

〈腐蝕講座〉

Ⅶ. 공장설계를 잘 해서 부식을 줄이자\*

Michael Henthorne\*\*

윤 창 구\*\*\* 역

화학공장의 건설 이전에 주요 장치를 적절히 설계함으로써 부식문제에 대비하여 나중의 조업 경비를 크게 절약할 수 있다.

틈부식, 전지부식, 마모부식, 응력부식균열등은 화학장치의 적절한 설계에 의해 가장 손쉽게 조절할 수 있는 종류의 부식들이다. 용접, 말단 침식, 용기로부터의 배수등의 경우 역시 적절한 설계 기술에 의한 조절이 가능하다.

틈부식 (Crevice Corrosion)

틈부식의 기구는 이 강좌의 제 1부(부식학회지 2권 1호 21-27(1973))에서 논의하였다. 설계의 관점에서 보면 이의 해결책은 설계상의 틈을 될 수 있는 대로 피하는 간단하면서도 중요한 방법이다. 흔히 말해지는 곳과 틈부식을 회피하는법 몇 가지를 그림 Fig. 1에

보였다.

틈부식이 특히 치명적이기는 번갈아 가며 말했다, 젖었다 하는 경우로서 이는 부식성 액체가 틈에 스며들었다가 증발에 의해 농축되는 때문이다. 그러나 농축이 언제나 문제가 되는 것은 아니다. 예를 들어 제 6부(부식학회지 3권 1호 33-41(1974))에서 보인 바와 같이 물게 하면 오히려 부식력이 높아지는 강한 산 종류들도 있다. 이러한 종류의 희석이 손쉽게 일어날 수 있는 것은 틈에스며든 산이 세척단계 동안에 묻어지는 경우다.

운휴시의 문제 또한 설계와 관계 된다. 용기 속의 유체를 완전히 빼어 내려면 배출구의 설계가 중요해진다.

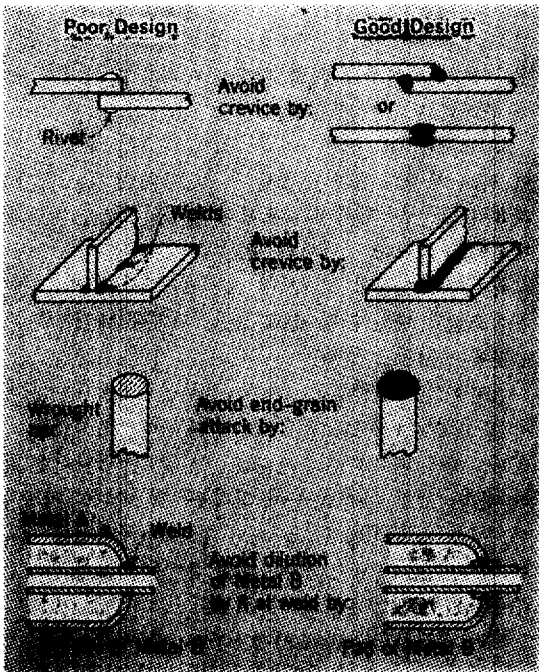


Fig. 1 Welding reduce corrosion problem

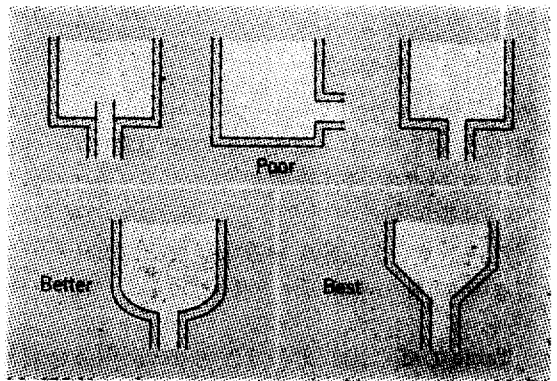


Fig. 2 Drainage affects corrosion resistance

Fig. 2에 보인 것과 같이 적은 양의 유체가 고여서 남게 되면 치명적일 수가 있다. 증발에 의한 불순물의 농축 및 용기내에 모이는 찌꺼기들은 구멍부식(pitting corrosion)과 틈부식이 일어날 좋은 환경을 마련해 주는 것이다.

전지부식 (Galvanic Corrosion)

전지부식은 이 강좌의 제 1부(부식학회지 2권 1호 21-27(1973))에 간단히 소개하였다. 이는 서로 다른 금속이 전해액내에서 접촉하여 전위차를 일으킬 때에

\* Chem. Eng., Nov. 15, 1971, pp. 163-166.

\*\* Carpenter Technology Corp.

\*\*\* 한국과학기술연구소(화학공정선)

생기는 바 특정한 쌍의 두 금속간에 생기는 전위차를 주어진 환경에 따라 측정할 수 있다.

이런 전위차를 차례로 배열한 것이 이른바 전지 시리즈(galvanic series)다. 바닷물 속에서의 몇 가지 금속과 합금에 대한 이런 시리즈를 **Table 1.** 에 보였다.

**Table 1.** Galvanic Series in Seawater at Ambient Temperature

Noble (cathodic)	Platinum
	Gold
	Titanium
	Alloy C (Ni-Cr-Mo)
	Alloy 20
	300 Series stainless steels(passive)
	400 Series stainless steels(passive)
	Nickel-copper alloys
	Bronzes
	Copper
	Brasses
	Lead
Active (anodic)	Stainless steels(active)
	Cast iron
	Steel
	Cadmium
	Aluminum
	Zinc
	Magnesium

전지 시리즈를 앞서 말한바 있는 기전력 또는 산화·환원 시리즈(부식학회지 2권 2호 79-83(1973))와 혼동하면 안 되겠다. 후자는 순수 금속의 전극간의 열역학적 관계를 나타내는 반면에 전지 시리즈는 평형상태에서의 부식전위를 실제로 측정하여 만든 것으로서 특정 환경내에서의 금속과 합금들에 대한 실제 수치를 나타낸다.

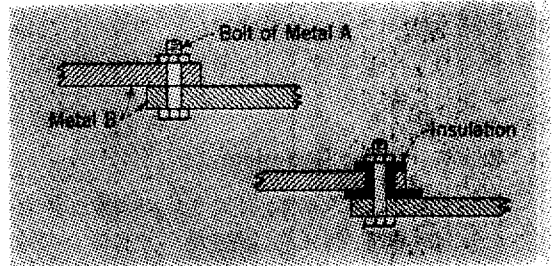
**Table 1.** 에서 보인 것과 같은 시리즈를 사용할 때의 일반적은 시리즈내의 두 금속간의 상대적 위치가 떨어져 있을수록 전지부식이 일어날 가능성이 크다는 것이다. 두 금속중에 활성이 높은 (more active)쪽이 부식 전지내에서 양극(anode)이 되어 빠른 속도로 부식되고 활성이 낮은 (more noble)쪽이 음극 (cathode)이 되어 낮은 속도로 부식된다.

예를들어 대기중의 철판의 부식을 막기 위해 아연도금한 함석을 쓰는데 이는 아연이 우선적으로 부식되는 때문이다. 만약에 함석판에 작은 구멍이 났다면 철판과 아연 사이에 부식용매(corrodent)를 통해 전기적 접촉이 잘되어 있는 한 노출된 쇠가 부식되지는 않는 것이다.

활성금속과 비활성금속간의 면적비는 아주 중요하다 서로 다른 금속간의 전위차는 전류를 일으키고 부식속도는 전류밀도에 의존한다. 따라서 활성금속의 면적이 비활성금속의 것보다 좁을수록 이 전류밀도가 높아지는 것은 당연한 이치다.

전지부식이 문제일 때에는 다음의 조치가 가능하다.

1. 전지 시리즈내에서 서로 가까운 금속을 쓸 것.
2. 불리한 면적비를 피할 것.
3. 전기적 절연----즉, 두 금속간의 회로를 끊어 줄 것(**Fig. 3**을 참조). 조업중에 다시 접촉되지 않도록 확인할 것(예: 부식에 의해 생성된 고형물에 의한 접촉).



**Fig. 3** Insulation avoids galvanic corrosion

4. 칠(coating)을 유지할 것. 비활성금속(음극)의 표면은 가능한 한 최대의 면적을 칠로 덮어 주면 되지만 활성금속(양극)표면에 칠이 벗어진 구멍이 나 있으면 불리한 면적비에 의한 침식을 당하므로 완벽한 칠을 유지하는 것이 중요하다.

5. 고려대상이 되는 두 금속간에 제 3의 금속을 넣어 어느 쪽과도 전기가 통할 수 있게 해줄 것. 단, 이 제 3의 금속은 양쪽의 금속보다 활성이 높아 구조물 대신에 부식되는 것이어야 함.

위에서 보다싶이 전지부식 자체가 경우에 따라서는 부식조절의 방편이 될 수도 있다. 여기에 대해서는 다음번에 토의하기로 한다.

전지부식은 양극분극곡선과 음극분극곡선(부식학회지 2권 3호 123-129(1973))을 이용하여 생각해줄 수 있다. 때에 따라서는 문제되는 두 금속/금속이온 계의 산화-환원 전위로 부터 전지부식의 예측이 가능하다. 예를 들어 **Fig. 4a**를 보면 같은 음극곡선에 대하여 활성이 높은 금속(B)이 낮은 금속(A)보다 더 큰 부식전류를 일으킴을 알 수 있다.

기전 시리즈(electromotive series, 즉 산화·환원 전위)로 예측한 전지부식의 신빙성이 높지 않은 것은 다른 요소들이 관계되는 때문이다. 이를 시범하기 위해 **Fig. 4b**에 보인 것은 묽은 산용액 속에서의 활성금속 양극(M), 역시 같은 금속으로 된 음극 및 다른 금속으로 된 음극(N)의 분극곡선들이다. 만약 금속 M이

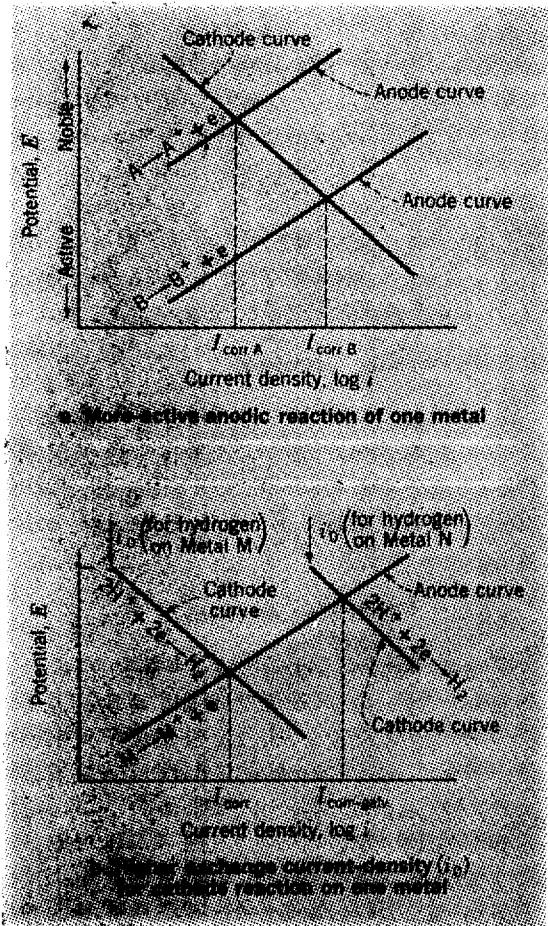


Fig. 4 Polarization curves and galvanic corrosion

스스로 부식되는 경우에는 부식전류밀도(즉, 부식속도)가  $I_{corr}$  가 될 것이다. 금속 N과 접촉하는 때에는 N가 음극이 되어 결과적으로 부식전류밀도는 훨씬 더 높은 값인  $I_{corr-galv}$  가 될 것이다.

Fig. 4b에서 금속 N의 음극분극곡선이 M것보다 훨씬 더 빠른 쪽으로 가 있는 이유는 무엇인가?

아시다시피 의 떨어진 양극이나 음극(부식반응에 참여하고 있는것)도 그 자신과 주위 용액속에 녹아 있는 자신의 이온간에 전위차를 일으킨다. 이 열역학적 양(반전지 전위, half-cell potential)이 바로  $M \rightarrow M^+$  또는  $M^+ \rightarrow M$  을 일으키는 구동력을 대표한다. 수소전극( $H_2 \rightarrow 2H^+$  또는  $2H^+ \rightarrow H_2$ )의 표준 반전지전위를 0으로 잡고 모든 다른 반전지 전위는 이에 대한 볼트 차로 측정하는 것이 관례다.

이 강좌의 제 2부(부식학회지 2권 2호 79-83(1973))에서 언급 많은 중의 하나는 외판 전극이 자신의 이온

용액속에 잠겨 있을 때에 종합적으로는 반응이 일어나지 않으나 무슨 일인가 일어 나고는 있다는 것이다. 즉, 산화반응  $M \rightarrow M^+$ 과 환원반응  $M^+ \rightarrow M$ 이 똑 같은 속도로 진행하고 있고 이 반응속도는 금속/금속이온 계마다 다르다. 또한 수소반응  $H_2 \rightarrow 2H^+$ 와  $2H^+ \rightarrow H_2$ 도 금속 표면에 따라 다른 속도로 진행하고 있다. 예를 들어 수소반응 속도는 아연 표면에서 보다 백금 표면에서 더 빠르다. (여기서 이야기하고 있는 것은 외판 전극들로서 두 방향이 서로 반대 방향으로 똑 같은 속도로 일어나 결과적 변화는 없는 경우다.) 이들 반응속도를 교환전류밀도  $i_0$ 라고 부른다. 교환전류밀도와 반전지전위는 한 전극이 부식전지의 일부가 되어 분극되기 전의 출발점을 정의해 준다.

금속 N에서 일어나는 수소반응의 교환전류밀도가 금속 M에서 보다 높으므로 (Fig. 4b) N의 음극분극곡선이 M 것보다 바른 쪽에서 출발하게 되고 따라서 같은 분극속도에 대한 부식전류밀도는 N쪽이 더 높다. 이와 같이 기전력 시리즈내에서의 위치가 서로 가까운 금속들이라 하더라도 양극이나 음극반응의 교환전류밀도가 서로 크게 다른 경우에는 전지 부식을 나타낼 수가 있다. 이것이 바로 금속이나 합금간의 전위차를 측정하는 것이(즉, 전지 시리즈) 그 효과를 기전력 시리즈로 추정하는 것보다 현명한 이유다.

전지부식의 문제가 지나치게 과장되는 경우가 꽤 있다. 전지 시리즈내에서 서로 가까운 금속 재료간에 문제가 생기는 경우는 물론 드물고, 서로 멀리 떨어져 있는 금속쌍이라고 해서 꼭 전지부식을 일으켜 파손되는 것도 아니다. 예를 들어 불수강과 구리합금들은 이가 없이 해양용으로 함께 쓰인다.

### 마모부식(Erosion Corrosion)

마모부식은 부식환경 및 설계와 관련이 큰데 흔히 부식액(Corrosident)의 속도가 증가함에 따라 심해진다. 유체가 벽에 부딪치는 것이나 난류하는 것이나 모두 해롭다. 특히 딱딱한 고형물 입자들이 섞인 유체(예: 각종 슬러리)가 가장 문제를 일으키기 쉬워서 이런 경우에는 실제적이기만 하다면 고형물을 여가해 버려야 한다.

공장의 열관 등속(piping system)은 관의 직경을 크게 함으로서 마모부식을 줄일 수 있다(즉, 유속과 난류를 줄임). 유체가 벽에 부딪는 것을 줄이기 위해서는 굽은 곳(bend)을 유선형으로 하고 완충판(baffles)을 사용하기도 하며 특히 유체의 도관이 용기의 벽에 겨냥되지 않도록 해 준다. 도관장치(tube bundles)의 경우에는 나팔 모양의 관을 입구에 사용하여 문제를

떨기도 한다.

마모부식은 국부적으로만 일어나므로 쉽게 침식될만한 곳은 최소의 노력으로 갈아 끼울 수 있도록 설계하는 것이 좋다.

특별한 경우인 거품부식으로 인한 피해(cavitation damage)를 면하려면 모든 표면을 반드럽게 만들어 거품의 발생점을 없애는 것이 유익하다.

비빔부식(fretting corrosion)도 설계를 바꿈으로써 없애거나 줄일 수 있다. 이 종류의 부식은 힘이 걸린 두 표면이 서로 비벼질 때에 (예를 들면 진동중에) 일어난다. 이를 예방하는 방법으로는 기름을 쳐서 마찰을 줄여주는 식과 이와는 반대로 표면을 거칠게 해서 마찰을 늘여 야에 상대운동이 일어나지 않게 하는 식이 있다.

응력부식균열(Stress-Corrosion Cracking)

설계는 여러 가지로 응력부식균열에 영향을 미친다. 줄열한 설계는 부식성 환경조건(예를 들어 틈)이나 높은 응력이 걸리는 것을 보장해 줄 수 있다. 응력의 관점에서 본 일반적인 가끔적이면 국부적으로 높은 응력이 물리는 것을 피하거나 응력해소시키라는 것을 들 수 있다.

균열이 일어나려면 일반적으로 인장응력(tensile stress)이 작용해야 한다고 알려져 있으나 압축응력(compressive stress)이 작용하는 부분에도 물론 인장응력이 따르게는 마련이다. 인장응력이 작용하는 곳이 부식용매와 접촉하는 표면이 아니어서 피해가 없을 수도 있다. 때로는 압축응력을 도입해서 응력부식균열의 가능성을 최소로 해주는데 예를 들면 기계로 깎는 대신에 하는 shot-peening, thread-rolling 등의 가공법이 있다. 균열에 수소 가스가 관련되는 경우에는 수소가 압축응력이 걸린 층을 지나 인장응력이 걸린 지역으로 확산해 갈 수 있으므로 표면에 압축응력을 가했다 해서 안심할 수는 없다.

줄열한 설계로 인한 응력에는 미숙한 공사와 조립의 결과로 일어나는 것들도 포함되는데 예를 들면 크기가 맞지 않는 부속을 억어지로 힘주어 맞추어 넣는 경우다. 폭발식 접착(explosive bonding) 기술을 쓰는 경우에는 이로인한 변형 또한 고려되어야 한다.

표면처리도 응력부식균열에 대한 저항력에 영향을 줄 수 있다. 기계로 깎고 가는 공작법이 치명적일 수 있는 것은 이들이 :

1. 표면을 거칠게 해서 응력향진점(stress raisers)을 만드는 경우.
2. 잔류 표면응력을 높이는 경우.

3. 미세 균열을 만드는 경우.

4. 해로운 금속학적 변화를 표면에서 일으키는 경우. 일반적으로 표면이 반드럽고 깨끗하며 응력이 걸려 있지 않으면 균열이 생길 기회가 적어지나 이렇게 해서 높은 저항력으로도 불충분한 경우가 많고 더욱이 결국은 다른 재료로 대체하고자 하는 경우에는 돈을 낭비한 결과가 되기 쉽다.

보다 새로운 재료시험법(미리 균열시킨 시편, 부식학회지 2권 4호 173-179(1973))을 따르면 옛날것들보다 더 유용한 설계기준 수치를 얻을 수 있다.

용접법(Welding Practices)

설계문제를 극복하기 위해서 용접이 자주 쓰여진다. 그러나 부주의하면 여기에도 단점이 있을 수 있다.

Fig. 1에 보인 것은 몇 가지의 줄열한 용접법과 그 대안이다. 용접에 따르는 금속학적 변화때문에 용접이 해로울 수도 있다.

말단부식(End-Grain Corrosion)

Wrought-metal 제품의 특정 환경에서의 부식에 대한 저항력은 가공(냉간 또는 열간)방향에 평행한 단면인가 또는 수직인 단면인가에 따라 다를 수가 있다. 많은 경우에는 (예 : 구멍부식이 일어나는 경우) 수직인 단면의 부식에 대한 저항력이 훨씬 못하다. 그 결과로 일어나는 것이 말단침식이다. 흔히 취하는 대책 하나를 Fig. 1에 보였다. 일부를 forge 하는 것도 대책이 되겠다. 말단침식이 잘 일어나는 것은 흔히 많은 양의 제 2상(second phase)을 포함하는 재료들로서 예를 들면 유탄철가로 유탄물을 형성시킨 자유공작용 합금류가 있다. 제품 가공시에 이 유탄물들이 가공방향으로 정렬되어 말단침식을 촉진할 수도 있다.

일반적 주의사항(Some General Comments)

설계문제와 함께 보통 논의될 수 있는 것들로는 재료선택과 공장수명에 비한 시설 투자의 경제성등이 있으나 앞으로의 재료선택 부분에서 다루기로 한다.

한 가지 지금 얘기할 수 있는 경제성 문제는 증산을 목적으로 공장이나 그 일부를 부식설계시에 설정한 한계 밖의 조건으로 조업하는 경우다. 흔한 예로는(부식의 관점에서) 바람직한 온도보다 약간 고온에서 조업하는 것을 들 수 있다. 장기적 안목에서 보아 명백한 것은 이런 조업은 현명하지 않은 것이라는 것이다.

각개의 경우는 그 자체의 특질로 판단해야지 선입견을 따르면 안 된다. 특히 주의를 기울일 곳은 정상으로부터 벗어 나는 부분들로, 증산하는 대신에 안전문

제를 일으킬 수도 있고 응력부식 균열이나 구멍부식에 의해 한 단위장치가 완전히 서버려 뜻밖의 실패를 볼 수도 있는 것이다. 불가피해서 공장의 한 단위를 원래의 설계조건 이상으로 운전하는 경우에는 전보다 자주 점검하고 예비 부품품들을 준비해두는 것이 현명한 것이다.

이 밖의 일반적 주의사항은 부식환경의 조절책에 대한 것으로 대개의 환경조절책(부식억제제 사용등)은 보다 저항력이 강한 재료로 대체하는 것에 비해 영속성이 낮 하므로 계속적 주의를 요한다는 것이다.

이렇게 생각하면 또 하나 중요한 사항이 있다. 부식에 영향을 줄 수 있는 변수들은 꼭 기록해야 한다는 것이다. 온도를 자주 기록하고 농도를 측정하고 등등. 정상적인 데에서 (예 : 공장시동 및 정지시의 정확한 순서 절차) 벗어난 것은 모두 꼬박꼬박 기록해 두어야 한다. 발생이 생겼을 때에 왜 탈이 났는가를 파악할 수 있으면 많은 돈과 시간을 절약할 수 있기 때문이다. 기록이 있으면 본인이나 다른 전문가들의 문제해결에 도움이 될 것이다.

마지막으로 공장설계라는 제목하에 생각할 수 있는 것은 공장 및 공장내 단위장치들의 위치다. 여기에 대해서는 선택의 여지가 없는 경우가 많으나 공사가 시작되기 전이라면 중요한 고려사항이 되어야 한다. 예를 들어 불수장으로 된 응축장치를 연산 회수탑으로부터 바람맞이에 설치하는 것은 응력부식균열의 제물로 만나는 셈이 될 수 있는 것이다.

## 문 헌

1. Fontana, M. G. and Greene, N. D., "Corrosion Engineering" McGraw-Hill, New York, 1967.
2. Uhlig, H. H., "Corrosion and Corrosion Control," Wiley, New York, 1963.
3. Pourbaix, M., "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions," Pergamon Press, New York, 1966.
4. Corrosion Under Heat Transfer. Papers presented at 1967 Symposium, Birmingham, England, *Brit. Corrosion J.*, **2**, 131-171(1967).
5. Corrosion of Joints in Construction Materials, 1966 Conference, London, England, *Brit. Corrosion J.*, **2**, 33-77(1967).
6. Sorell, G., Controlling Corrosion by Process Design, *Chem. Eng.*, July 29, 1968, pp.162-170.
7. Landrum, R. J., Designing for Corrosion Resistance, *Chem. Eng.*, Feb. 24, 1969, pp. 118-124; Mar. 24, 1969, pp. 172-180.
8. Groves, N. D., How To Design for Corrosion Resistance, *Machine Design*, Apr. 1, 1965.
9. Copson, H. R., Effects of Velocity on Corrosion, *Corrosion*, **16**, 86t-92t(1960).
10. Reid, W. T., Protecting Standby Equipment-Corrosion Control During Equipment Shutdown, *Mater. Protect.*, **6**, 42-44(1967).