

〈技術講座〉

400 계 스테인레스강의 내식성 (II)

장 현 구 역

Corrosion Resistance of the 400 Series Stainless Steels.

D. W. Mc Dowel, Jr, and C. R. Mayne

2) 부동태 및 보호피막

부식에 미치는 산소의 영향은 다양하며 복잡하다.

산소는 전자 수용체로서 작용하기 때문에 부식을 증가시킬 수 있다. 농도가 더욱 높으면 산소는 또한 부식을 감소시킬 수 있다. 산소나 질산과 같은 산화제는 그들 자신의 보이지 않는 보호 피막을 형성할 수 있으며 따라서 부식 작용을 감소시킨다.

이런 작용이 일어났을 때 금속은 부동태로 되었다고 한다. 어떤 활성금속이 부동태로 되면 귀금속과 같은 성격을 지니게 된다.

예를 들어 산소층이나 산화물 피막에 의하여 부동태로 된 철은 백금의 귀한 전위로 접근하여 부식에 견딘다.

이 사실은 쉽게 시험해 보일 수 있는 것이다. 철은 염산 중에서 활성이며 백금과 연결시켜 전위차를 측정하면 700mV 정도인 값을 갖는다. 철이 부동태로 되는 농질산 중에서 이와 같은 측정을 하면 철과 백금의 전위차는 약 300mV 값으로 떨어지는 것을 알 수 있다.

그렇지만 이 경우 철표면에 부동태를 가져오는 연약한 피막은 쉽게 파괴된다. 예를 들어 한조각의 철편이 질산 중에 담기면 철편은 부동태로 되어 이때 형성된 보호피막에 의하여 부식작용이 방지된다. 이와 같이 부동태화로 된 철을 황산중에 담으면 구리는 도금되지 않는다. 그러나 유리봉과 같은 것으로 표면을 가볍게 건드려 주어도 부동태 피막은 쉽게 파손되어 철은 다시 활성으로 되고, 피막이 파괴된 지점에 구리는 방사형으로 도금되어 나온다.

충격을 받은 지점은 활성지역으로 양극이 되고 주위 지역은 음극으로 된다. 음극에서의 환원작용은 부동태를 파괴하여 부식작용을 촉진하게 한다.

이런 형의 불안정한 부동태 피막은 분명, 부식에 대하여 철을 보호할 수 있는 방편을 마련해 줄 수 없다. 다행스럽게도 철에 크롬을 합금시키거나 크롬과 니켈을 함께 합금시켜 스테인레스강에서처럼 한층 더 안

정한 부동태를 얻을 수 있다. 크롬에 의하여 부동태와 내산화성이 얻어지는 기구(mechanism)는 완전히 이해되지 못하고 있으나 이에 대하여 여러가지 이론들이 전개되어 있다.

그중 한가지 이론에서는 스테인레스강이 부동태로 되는 이유를 크롬과 철 원자에 의한 전자 분담(electron sharing)에 의한다고 주장한다.

크롬이 철과 합금될 때 낮은 크롬농도의 합금은 붉은 질산에 용해하는데, 그것은 이 합금이 아연정도의 전극전위를 가져 활성금속처럼 거동하기 때문인 것으로 알려져 있다.

그러나 크롬 함량이 약 13.5%로 증가하면 이 합금은 특성이 현저하게 변하여, 붉은 질산에 더 이상 녹아 들어가지 않으며 그 전극전위도 은과 같은 수준이고, 따라서 그 특성은 부동태합금으로 다룰 수 있도록 변하게 된다.

그들이 내린 결론은 크롬 한개 원자는 다섯 개의 철 원자에 내식성을 부여할 수 있다는 것이다. 또한 산소의 존재는 전자의 공유를 파괴하여 염산에서처럼 부식을 일으킨다고 그들은 설명하였다. 또한 산소의 존재는 전자 공유의 파괴를 방지하므로 부동태나 내산화성을 증가시킨다고 얘기하였다.

1836년 Faraday는 철의 부동태를 제질상의 문제로 다루어 부식성 환경과의 반응을 방지하거나 늦추는 금속표면에 덮힌 보호피막과 관련시켜 보았다.

그의 이론은 질산과 같은 산화성 산은 철표면상에 그 이상의 침식으로 부터 下地金屬(Underlying metal)을 보호하는, 불안정한 산소층이나 산화물층을 형성한다는 것이다.

스테인레스강의 개발과 더불어 이 산화피막설은 스테인레스강의 부동태와 현상학적인 내식성을 설명하는 데 쓰여왔다.

이 설에 의하면 스테인레스강은 미세적인 양고, 치밀하며, 단단하게 밀착한 산화크롬피막으로 덮인 下地金

속의 침식을 막는다. 여러 연구자들은 이들 피막을 분리하였다고 주장하였다.

부동태의 수소용체설(hydrogen solution theory)은 여러 연구자에 의하여 제안 전개되었다. 이 이론에 의하면 수소기체가 표면원자층에 들어가면 금속적자는 성격이 변하여 금속원자가 쉽게 녹아난다는 것이다. 만일 수소가 산소에 의하여 다시 제거된다면 금속은 부동태로 된다.

Fontana 와 Beck 는 스텐레스강은 물리적으로 흡착된 가스때문에 부동태로 된다고 했다. 이 가스는 실온 중에서 진공처리에 의하여, 그리고 화학적으로 흡착된 가스를 제거시키는데 충분치 않은 압력하에서도, 제거될 수 있으며 안정한 크롬산화물을 파괴하지 않는다.

다른 이론들도 또한 제안되었지만 이들을 논의할 만한 충분한 지면이 허락되지 않아 생략하기로 한다.

다만 스텐레스강의 부동태가 산화피막, 산소층 또는 다른 어떤 원인에 의한 간에 이들 모든 이론들로부터 분명한 사실은 산화성 조건이 부동태와 최대내식성을 얻는데 도움을 준다는 점이다.

크롬을 함유하고있는 합금철이 활성인가 또는 부동태인가는 그들의 조성과 환경에 달려있다. 예를 들어 3% 크롬을 함유하는 철은 황산용액에서 활성이며 구리를 도금해 낸다. 6% 크롬인 경우에는 도금 석출은 더욱 느리게 진행되지만 아직도 활성을 보인다. 12%나 그 이상의 크롬을 함유한 합금은 근본적으로 부동태를 지니므로 여러 환경에서 부식에 견딜 것이다.

더 높은 크롬 및 크롬·니켈 강은 역시 황산용액에서 뿐만 아니라 다른 많은 매체 중에서 부동태이다. 이 부동태는 확실히 본질적인 것이며 이 시편을 유리봉으로 건드려 주어도 파괴되지 않는다.

반면, 보통 강을 진한 질산에서 부동태로 만든 후 유리봉으로 건드려 주면 부동태는 파괴된다.

철에서 발생하는 것 처럼 부동태로부터 활성으로의 변화는 또한 스텐레스강의 전위를 변하게 만든다. 완전히 활성인 상태에서 스텐레스강은 철과 마찬가지로 작용하며 대략 철과 동일한 전위를 갖는다.

18-8 스텐레스강 한 조각과 탄소강 한 조각을 가까운 황산 중에 넣고 연결하여 밀리볼트메타로 전위차를 측정하면 처음에는 스텐레스강은 부동태이기 때문에 탄소강보다 700mV 더 귀한 전위를 보인다. 만일 회로를 그대로 두고 탄소강을 스텐레스강과 직접 접촉시키면 스텐레스강 표면에서 음극반응이 진행되어 수

소가 발생할 것이며 이 수소는 스텐레스강의 귀한 전위와 부동태의 원인인 보호피막을 파괴할 것이다. 다시 탄소강을 스텐레스강에서 떼면 둘사이의 전위차는 영으로 떨어진다. 탄소강을 부동태인 다른 스텐레스강 조각으로 교환시켜 주면 활성인 스텐레스강과 부동태인 스텐레스강 사이의 전위차는 먼저 보았던 탄소강과 부동태인 스텐레스강 사이의 전위차와 동일하게 될 것이다.

활성화된 스텐레스강을 다시 부동태로 만들어 주는데는 강한 산화제로서 강력한 부동태화 효과를 갖는 질산을 액중에 넣어 주면 된다. 질산이 첨가되면 수소의 방출은 끝나고 전위차는 영으로 떨어진다.

만일 한 조각의 백금을 부동태인 스텐레스강과 치환시켜 주면 전위차는 아주 작게됨을 관측할 수 있다. 이것은 한때 활성이었던 스텐레스강이 부동태를 다시 얻어서 귀한 전위상태로 된 것을 보이는 것이다.

전위의 차는 동일한 스텐레스강시편상에 활성인 지역과 부동태인 지역이 공존할 때에도 발생할 것이다. 예를 들어 스텐레스강의 부동태는 산화물이나 산소의 보호피막에 의존하며 눈에 보이지는 않지만 실제로 존재하는 것으로 이 피막을 유지하기 위하여는 산소가 충분히 공급되어야 한다.

표면상의 어떤 점에서 산소공급이 이 피막을 유지하기에 불충분하다면, 예를 들어 국부적인 차폐의 결과에서 처럼, 국부적으로 활성인 좁은 지역이 형성되어 주위 부동태 지역과 큰 전위차를 발생하게 될 것이다. 그 결과로 좁은 활성양극지역과 주위의 넓은 부동태 음극지역 사이에 유전작용(流電作用; Galvanic Action)이 일어나 부식작용은 좁은 활성면적에 집중화되는 것이다.

이와 같은 소위 활성-부동태 전지의 발생은 부동태가 파괴되는 틈(crevice)에서 부식을 일으킨다. 스텐레스강 시편에 고무밴드를 둘러 묶은 소금물과 3가철화철 용액에 담가 놓았을 때 보호피막의 파괴와 더불어 활성-불활성 전지의 형성에 의하여 생기는 손상을 보고 잘 알 수 있다. 용액에 넣어 한 동안 지나면 고무밴드가 스텐레스강의 가장자리를 찢라며어 들어가는 것을 눈여겨 볼 수 있을 것이다. 산소는 고무밴드의 밑으로 쉽게 뚫고 들어갈 수 없다. 이로 인한 산소의 고갈은 부동태를 파괴하여 고무밴드의 밑에 활성면적 또는 양극을 생성하고 반면에 나머지 표면은 용존산소에 자유롭게 노출되어 있으므로 음극으로 작용한다.

분명히 스텐레스강이나, 내식성이 보호성 산화피막에

이존하는 다른 금속 또는 합금에 있어서는 산소의 침투를 불가능하게 하는 침전물이나 틈을 피하는 것이 필요하다. 한가지 예로서 해수중에서 시편으로 사용되는 스테인레스강관을 고정하는 절연물로서 플라스틱 와사를 사용한 경우에 틈이 얼마나 해롭게 작용하는가를 생각해 보자. 시험후에 고정 와사를 제거하면 와사 밑의 틈부분에 심한 부식이 발생한 것을 볼 수 있을 것이다. 활성—부동태 전지로 인한 이와 유사한 틈부식이 여러가지 종류의 침전물, 해수중에서 금속에 붙어 자라는 조개류와 같은 부착물 밑에서 일어날 수 있다.

스테인레스강의 가장 유용한 내식성을 충분히 발휘하기 위하여는 산소를 차폐시키는 침전물이 생기지 않게 해주는 것이 지극히 중요하다는 사실을 이를 통하여 쉽게 알 수 있다.

3. 부식 시험

특정 매개물이나 환경에서 부식에 견디는 재료를 선정하는 때에는 선정지침으로서 세가지 주 정보원(Sources of information)이 있다.

첫째 단시간의 연구실 시험, 둘째 문제되는 매개물 중에서 시편의 노출시험, 셋째 실제사용시에 있어서의 지난 동안의 성능에 대한 이력(case histories)이다.

단시간 연구실 시험은 종종 제품이 사용되는 것보다 높은 용도와 진한 농도 하에서 수행되며 재료들은 종종 강도를 기준으로 평가된다. 때때로 이 시험은 다루어질 용액 이외의 매개물에서 이루어지기도 한다. 가장 자주 사용되는 시험으로 Huey Test가 있는데 그것은 재료를 65% 질산 비등용액에서 48시간 동안 다섯번 시험하면서 각 시험기간 동안의 단위 면적당 중량감소를 측정하는 것이다. 이 밖에도 또한 연구실 시험법이 여러가지 사용되고 있다. 그러나 모든 이들 시험법은 시험기간이 경과할 수록 신빙도가 떨어지게 되는 데 그 이유는 농도와 온도가 부식에 중요한 요인이며 이들 농도나 온도의 변화는 여러가지 재료들의 부식속도에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 종종 실험실에서 준비한 용액 중에는 존재하지 않은 소량의 오염물질이 부식 속도에 크게 영향을 줄 수 있다.

문제시되고 있는 실제 매체나 환경중에 시편을 노출시켜 얻은 결과들은 단시간 연구실시험에서 얻은 자료보다 더욱 더 믿을 수 있다. 노출시간은 몇 일 동안으로부터 일년 정도나 또는 더 긴 동안 까지 이룰 수 있다. 물론 이방법은 고려중인 매체가 주위에 존재해야만 사용될 수 있는 것이다. 이런 문제와 상관있는

제품생산자나 그 이외의 사람들은 이와같은 시험을 많이 하였으며 적절한 재료선정에 항상 도움을 주고있다. 여러가지 환경하에서 모든 금속들의 내식성에 관한 가장 완전한 정보는 아마도 Internationa Nickel Co.의 개발연구부 부식담당분야에서 철하여 갖고있다. 이 철(file)들은 여러가지 매체중에서 수 많은 노출시험경과 뿐만아니라 실험실자료와 다른 연구자들에 의하여 출판된 결과들도 포함하고있다. 이 자료들은 니켈을 함유하고 있진 말건 상관없이 어떤 특정환경에 적용하는데 가장 좋은 재료를 선정하는데 상당히 도움을 주곤 한다.

물론 금속이나 합금이 성능이 보증된 후에는 그 환경에 대하여 채용할 수 있으며 다른 유사한 환경에 대하여서도 추천할 수 있다. 부식자료는 통상 단위 노출면적에 대한 금속 중량손실을 기준으로 하여 보고되고 있다. 가장 일반적인 방법이 IPY (inches penetration per years), IPM (inches penetration per month) 및 MDD (miligrams per square decimeter per day) 단위이다. MDD를 IPY로 고치는 경우 다음식을 사용하면 된다.

$$MDD \times \frac{0.001437}{d} = IPY$$

여기서 d 는 금속의 밀도를 g/cm^3 로 나타낸 값이다. Table 3은 여러 금속 및 합금에 대하여 사용되는 이들의 상관인자를 보인 것이다.

여기서 볼 수 있는 것처럼 부식손실을 보고하는 방법들은 손실이 모든 노출표면에서 균일하게 일어난다고 가정하는 것이다. 앞에서 설명한 것처럼 스테인레스강은 크롬산화물이나 산소층에 의하여 부식에 견딘다. 이 층이 어떤 한 점에서 파괴되면 그 점은 주위의 넓은 음극면적에 대하여 양극으로 되고 빠른 국부침식이 발생하게 된다.

다음에 보기를 하나 들어 보자. 서로 절연된 여러가지 합금들의 시편이 설치된 스푼(spool)을 단일효과를 측정하는 증발장치에 넣어 30일 동안 노출시켜준다. 물은 펄톤, 아미노산, 젤라틴, 소금, 갈슘 및 마그네슘염을 함유하고 있고 황산으로 pH=5.0이 되게 산성으로 만든 것이다. 평균온도는 185°F (165~210°F) 이고 약간의 통기(aeration)를 시켜준다. 430형 스테인레스강은 다만 0.0013IPY의 부식손실을 보이나 pit가 생겨 0.050인치두께의 시편을 완전히 관통한다. 이 공식(pitting)은 금속의 평균손실로 부식율을 측정할 때에 큰 부식침식이 없어도 발생할 수 있다. 그러므로 다만 평균금속손실을 보이는 자료는 금속의 성능을 판단하는데 있어서는 최종 단안을 내리는 자료로

Table 3 Relationship Between Corrosion Rate in Milligrams per Square Decimeter Per Day (MDD) and Penetration in Inches and Centimeters Per Year (IPY)

Material	Density per gm. cu. cm.	Penetration Equivalent to a Corrosion Rate of 1 MDD in	
		IPY	cm. per yr.
Aluminum 2S	2.72	0.000528	0.001346
Ambrac	8.86	0.000162	0.000412
Brass (Admiralty).....	8.54	0.000168	0.000427
Brass (Red)	8.75	0.000164	0.000416
Brass (Yellow).....	8.47	0.000170	0.000432
Bronze (Phosphor, 5% Sn)	8.86	0.000162	0.000412
Bronze (Silicon)	8.54	0.000168	0.000427
Bronze, cast (85-5-5-5).....	8.70	0.000165	0.000419
Cast Iron.....	7.20	0.000200	0.000508
Copper.....	8.92	0.000161	0.000409
Copper-Nickel Alloy (70:30).....	8.95	0.000161	0.000409
Hastelloy A	8.80	0.000163	0.000414
Hastelloy B.....	9.24	0.000155	0.000394
Hastelloy C	8.94	0.000161	0.000409
Inconel	8.51	0.000169	0.000429
Iron-silicon Alloy.....	7.0	0.000205	0.000521
Lead (chemical)	11.35	0.000127	0.000323
Monel	8.84	0.000163	0.000414
Nickel	8.89	0.000162	0.000412
Nickel Silver (18% Ni).....	8.75	0.000164	0.000417
Ni-Resist.....	7.48	0.000192	0.000488
Silver	10.50	0.000137	0.000348
Stainless Steel Type 304.....	7.92	0.000181	0.000462
Stainless Steel Type 430.....	7.61	0.000189	0.000480
Steel (mild)	7.86	0.000183	0.000465
Tin	7.29	0.000197	0.000500
Zinc.....	7.15	0.000201	0.000510

서 항상 들어맞지는 않는다는 것을 명심해야 된다.

4. 내식성

이상에서 얘기한 것을 염두에 두고 개별 형의 스텐레스강의 내식성을 검토해 보기로한다. 편리를 위하여 다음 세가지로 분류하여 볼 수 있다.

(1) 12% 크롬 그룹에 속하는 강의 내식성

(2) 17% 크롬그룹의 내식성, 여기엔 또한 더 높은 크롬을 함유한 형태도 포함된다.

(3) 오스텐나이트 스텐레스강의 내식성, 이 강은 내식성이 월등하게 좋기때문에 다음 장에서 별도로 다루기로 한다.

1) 12% 크롬형의 내식성

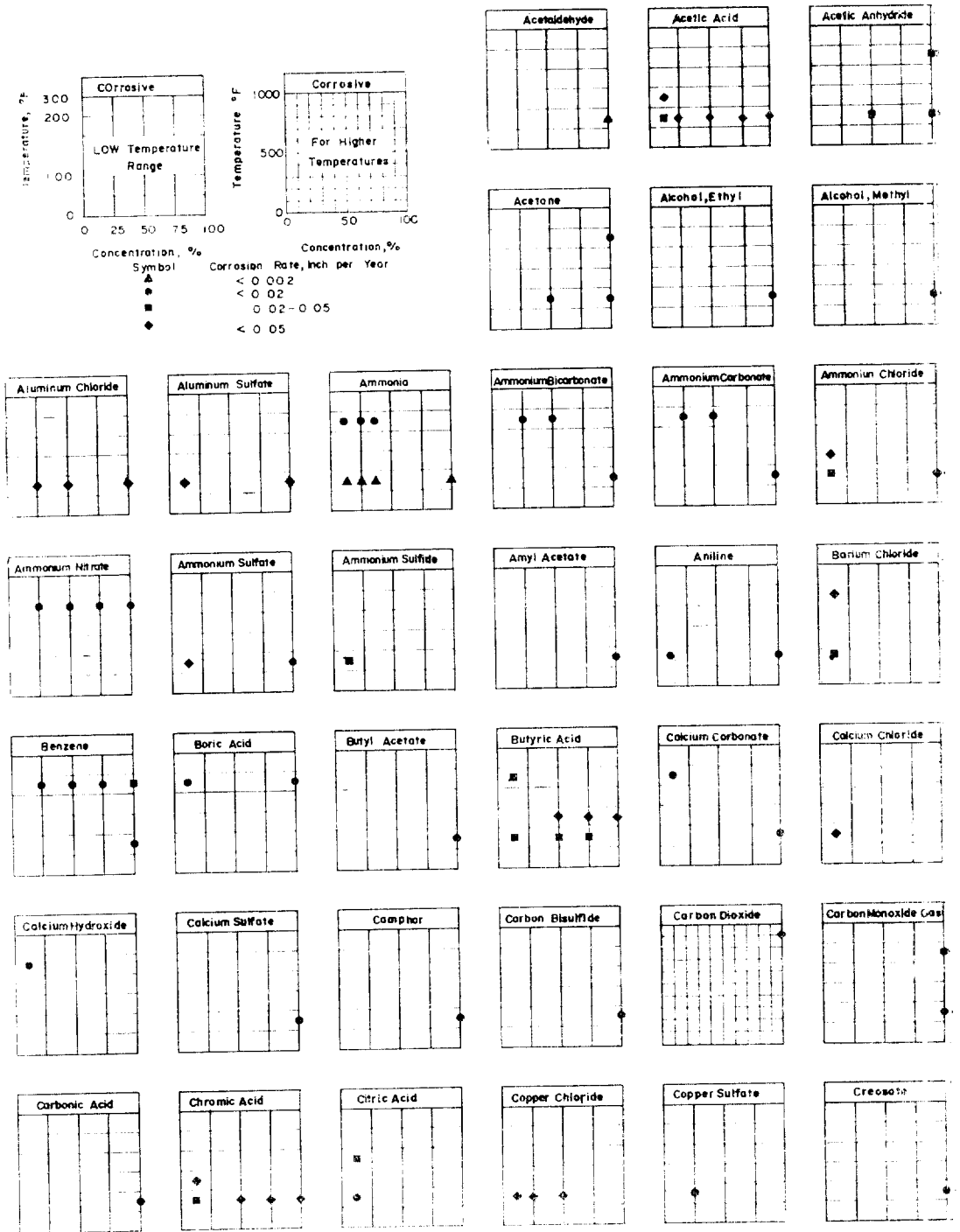
12% 크롬형은 스텐레스강 중에서 가장 싼 종류이며

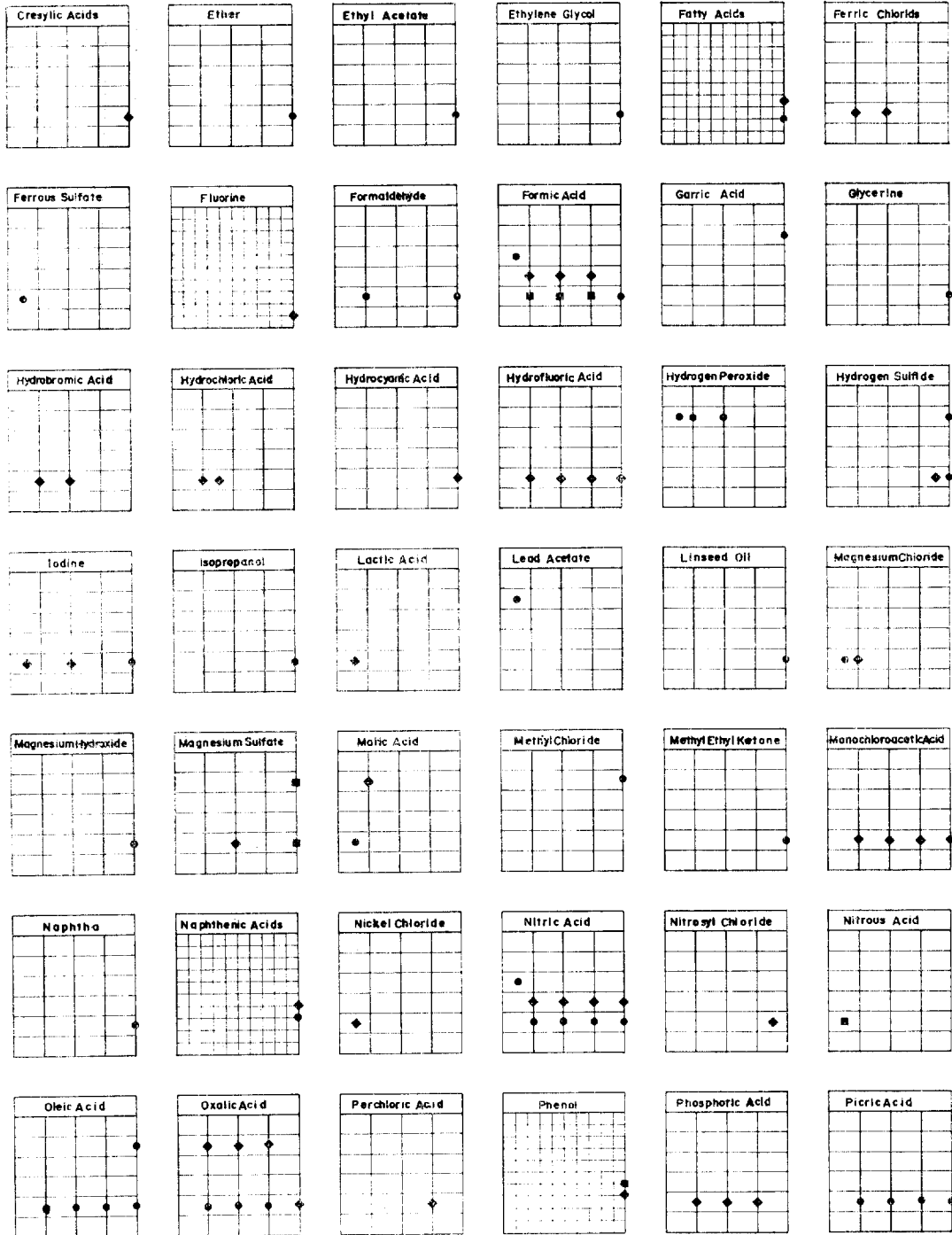
440A, B 및 C를 제외하고는 대부분 말덴사이트 형이 포함된다. 기계적 성질과 내식성은 열처리에 영향을 받는다. 경화가가능한 스텐레스강은 경화된 상태에 있을 때 가장 좋은 내식성을 갖는다. 그 이유를 간단히 설명하면 다음과 같다. 크롬은 탄소와 친화력이 크기 때문에 결합하여 크롬탄화물(Cr₂₃C₆)을 형성한다. 크롬탄화물은 고용체상태로 있는 크롬보다도 재료를 더 동태화시키는 경향을 감소시킨다.

소둔된 상태에 있을 때 경화된 경우보다 더 많은 크롬탄화물을 갖는데 그 이유는 경화된 상태하에서는 대부분의 탄소가 철에 묶여 탄화철(Fe₃C)을 형성하기 때문이다. 그리하여 재료의 내식성은 소둔시켰을 때보다 경화시켰을 때 더 좋게 되는 것이다.

410형 스텐레스강을 제외하고는 모든 말덴사이트형

Table 4-Corrosion Resistance of 12% Chromium Stainless Steels





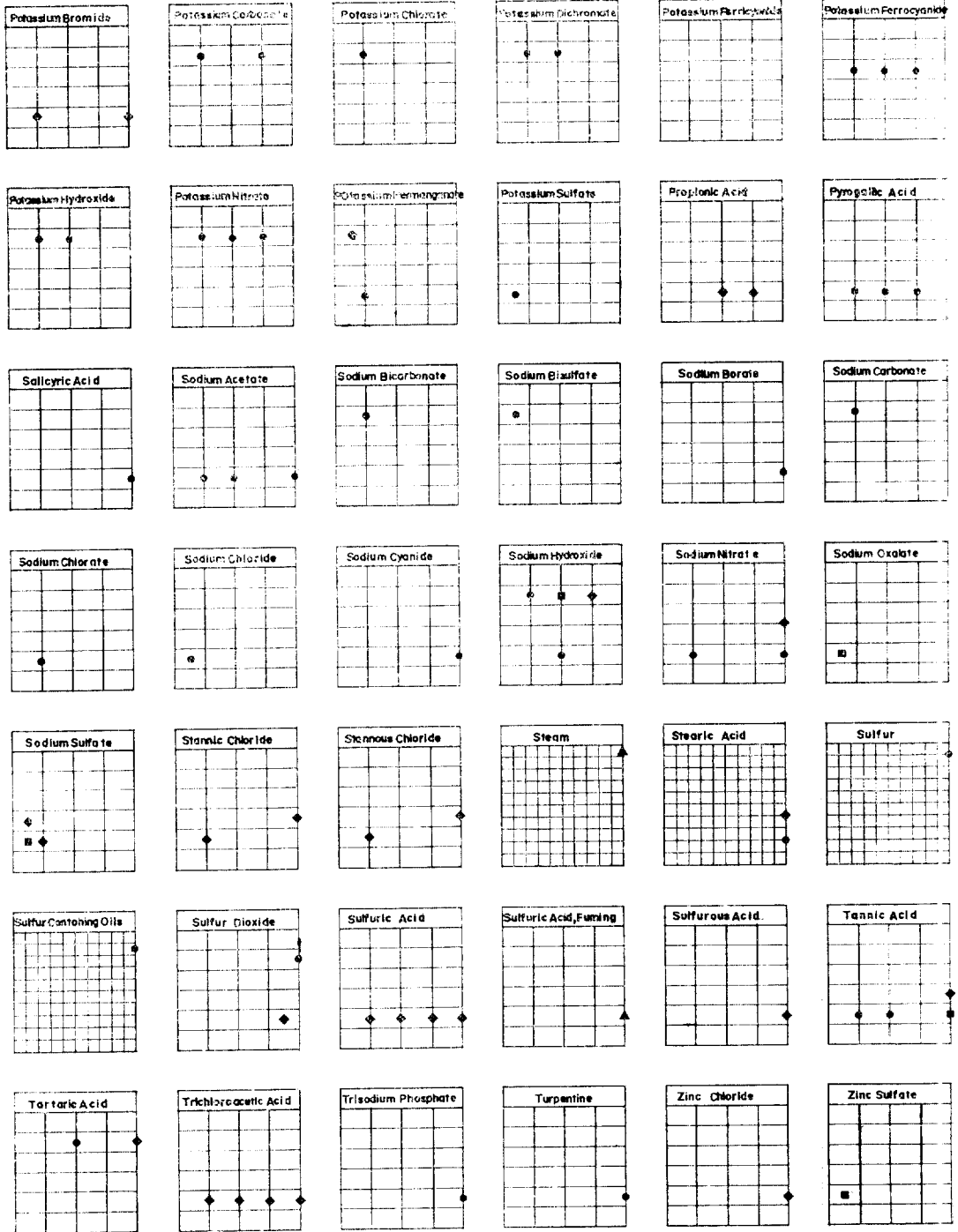
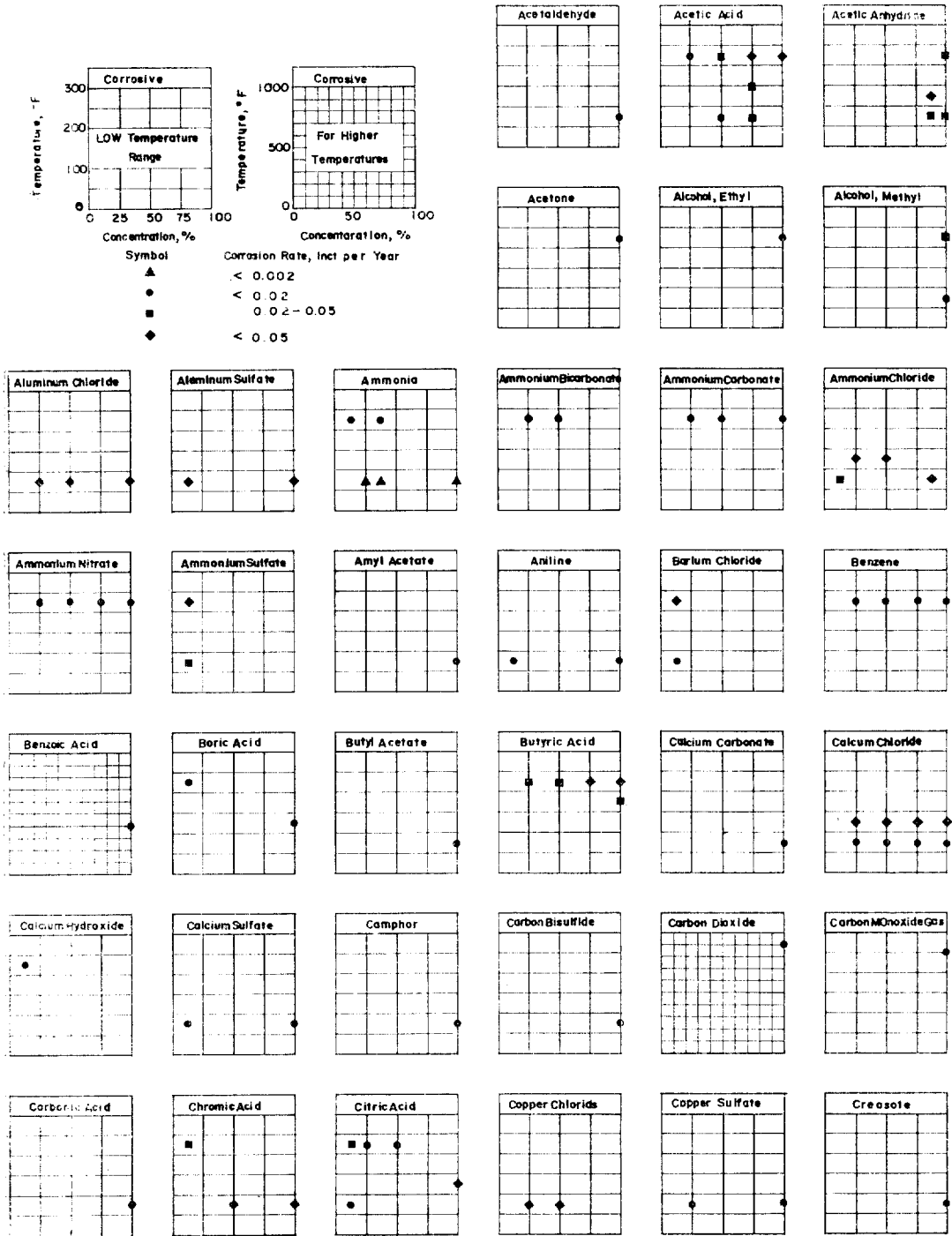
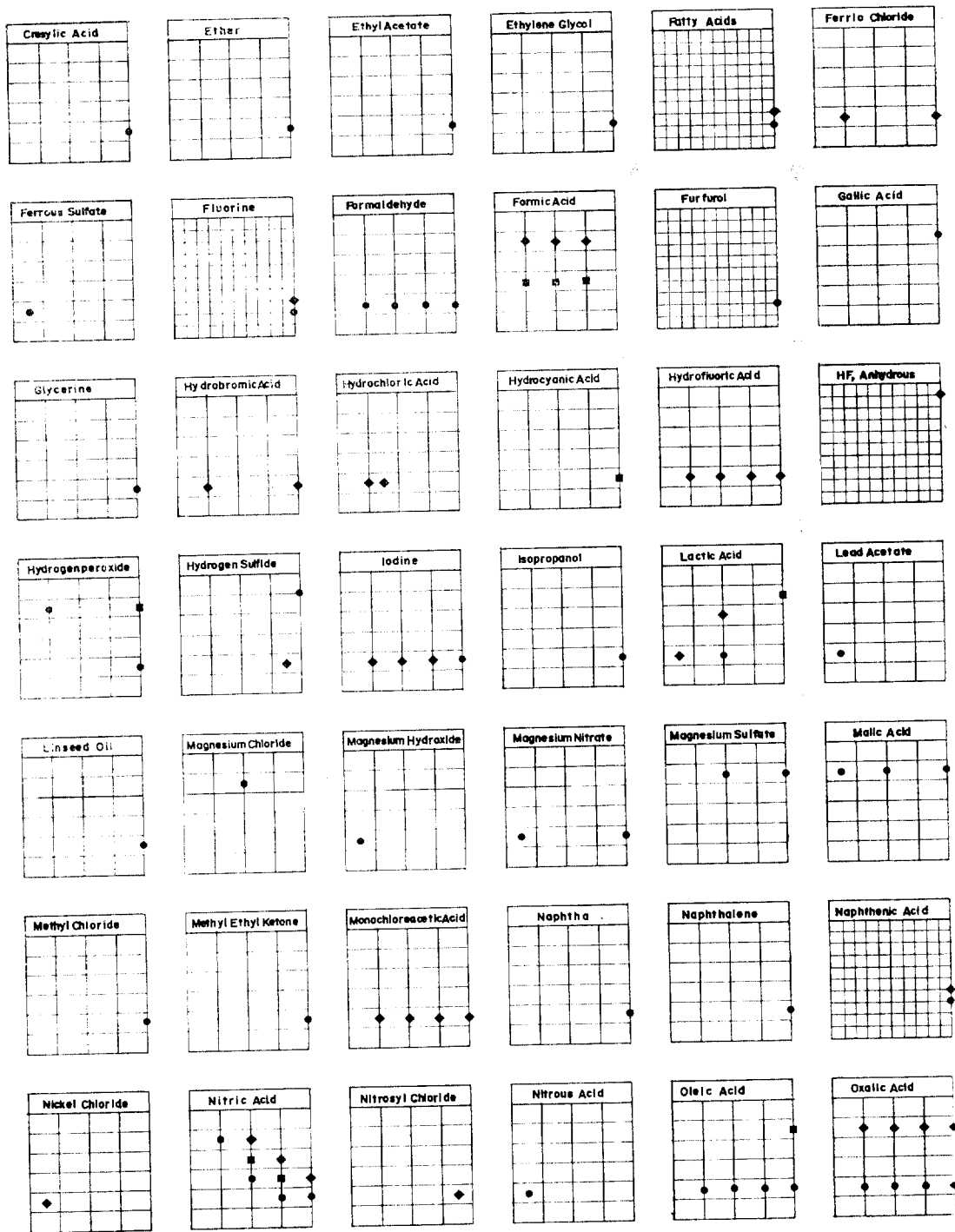
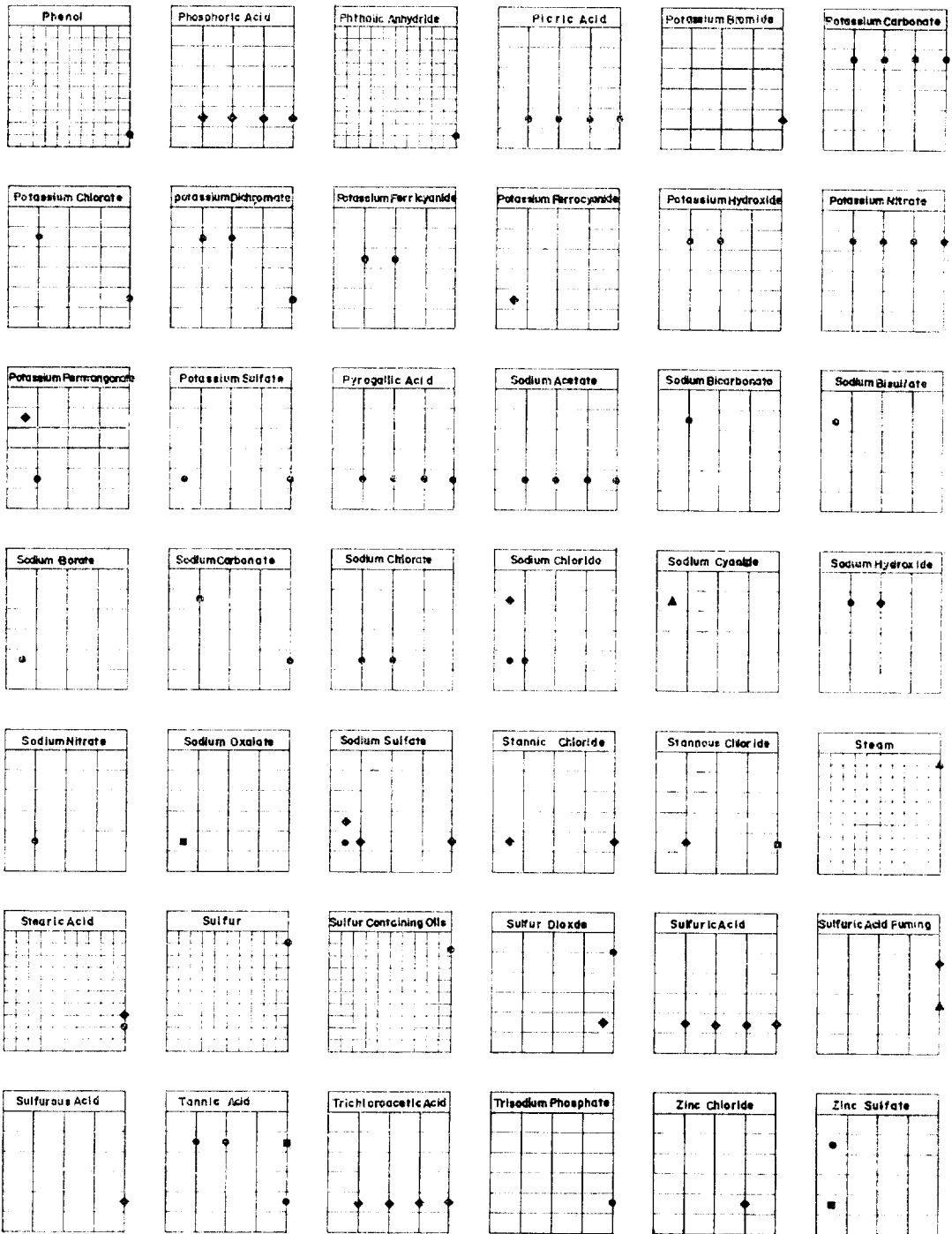


Table 5-Corrosion Resistance of 17% Chromium Stainless Steels







스텐레스강은 경화된 상태에서 사용되며, 탄소강보다 우월한 내식성이 결정적인 요인이라 하더라도 이들 중에서 실제로 어떤 재료를 사용할 것인지를 결정할 때에는 열처리에 의하여 얻을 수 있는 기계적 성질의 대소에 따르게 된다. 410 형은 경화된 상태뿐만 아니라 소둔된 상태에서도 사용된다.

12% 크롬강은 부동태의 관점에서는 경제농도에 속하는 강이며 보통의 분위기에 노출되면 처음부터 약간의 녹을 형성하므로 미관의 입장에서는 바람직스럽지 않지만 이런 점이 일반적으로 그들의 용도를 감소시키진 않는다. 소둔상태의 410 형 스텐레스강은 화학공정의 bubble caps, trays, heat exchangers, linings, screens, troughs, flumes 등과 공장건물의 지붕과 같은 곳에 사용된다. 다른 말텐사이트 스텐레스강과 같이 410 형은 공기중에서 경화한다. 그래서 용접후에는 응력제 거처리가 필요하다. 만일 이것이 불가능하면 405 형을 사용하는데 이 재료는 급냉에 의하여 크게 경화되지 않는다. 그 내식성은 410 형과 유사하다.

440A, B 및 C 형은 모든 스텐레스강 중에서 가장 경화가 잘 되는 재료이며 때문에 어느 정도 내식성을 필요로 하며 아주 높은 경도를 요구하는 경우에 사용

된다. 이들 강은 다른 말텐사이트형 강에서 보았던 것과 같은 이유로 경화된 상태하에서 가장 좋은 내식성을 갖는다. 그 내식성은 410 형과 430 형의 사이에 있다고 볼 수 있다.

Table 4는 12% 크롬 스텐레스강이 여러가지 매체중에서 보이는 내식성을 정리한 것이다.

2) 17% 크롬 스텐레스강의 내식성

17% 크롬 스텐레스강은 12% 크롬 스텐레스강보다 더 좋은 내식성을 갖지만 오스테나이트 크롬-니켈형 보다 일반적으로 열등하다. 440A, B 및 C를 제외하고 이들은 모두 페라이트형으로 열처리에 의하여 경화될 수 없는 강이다.

이들은 냉간가공에 의하여 서서히 경화하며 항상 소둔된 상태에서 사용된다.

446 형은 주로 고온용으로 사용되는데 그 이유는 산화 스케일에 견디는 좋은 특성 때문이다. 이것은 특히 높은 유황함유 폐기 가스나 유황함량이 높은 분위기에서 유용하다. 실온중에서는 거의 사용되지 않으므로 여기서 이만 줄이기로 한다. Table 5는 많은 매체들에서 17% 크롬강의 내식성을 보인 것이다.

REFERENCES ON CORROSION AND ITS PREVENTION

Following is a list of references, dealing with corrosion and its prevention, which may be quite when considering problems involving corrosion. This list of references is taken from the book "CORROSION IN ACTION."

BOOKS

I In English

1. Corrosion Resistance of Metals and Alloys-R. J. McKay and R. Worthington-American Chemical Society Monograph No. 71. Published by Reinhold Publishing Co., New York, New York, 1936.
2. Protective Films on Metals-E. S. Hedges, published by Chapman and Hall, London, 1937.
3. Soil Corrosion and Pipe Line Protection-Scott Ewing. Published by American Gas Association, New York, New York, 1938.
4. The Corrosion of Iron and Steel-J. C. Hudson, Published by Chapman and Hall, London, 1940.
5. Metallic Corrosion Passivity and Protection-U. R. Evans, published by Edward Arnold and Co., London, 1946. Longmans, Green and Co., New York.
6. The Corrosion Handbook, edited by H. H. Uhlig, sponsored by The Electrochemical Society, Inc., published by John Wiley and Sons, Inc., New York, New York, U. S. A. -1948.
7. Corrosion-Causes and Prevention. Third Edition, F. N. Speller. Published by McGraw-Hill Book Company, New York, 1951.
8. Corrosion Testing Procedures-F. A. Champion, published by John Wiley and Sons, Inc., New York, New York, 1952.
9. Protective Coatings for Metals-R. M. Burns and W. W. Bradley-American Chemical Society, Monograph No. 129. Published by Reinhold Publishing Co., New York, 1955.

II In German

1. Die Korrosion Metallischer Werkstoffe—O. Bauer, O. Krohnke and G. Masing. Published by S. Hirzel, Leipzig. 3 volumes—1936, 1938, 1940.
2. Zunderfeste Legierungen—W. Hessenbruck. Julius Springer, Berlin, 1940. (Reprinted by Edwards Bros., Inc.)
3. Mesung und Verhütung der Metallkorrosion—F. Todt. Published by Walter de Gruyter and Co., Berlin, 1941. Reprinted by Edwards Bros., Inc., Ann Arbor, Michigan.
4. Die Zersetzungserscheinungen der Metalle—G. Schikorr. Published by J. A. Barth, Leipzig, 1943—reprinted by Edwards Bros., Inc., Ann Arbor, Michigan.

III In Spanish

1. El Problema de La Corrosion Metalica—E. Jimeno. Published by Inst. Espanol de Oceanografia, Madrid, 1947.

PUBLISHED ARTICLES

1. Costs of Corrosion

- a. Rohrman, F. A., "Economic Aspects of Corrosion Problems." *Corrosion*, 3, 67 (1947).
- b. Jordan, Harry E., "Corrosion Costs to the Water Industry," *Corrosion*, 3, 367 (1947).
- c. Anderson H. H., "Corrosion Costs—Beader Report," *Business Week*, May 24, 1947, #925, 37-38.
- d. Miller, M. C., "Cutting Corrosion Costs—The Billion Dollar Side Show," *American Gas Association Monthly*, 31, #9, pp 28-29, 52 (1949).
- e. Stephenson, J. F., "Costs and Savings Effected by Cathodic Protection for a Short Section of Line," *Oil Gas J.*, 49, No. 20, pp 240-241 (1950), September 21.
- f. Wilson, R. B., "Management's Attitude Toward a Corrosion Control Program," *Gas Age*, 106, November 9, 1950, #10.
- g. Uhlig, H. H., "Costs of Corrosion to the United States," *Proc. U.N. Scient. Conf. on Conservation and Utilization of Resources*, Vol. II, pp. 213-218 (1951).
- h. Vernon, W. K. J., "The Costs of Corrosion and of its Control," *Proc. U.N. Scient. Conf. on Conservation and Utilization of Resources*, Vol. II, pp. 218-222 (1951).
- i. Mitchell, F. K., "Control of Corrosion Damage to Rolling Stock Through Proper Design and Maintenance," *Corrosion*, 7, 269(1951).
- j. Crane, T. S., "Corrosion Problems of the Railroad" *Corrosion*, 8, 141-151 (1952).

II Tarnishing

- a. Tamann, G., and Koster, W., "Velocity of Oxygen, Hydrogen Sulfide and Halogens on Metals," *Z. Anorg. Allgem. Chem.*, 123, 216 (1922).
- b. Pilling, N. B., and Bedworth, R. E., "The Oxidation of Metals at High Temperatures," *J. Inst. Metals*, 29, 534 (1923).
- c. Vernon, W. H. J., "First (experimental) Report to the Atmospheric Corrosion Committee (British Non-Ferrous Metals Research Assn.)," *Trans. Faraday Soc.*, 19, 839-900 (1923-1924).
- d. Vernon, W. H. J., "Second (experimental) Report to the Atmospheric Corrosion Committee (British Non-Ferrous Metals Research Assn.)," *Trans. Faraday Soc.*, 23, 113-183 (1927).
- e. Vernon, W. H. J., and Whitby, L., "The Open-Air Corrosion of Copper, A Chemical Study of the Surface Patina," *J. Inst. Metals*, 42, 181 (1929).
- f. Vernon, W. H. J., and Whitby, L., "The Open-Air Corrosion of Copper, Part II—The Mineralogical Relati-

- onship of Corrosion Products," J. Inst. Metals, 44, 389 (1930).
- g. Vernon, W.H.J., "Laboratory Study of the Atmospheric Corrosion of Metals, Part I—Corrosion of Copper in Certain Synthetic Atmospheres. with Particular Reference to the Influence of Sulfur Dioxide in Air of Various Relative Humidities," Trans. Faraday Soc., 27, 255-77, 582 (1931) h. Vernon, W.H.J., "The Fogging of Nickel," J. Inst. Metals, 48, 121-145 (1932).
- i. Vernon, W.H.J., "The Open-Air Corrosion of Copper, Part III—Artificial Production of Green Patina," J. Inst. Metals, 49, 153-166 (1932).
- j. Wagner, C., "The Mechanism of the Movement of Ions and Electrons in Solids and the Interpretation of Reactions Between Solids," Trans. Faraday Soc., 34, 851 (1938).
- k. Vernon, W.H.J., Akeroyd, E.I., and Stroud, E.G., "The Direct Oxidation to Zinc," J. Inst. Metals, 65, 301 (1939).
- l. Vernon, W.H.J., "The Corrosion of Metals in Air," Chemistry and Industry, 21, 314-318 (1943).
- m. Evans, U.R., "Mechanism of Oxidation and Tarnishing," Trans. Electrochem. Soc., 91, 547 (1947). n. Simmons, A.L., "Tarnishing of Nickel-Silver," Metal Progress, 58, September, 1950, 23, pp. 345-347.