

<研究論文>

水道管用 金屬材料의 腐蝕舉動研究

朴 庸 秀* · 洪 淳 九**

*延世大學校 金屬工學科

**前 延世大學校 金屬工學科 大學院生

A Study on Corrosion Behavior of Some Metal
Pipes in Tap Water Environment.

Y. S. Park*, S. G. Hong**

*Dep't of Metallurgical Eng., Yonsei Univ.

**Dep't of Metallurgical Eng., Yonsei., Univ., Former Graduate Student

Abstract

Experiments were conducted to study corrosion behavior of some metal pipes in tap water environment. The studied metals were low carbon steel, galvanized steel, aluminium, copper and type 304 stainless steel. The composition of the solution was close to that of the typical city water in Seoul area.

In this work, corrosion behavior was studied as functions of temperature, flow rate and dissolved oxygen content. The following results were obtained.

1. In closed-circuit experiments with testing temperatures of 75°C and 85°C and a flow rate of 0.58m/second, low-carbon steel corroded the most followed by galvanized steel and aluminium. Type 304 and copper did not corrode.
2. In aerated experiments with a testing temperature of 85°C, a flow rate of 0.58m/second and dissolved oxygen content of 2ppm, low carbon steel, galvanized steel and aluminium showed the same corrosion tendency as in the case 1, while copper showed pitting attack and type 304 localized attack in areas immediately adjacent to the weld part. However, the degree of corrosion of copper and type 304 was much less than the first three. Type 304 corroded the least.
3. In aerated experiments with a higher flow rate (1 m/second), type 304 also corroded much less than copper.

I. 서 론

최근에 들어 수도물의 원수로 사용되는 강 및 하철의 오염이 급격히 진행되고 있고, 이에 따른 화학처리로 수도물의 부식성이 높아지고 있다. 따라서 과거에 널리 사용되었던 저탄소강관은 부식으로 인한 수도물의 적수(赤水)현상¹⁾, Scale 부착에 따른 급수량의 저하 및 누수사고등이 발생되어 현재에는 그 사용량이 점차 감소되고 있다. 이에 대체한 아연도강관, 역시 아연 ion 용출에 의한 수도물의 백수(白水)현상²⁾등의 문제가 있는 것으로 알려져 있다. 이보다 내식성이 뛰어난

금속으로는 알루미늄, 동, Stainless 강 등을 들수 있는데, 이들의 우리나라 수도물에서의 부식거동에 대해서는 거의 알려져 있지 않다. 이에 대한 연구는 수도관의 재질선택에 기본이 되어 누수 등의 문제해결이 도움이 되리라 믿어, 본연구에서는 서울지역의 전형적인 수도물성분을 기본으로 Cl⁻ 양과 온도를 높힌 부식 가속화환경에서, 유속 및 용존산소량을 변화시켜 이들 금속재료들의 부식거동을 살펴보았다.

II. 실험

I. 시편

Table 1 Chemical Composition and Diameter of Specimens (w/o)

시편	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	비 고	Diameter(mm)	
										O.D	I.D
Mild steel	0.25	0.3-0.9	0.1-0.35	0.035	0.035			0.20	Fe 잔부	21.8	16.0
아연도관	"	"	"	"	"			"	80±5μ Zinc	21.8	16.0
Al 6063		0.1	0.2-0.6			0.10		0.10	Al 잔부	22.1	20.0
Copper				0.004-0.04				99.90	—	22.2	20.1
304 S.S	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	18-20	8-12		Fe 잔부	22.1	20.0

Table 2 Compositions of Test Solution and Tap Waters in Seoul Area

항 목	팔당	구의	독점	보광	노량진	영등포	선 유	김 포	평균값	실험수
pH	7.5	7.2	7.3	7.1	7.5	7.1	7.2	7.3	7.3	7.2
NH ₃ -N	0.09	0.17	0.12	0.76	0.16	-	-	-	0.34	0.19
KMnO ₄ 소모량	9.9	5.0	5.0	11.5	2.4	1.2	2.4	2.1	6.3	9.7
경 도	47.7	48.7	51.8	57.0	47.4	44.8	42.5	45.7	49.0	48.0
Cl ²	0.5	0.4	-	1.1	0.6	5.0	0.15	-	0.93	0.51
Na ⁺	4.0	6.0	7.0	11.0	4.0	4.5	4.3	3.8	5.58	122.9
K ⁺	1.2	1.0	1.4	2.0	0.8	1.6	0.4	1.4	1.23	1.6
Ca ⁺⁺	13.0	14.6	14.6	14.4	14.1	12.2	10.8	13.4	13.4	13.5
Mg ⁺⁺	2.6	3.0	4.4	6.0	2.4	2.0	3.7	1.6	3.2	3.3
Fe ⁺⁺	1.0	1.4	0.8	1.2	0.6	1.1	1.1	0.6	0.8	0.8
Zn ⁺⁺	0.5	0.7	0.4	2.2	0.2	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
SiO ₂	5.7	5.6	5.3	7.0	4.1	5.0	5.2	5.6	5.5	5.5
Cu ⁺⁺	*	*	*	*	*	*	*	*	*	-
Cr ⁺⁺⁺	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0.9
Ni ⁺⁺	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0.4
Al ⁺⁺⁺	*	*	*	*	*	*	*	*	*	0.2
Cl ⁻	6.3	7.4	8.4	26.4	7.4	12.7	7.9	8.4	10.6	208.0

<unit; ppm except pH>

* not analyzed

본 실험에 사용한 시편은 KSD 3569 저탄소강관, 아연도관관, 6063 알루미늄관, 인탈산동관 및 Type 304 Stainless 강관으로 조성과 직경은 Table 1 과 같다.

제조공정을 살펴보면, 저탄소강관은 용접후 1000~1050°C에서 소둔하고, 공냉, 수냉을 거쳐 최종적으로 화학염료로 피막처리되었다. 아연도관관은 이러한 저탄소강관에 아연을 hot dipping으로 도금한 재료이다. 동관은 압출로 제작되었으며, 열처리되지 않은 재료이다. 알루미늄관은 압출로 제작후 520°C 부근에서 용체화처리되고, 수냉, 170°C 부근에서 시효경화되었으며 인위적인 산화피막처리는 되지 않았다. Stainless 강관은 용접후 1100°C 부근에서 소둔, 수냉하고 질산용액

에서 부동태피막처리가 된 재료이다.

2. 실험수

실험수의 조성은 서울시에 공급되는 8개 수원지의 수도물 성분의 평균값과 가깝게 조절되었는데, Table 2 에 나타나 있다.

서울시 수도물은 경도가 50ppm 정도로 연수에 속하였는데, 조성을 Langelier³⁾식에 대입하면 포화지수(Saturation Index)값이 0 이하가 되어 부식억제 작용을 하는 CaCO₃의 형성이 어려운 조건이었다.

시험기간을 단축하기 위하여 부식을 촉진시키는 ion 중⁴⁾ Cl⁻ 양을, NaCl을 첨가하여 약 200ppm으로 조절하였고, 온도를 75°C, 85°C로 높혀줌으로써 산소확

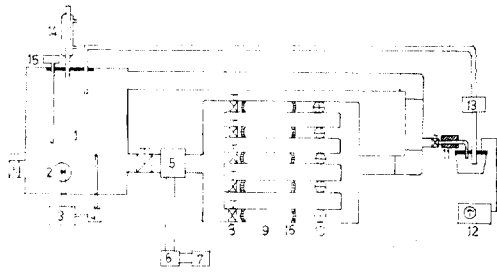
면 새로운 시편들을 설치, 감량을 측정하였다.

III. 결 과

실험은 공기를 불어넣지 않은 폐회로 경우와 용존산소양을 2ppm으로 조절한 Aerated 실험수에서의 경우로 분리, 실시하였다. 폐회로의 경우, 초기의 용존산소양은 금속관의 부식(또는 산화)이 진행함에 따라 줄어들기 때문에 실제조건을 모방하기 어려웠다. 즉 수도물은 저수조등에서 공급되기 때문에, 항상 포화치에 가까운 산소가 용존한다고 볼 수 있겠다. ^{5,6} 즉 Aerated 실험수에서의 실험이 실제와 더 가깝고, 더 높은 부식조건을 형성하였다.

Fig. 2는 온도 75°C, 유속 0.58m/sec, 폐회로 실험수에서 3주일동안 1주일단위로 실험한 결과이다. 저탄소강의 부식속도는 13.6, 25.2, 30.2mg/cm²·week로 증가하나, 아연도강의 부식속도는 8.2, 5.0, 5.1mg/cm²·week로, 알루미늄은 3.2, 1.2, 0.9mg/cm²·week로 점차 감소되는 경향을 보였다.

Fig. 3은 85°C, 0.58m/sec, 폐회로 실험수에서 5주일동안 1주일단위로 실험한 결과로서 75°C에서 실험한 결과와 비슷한 경향을 보여주고 있다. 즉 저탄소강은 30.7, 35.2, 40.1, 42.2, 47.1mg/cm²·week로 증가하였고, 아연도강은 8.0, 3.4, 2.8, 2.6mg/cm²·week로 낮



- | | |
|---------------------|----------------------------|
| 1. water tank | 9. Specimen |
| 2. heater | 10. flow meter |
| 3. temp. controller | 11. cooler |
| 4. thermocouple | 12. dissolved oxygen meter |
| 5. pump | 13. pump |
| 6. magnetic switch | 14. condenser |
| 7. timer | 15. air bubbler |
| 8. valve | 16. rubber tube |

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

산율과 반응속도를 증가시켜 부식을 촉진시켰다.

3. 실험장치 및 방법

실험장치의 개략도는 Fig. 1에 나와있다. 물탱크는 용량이 800l로 Type 316 Stainless 강관을 용접하여 제작하였다. 역시 Type 316 Stainless 강관으로 제작된 13KW Immersion Heater와 온도조절기를 사용하여 실험수를 실험온도로 조절한 후, 순환 Pump로 30cm 길이의 시편이 설치된 5개 회로에 실험수를 동시에 흘려 보냈다. 유속은 시편끝에 부착된 Valve와 유량계를 사용하여 조절하였다. 용존산소양은 공기주입장치를 이용하여 탱크안에 공기를 불어 넣으면서 Fig. 1의 (11) 부분에 위치한 냉각기를 거쳐나온 실험수를 Dissolved Oxygen Meter로 측정하면서 조절하였다.

그리고, 회로금속이 부식되므로써 일어나는 영향을 최소화시키기 위하여 회로는 Type 316 Stainless 강으로 제작하였고, 시편금속은 회로금속과 고부관으로 연결되어 Galvanic Effect를 없앴다.

실험은 실제조건과 유사하게 하기 위하여 24시간용 Timer를 사용하여 3시간은 유동, 1시간은 정체된 조건에서 진행하였다.

시편들은 설치하기 전에 30cm 길이로 절단하여 부드러운 솔과 Acetone으로 관내부와 외부의 불순물을 완전히 제거하고 증류수로 세척한 후, 건조기에서 탈수 건조시켜 무게를 측정하였다. 실험후 시편은 같은 방법으로 내부에 부착된 부식생성물을 충분히 제거하고 건조시켜 무게의 변화를 측정하고, 시험조건이 변경되

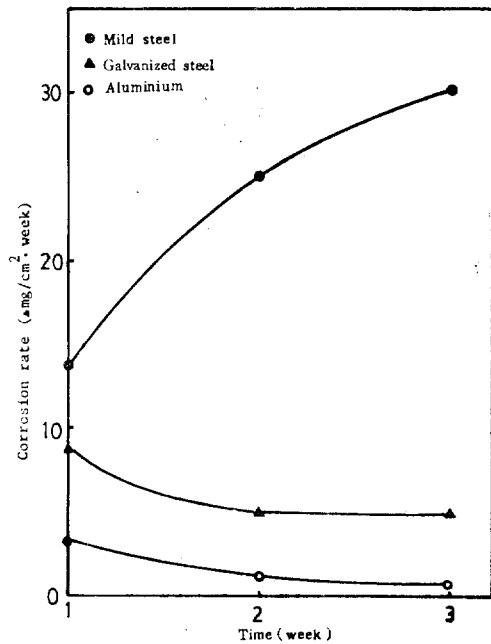


Fig. 2 Corrosion rates as a function of time (temp. 75°C, flow rate 0.58m/s)

아지며, 저탄소강과 비교해 보면 1주일 실험에서는 26%, 5주일 실험에서는 5.5%에 불과해 우수한 내식성을 보였다. 알루미늄도 4.0, 0.7, 0.4, 0.5mg/cm²·week로 감소되어, 아연도강보다도 더 낮은 부식속도를 나타내었다.

온도가 85°C로 높아짐에 따라, 저탄소강은 2주일 실험결과 40%, 알루미늄은 17% 증가하였으나, 아연도강은 부식생성물의 특성으로 인해 오히려 32% 감소되었다.

폐회로 실험에서 동과 Type 304 Stainless 강의 부식은 관찰되지 않았다.

Fig. 4는 85°C, 0.58m/sec, 공기를 불어넣어 용존산소양을 2ppm으로 조절하고, 1주일 단위로 3주일 실험한 결과이다. 시간이 지남에 따라 저탄소강의 부식속도는 증가한 반면, 아연도강과 알루미늄의 속도는 감소하여, 폐회로실험과 같은 경향을 보였다. 폐회로 실험과 부식속도를 비교하면, 3주일경우 저탄소강은 6.5%, 아연도강은 14%, 알루미늄은 44%로 모두 증가하여, 산소의 지속적인 공급이 물에서의 부식증가에 결정적인 역할을 한다는 것을 보였다.

동과 Type 304 Stainless 강도 약간의 부식을 보였는데, 동은 0.3mg/cm²·week, Type 304는 2주일후에

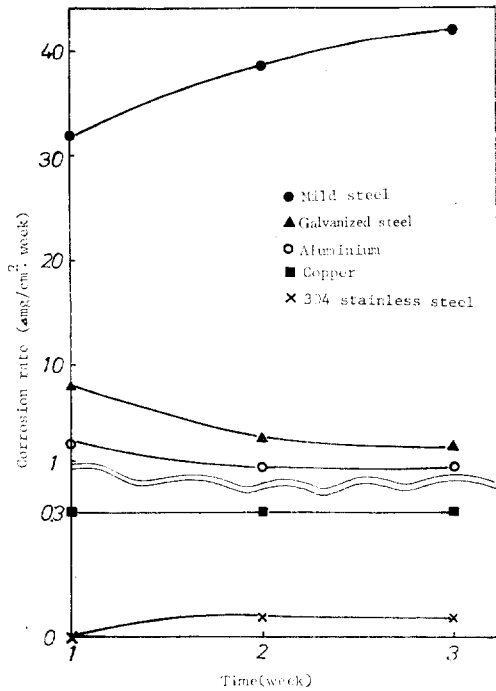


Fig. 4 Corrosion rates as a function of time (temp. 85°C, flow rate 0.58m/s, dissolved oxygen conc. 2ppm)

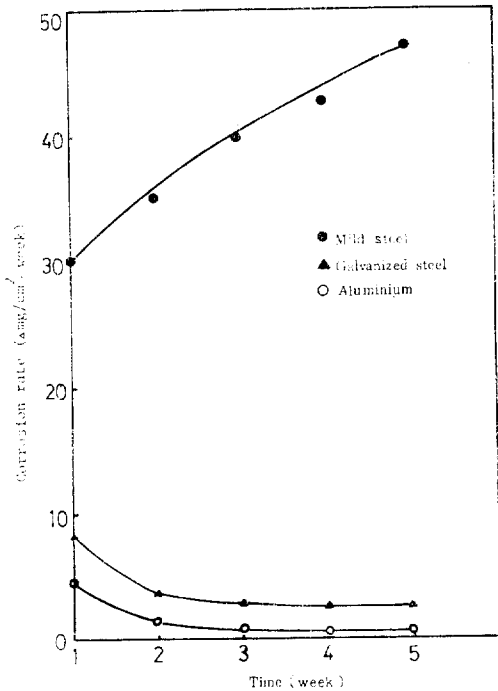


Fig. 3 Corrosion rates as a function of time (temp. 85°C, flow rate 0.58m/s)

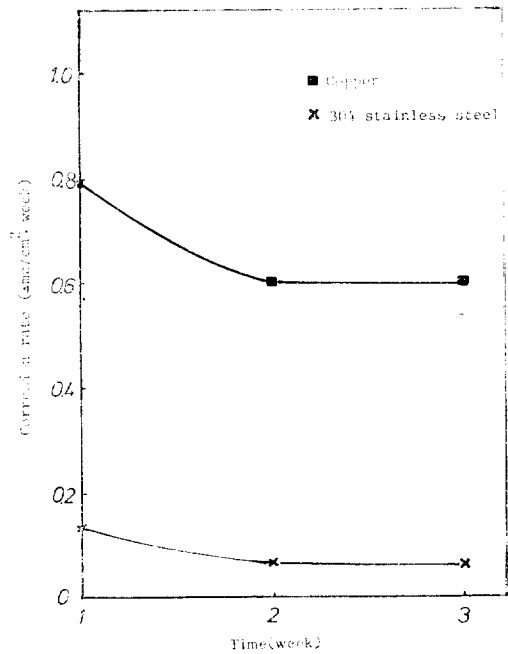


Fig. 5 Corrosion rates as a function of time (temp. 85°C, flow rate 1m/s, dissolved oxygen conc. 2ppm)

0.05mg/cm²·week 로 동부식속도의 17%에 불과하여 시험된 금속중 가장 뛰어난 내식성을 보였다.

Fig. 5 는 유속을 1 m/sec 로 증가시켜, 유속이 부식속도에 미치는 영향을 관찰한 결과이다. 동과 Type 304 만이 시험되었는데, 3 주일 실험한 결과, 동은 0.6mg/cm²·week 로 0.58m/sec 의 유속경우보다 100% 증가, Type 304 는 0.08mg/cm²·week 로 60% 증가되었다.

IV. 고 찰

1. 저탄소강의 부식거동

저탄소강은 Fig. 2, 3, 4 에서 보듯이 시간의 증가에 따라 부식속도도 증가하였다. 이는 두가지에 기인하는데, 첫째는 Porous 한 Fe₃O₄ 의 형성으로 이산화피막이 부식억제작용을 못하였고, 둘째는 시간의 증가에 따라 부식에 의한 강관내경의 증가로 절대부식량이 증가한 때문이었다.

이러한 Fe₃O₄ 가 형성되는 이유는 Roetheli^{7),8)} 등에 의해서도 밝혀졌듯이, Gelatinous 한 Fe(OH)₃ 를 석출시킬 수 있는 Ferrous Ion 의 Ferric Ion 으로의 산화가 불충분하여 일부의 Fe(OH)₂ 가 석출되고, 이것이 Fe(OH)₃ 와 반응하여 검은색의 Porous 한 Fe₃O₄ 를 형성

하였는데, 이는 육안으로도 관찰되었다.

Fig. 6 은 85°C, 0.58m/sec, 용존산소 2ppm 조건의 실험에서 1 주일동안 실험한 저탄소강관내부표면의 주사전자현미경사진인데, Auger Spectra 검사결과 Fe₃O₄ 가 형성하였음을 확인하였다.

2. 아연도강의 부식거동

Fig. 2, 3, 4 의 결과를 살펴보면, 아연도강은 저탄소강과는 달리, 부식속도가 시간이 지남에 따라, 감소하고, 온도의 증가도 속도를 감소시키는 것으로 나타났다. 이는 보호적인 ZnO 의 형성에 기인하는 것으로, ZnO 는 아연도강을 실험수로부터 효과적으로 차단하여, 두께가 증가할수록 산소의 확산에 의한 산화피막 통과시간을 연장시켰다.

Gilbert⁹⁾ 와 Cox¹⁰⁾ 등에 의하면, 아연도강이 물에 의해 부식될 때 70°C 이하에서는 Zn(OH)₂ 가, 그 이상의 온도에서는 ZnO 가 형성하는데, 이는 Auger Spectra 로써 확인하였다. ZnO 의 형성으로 85°C 에서의 부식속도가 감소되었는데, ZnO 가 더 보호적이기 때문이었고, 이는 다른 연구자¹¹⁾들에 의해서도 밝혀 진바 있다. 그러므로 Zn 의 경우 부식가속화실험은 70°C 이하에서 실시하여야 하는 것으로 나타났다.

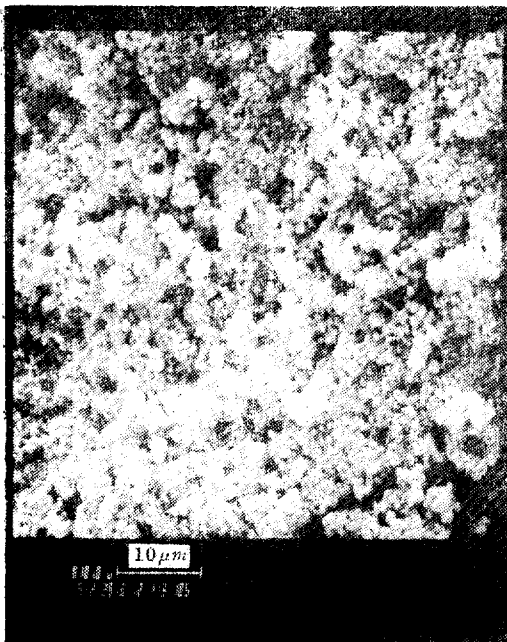


Fig. 6 Scanning electron micrograph of the mild steel (test condition; temp. 85°C, flow rate 0.58m /s, dissolved oxygen conc. 2 ppm, period 1 week)

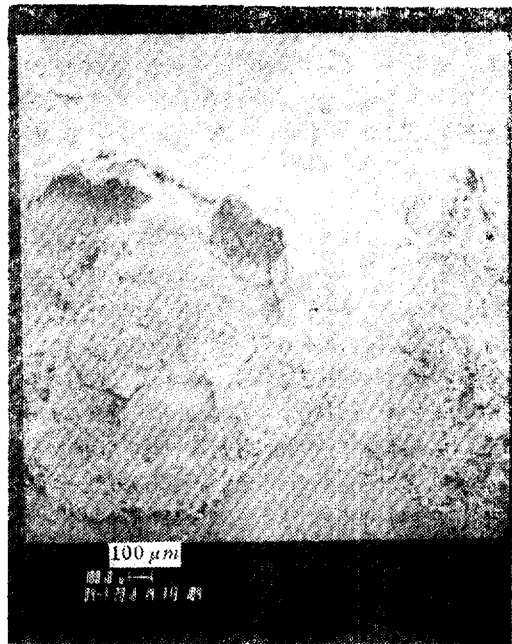


Fig. 7 Scanning electron micrograph of the galvanized steel (test condition; temp. 85°C, flow rate 0.58m/s, dissolved oxygen conc. 2 ppm, period 1 week)

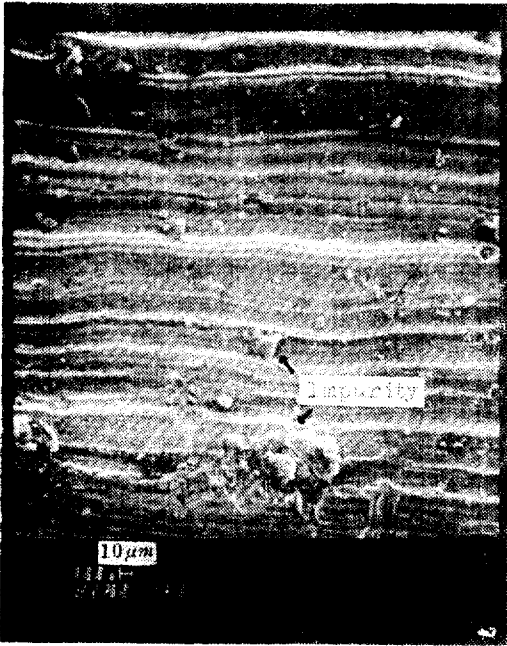


Fig. 8 Scanning electron micrograph of the aluminium before test

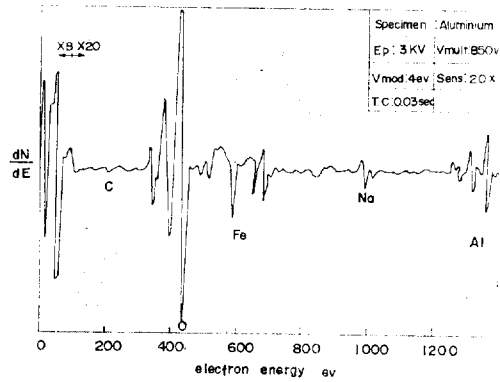


Fig. 9 Auger spectra from the aluminium (test condition; temp. 85°C, flow rate 0.58m/s, period 1 week)

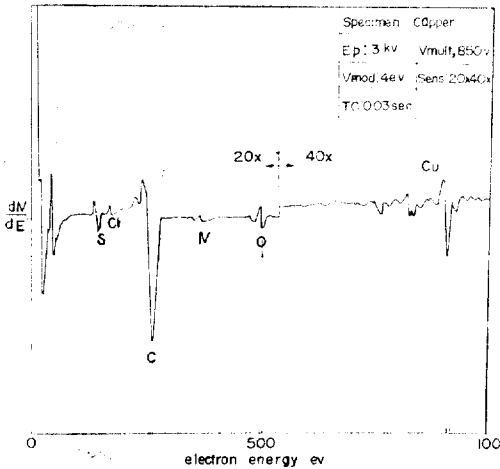


Fig. 10 Auger spectra from the copper (test condition; temp. 85°C, flow rate 0.58m/s, period 1 week)

이러한 보호적인 ZnO의 형성은 Zn 본래의 역할을 상실하여, '전위의 역전' 현상^{2), 12)}을 나타낼 수 있다. Fig. 7 은 85°C, 0.58m/sec, 용존산소 2ppm 경우의 1 주일 실험후 주사전자현미경사진인데, 극부적인 부식 생성물을 보여주고 있다. 즉 Zn 피막이 파괴된 부위는 가속된 부식현상을 나타낼 수 있는 것이다.

3. 알루미늄의 부식거동

알루미늄의 경우도 시간이 흐름에 따라 부식속도는 감소하였으나, 동이나 Type 304 Stainless 강보다는 훨씬 높은 속도를 나타내었다. 초기의 속도는 비교적 컸는데 그 이유는 첫째 알루미늄은 공기중에서도 어느 정도의 Al₂O₃ 피막을 형성하나, Anodizing 처리가 되지 않았기 때문에 산화피막두께가 충분치 않았고, 둘째 Fig. 8 의 실험전 알루미늄관의 주사전자현미경사진에서 보듯이 표면에 많은 불순물(→포시)이 존재하여, 초기에 이들의 부식이 일어난 것으로 생각된다. 그러나 시간이 지남에 따라 Steady State 의 Al₂O₃가 형성, 일정한 부식속도를 유지하게 되었다. Fig. 9 는 85°C, 0.58m/sec, 폐회로 실험수에서 1 주일동안 실험된 알루미늄관의 표면 Auger Spectra로서 Al₂O₃의 형성을 확인하였다.

4. 동관의 부식거동

Fig. 10 은 85°C, 0.58m/sec, 폐회로에서 1 주일동안

실험한 동관의 Auger Spectra로서 표면에는 Cu₂O와 압출시 잔류유탄소에 의해 탄소피막이 형성된다는 Lucey^{13), 14)}의 주장과 같이 탄소피막이 존재함을 확인하였다. 그러나 위의 실험에서 부식이 전혀 발생하지 않았으므로, 이들은 이미 실험전에 형성되었던 것으로 생각된다. 이들은 폐회로 실험에서는 동관을 완전히 보호하였으나, 용존산소 2ppm 경우 0.58m/sec의 유속조건에서 0.3, 1m/sec에서 0.6mg/cm²·week의 부식이 발생해 이들 피막이 파괴되었음을 알 수 있었다.

Fig. 11 은 85°C, 0.58m/sec, 용존산소 2ppm의 조건에서 1 주일동안 실험한 동관의 부식부분으로, Pitting

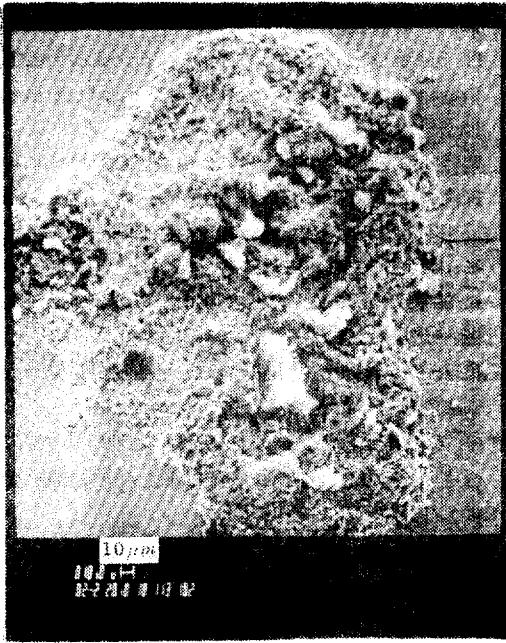


Fig. 11 Scanning electron micrograph of the copper. (test condition; temp. 85°C, flow rate 0.58 m/s, dissolved oxygen conc. 2ppm, period 1 week)



Fig. 12 Scanning electron micrograph of the type 304 stainless steel. (test condition; temp. 85°C, flow rate 0.58m/s, dissolved oxygen conc. 2ppm, period 2 weeks)

과 주위의 부식생성물형성을 보여주고 있다. 동(Pitting)은 Cu_2O 와 탄소피막이 Membrane 역할을 하여 유발되는 것으로 알려져 있다. Lucey^{13),14)}에 의하면 CuCl-Pocket 이 다공성이며 전도성인 Cu_2O Membrane 밑에 형성되어 Membrane 밑에서 산화(부식)반응이 진행하므로써 발생하며, 탄소피막은 ready-made membrane 역할을 하고, 초기의 pit로 부터 CuCl 방출을 막아 Cu_2O membrane 성장에 도움을 준다고 한다. 일어나는 전기화학적 반응은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 1) $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^+ + \text{e}^-$
- 2) $\text{Cu}^+ + \text{Cl}^- \rightarrow \text{CuCl}$
- 3) $2\text{CuCl} + \text{F}_2\text{O} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + 2\text{H}^+ + \text{Cl}^-$

그러므로 Pit 내부의 pH는 낮아지고, 동은 열역학적으로 불안정해지¹⁵⁾, 부식이 촉진된다.

본 실험에서 Pitting은 용존산소하에서 쉽게 유발되었다. 용존산소에 의하여 일반적으로 금속들의 부식은 증가하거나 부동태를 형성 감소할 수 있는데, Tomashcv¹⁶⁾ 등에 의해 지적되었듯이 특히 동은 물안의 산소에 의해서는 부동태를 형성하기보다는 Open Circuit Potential의 증가로 Cu^+ , 또는 Cu^{++} ion의 형성이 쉽다고 알려져 있다. 즉 1)과 2)반응이 쉬워져 CuCl이

형성하는 것이다.

유속이 증가함에 따라 동(Pitting)의 부식이 증가된다는 것은 쉽게 예견할 수 있었다. 첫째 Cu_2O 피막의 파괴가 쉬워지고, 둘째 심한 와류(Turbulent Flow)의 형성으로 산소의 확산층두께를 줄여, 동으로의 접근이 쉬워지기 때문이다. 1m/sec의 경우 Reynold 수는 57,880으로 심한 와류를 형성, 산소에 취약한 동은 100%의 부식증가를 보이게 된 것이다.

5. Type 304 Stainless 강의 부식거동

Type 304 Stainless 강은 폐회로 실험에서는 전혀 부식이 없었으나, 용존산소 2ppm 조건에서는 0.05, 0.08 $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{week}$ 로 극히 경미한 부식정도를 보였다. 이 재료의 뛰어난 내식성은 Fe-Cr-Ni계의 복합산화물피막의 존재로 나타난 것으로, 이미 널리 확인되었고, 본 실험에서도 Auger Spectra로써 확인하였다. 용존산소 2ppm 조건에서의 부식지역은 용접부위 근처로 제한되어 있었는데, Fig. 12는 0.58m/sec에서 2주일 실험한 재료의 부식부위 주사전자현미경사진이다.

위의 관찰에서 알 수 있듯이 복합산화물피막이 용접의 영향으로 변할 때만이 이지역(Heat Affected Zone)의 부식이 가능하였다. 용접시 용접부인접지역의 온도는

Cr₂₃C₆ 석출이 가능한 1200~1400°F 사이가 되어 Cr의 고갈현상이 일어난다¹⁷⁾. Cr의 고갈은 Stainless 강 특유의 복합산화피막형성을 불가능하게 하고, 부식이 발생하는 것이다. 고갈현상은 관제작시 후열처리로 해결하지만, 열처리가 완전하지 않은 경우 본실험에서 관찰된 약간의 국부부식이 유발 할 수 있다. Fig. 12에서의 부식형태는 일반적인 Heat Affected Zone의 입계부식과는 다른 형태를 보이고 있는데, 이는 와류에 의해 이지역에 Erosion이 함께 일어난 것으로 생각된다. 유속이 1m/sec로 증가함에 따라 부식속도가 60% 증가하였는데, 이는 Erosion의 증가로 일어난 것으로 생각된다.

V. 결 론

수도관용 금속재료들의 부식거동을 실험수의 온도, 유속, 용존산소량을 변화시켜 부식감량을 조사하고, Auger Electron Spectroscopy와 주사전자현미경을 사용하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 온도 75°C, 85°C, 유속 0.58m/sec, 폐회로 실험수에서의 부식은 저탄소강관>아연도강관>알루미늄관 순서였고, 동관과 Type 304 Stainless 강관의 부식은 관찰되지 않았다.
2. 85°C, 0.58m/sec, 용존산소 2ppm의 Aerated 실험수에서의 부식은 저탄소강관>아연도강관>알루미늄관>동관>Type 304 Stainless 강관 순서였고, 동관은 공식이 Type 304 Stainless 강관은 용접부의 인접부위에서 약간의 국부부식이 관찰되었다.
3. 85°C, 1m/sec, 용존산소 2ppm의 Aerated 실험수에서도 부식은 동관>Type 304 Stainless 강관순서였는데, 0.58m/sec 경우보다 증가된 값들을 보였다.

VI. 인용문헌

1. 編集部まえがき, 스텐레스, 1971-1, 13 (1971)

2. 須齊嵩, 스텐레스, 1971-4, 14 (1971)
3. W. F. Langelier, *J. Amer. Water. Works. Assoc.*, **28**, 1500 (1936)
4. G. Butler and H. C. K. Ison, "Corrosion and Its Prevention in Waters", pp 18-23, Reinhold Pub., New York, U. S. A., 1966
5. 門井守夫, 스텐레스, 1971-1, 19 (1971)
6. H. Leidheiser, Jr., "The Corrosion of Copper, Tin, and Their Alloys", p 98, R. E. Krieger Pub., New York, U. S. A., 1979
7. B. E. Roetheli and R. H. Brown, *Ind. Eng. Chem.*, **23**, 1010 (1931)
8. H. O. Frorrest, B. E. Roetheli and R. H. Brown, *Ind. Eng. Chem.*, **23**, 1012 (1931)
9. G. T. Gilbert, *J. Electrochem. Soc.*, **99**, 16 (1952)
10. G. L. Cox and B. E. Roetheli, *Ind. Eng. Chem.*, **23**, 902 (1931)
11. R. B. Hoxeng and C. F. Prutton, *Corrosion*, **5**, 330 (1949)
12. H. H. Uhlig, "Corrosion and Corrosion Control", 2nd ed., pp 234-236, John Wiley & Sons, New York, U. S. A., 1971
13. V. F. Lucey, *Brit. Corro. J.*, **2**, 36 (1967)
14. V. F. Lucey, *Brit. Corro. J.*, **7**, 36 (1972)
15. NACE, "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solution", 2nd ed., p 384, NACE, Houston, U. S. A., 1974
16. N. D. Tomashov, "Theory of Corrosion and Protection of Metals," p 487, MacMillan, New York, U. S. A., 1966
17. M. G. Fontana and N. D. Greene, "Corrosion Engineering", 2nd ed., p 62, McGraw-Hill, New York, U. S. A., 1978