Frequency Driver를 이용한 냉온수관의 스케일 방지억제효과 The Effects of Scale Growth Inhibition on Water Pipe using Frequency Driver

장미정 · 성일화^{*,†}
Mi-Jeong Jang · Il-Wha Sung^{*,†}

서울시립대학교 환경공학부 · *가천의과대학교 보건환경시스템학과

Department of Environmental Engineering, University of Seoul

*Department of Sanitary & Environmental System Engineering, Gachon University of Medicine and Science

(2010년 11월 17일 접수, 2011년 4월 27일 채택)

Abstract : Scale induced by hardness materials in water must be controlled because of it can be result in remarkable damages of pipeline as well as water quality deterioration. Especially hot water system is one of scale management required facility as scale formation can be accelerated by temperature. The scale control performance of frequency driver (FD) was tested instead of existing methods such as chemical, physical and electromagnetic methods which needs chemicals and electric power. Three kinds of pipe coupons were submerged in test water with 500 mg/L of hardness for 33 days and XRD and SEM were analysed for comparing scale formation characteristics of these coupons. Calcite (CaCO_3) which came from hardness of water was formed on only cast iron pipe coupon and this coupon showed higher corrosion rate than copper and stainless steel pipe coupon. Hot water circulating system connected cast iron pipe with and without FD was operated with 300 mg/L of hardness water at 50°C for monitoring of scale formation and water quality with and without FD. XRD showed that FD led to magnetite (Fe_3O_4) scale which is good scale for preventing corrosion than calcite and SEM image also indicated the scale control effect of FD. Scales of 16% on pipe joint, 14% on pipe length, and 42% on heat exchanger decreased with FD comparing scales of those parts without FD. From the results of water quality, FD reduced crystallization of hardness material without chemical reaction in water and it can indicate that FD is safe and proenvironmental technology for scale reduction.

Key Words : Frequency Driver (FD), Hardness, Pipe, Scale, XRD, SEM

요약 : 수중 경도물질에 의해 유발된 스케일은 수질 저해는 물론 배관의 기능에 막대한 손실을 초래할 수 있어 관리가 필요하다. 특히 온수시스템의 경우, 온도에 의해 스케일화작용이 가속화되므로 관리가 필요한 시설 중 하나이다. 현재까지는 화학약품이나 에너지가 소모되는 화학적, 물리적, 전자기적 방법과는 다른 무전원방식의 Frequency Driver (FD)를 이용하여 스케일 생성 방지 효과를 확인하고자 하였다. 500 mg/L의 경수에 33일간 3종류의 관 시편을 침지시켜 관 재질별 스케일 형성도를 비교하기 위해 XRD와 SEM을 이용하여 표면을 분석하였다. 주철관에서는 경도에서 유발된 스케일인 calcite (CaCO_3)가 형성되었고, 구리나 스테인리스관에 비해 부식율이 높았다. 온수순환장치를 제작하여 경도 300 mg/L로 50°C의 조건에서 FD 설치 유무에 따른 주철관의 스케일 형성도와 수질 변화를 비교하였다. XRD 결과에서 FD를 설치하였을 경우 calcite의 생성은 비교적 적은 반면, 좋은 부식생성물인 magnetite (Fe_3O_4)의 생성을 확인할 수 있었으며, SEM 사진에서도 FD의 스케일 저감 효과를 확인할 수 있었다. 관 내부의 스케일 양의 경우, FD를 설치하지 않은 경우에 비해 FD를 설치하였을 경우 관 연결부분에서는 16%, 관 전체길이에서는 14%, 열교환기에서는 42%의 적은 스케일이 형성되어 FD의 스케일 저감효과를 확인할 수 있었다. 또한 FD 설치 유무에 따른 수질분석 결과를 토대로 FD가 수질의 화학적 변화 없이 경도물질의 결정화를 방지하는 것으로 나타나 환경적으로도 안전함을 확인하였다.

주제어 : Frequency Driver (FD), 경도, 관, 스케일, XRD, SEM

1. 서론

냉·온수관의 스케일은 수질 저해는 물론 관경 축소와 관 내부 압력 증가로 인한 관 파손 등을 유발하여 원활한 용수 공급을 어렵게 할 수 있다.

스케일(scale)은 물속에 녹아있는 광물질 금속 이온 등의 화학적 결합물이 침전하여 배관이나 장비의 벽에 부착된 것으로 불순물 중 경도성분으로 알려진 Ca^{2+} , Mg^{2+} 등이 주원인이 된다. 대표적인 스케일인 탄산칼슘(CaCO_3)의 경우, 물속의 일시경도 성분 즉 탄산수소칼슘($\text{Ca(HCO}_3)_2$)이 온도가 올라가면서 탄산가스를 방출하고 탄산칼슘으로 변할 때

용해도가 떨어져서 스케일로 변하는 것으로($\text{Ca(HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) 백색의 스케일을 만들어낸다.

이와 같은 스케일화는 온도가 높으면 화학반응이 가속화되므로, 냉수관보다 온수관에서 스케일 문제가 발생할 가능성이 높으며, 수 중 Ca^{2+} 와 CO_3^{2-} 농도가 높으면 스케일 형성이 촉진된다. 열교환시스템에서의 스케일발생은 매체 표면에 고체막을 형성하여 보일러나 온수관에서 열전달을 감소로 열효율이 저하되고 에너지 소비를 증가시키는 원인이 될 수 있다. 또한 이런 현상이 지속될 경우 가열면의 온도 증가로 고온부식이 유발될 수 있으며, 보일러내 온도 상승을 유도하여 과열로 인한 폭발 등의 사고의 위험을 초래할

[†] Corresponding author E-mail: iwsung@gachon.ac.kr Tel: 032-820-4262 Fax: 032-820-4261

수 있다.¹⁾ 뿐만 아니라 배관의 단면적 축소 및 마찰손실 증가로 물 공급을 위한 요구동력이 증가되고, 각종 밸브 및 자동제어기기 등의 작동 불량에 지속되어 막대한 경제적 손실이 유발될 수 있다.²⁾

수중 경도물질 제거를 위한 연수화, 인산염 주입 등³⁾의 수질제어의 한계를 감안할 때, 스케일 형성의 가장 직접적인 해결방안은 문제가 되는 배관 또는 설비의 주기적인 교체이나, 대부분의 배관과 설비가 건물 내부나 지중에 설치되어 있어 교체가 어렵고, 내구성에 문제가 없는 배관을 교체하는 것 또한 환경·비용면에서 합리적이지 않다. 이를 위해서 현재까지 개발된 스케일 제거 공법으로는 강산이나 소독제 등 약품을 이용하는 화학적 처리와 air sanding이나 poly pig 등으로 연마하여 직접 스케일을 떼어내는 물리적인 방법, 그리고 배관과 수체의 전기적 또는 자기장적인 작용을 유도하여 스케일 형성을 방지, 제거하는 전자기적인 방법이 있다.⁴⁻⁷⁾ 화학적 그리고 물리적 처리 방법은 스케일이 어느 정도 형성된 후에 제거하는 사후처리라 하면, 전자기적인 방법은 스케일 형성을 미연에 방지하는 사전방지라 할 수 있다. 이 중 화학적 처리는 화학약품과 부산물처리에 비용이 많이 들고, 사용되는 약품이 강산성으로 배관 및 설비가 부식될 수 있는 문제점이 있고, air sanding이나 poly pig 등은 단단하게 고착된 스케일의 제거에는 큰 효과를 볼 수 없으며, 적용환경에도 제약이 있다. 전자기적인 방법의 경우, 배관 내·외부에 장비를 설치해야 하며, 지속적인 에너지 공급이 필요하다는 단점이 있다.⁸⁾

스케일 관리의 가장 최선의 방법은 스케일 형성 자체를 방지하는 것이므로, 배관에 침해적이지 않고 전기 공급이 필요 없는 새로운 방식의 스케일 관리 방안으로서 Frequency Driver (FD)가 고안되었다. FD는 서로 다른 금속이 접촉할 때, 특수한 활성화 과정을 거쳐 그 전위차로 생성된 에너지가 액체에 전달되어 지속적인 공명 주파수를 생성하게 되는데 이런 공명 주파수는 Ca, Mg 결정구조를 보다 부드러운 형태로 변화시키는 작용으로 스케일의 생성을 방지하는 효과를 유도하여 스케일의 화학적인 처리가 아닌 물리적인 처리가 가능하게 되는 것이다.⁹⁾ 물의 흐름과 이중 금속 사이에서 형성된 공명 주파수를 이용하므로, 외부로부터의 전기에너지의 공급이 필요 없으며, 물의 흐름이 유지되는 모든 종류의 설비에 사용이 가능한 친환경적인 기술이라 할 수 있다.

본 연구에서는 경도와 수온에 따른 FD의 스케일 저감 효과를 확인하여, FD의 적용가능성을 제안하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 관종별 스케일 형성 및 부식률 평가

관 재질에 따른 스케일 형성도를 알아보기 위해 여러 관 재질의 시편을 경수에 침지하는 방식을 이용하였으며, 시편의 실험을 위해 제작한 아크릴수조의 크기는 19 cm L × 11

Table 1. Removal methods of corrosion products from coupons

Material	Chemical	Time	Temp.	Remarks
Copper and copper alloys	50% HCl	3min	20~25℃	Followed by light scrub ²⁰⁾
Iron and steel	conc. HCl + 50 g/L SnCl ₂ + 20 g/L SbCl ₃	20min	20~25℃	Followed by light scrub
Stainless Steel	10% HNO ₃	20min	60℃	-

cm W × 7 cm H이며, 용량은 1.5 L였다. ‘2009 상수도 통계’의 전국 관종별 수도관 현황¹⁰⁾을 살펴보면 내식성 관인 PVC관과 PE관 그리고 덕타일주철관을 제외한 부식성 관 중 비율이 가장 큰 스테일리스관(14.2%)과 주철관(8.3%), 그리고 구리관이 높은 것으로 나타났다. 스테인리스스틸관(SUS)과 구리관(CU) 및 주철관(CIP)을 선택하여 시편을 제작하였다. 이 때 시편의 크기는 1 mm × 20 mm × 40 mm로, 각 관 종 시편 10개씩의 무게를 측정 후 각 조에 넣고 33일 동안 스케일량과 부식율을 분석하였다.

스케일량과 부식율 분석은 관 시편을 일정기간 침지시킨 후의 무게차로 측정하였다. 부식율을 구하기 위하여, 관 시편을 수조에서 회수하여 KS D ISO 8407:2003 (Table 1)에 의거하여 처리한 다음 무게감소량을 측정하여 mg/dm²/day (milligrams per square decimeter per day, mdd)로 나타내었다.

원수의 경도는 CaCO₃를 소량의 (1+1)HCl로 녹이고 수분간 가열하여 CO₂를 제거한 후 방냉하여 Methyl red를 지시약으로 하여, 3 N NH₄OH와 HCl로 pH 9로 조절 후 수돗물로 희석하여 조절하였다. 스케일 형성을 위한 실험수조 조건은 사전 연구를 통해 도출하였으며, 먹는물수질기준의 먹는샘물의 경도기준인 500 mg/L, 수온은 30℃, pH 8.83, 그리고 전기전도도는 126.8 μS/cm이었다.

2.2. FD의 스케일 방지 효과 비교

FD의 스케일 형성 방지 효과를 알아보기 위한 온순환장치는 Fig. 1과 같다. 장치는 온도조절을 위한 보일러와 열교환기, 그리고 교반기 등으로 구성되었으며, 500 L의 원통형의 플라스틱 재질의 원수조와 144 L(유효용량 122 L) 용량의 FRP 재질의 순환수조 2조가 각각 장치의 중앙과 좌우에 위치한다.

원수조에서 각 순환수조로 공급된 실험수는 내부 순환 시스템을 통해 시스템 내에서 수 회 순환된 후 배출되는데 주철관 재질로 된 순환수조의 유입관(L: 370 mm, D: 250 mm)에 FD를 설치하여 스케일 형성 방지 효과를 모니터링 하였다. 원수조의 실험수는 FD가 설치된 순환수조와 FD가 설치되지 않은 순환수조로 체크밸브가 부착된 유량계(5~16 L/min)를 이용하여 공급하였다. 2개의 순환수조는 덮개가 없는 개방형으로 온도 조절 실험 시 발생 가능한 증발현상을 방지하기 위해 상부에 내부 확인이 가능하도록 아크릴 덮개를 사용하였으며, 실험기간 동안 50℃에서 증발량인 2.53~3.13 L/d를 inverter pump (60 LPM, 15 psi)로 매일 추가 공

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

급시켰다. 공급된 원수는 순환수조 내에서 10 LPM의 순환 펌프로 순환시켰다.

순환수조 내 부착된 열교환기는 목표 수온이 유지되도록 온도센서에 의해 자동 조절되었으며, 장치의 조작은 컨트롤 박스의 제어판에서 수행되었다. 수질 분석용 시료는 순환수조 측면에 설치된 밸브를 통해서 채수하였으며, 실험 종료 후 실험수는 순환수조 하부에 설치된 배출구를 통해 배출되었다.

먹는물수질기준의 경도기준인 300 mg/L로 조제한 원수로 50℃조건에서 온수순환장치를 33일간 운전하면서 FD 설치 유무에 따른 관 내부와 순환수조 내부의 특성을 비교하였다. 원수의 pH는 8.74, 전기전도도는 644 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이었다.

2.3. 분석항목 및 방법

실험수의 수질과 관 재질별 시편 표면의 분석항목 및 분석방법은 다음 Table 2와 같다.

실험기간 동안 순환수조 내의 경도, 알칼리도, 전기전도도, pH 등의 수질변화를 모니터링 하였으며, FD가 설치된

관의 내벽과 열교환기에 형성된 스케일의 특성을 FD가 설치되지 않은 경우와 비교하였다.¹¹⁾

관 재질에 따른 시편의 표면에 생성된 스케일사진과 성분분석을 하였고, FD를 설치한 파이프와 설치 안 한 파이프내의 스케일은 상온에서 건조 후 분말형태로 준비하여 ESEM (Field-Emission Scanning Electron Microscope, Carl Zeiss Model SUPRA 55VP)과 XRD (X-Ray Diffractometer, Bruker Model AXS D5005)를 이용하여 형태와 성분을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 관 재질에 따른 경수의 스케일 형성 특성

관 시편 표면의 스케일 형성을 확인하기 위해, 먹는샘물 수질기준의 경도기준인 경도 500 mg/L의 실험수를 30℃로 유지하면서 pH 8.83에서 33일간의 실험수의 변화와 시편 표면에서의 스케일 형성 및 부식현상 등을 분석하였다.

육안으로 볼 때, CIP의 경우 적색의 침전물과 백색의 결정이 CU의 경우, 실험수의 변색이 매우 심하게 나타나 산화구리(CuO)형성이 의심된 반면, SUS 시편에서는 표면과 실험수에서는 실험전과의 큰 차이점을 발견할 수 없었다.

SEM을 이용한 관 시편 표면의 분석결과를 Fig. 1에 나타내었다. CIP의 경우, Fig. 1(a)에서와 같이 실험수 침지 후에 침전물이 퇴적되어 있었으며, 구상형과 불규칙한 미세한 결정들이 혼재하고 있었다.

반면 SUS 표면은 실험 전과 큰 차이가 없으며 얇은 산화 피막이 관찰되었다. CU의 경우도 실험 전에 비해 얇은 피막이 형성된 것을 볼 수 있었는데, 이런 피막의 자세한 성분들을 알아보기 위해 XRD를 이용하여 분석하였다.

Table 2. Analytical methods for water quality

Item	Unit	Method
pH	-	HANNA 210 pH meter
Temperature	℃	HANNA 210 pH meter
Hardness	mg/L as CaCO_3	Standard method ¹²⁾
Alkalinity	mg/L as CaCO_3	Standard method
Conductivity	$\mu\text{S}/\text{cm}$	ISTEK 430 Conductivity meter
Total Solids	mg/L	Standard method
Suspended Solids	mg/L	Standard method
Ca, Mg	mg/L	Metrom IC
Fe	mg/L	Agilent ICP/MS Model 7500 I

Fig. 2. SEM micrographs of coupons surface immersed for 33 days (left: before, right: after).

변화된 시편 표면에 형성된 물질들의 성분을 알아보기 위해 XRD로 분석한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. CIP 표면은 실험 전에 Fe_3C 의 탄소강 성분이 주를 이루었으나, 실험 후 백색의 결정인 calcite (CaCO_3)와 철의 부식생성물인 magnetite (Fe_3O_4)와 $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$ 가 분석되었다.¹³⁾ 권 등¹⁴⁾의 연구에 의하면 350℃의 보일러수에 침지시킨 철합금 시편에 대한 스케일생성 실험에서, 침지시간이 증가함에 따라 철 피크는 점차 감소하면서 Fe_3O_4 가 증가하였는데, 본 실험 결과에서도 같은 경향을 보여주었다.

SUS 시편에서는 실험 후에 NiO , $\text{Cr}_2\text{S}_3\text{Se}_2\text{Zn}$ 등이 검출되었는데 stainless steel의 전형적인 부식현상을 보여준 결과

라 할 수 있다.¹⁵⁾ CU의 경우 실험 전에 비해 실험 후 Cu와 Cu_2O 의 생성이 증가된 것을 알 수 있었다.

금속의 부식은 극히 자연스러운 현상으로 부식을 위한 최적조건인 수분과 온도에 대한 당연한 결과이나, CIP에서만 CaCO_3 가 분석된 것에 주목해야 한다. CIP 표면에서 분석된 CaCO_3 는 calcite로 30~60℃ 조건에서는 동질이상인 aragonite보다는 calcite의 생성이 활발하다는 한 등¹⁶⁾의 연구결과에 부합한다. 주철관의 부식으로 철과 함께 용출된 탄소가 수중의 Ca과 결합하는 이와 같은 반응은 상대적으로 부식반응이 약한 CU와 SUS에서는 실험기간동안에는 확인할 수 없었다.

Fig. 3. XRD of scale in coupons surface immersed for 33 days (top: CIP, center: SUS, bottom: CU).

Calite의 형성은 CIP 시편이 침지된 실험수의 경도변화를 통해 간접적으로도 확인할 수 있었다. Table 3에서와 같이

SUS나 CU의 실험수에서 보다 CIP의 실험수의 경도가 크게 감소한 것을 알 수 있는데, 이 또한 수중 경도물질의 일부가 CIP 표면의 스케일 형성에 기여했음을 유추하게 하는 결과라 할 수 있다.

직접적으로 부식현상을 확인하기 위하여 Fig. 4와 같이 관종별 부식율을 측정하였다. 관종별 부식속도는 CIP가 48.79 mdd, CU는 19.39 mdd, SUS는 2.86 mdd로 CIP의 부식속도가 가장 큰 것으로 나타났다. 부식속도가 가장 큰 CIP를 대상으로 시간별 부식속도 변화 추이를 살펴본 결과, 2일째 부식속도가 137.5 mdd를 보인 후, 이후 점차 감

Fig. 4. Corrosion rate of pipe materials at 33 day.

Fig. 5. Variation of corrosion rate of CIP.

Table 3. Variation of test water Quality for 33 days at Hardness 500 mg/L, pH 8.83, 30℃

Duration	SUS			CU			CIP		
	pH	Hardness (mg/L)	Cond. (mS/cm)	pH	Hardness (mg/L)	Cond. (mS/cm)	pH	Hardness (mg/L)	Cond. (mS/cm)
1	7.20	500	3.45	7.00	500	3.38	7.60	500	3.42
4	8.72	356	2.94	9.01	470	2.89	8.83	436	3.41
8	7.96	302	3.20	8.49	466	3.20	8.31	412	3.20
12	8.00	276	2.86	8.30	460	2.91	8.30	356	2.91
19	5.75	276	3.00	6.73	436	3.00	6.22	288	2.65
22	7.76	276	2.96	7.68	414	2.86	6.45	262	3.00
27	6.00	296	3.20	6.50	402	2.90	7.00	246	2.95
33	6.20	328	3.16	6.45	390	2.91	6.50	236	2.75

소하다 29일째 이후부터는 일정한 수준을 유지하는 것을 알 수 있었다(Fig. 5).

지금까지의 결과를 바탕으로 CIP의 부식 및 스케일 형성이 다른 관중에 비해 월등하여 본 연구의 목적에 적합하다고 판단되어, FD를 이용한 실험에서 CIP를 사용하였다.

3.2. FD의 스케일 형성 방지 효과 비교

3.2.1. 스케일 분석

Fig. 6에서, FD 유무에 상관없이 calcite (CaCO_3), magnetite (Fe_3O_4), calcitemagnesium (MgCaCO_3) 등이 생성되었다. 그러나 FD를 설치한 관에 비해, FD를 설치하지 않은 관에서의 calcite와 calcitemagnesium의 형성이 더 활발한 것으로 나타났다. 반면에 FD를 설치한 관에서는 calcite의 형성을 확인할 수는 있었지만, 철의 부식생성물인 magnetite의 비율이 더 높음을 알 수 있었다. 이와 관련하여 김 등¹⁷⁾과 Sarin 등¹⁸⁾에 의하면 철이 부식되는 과정에서 magnetite와 스케일 물질이 형성되는데, 안정한 광물인 magnetite 피막이 형성되면 더 이상의 녹의 생성을 억제할 수 있다는

Fig. 6. XRD of corrosion products and scale pipe with FD and without FD.

연구결과를 바탕으로, FD가 좋은 부식을 유도함을 알 수 있다.

Fig. 9는 유입관에서 채취한 스케일의 SEM 촬영 결과이다. FD를 설치하지 않은 유입관의 스케일은 모서리가 각진 얇은 판상형인 반면 FD를 설치한 곳의 스케일들은 구상을 이루고 있었다. 이는 경도물질에 의한 스케일에 의한 것으로 Kun¹⁹⁾ 등의 연구에서도 Ca^{2+} , Mg^{2+} 가 존재하는 실험수에서 생성된 스케일은 구형과 뾰족한 바늘모양의(needle-shape)형태였고, Ca^{2+} , Mg^{2+} 가 없는 실험수에서는 구형의 스케일만 형성되었다. SEM 결과에서도 FD의 경도물질에 의한 스케일화 억제 효과를 확인할 수 있었다.

3.2.2. 칼슘·마그네슘에 대한 FD의 효과

FD 설치 유무의 조건에서 온수순환장치의 실험수를 2~3일 간격으로 채수하여 경도와 pH, 전기전도도 및 알칼리도를 분석하였다.

실험기간 동안 두 순환수조 모두에서 경도의 증가를 확인할 수 있었는데, 이는 순환시스템 내에서 실험수에 존재하는 Ca와 Mg 외에 주철관에서 발생하는 부식으로 Fe 등의 경도유발물질이 실험수내로 추가로 공급되었기 때문으로 사료된다. 그러나 FD를 설치한 경우의 실험수의 경도가 FD를 설치하지 않은 경우에 비해 낮은 것으로 볼 때, 앞서 설명한 바와 같이 magnetite 막의 형성으로 주철관의 부식현상이 억제된 효과로 유추할 수 있다. 반면 수질인자인 알칼리도와 pH의 경우에는 FD 설치 유무에 관계없이 비슷한 경향을 보이며 감소하는 것으로 나타나, FD가 화학적인 수질변화를 유발하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

다음 Fig. 9는 실험 종료 후 채수한 순환수조의 실험수의 고형물 농도를 비교한 것으로 FD가 설치되지 않은 순환수조의 실험수에서 보다 많은 침전물을 육안으로도 확인할 수 있었으며, FD를 통해 수중에 탈착된 스케일 물질이 총

(a) without FD

(b) with FD

Fig. 7. SEM micrographs ($\times 20,000$) of inlet pipe with and without FD.

Fig. 8. Variation of hardness, alkalinity and pH by operation time at hardness 300 mg/L.

Fig. 9. Comparison of TS and SS in effluent with and without FD.

고형물을 기준으로 FD를 설치하지 않은 경우 21,440 mg/L에서 FD를 설치하였을 경우 3,483 mg/L로 83.7%까지 감소되었음을 보여주었다.

유입관의 부식과 스케일 형성도를 비교하기 위해 온수순환장치에서 유입관을 분리하여 내부 스케일을 분석하였다.

육안으로도 FD 설치 유무에 따른 스케일 형성도의 차이를 확인할 수 있었으며 FD가 설치되지 않은 유입관의 경우, 붉은 산화철과 두터운 스케일을 확인할 수 있는 반면 FD가 설치된 유입관의 경우, 약간의 침전물만 확인할 수 있어

FD의 스케일 방지 효과를 직접적으로 알 수 있었다. Fig. 10~12는 실험이 종료된 후 FD가 설치된 경우와 FD가 설치되지 않은 경우에서 주철관 파이프전체길이와 연결부분 및 열교환기에 형성된 스케일량을 분석한 결과이다.

파이프 전체 길이에 생성된 스케일 양은 FD가 설치되지 않은 경우 6,235 mg인데 반해 FD를 설치하였을 경우 5,356 mg으로 나타났으며, 파이프 연결부분의 경우도 FD가 없는 경우 501 mg이나 FD가 설치되었을 경우 427 mg으로 FD의 스케일 저감 효과를 확인할 수 있었다. 특히 스케일 발

Fig. 10. Comparison of scale weight for pipe length with and without FD.

Fig. 11. Comparison of scale weight for pipe joint with and without FD.

Fig. 12. Comparison of scale weight for heat exchanger with and without FD.

생 가능성이 큰 열교환기의 경우 역시 FD가 설치되었을 경우 40 mg의 스케일이 분석되어 FD가 설치되지 않은 경우 71 mg보다 44% 정도 적은 양의 스케일이 형성되었음을 확인할 수 있었다.

Fig. 13과 Fig. 14에서 각 부분별 스케일 생성량과 단위 면적당 스케일 생성량을 비교한 결과, FD를 설치하였을 경우가 설치하지 않은 경우에 비해, 파이프 연결부분에서는 약 16%, 파이프 길이에 대해서는 약 14%의 스케일 저감 효과를 확인할 수 있었다. 그러나 열교환기의 경우, FD 설치로 42%의 스케일 저감효과를 나타내었는데, 열교환기는 보일러에서 열을 전달하는 주요설비로 열교환기 표면에 스

Fig. 13. Comparison of scale weight per unit area with and without FD.

Fig. 14. Scale control efficiency of FD with each part of pipe and heat exchanger.

케일이 발생하게 되면, 에너지 손실은 물론 장비의 손상을 유발하게 되어 경제적 피해가 커질 수 있음을 고려할 때, 열교환기 효율 제고 및 장비의 유지관리를 위한 FD의 적용성을 확인할 수 있는 결과이다.

FD를 설치하지 않았을 경우, 관 전체에 생성된 스케일 g 당 Fe의 양이 591 mg, 연결부분에서 501 mg, 그리고 열교환기의 경우 630 mg으로 FD가 설치된 경우 각각의 양인 308 mg, 523 mg, 496 mg에 훨씬 웃도는 양을 나타냈다

Fig. 15. Comparison of Fe for inlet pipe scale with and without FD.

Fig. 16. Comparison of Ca for inlet pipe scale with and without FD.

(Fig. 15). 결과적으로 FD가 설치되지 않았을 경우 스케일에서 Fe가 차지하는 비율이 50% 이상으로 주철관의 부식으로 인한 관 표면의 부식생성물의 증가현상과 수중으로부터 공급된 Ca의 스케일 형성이 두드러졌음을 확인하였고 (Fig. 16), FD가 이와 같은 부식과 스케일 형성을 방지하는 작용을 하였음을 알 수 있었다.

4. 결론

배관 내 스케일은 수질안정성 및 설비 유지 관리의 모든 측면에서 관리가 시급한 문제이며, 에너지 소비증가와 환경오염에 대한 우려로 보다 안전한 친환경적인 스케일 방지 방안이 요구되는 가운데, 전원공급이 필요 없는 FD를 온수순환시스템의 유입관 외부에 부착하여 관 표면에 스케일 형성 억제 효과를 평가하였다.

조제 경수를 대상으로 CIP, SUS, 그리고 CU관을 대상으로 관종별 스케일 형성 특성을 분석한 결과 주철관의 철의 부식과정에서 스케일 형성의 유도가 용이함을 확인하였으며, 주철관을 온수순환시스템의 유입관으로 채택하여 FD 설치 유무에 따른 유입관 내부의 스케일 형성 특성을 비교하였다.

온수순환시스템의 유입관에 형성된 스케일의 성분은 FD를 설치하였을 경우, 좋은 부식물질인 magnetite인 반면, FD가 설치되지 않은 경우는 대부분 calcite가 형성되는 것으로 나타났으며, 스케일 양은 FD를 설치하지 않은 경우에 비해 FD를 설치하였을 경우 파이프연결부분에서는 16%, 파이프전체길이에서는 14%, 열교환기에서는 42%의 스케일이 형성되어 FD의 스케일 저감효과를 확인할 수 있었다. 또한 FD 설치 유무에 따른 수질분석 결과를 토대로 FD가 수질의 화학적 변화 없이 경도물질의 결정화를 방지하는 것으로 나타나 환경적으로도 안전함을 확인하였다.

배관 내 스케일로 인해 겪는 수많은 문제들과 형성된 스케일의 제거를 위해 소모되는 시간과 비용을 고려할 때, 스케일 형성을 미연에 방지할 수 있는 방안으로써 FD의 적용가능성이 크다고 할 수 있다.

참고문헌

1. 서해성, 김정우, 모정하, “판형 열교환기내의 스케일 완화에 관한 실험,” 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회논문집, pp. 188~193(2000).
2. 우달식, 명복태, 문정기, 황병기, 문광순, “개방순환식 냉각 시스템에서 온도, 농축배수에 따른 설비장해(부식/스케일)에 미치는 영향,” 대한환경공학회지, **26**(7), 759~766(2004).
3. 조관형, 우달식, 황병기, “부식 및 스케일 억제제에 의한 냉각수 수질향상,” 한국환경과학회지, **18**(2), 87~195(2009).
4. 박재현, 황덕홍, 이병현, “고주파전자장치를 이용한 관의 스케일 제거특성, 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집,” pp. B19~B22(2003).
5. 이재성, 이수원, 민경희, “물리적 이온 수처리 시스템을 이용한 수도관의 부식 및 스케일 제어에 관한 연구,” 한국환경분석학회지, **8**(1), 27~31(2005).
6. 김정진, 김윤영, 김형수, 장윤득, “금속마그네슘을 이용한 배관 내벽의 스케일제거 및 억제효과연구,” 한국광물학회지, **19**(2), 111~121(2006).
7. 김경환, “설비배관 내 스케일 및 부식방지를 위한 전자장수처리 기술의 원리와 적용사례,” 공기조화 냉동공학회 하계학술발표회논문집, pp. 991~996(2000).
8. 정선구, “상수관에 대한 세정 및 세관기술 현황,” 계장기술, **15**(8), pp. 140~146(2007).
9. 중소기업청, “공명을 이용한 액체처리기술 신기술 사업화 평가 사업보고서,” (2009).
10. 환경부, “2009 상수도 통계,” (2010).
11. Harris, D. C., “Quantitative Chemical analysis,” 3rd Edition, W.H Freeman and Company New York(1991).
12. APHA, AWWA and WEF, “Standard methods for the examination of water and wastewater,” 21st Edition(2005).
13. Tang, Z., Hong, S., Xiao, W. and Taylor, J., “Characteristics of iron corrosion scales established under blending of ground, surface, and saline waters and their impacts on iron release in the pipe distribution system,” *Corros. Sci.*, **48**, 322~342 (2006).
14. 권혁철, 양오봉, 김기주, 임한귀, 최미화, “보일러튜브의 스케일 형성에 미치는 산소의 영향,” 부식과 방식, **3**(1), 22~27(2004).
15. Sun, M., Wu, X., Zhang, Z. and Han, E., “Oxidation of 316 stainless steel in supercritical water,” *Corros. Sci.*, **51**, 1069~1072(2009).
16. 한현각, 김보미, 김진아, “탄산칼슘결정 생성에서 온도와 PAA 영향,” 화학공학회논문집, **46**(6), 1052~1056(2008).
17. 김정진, 김윤영, 장세정, 김형수, “마그네슘(Mg)금속을 이용한 배관내벽의 스케일 제거 및 억제 장치,” 대한상하수도학회·물환경학회 2004공동추계학술발표회 논문집, pp. E35~E43(2004).
18. Sarin, P., Snoeyink, V. L., Bebee, J., Kriven, W. M. and Clement, J. A., “Physico-chemical characteristics of corrosion scales in old iron pipes,” *Water Res.*, **35**(12), 2961~2969(2001).
19. Wu, K. H., Zhu, L. Q., Li, W. P. and Liu, H. C., “Effect of Ca^{2+} and Mg^{2+} on corrosion and scaling of galvanized steel pipe in simulated geothermal water,” *Corrosion Sci.*, **52**(7), 2244~2249(2010).
20. KS D ISO 8407(2003).

KSEE