다이어그램에 표시하면 CuO 와 Cu_2O 의 경계영역 부근이 되며 $\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}=10^{-4}$ 몰농도 경계선 이하에 위치한다. 즉, Pourbaix 다이어그램에서 빨간 화살표로 표시한 기전력은 영이거나 부의 값을 갖게 되어 공식 부식 반응이 열역학적으로 불가능

하게 되며 반응속도론적으로도 공식 부식이 멈추게 된다. Fig. 9a는 아직 핀홀로 발전되지 않은 공식 ⑤의 SEM 이미지이며 (Fig. 7b의 빨간 색 사각형 부분) 기술을 적용하지 않은 세대의 누수배관에서 관찰되는 공식 내부의 Cu_2O 입자의 이미지 (Fig. 9b)와 비교하여 보여준다. Fig. 9a의 빨간 색 사각형 안에 정육면체의 Cu_2O 입자의 표면이 살짝 엮은 것을 볼 수 있다. (Fig. 9a, b의 깊게 파인 골은 Cu_2O 입자가 성장될 때 생긴 결합으로 보인다.) 이것은 Cu_2O 입자면에 equation (5)에 의해 Cu_2O 분자가 달라 붙으면서 Cu_2O 입자를 성장시키는 것이 아니고 Cu_2O 입자면으로부터 Cu_2O 가 일시적으로 조금 녹아 나갔다는 것을 의미한다. 즉, equation (5)의 역반응이 일어난 것으로 보인다. 이것은 낮은 용존산소 농도로 인하여 음극의 산소환원 반응이 정지되어 공식 내부에서 양극반응이 정지되고 공식 부식이 정지되는 또 다른 증거이다.

4. 결론

- (1) 소화배관 내의 공기를 제거한 후에 아황산나트륨으로 용존산소를 제거한 물을 충수하는 기술은 스프링클러 동배관의 공식부식의 성장을 정지시켜 누수를 방지하는 매우 유효한 기술임을 확인하였다.
- (2) 아황산나트륨 수용액에 의한 동배관 공식부식의 방지는 용존산소 농도를 매우 낮은 값으로 유지하여 공식부식 반응을 열역학적으로 또는 반응속도적으로 멈추게 함으로서 이루어진다.
- (3) 이 기술로 동배관 내의 용존산소 농도가 측정할 수 없을 정도로 매우 낮은 값으로 6개월 이상 유지됨을 확인하였으며, 최소 2년 이상 낮은 용존산소농도가 유지될 것으로 예상된다.
- (4) 스프링클러 동배관의 공식 부식의 성장은 배관 내에 가압된 공기층과 스프링클러 설치 시에 발생한 모래와 같은 이물질에 의해 만들어지는 산소농도차전지 현상으로 인해 일어난다.
- (5) 스프링클러 동배관의 핀홀 형성은 반구형 공식의 생성, 인접한 공식들의 합체와 성장, 공식 내 Cu 입자들의 용해와 분리에 의해 깊숙한 구멍으로 발전의 여러 단계를 거쳐 일어난다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원의 기관고유사업(2E27120)으로 지원되었으며 이에 감사를 드립니다.

References

1. D. A. Lytle and M. R. Schock, *J. Am. Water Works Ass.*, **100**, 115 (2008).
2. H. Cong, H.T. Michels, and J. R. Scully, *J. Electrochem. Soc.*, **156**, C16-C27 (2009).
3. E. Sarver, K. Dodson, P. Scardina, R. Lattyak-Slabough, M. Edwards, and C. Nguyen, *J. Am. Water Works Ass.*, **103**, 86 (2011).
4. E. Sarver and M. Edwards, *Int. J. Corros.*, **2012**, Article ID 857823 (2012).
5. M. Edwards, J. F. Ferguson, and S. Reiber, *J. Am. Water Works Ass.*, **86**, 74 (1994).
6. This Old House, How to stop copper pipe corrosion, <https://www.thisoldhouse.com/how-to/how-to-stop-copper-pipe-corrosion>.
7. BS EN 1057:1996, Copper and copper alloys- Seamless, round copper tubes for water and gas in sanitary and heating applications (1996).
8. J-B. Lee and H. Jung, *Corros. Sci. Tech.*, **13**, 6 (2014).
9. S. H. Suh, Y. Suh, H. G. Yoon, J. H. Oh, Y. Kim, K. Jung, and H. Kwon, *Eng. Fail. Anal.*, **64**, 111 (2016).
10. J-G. Kim, Research report: Study on the cause of copper tube corrosion, the Korean Institute of Surface Engineering (2016).
11. S. H. Suh and H. Kwon, Wet type sprinkler system for preventing corrosion of metallic water supply tubes, Korea Patent No. 10-1630742 (2016) and 10-1734897 (2017).
12. S. H. Suh, Apparatus and methods for drain, vent and water filling for wet type sprinkler systems, Korea Patent pending No. 10-2017-0032686 and 10-2017-0093215 (2017).
13. S. H. Suh, S. Kim, and Y. Suh, *Corros. Sci. Tech.*, **16**, 247 (2017).
14. M. Pourbaix, *Atlas of Electrochemical Equilibria in Dissolved waters*, Pergamon Press, Houston (1974).