



[요약문]

산업의 고도화에 따라 산업 기기의 사용 환경이 가혹해지고 있어 극한의 부식 환경에서 사용될 수 있는 다양한 합금개발이 요구된다. 타이타늄 합금은 다른 금속 소재에 비해 뛰어난 내식성을 가지고 있어 석유화학·해양·발전용 소재로 활용되고 있으며 그 적용범위가 점차 확대되고 있다. 특히, 고농도·고온의 환경조건에서 내식성이 우수하고, 기존의 합금보다 경제성이 뛰어난 타이타늄합금을 위한 연구개발이 이루어지고 있다. 본 고에서는 타이타늄 합금의 내식특성·응용 현황과 최근 합금개발관련 연구동향에 대해 기술하였다.

1. 서론

인류의 문명과 산업의 발전에 금속재료기술이 큰 역할을 한 것은 분명한 사실이나 금속소재의 부식이 인류에 준 피해도 막대하다. 부식으로 인한 직접적인 경제적 손실은 기준점인 무부식(zero corrosion) 상태를 설정하는 것이 어려우나 일반적으로 GDP의 3~5%로 보고되고 있다. 미국의 경우 1998년 한 해 동안의 부식비용(corrosion cost)은 276억 달러에 이르고, 그 해 미국 GDP의 3.1%로 평가되었다^[1,2]. 중국은 2002년 재료부식으로 초래된 경제적 손실이 약 5000억 위엔(당해 연도 중국 GDP의 5%)으로 보고되었다^[3]. 또한, 조업중단, 제품손실, 효율저하 및 과설계(over design)를 포함한 간접적인 경제적 손실까지 포함하면 더욱 많은 경제적 손실이 발생하는 것으로 알려져 있다.

조선/해양, 철강, 석유화학, 자동차, 발전산업 등 중공업 위주의 산업발전을 유도해온 우리나라는 부식으로 인한 사고가 빈번하게 일어나 인명피해가 발생하는 등 매우 심각한 문제가 되고 있으며, 산업의 고도화에 따라 극한의 부식 환경에 노출되는 빈도가 증가하고 있다. 따라서 방식기술의 개발 및 초내식 소재의 개발과 함께 사용환경에 적절한 소재의 적용 및 개발이 요구된다.

타이타늄 및 타이타늄합금은 우수한 내식성과 다른 금속소재에 비하여 가벼우면서도 높은 강도로 인하여 다양한 부식환경에 적용하는 사례가 증가하고 있다. 타이타늄의 내식, 경량, 고비강도 특성을 활용하여 미국에서는 항공우주용 부품 및 스포츠 레저용 소재로 활용되고 있고, 일본에서는 석유화학산업용·에너지 산업용·생체용·내해수용 소재로 활용되고 있다^[4]. 특히, 공식, 틸부식 및 응력부식균열에 대한 저항성이 커서 제열설비의 열교환기용 튜브에 많이 적용되고 있다^[5]. 타이타늄의 뛰어난 내식성은 표면에 형성된 TiO_2 산화피막의 화학적 안정성에 기인한다. 산화피막이 안정하게 존재하는 환경에서는 우수한 내식성을 나타내는데, 특히 해수분위기에 대해서는 다른 금속재료에 비하여 균일부식이나 공식 등에 대하여 우수한 내식성을 나타내므로 화력발전소 및 원자력발전소의 복수기, 해수담수화 장치의 brine heater 등에 사용되고 있다. 그러나 순수 타이타늄은 스테인레스강과 마찬가지로 고온 고농도의 염화물 환경에서는 틸부식이 발생하기 쉽고 염산이나 황산 등의 비 산화성 용액중에서는 활성용해를 일으켜 심한 부식이 발생한다. 본 고에서는 내식성이 우수한 소재로 알려져 있는 타이타늄의 내식환경에서의 응용 현황 및 특성 등에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

2. 타이타늄의 부식 특성 및 연구 동향

금속재료의 부식은 고온환경에 기인한 고온산화부식, 응력작용에 의한 응력부식, 입계반응에 의한 입계부식, 화학적인 각종 산(acid)에 의한 산부식 및 해수에 의한 해수부식 등이 있다. 이러한 각종 부식적인 요소를 제거해서 내식성을 향상시키기 위해서는 해당 재료의 양극 활성도를 감소시키고 부동태화 되어야 한다. 이와 같은 부식환경에 저항성이 높은 피막 형성 및 재료의 물성을 가지고 있는 대표적인 재료로 타이타늄합금, 니켈합금 및 스테인레스강 등을 들 수 있다. 다양한 내식분위기에서의 타이타늄과 경제소재의 내식성을 비교한 결과를 표 1에 나타내었다.

타이타늄은 산소와의 친화력이 매우 크기 때문에 상온 대기중에서 표면에 수 nm의 견고한 산화 피막이 형성되며, 이 산화피막이 손상되어도 쉽게 재생되기 때문에 여타 금속에 비해 대기 및 다양한 환경에서 내식성이 우수하다^[6]. 타이타늄과 다른 금속재료들의 산화 및 환원성 용액에서의 부식 특성을 그림 1에 나타내었다. 타이타늄은 산화성 분위기 및 염화물 환경에서 매우 우수한 내식성을 갖는 것을 알 수 있다. 타이타늄의 이러한 우수한 특성으로 인해 해양 구조물 및 석유·화학산업에 주로 이용되고 H₂S와 CO₂ 분위기에서는 260℃ 까지도 우수한 내식성을 지닌다. 그러나 특정의 환경 조건에서는 그림 2에 나타난 것과 같이 타이타늄도 심한 부식이 발생하여 공정장비의 경우 급격한 열화가 발생할 수도 있다. 특히 고온·고농도의 염산, 질산과 같은 비산화성 산 분위기 및 낮은 pH를 갖는 염화물 옥살산, 인산 분위기에서는 부식이 발생되기 쉽고, 질산이나 과산화수소와 같은 강력한 탈산제와 플루오린화나트륨(sodium fluoride)과 같은 불소계 화합물 역시 타이타늄의 부식을 촉진시킨다^[7]. 실제로 타이타늄 부식에 있어서는 정제된 고농도 부식매체로 인한 틸부식이 가장 큰 문제를 발생시킨다. 타이타늄의 적용에 있어 이와 같은 문제점을 해결하고 보다 가혹한 부식환경에 적용하기 위하여 합금화에 의한 내식 타이타늄합금 개발, 부식 억제제의 투입, 표면개질 등을 통한 다양한 방법들이 연구되고 있다.

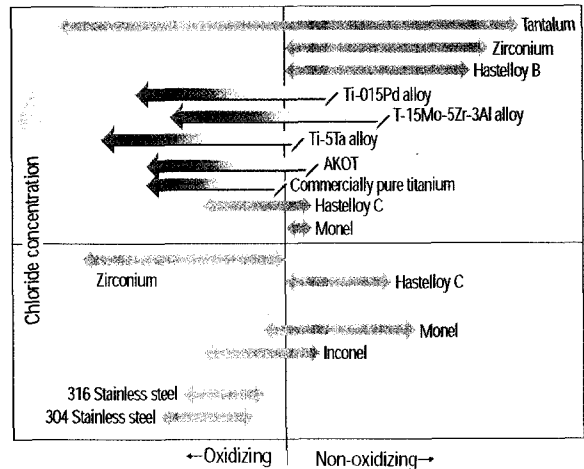
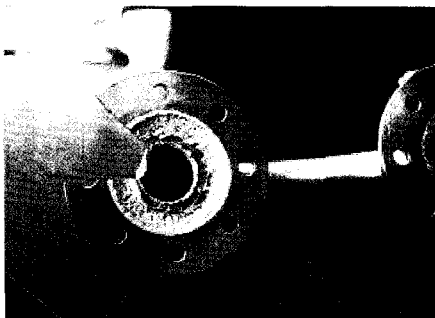


그림 1. 산화, 환원성 용액 및 염소농도에 따른 각종 금속재료의 부식특성 비교^[8]



(a) 타이타늄합금의 틸부식



(b) Mo 코팅된 타이타늄합금의 공식

그림 2. 타이타늄합금의 부식사례

표 1. 다양한 부식환경에서의 타이타늄 및 내식소재의 내식성 비교

Classification	Corrosion medium	Conc. (mass%)	Temperature (°C)	Corrosion resistance				
				Commercially pure titanium	Ti-0.15Pd	Unalloyed zirconium	304 stainless steel	Hastelloy C
Inorganic acids	Hydrochloric acid (HCl)	1	25	○	○	○	○	○
			Boiling	×	○	○	×	△
		10	25	○	○	○	×	△
			Boiling	×	△	○	×	×
	Sulfuric acid (H ₂ SO ₄)	1	25	○	○	○	○	○
			Boiling	×	○	○	×	○
		10	25	○	○	○	○	○
			Boiling	×	×	○	×	○
	Nitric acid (HNO ₃)	10	25	○	○	○	○	○
			Boiling	○	○	○	○	○
		65	25	○	○	○	○	○
			Boiling	○	○	○	○	×
Organic acids	Acetic acid (CH ₃ COOH)	10	Boiling	○	○	○	○	○
		60	Boiling	○	○	○	○	○
	Formic acid (HCOOH)	10	25	○	○	○	△	○
		30	Boiling	×	○	○	×	○
	Oxalic acid ((COOH) ₂)	10	25	○	○	○	○	○
		25	60	×	No data available	○	△	○
	Lactic acid (CH ₃ CH(OH)COOH)	10	Boiling	○	○	○	○	○
		85	Boiling	○	○	○	×	○
Alkalis	Caustic soda (NaOH)	10	100	○	○	○	○	○
		40	Boiling	×	×	○	○	○
	Potassium carbonate (K ₂ CO ₃)	5	Boiling	○	○	○	○	○
		20	Boiling	○	○	○	○	○
Inorganic chlorides	Sodium chloride (NaCl)	25	25	○	○	○	○*	○
			Boiling	○*	○	○	○*	○*
	Ammonium chloride (NH ₄ Cl)	40	25	○	○	○	○*	○
			Boiling	○*	○	○	△*	○*
	Zinc chloride (ZnCl ₂)	20	Boiling	○*	○	○	×	×
			50	Boiling	○*	○	○	×
	Magnesium chloride (MgCl ₂)	42	25	○	○	○	○*	○
			Boiling	○*	○	○	○*	○*
	Femic chloride (FeCl ₃)	30	25	○	○	×	×	△
			Boiling	○*	○	×	×	×
Inorganic salts	Sodium sulfate (Na ₂ SO ₄)	20	25	○	○	○	○	○
			Boiling	○	○	○	○	○
	Sodium sulfide (Na ₂ S)	10	25	○	○	○	○	○

Classification	Corrosion medium	Conc. (mass%)	Temperature (°C)	Corrosion resistance				
				Commercially pure titanium	Ti-0.15Pd	Unalloyed zirconium	304 stainless steel	Hastelloy C
Inorganic salts	Sodium sulfate (Na ₂ S)	10	Boiling	◎	◎	◎	○	◎
	Sodium chlorite (NaOCl)	5	25	◎	◎	◎	△	△
		15	25	◎	◎	◎	△	△
	Sodium carbonate (Na ₂ CO ₃)	30	25	◎	◎	◎	◎	◎
Boiling			◎	◎	◎	◎	◎	
Organic compounds	Methyl alcohol (CH ₃ OH)	95	25	◎	◎	◎	◎	◎
	Carbon tetrachloride (CCl ₄)	100	Boiling	◎	◎	◎	○	○
	Phenol (C ₆ H ₅ OH)	Saturat	25	◎	◎	◎	◎	○
	Formaldehyde (HCHO)	37	Boiling	◎	◎	◎	◎	○
Gases	Chlorine (Cl ₂)	Dry	25	×	×	◎	◎	◎
		Humid	25	◎*	◎	×	×	×
	Hydrogen sulfide (H ₂ S)	Dry	25	◎	◎	◎	△	◎
		Humid	25	◎	◎	◎	○	○
	Ammonium (NH ₃)	100	40	◎	◎	◎	◎	◎
			100	◎	◎	◎	◎	◎
Others	Seawater	-	25	◎	◎	◎	◎*	◎
			100	◎*	◎	◎	○*	◎*
	Naphtha	-	80	◎	◎	◎	◎*	◎
			180	◎	◎	◎	◎*	◎

<Degree of corrosion resistance> ◎ : 0.125mm/year or less ○ : 0.125~0.5mm/year △ : 0.5~1.25mm/year
 × : 1.25mm/year or more
 ※ : Local corrosion such as pitting and crevice corrosion resistance

2.1 합금원소

타이타늄의 틸부식을 개선하기위한 방법의 하나로 Pd이나 Mo 등과 같은 원소를 첨가한 Ti-0.15Pd (ASTM Gr.7)과 Ti-0.8Ni-0.3Mo (ASTM Gr.12) 등의 합금들이 개발되어 석유화학 공장 등에 사용되고 있다. 그림 3은 고온에서 염산용액의 농도에 따른 순타이타늄 및 타이타늄합금의 부식속도를 비교한 것으로 고온·고농도의 염산분위기에서는 Ti-0.15Pd합금 및 Ti-Ni-Pd-Ru-Cr합금(AKOT)이 순 타이타늄에 비하여 훨씬 우수한 내식성을 나타내는 것을 알 수 있다^[9].

그림 4는 순 타이타늄 및 Ti-Pd합금의 온도 및 NaCl 농도 변화에 따른 틸부식 및 공식 발생을 비교한 것이다. 타이타늄에서 틸부식의 경우 스테인레스강처럼 민감하지는 않으나 고온,

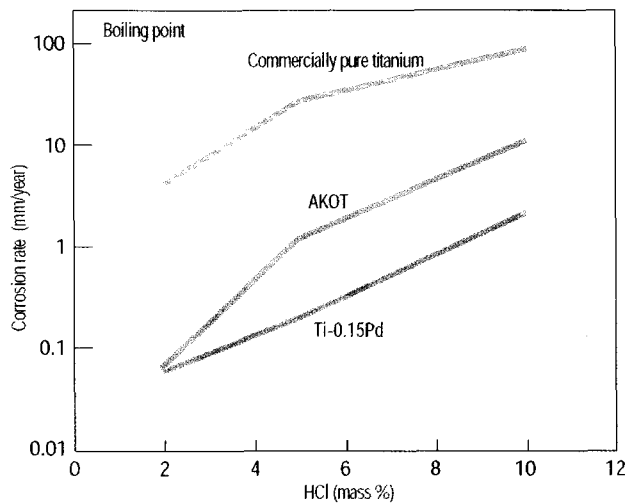


그림 3. 염산 용액에서의 타이타늄 및 타이타늄합금의 부식속도

고농도 환경에서는 순 타이타늄보다 튼부식 저항성이 큰 Ti-0.15Pd합금 및 Ti-Ni-Pd-Ru-Cr합금(AKOT)과 같은 내식 타이타늄을 적용하는 것이 유리하다.

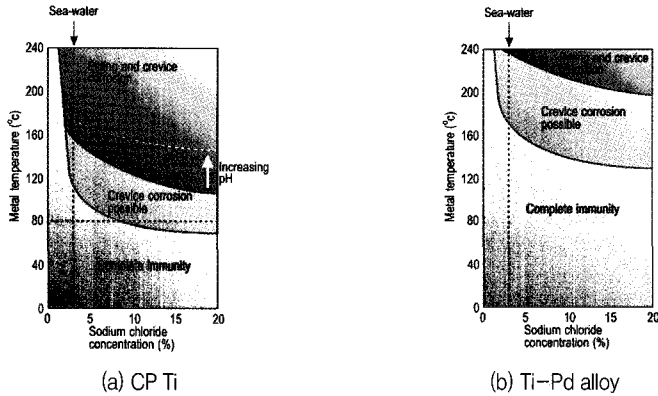


그림 4. 온도, 농도 및 pH에 따른 타이타늄 공식 및 튼부식 저항성

타이타늄 산화피막의 특성은 미량의 합금원소에 따라 크게 변화하지 않는다. 따라서 일반적으로 이용되는 합금성분(Fe, C, N, O, H)이 2~3% 미량 첨가되어도 일반적인 부동태 환경에서는 부식저항성에 미치는 영향은 미미하다. 즉, 낮은 부식속도의 환경에서는 Fe 및 침입형원소(C, O, N)의 함량이 조금씩 다른 모든 순타이타늄의 경우(Gr.1 ~ Gr.4) 비슷한 부식저항성을 나타내지만, 부식속도가 0.13mm/y 이상인 경우 Fe 및 S가 증가할수록 부식속도는 증가한다. 따라서 고온·고농도 환경에서는 미세원소 함량을 고려하여야 한다.

합금원소 중 Fe는 일반적인 불순물로 이는 알파(α) 상에 대한 고용도가 매우 낮다. 따라서 약 0.05% 이상 함유될 경우 베타(β) 또는 공식상이 나타나 이와 같은 상들은 염화물 용액에서 공식전위(pitting potential)을 낮춰 국부 부식이 발생할 수 있다. Fe가 첨가될 경우 용접부식 발생이 용이하며 또한 브롬산나트륨(sodium bromide)에서 공식을 발생시키기도 한다. 또한 용접부식은 미세조직과 산소함량과 밀접한 관계가 있다.

한편, 미량의 니켈(Ni) 및 팔라듐(Pd) 첨가에 따라 순타이타늄의 부식저항성이 크게 증가한다. 특히, 미량의 팔라듐첨가는 고온 염화물 용액에서의 튼부식 저항성을 크게 향상시키는 것으로 알려져 있다. 바나듐과 몰리브덴(≥ 4% Mo) 또한 내부식성 향상에 기여하는 것으로 알려져 있는데, 다만 알루미늄의 첨가는 타이타늄합금의 내식성을 감소시키는 것으로 알려져 있다^[10].

상기의 결과들을 이용하여 내식용 합금으로 Ti-0.15Pd 합금이 개발되었으나 팔라듐(Pd)이 첨가되면서 소재가 격이 2배 이상 상승하게 되어 경제성을 고려한 Ti-0.3Mo-0.8Ni합금이 개발되었다^[11]. 이 합금 개발과정에서의 결과를 이용하여 Nippon Steel에서는 TICOREX, Sumimoto에서는 SMI-ACE 합금을 Kobe Steel에서는 AKOT 합금을 개발하여 상용화 하였다.

2.2 표면 조건

표면성질은 가혹한 부식환경에서 타이타늄의 거동에 영향을 준다. 외부 침착물 특히 Fe 입자가 침착되어 있을 경우 염산 등의 용액에서 국부적인 부식이 발생할 수 있다^[12]. 수소가 다량 함유되어 있을 경우에도 부식속도가 증가하며 자기촉매형 부식을 촉진시킬 수도 있다^[13]. 일반적인 해수환경에서는 타이타늄 표면이 손상되어도 국부적인 부식이 진행되지 않는다. 그리고 이와 같은 결함 부는 염소와 기계적인 처리 방법으로 제어할 수 있다^[14, 15].

양극피막처리는 가혹한 환경에서 부식저항성을 향상시킬 수 있는 방법으로 타이타늄 표면 산화피막의 성장과 안정성을 향상시킨다. 낮은 양극 전압을 인가하여 열교환기와 같은 복잡한 형상의 부품에도 피막을 형성시킬 수 있다.

열 산화 방법은 대기중의 특정 온도에서 특정 시간동안 처리하는 방법으로 표면을 강화시키는 양극피막처리와 유사한 효과가 있다. 그러나 이 방법으로 생성된 피막은 손상될 경우 자가 보수되지 않고, 특정 온도와 시간 이상으로 처리할 경우에는 표면취화가 발생할 수도 있다^[16,17]. 최근에는 내식성을 향상시키기 위한 표면처리 방법으로 Pd 등을 타이타늄 표면에 이온 주입하는 방법, 귀금속 코팅 방법 등이 수행되고 있다.

2.3 부식 억제제^[18]

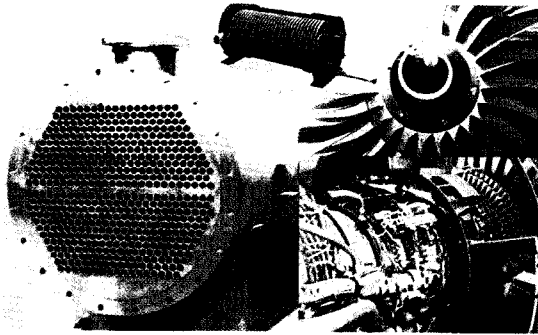
실제 공정에서 사용하는 용액들은 타이타늄의 부식을 억제할 수 있는 화학적 성분들을 포함하고 있다. 그러나 불화물, 옥살산 이온, 환원 조건에서 높은 수소이온 농도 등은 부식을 촉진시킨다. 공정 중의 용존산소, 염소 및 다른 산화제 등은 타이타늄의 사용 영역을 넓혀주는 역할을 하여 고온, 고농도의 용액에서 사용하여도 부식이 큰 문제가 되지 않는다. 0.01~1.0 wt.%의 산화제 또는 Cr, Cu, Ni, Fe, Mo, V 등의 중금속 이온은 염산, 황산 등과 같은 산 용액에 의한 부식을 지연시킬 수 있다. 타이타늄에 미량의 Si이나 Cr을 첨가하였을 경우에도 고온의 질산에서 내식성이 향상된다. 소량의 수분도 수소, 염소가스에 대하여 매우 효과적인 억제제 역할을 한다. As, Se, Te 화합물도 부동태화를 증진시키는 것으로 알려져 있다.

3. 내식환경에서의 타이타늄 응용 현황

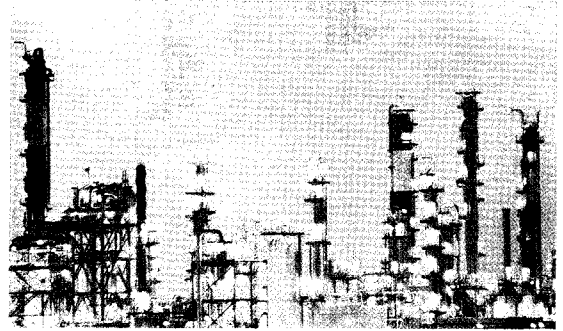
타이타늄은 1940년대에 주로 항공기용 소재로 개발되었지만 최근에는 전세계 타이타늄 소비량의 50% 정도만이 항공기에 적용되고 있다. 항공산업이 발달한 미국의 경우 약 70% 이상의 타이타늄이 항공산업에 사용되고 있고, 민수용으로 적용이 활발한 일본의 경우 국가 전체 타이타늄 수요량의 50% 이상이 내식성이 요구되는 석유화학·해양·발전용 소재로 활용되고 있다. 타이타늄은 1960년대에 산화성 염화물 환경의 공정을 제어하는 화학공업에 적용되기 시작하여 최근에는 아세트산, 질산, 브롬 및 아세트론 등의 보다 가혹한 환경 매체에 적용되고 있다. 내식환경에서 타이타늄은 그림 5에 나타낸 것과 같이 주로 열교환기, 석유화학 반응기 정련소 등에 적용되고 있다.

타이타늄은 우수한 내식성, 경량이면서 강도가 우수하다는 특성을 지니고 있어 발전소에 직간접적으로 관련된 다양한 부품에 적용되고 있다. 현재 타이타늄의 우수한 특성을 이용하여 원자력 및 화력 발전소에 적용되는 분야로는 복수기용 콘덴서 튜브, 관판과 증기터빈용 블레이드 등을 들 수 있다. 복수기는 터빈을 회전시킨 후 배출되는 증기를 냉각 응축시켜 복수로 전환하는 장치로, 증기터빈의 효율을 향상시키는 것을 목적으로 하는 열교환기이다. 복수기에서 배출된 물은 보일러 또는 반응기를 거쳐 다시 수증기로 되고 터빈을 회전시켜 나온 증기는 복수기에서 냉각되는 과정을 반복한다. 냉각을 위해서는 다량의 냉각수가 필요한데 냉각수로는 주로 해수를 사용하고 있다. 타이타늄은 냉각관과 냉각관을 복수기 동체에 고정하는 관판에 이용된다. 해수염수화 장치 및 발전소 콘덴서 분야에서는 관형 열교환기를 냉각수·공조설비 분야에서는 관형 열교환기에 타이타늄이 활용된다. 열교환기 적용시에는 판상 및 관상으로 성형해야 하기 때문에 불순물 함량이 적은 순 타이타늄(Gr.1 및 Gr.2)이 주로 이용된다.

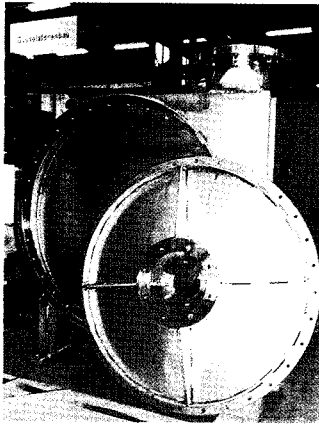
화학산업에서 타이타늄이 가장 많이 적용되는 분야는 테레프탈산, 아세트알데히드, 초산, 요소 및 펄프표백 산업이다^[4]. 타이타늄은 촉매계의 고온 고압 취화물 용액 및 염화파라듐 촉매계의 염소이온에서 부식되지 않는 특징으로 인하여 반응탑, 컨덴서 및 열교환기용 튜브 등에 이용된다. 이 외에도 니켈정련 플랜트, 가성소다플랜트, 펄프제지 산업 및 화학 기자재 산업 등에도 타이타늄이 적용되고 있다.



<Heat exchanger & engine>



<정련소 : Refinery>



<corrosive gas fan>

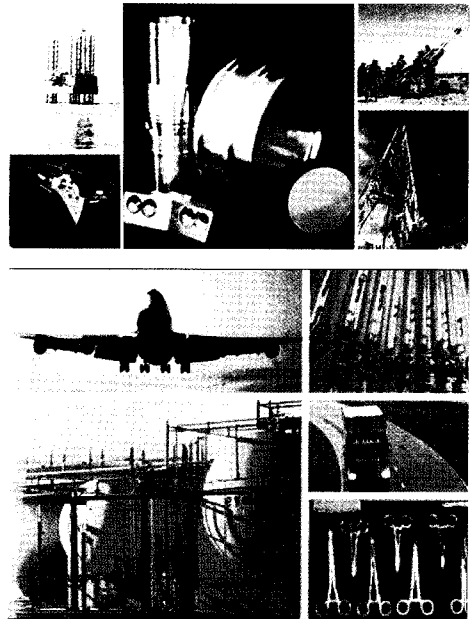


그림 5. 내식환경에서의 타이타늄 적용 예

4. 내식 타이타늄 연구개발 현황

타이타늄은 일반적인 상온 대기환경, 수분이 있는 환경에서는 우수한 내식성을 나타내므로 내식성 향상 관련 연구는 특별한 경우를 제외하면 그리 많지 않은 편이다. 그러나 타이타늄은 고온 염화물 수용액과 같은 극한 환경에서 침부식의 발생이 용이하므로 이와 같은 환경에서 적용하기 위하여 백금족 원소인 Pd를 첨가한 Ti-Pd 계 합금이 개발되었고, 고가인 Pd를 대체하기 위하여 일본의 Nippon Steel, Sumitomo 금속에서는 Pd 대신 Mo이나 Ni 등을 첨가한 내식성 타이타늄 합금 등을 개발하여 콘덴서 튜브, 열교환기 튜브, 파이프, 라이닝소재 등에 적용하고 있다. 미국의 TIMET사에서는 최근 탄소소를 첨가한 Ti-C 2원계 타이타늄합금을 개발하였는데 기존 Ti-Pd 이상의 내식성을 갖는 것으로 보고하고 있다^[9]. 표 2에 내식 타이타늄 관련 해외기술 개발 현황을 요약하여 나타내었다. 국내의 경우 초내식 재료관련 기술개발은 주로 스테인레스강을 위주로 내식소재 개발 및 표면처리 등과 관련된 연구가 진행되어 왔고, 타이타늄의 경우에는 생체재료로서의 신합금 개발 및 표면처리에 대한 연구가 주로 진행되어 왔다. 그러나 북



합적인 환경에서 적용을 위한 초내식 타이타늄 관련 연구는 미약한 실정이다. 재료연구소에서는 최근 고온 고내식의 복합적인 환경에 적용을 위한 타이타늄합금 개발을 위해 타이타늄 표면 분석 및 내식합금 설계 등에 관한 연구를 수행 중에 있다.

표 2. 내식 타이타늄 관련 해외 연구 현황

기술내용	Item/주요사양 혹은 성능	업체/연구기관	개발 국가
Ti-Pd 계 내식 타이타늄합금 제조 기술	Condenser tube, 열교환기용 튜브, 라이닝소재, 전해용 용기	Nippon Steel, Sumitomo, Kobe Steel	일본
제4세대 원자로용 고내식 소재 개발	원자로/ 초임계수 환경에 적용	Westinghouse Electric Co.	미국
타이타늄 부식 억제 기술	반도체 구조물/표면 산화물 층과 착체 형성	EKC Tech.	영국
내식, 내산화 표면처리 기술	항공우주용부품/ 표면에 금속간화합물층 생성, 높은 경도 및 내산화성	Waterloo 대학교	캐나다

5. 맺음말

산업의 고도화에 따라 많은 산업용 기기 및 부품들이 경제적 관점 및 효율성 향상 측면에서 복합적인 극한환경에서 적용이 요구되고 있고, 이에 따라 다양한 부식결합들이 발생하고 있어 타이타늄과 같은 우수한 내식성을 갖는 합금의 수요가 증가하고 있는 실정이다. 타이타늄은 자체로 우수한 내식 특성을 갖고 있지만 특정의 매체 또는 고온, 고압 및 산성분위기 등의 복합적인 환경에서는 부식이 가속화 된다. 따라서 많은 기업에서 요구되는 설비 제작 후 장시간 복합적인 부식환경에 견딜 수 있는 극한 내식용 소재개발이 지속적으로 이루어 져야 한다. 이를 위해서는 다양한 부식환경에서의 타이타늄합금 표면에 형성되는 피막특성, 부식거동에 대한 분석을 바탕으로 복합환경에 적용할 수 있는 합금설계, 개발소재의 요소 부품화를 위한 공정기술 개발 및 내식성 향상을 위한 표면처리 등에 대한 연구개발이 요구된다. 또한 가혹한 부식환경에 적용을 위해서는 높은 신뢰성이 요구되므로 개발된 합금 또는 부품에 대한 신뢰성 평가도 필수적으로 수반되어야 할 것이다.

❁ 참고 문헌

- [1] G.H. Koch, M.P.H. Brongers, N.G. Thompson, Y.P. Virmani, J.H. Payer, "Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States", FSP & SFPE, 2003.
- [2] 김정환, 한국안전학회지, 제24권 제1호, 31~36, 2009
- [3] 과기일보(중), 2005.09. 14, 8면
- [4] 이용태, 타이타늄, 한국철강신문, 2009
- [5] Ismaeel N. Andijani et al., Desalination 129, 45~51, 2000
- [6] Craig, Bruce: Technical Note 2, Corrosion, Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. ASM International, 1065
- [7] M. Ishii, M. Kaneko and T. Oda, NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT No. 87 JANUARY, 2003
- [8] M. Stern and H. Wissenberg, J. Electrochem. Soc., 106(9), 759, 1959
- [9] S. Yasuaki, Titanium Japan, 56(2), 105, 2008

- [10] N. D. Tomashov, et al., Titanium and Titanium Alloys, AIME, 927, 1982
- [11] R. W. Schutz and L. C. Covington, ASTM STP 830, 29, 1982
- [12] L. C. Covington and R.W. Schutz, ASTM STP 728, 163, 1981
- [13] H. B. Bomberger, ASTM STP 830, 143, 1982
- [14] R.O. Lewis, Materials Protection, 22(9), 31, 1982
- [15] T. Nosetani, et al, Titanium '80, Science and Technology, AIME, 2623, 1980
- [16] T. Fukuzuka, et al., Titanium '80, Science and Technology, AIME, 2783, 1980
- [17] R. W. Schutz and L. C. Covington, Corrosion 81, Natl. Assoc. Corr. Eng., 16, 1981
- [18] H. B. Bomberger, et. al., Titanium Science and Technology, 2435, 1984
- [19] J. Grauman, S. Fox, Ti-2007 Sci. Tech., (2007) 1213



홍재근

· 재료연구소 구조재료연구본부 특수합금연구그룹
선임연구원
· 관심분야 : 타이타늄 합금의 열처리 및 레이저 용접
· E-mail : jkhong@kims.re.kr



현용택

· 재료연구소 구조재료연구본부 특수합금연구그룹
책임연구원
· 관심분야 : 금속계 생체재료 제조 및 특성평가
· E-mail : ythyun@kims.re.kr



박노광

· 재료연구소 구조재료연구본부 특수합금연구그룹
책임연구원
· 관심분야 : 타이타늄 및 니켈합금 공정실계, 터빈소
재부품 수명예측/평가, Multi-scale
materials processing
· E-mail : pnk@kims.re.kr