

생체용 Ti-Zr-Pd계 합금의 양극분극특성

광주보건대학 치기공과

정 종 현

=Abstract=

Anodic Polarization Properties of Ti-Zr-Pd Based Alloys for Biomedical Applications

Jong-Hyun Jung

*Dept. of Dental Lab. Technology, Kwangju Health College,
Kwangju 506-701, Korea*

For biomedical applications, Ti-X%Zr-Y%Pd(X:10~20, Y:0.2 or 0.4) based alloys not containing harmful Al and V were newly designed, and polarization curves for their alloys were measured at 37°C in 5% HCl solution in order to understand effects of Zr on the corrosion. From the results of anodic polarization behavior, it was found that the corrosion resistance increased with increasing Zr content. The results show their potential to develop Ti-based alloys for biomedical materials. The Ti-20%Zr-0.2%Pd alloy shows excellent corrosion resistance and was superior to those of the Ti, Ti-6%Al-4%V ELI alloy, Co-30%Cr-6%Mo alloy and STS 316L stainless steel.

Key Words : anodic polarization behavior, biomedical materials, corrosion resistance.

* 이 논문은 2000년도 광주보건대학 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음

I. 서 론

현재 생체용 금속재료로서 Ti-6%Al-4%V ELI 합금이 가장 주목받고 있지만 V의 세포독성과 Al의 알츠하이머형 치매와의 관련성이 의문시되고 있어 이의 대체용 Ti합금개발에 대한 연구들이 진행되고 있다. 생체재료로서 합금원소 선정은 매우 중요한데 Zr 및 Pd는 독성이 거의 나타나지 않고 생체안정성과 밀접한 내식성 개선효과도 높은 것으로 알려져 있다(川原春幸 et al.,1963). Zr은 주기율표상 Ti와 같은 IV족 원소로서 화학적 성질이 서로 비슷하며 표면에 부동태피막이 쉽게 형성되어 산이나 염수에 대해 내식성이 강하고(Yau & Webster, 1987), Pd 또한 백금족 원소로서 Ti표면의 부동태화를 촉진하여 Ti계 합금의 부식을 억제하는 것으로 알려져 있다(Stern & Wissenberg, 1959). 그러나 Zr을 뼈조직에 매식 할 경우 Zr표면에는 인산지르코늄 형성 가능성이 높아 Ti-Zr계 합금을 생체용으로 이용하기 위해서는 Zr함량을 제한하여야 하며(Hanawa et al, 1992), Pd는 Ti와 금속간 화합물을 형성하는 β 형 공석형 원소이므로 석출을 고려하여 Ti의 α 고용한도 이내로 함량을 제한하여야 한다(Lampman,1990). 따라서 본 연구에서는 Ti의 일부를 생체적합성이 우수한 Zr 및 Pd으로 치환한 Ti-X%Zr-Y%Pd(X:10~20, Y:0.2 or 0.4)계 합금을 설계하였고 첨가원소가 생체모의 환경에서의 내식성에 미치는 영향을 평가하기 위해 산성용액 중에서 전기화학적 방법인 양극분극 특성시험을 하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 합금 제조

본 연구에 사용한 합금은 순도 99.9wt%Ti, 99.9wt%Zr, 99.9wt%Pd를 사용하여 제조하였으며 각 시료의 조성에 해당하는 성분원소를 총 중량이 20gr이 되도록 정확히 칭량하여 아크로에 장입하고 10^{-4} torr까지 진공처리 한 후 Ar분위기에서 용해하였다. 매회 본 합금을 용해하기 전에 산화를 방지하기 위해 Ti getter를 먼저 용해하였으며 합금이 균질화 되도록 5회 이상 재 용해를 시행하였다. 용해 후 ICP를 이용하여 시료의 화학성분을 분석한 결과 용해중 특정 성분의 손실은 거의 없었다. 균질화 처리는 주조후 일부 ingot를 석영관에 장입하고 3×10^3 까지 진공처리한 후 봉입하고 1000°C 에서 2시간 유지한후 공냉하였다. Table 1은 제조된 합금의 종류와 화학조성을 나타낸 것이다.

Table 1. Chemical compositions of the specimens(wt.%)

| Alloy systems | Elements | | |
|-----------------|----------|------|------|
| | Zr | Pd | Ti |
| Ti-10%Zr-0.4%Pd | 10.02 | 0.32 | Bal. |
| Ti-15%Zr-0.4%Pd | 14.87 | 0.11 | Bal. |
| Ti-20%Zr-0.2%Pd | 19.78 | 0.22 | Bal. |
| Ti-20%Zr-0.4%Pd | 19.11 | 0.36 | Bal. |

2. 양극분극 시험

내식성을 측정하기 위해 시편을 $15 \times 15 \times 2\text{mm}$ 크기로 절단하여 #600에서 #2000까지 emery paper로 연마하고 $0.05 \mu\text{m}$ 알루미나 수용액으로 최종 미세연마한 후 시료표면을 1cm^2 만 남기고 그 외 표면을 에폭시수지로 피복하여 양극분극시험을 행하였다. 양극분극시험 기기는 Parr사의 CMS 100을 이용하였으며 제조한 시편을 작업전극으로, 포화카

로멜(Saturated Calomel Electrode, SCE)전극을 기준 전극으로, 고밀도 탄소전극을 보조전극으로 사용하였다. 전해질 용액은 $37 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 5% HCl용액을 사용하였고 용액내 용존된 산소를 제거하기 위해 고순도 N₂가스를 시험 시작 20분전부터 유입하여 시험동안 지속시켰으며 -1.0V~5.0V VS. SCE 전위구간을 $3.33 \times 10^{-4}\text{V/sec}$ 의 속도로 주사하였다.

3. ESCA분석 시험

양극분극시험후 합금표면에 형성된 부동태피막의 조성을 관찰하기 위해 ESCA시험을 행하였으며 Ti계 합금을 -1~1V vs. SCE전위구간에서 $3.33 \times 10^{-4}\text{V/sec}$ 의 속도로 주사하여 분극 시험한 후 시편을 채취하고 에탄올로 5분간 초음파 세척하였다. ESCA분석은 Surface Science Instrument사의 SSX-100 기기를 사용하였으며 출력은 120W, X선원은 spot size ϕ 1.0mm인 ALK α 선을, 측정영역은 0~1100eV구간으로 하여 Ar 가스로 1분간 sputtering한 후 시행하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 양극분극 특성

양극분극곡선에서 합금의 내식성을 비교하는 데에는 부식전위 E_{corr} 측정, 부동태통과구역 측정, 임계양극전류밀도 I_{crit} 측정, 부동태구역전류밀도 I_p 측정 및 부식 전류밀도 I_{corr} 측정등과 같은 여러 방법들이 이용되고 있다. 그러나 본 연구에서 사용한 합금들의 양극분극곡선은 I_{crit} 의 피크가 뚜렷하지 않고 측정구간인 -1~5V전위에서 부동태통과 구역이 나타나지 않기 때문에 부식전위 E_{corr} , 부동태구역 1V vs. SCE의 전류밀도 $I_{1.0}$, Okazaki 등(Okazaki et al, 1997)이 생체용 금속에 적용한

양극영역의 전류밀도 $0.1\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 에 해당하는 전위 $E_{0.1}$ 및 부식전류밀도 I_{corr} 등을 종합하여 평가하였다.

Fig. 1은 E_{corr} , $I_{1.0}$ 및 $E_{0.1}$ 을 양극분극곡선 상에 표시한 것이다.

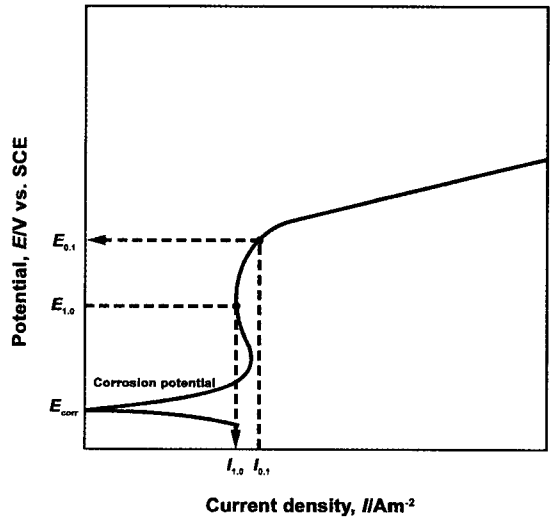


Fig. 1. Schematic illustration of anodic polarization properties used to estimate corrosion resistance.

Fig. 2는 1000°C 에서 2시간 균질화 처리한 Ti-X%Zr-0.4%Pd(X:10~20) 합금의 내식성에 미치는 Zr의 영향을 조사하기 위해 고순도 N₂가스로 탈기한 5% HCl용액에서 -1~5V vs. SCE전위 구간의 양극분극 곡선을 측정하여 나타낸 것이다. 이 합금들의 임계양극전류밀도 I_{crit} 피크는 뚜렷하지 않고 100~200mV vs. SCE전위 부근에서 부동태화 구역으로 진입하여 전위가 상승하다가 1.0~1.1V vs. SCE전위 구간에서 일시적인 부동태피막 파괴로 전류밀도가 상승하고 있으나 곧 1.8V vs. SCE 전위부근에서 2차 양극 전류밀도 피크를 보이며

다시 부동태화 구역이 계속되고 있는데, 부동태 통과구역이 5V vs. SCE전 위이하에서는 나타나지 않았다. 본 연구에서 관찰된 2차 양극 전류밀도 피크는 Ti의 Pourbaix diagram(Pourbaix,1966)에서 나타난 것처럼 $TiO_3 \cdot 2H_2O$ 의 형성에 의한 일시적인 부식으로 생각된다.

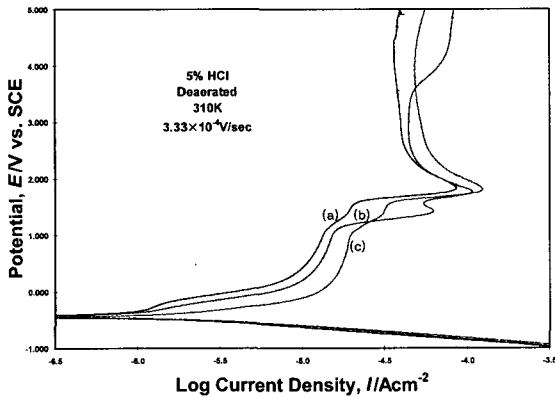


Fig. 2. Comparison with the anodic polarization curves for Ti-X%Zr-0.4%Pd(X:10~20) alloys; (a)Ti-20%Zr-0.4%Pd alloy, (b)Ti-15%Zr-0.4%Pd alloy and (c)Ti-10%Zr-0.4%Pd alloy.

Fig. 3은 Ti-X%Zr-0.4%Pd(X: 10~20) 합금의 Zr 함량증가에 따른 부동태 구역전류밀도 $I_{1.0}$ 및 부식전류밀도 I_{corr} 의 거동을 나타낸 것이다. $I_{1.0}$ 는 0.10 ~0.15A · m⁻²전류밀도 구간에서 Zr의 함량이 증가할수록 감소하였으며 I_{corr} 도 0.014~0.036A · m⁻²전류밀도 구간에서 Zr의 함량이 증가할수록 감소하였다.

Fig. 4는 Ti-X%Zr-0.4%Pd(X:10~20) 합금의 Zr 함량증가에 따른 부식 전위 E_{corr} 및 0.1A · m⁻²전류밀도의 전위 $E_{0.1}$ 을 나타낸 것이다. E_{corr} 는 Zr함량의 증가에 따른 큰 변화없이 -440mV vs. SCE전위 부근

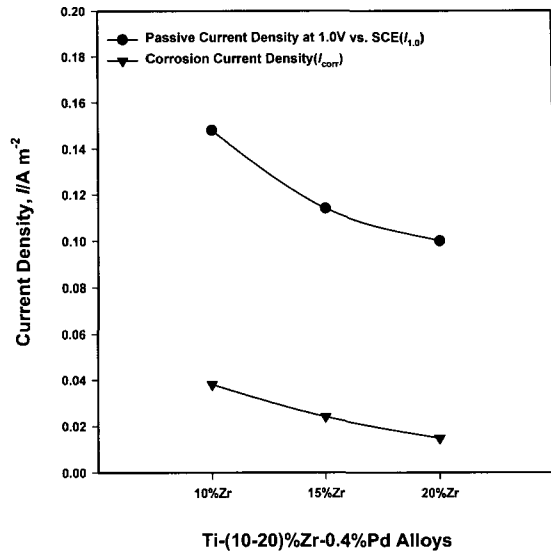


Fig. 3. Comparison with passive current density at 1.0V vs. SCE and corrosion current density estimated by anodic polarization test for Ti-X%Zr-0.4%Pd(X:10~20) alloys in the deaerated 5% HCl solution at 37°C.

에서 거의 일정하였으나, $E_{0.1}$ 는 50~1000mV vs. SCE전위 구간에서 Zr의 첨가량이 증가할 때 높아지는 경향을 보였다. 따라서 Zr함량에 따른 $I_{1.0}$, I_{corr} , $E_{0.1}$ 및 E_{corr} 의 거동을 관찰한 결과 Zr함량이 증가하면 내식성이 우수하게 나타났다. 이는 Okazaki등(Okazaki et al, 1995)이 Ti 합금에서 보고한 바와 같이 Zr 첨가량이 많아지면 부동태피막 형성이 촉진되어 유리되는 이온의 양이 적어지기 때문으로 생각된다. Ti-20%Zr-Y%Pd(Y:0.2 or 0.4) 합금의 Pd함량증가에 따른 부식 전위 E_{corr} 및 0.1A · m⁻²전류밀도의 전위 $E_{0.1}$ 는 큰 차이가 없이 서로 비슷한 경향으로 나타났다.

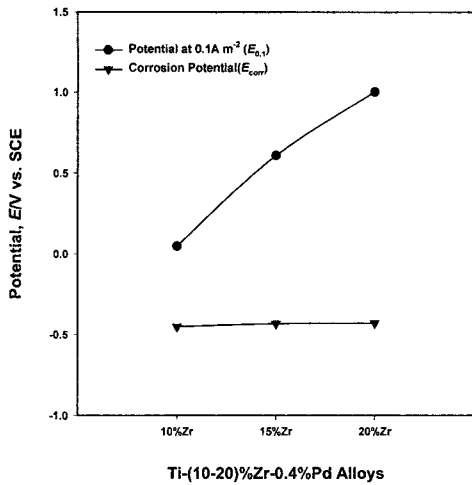


Fig. 4. Comparison with potential at $0.1A \cdot m^{-2}$ vs. SCE and corrosion potential estimated by anodic polarization test for Ti-X%Zr-0.4%Pd(X:10~20) alloys in the deaerated 5% HCl solution at 37°C.

2. Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금과 Ti-6%Al-4%V 합금, CP Ti 및 Co-30%Cr-6%Mo 합금의 비교

Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금과 시판되고 있는 Ti-6%Al-4%V 합금, CP Ti (ASTM Grade 2) 및 Co-30%Cr-6%Mo 합금의 양극분극 특성을 비교하였으며 Table 2는 비교군 합금의 화학조성을 나타낸 것이다.

Table 2. Chemical compositions of alloys used for control(wt.%)

| | | | | | | | | |
|-------------------------|------|------|-------|------|-------|-------|------|------|
| Ti-6%Al-4%V | Al | V | C | Fe | O | N | Ti | |
| | 5.46 | 4.34 | 0.015 | 0.14 | 0.058 | 0.005 | Bal. | |
| CP Ti (ASTM Grade 2) | Fe | C | H | O | N | Ti | | |
| | 0.30 | 0.10 | 0.015 | 0.25 | 0.03 | Bal. | | |
| Co-30%Cr-6%Mo | Cr | Mo | Ni | Fe | C | Si | Mn | Co |
| | 29.3 | 5.8 | 2.2 | 0.73 | 0.3 | 0.8 | 0.75 | Bal. |

Fig. 5는 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금, Ti-6%Al-4%V 합금, CP Ti 및 Co-30%Cr-6%Mo 합금을 고순도 N₂가스로 탈기한 5% HCl용액에서 -1~5V vs. SCE전위구간의 양극분극 특성을 측정하여 나타낸 것이다. Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금, Ti-6%Al-4%V 합금 및 CP Ti에서는 모두 임계양극 전류밀도 피크가 뚜렷하게 나타나지 않고 부동태 영역으로 진입하고 있으며, 부동태 구간이 길고 부동태통과 구역이 5V vs. SCE 전위 이하에서는 나타나지 않았다. 그러나 Co-30%Cr-6%Mo 합금은 -400mV vs. SCE 부근에서 임계양극 전류밀도 피크가 나타나고, 이 부근의 전위를 통과하면서 부동태 피막의 신속한 형성으로 전류가 급속히 감소하며 부동태화 되고 있으나 부동태 구간이 좁고 500mV vs. SCE 전위 부근에서 부동태 피막의 파괴로 전류밀도가 급격히 상승하는 부동태통과 구역이 나타났다.

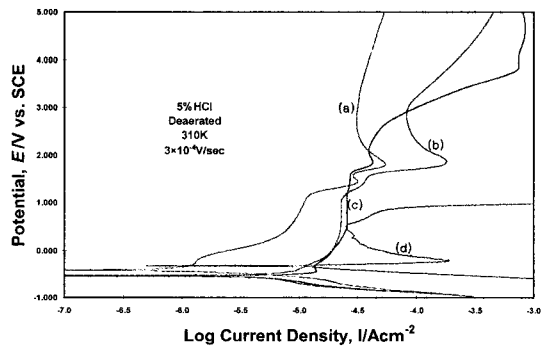


Fig. 5. Comparison with the anodic polarization curves for biomedical alloys; (a)Ti-20%Zr-0.2%Pd alloy, (b)CP Ti, (c)Ti-6%Al-4%V alloy and (d)Co-30%Cr-6%Mo alloy.

Fig. 6은 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금, Ti-6%Al-4%V 합금 및 CP Ti의 I_{1.0} 및 I_{corr}의 거동을 비교하여 나타낸 것이다. I_{1.0}는 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금이

0.08A · m²로 가장 낮고 CP Ti의 0.17A · m², Ti-6%Al-4%V 합금의 0.19A · m²순으로 높았으며, I_{corr}는 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금과 Ti-6%Al-4%V 합금이 0.02A · m²부근에서 거의 비슷하였고 CP Ti 이 0.01A · m²로 약간 낮게 나타났다.

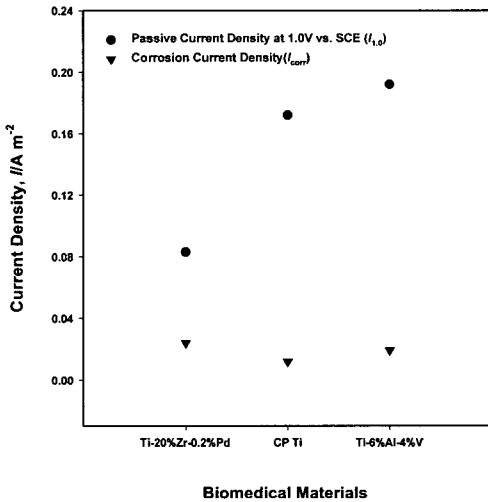


Fig. 6. Comparison with passive current density at 1.0V vs. SCE and corrosion current density estimated by anodic polarization test for biomedical alloys in the deaerated 5% HCl solution at 37°C.

Fig. 7은 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금, Ti-6%Al-4%V 합금 및 CP Ti의 E_{corr} 및 E_{0.1}의 거동을 비교하여 나타낸 것이다. E_{corr}는 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금이 -410mV vs. SCE로 Ti-6%Al-4%V 합금 및 CP Ti 보다 약간 높았고, E_{0.1}는 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금이 1.2V vs. SCE로 Ti-6%Al-4%V 합금의 -460mV vs. SCE이나 CP Ti의 -250mV vs. SCE보다 매우 높게 나타났다. 따라서 I_{1.0}, I_{corr}, E_{0.1} 및 E_{corr}의 거동을 관찰한 결과, Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금이 현재 상용화되고 있는 Ti-6%Al-4%V 합금

및 CP Ti보다 내식성이 우수하였다. Kovacs 등 (Kovacs & Davidson, 1993)은 Ti, Zr, Al, V의 양극 분극 특성을 관찰한 결과, Ti과 Zr은 부식전위에서 전류밀도가 극히 낮고 양극이나 음극의 넓은 전위 구간에서 비슷한 분극거동을 보이며 부동태 구역이 뚜렷히 나타나지만, Al과 V은 부식전위에서 전류밀도가 매우 높고 생체재료로서 안정해야 될 전위구역에서도 부동태 피막의 파괴가 진행된다고 보고하였다. 또한 Morishita 등(Morishita et al, 1990)은 전자론에 의한 Ti계 합금의 내식성 평가에서 Ti-M(M: Zr, Al, V등) 합금원소간의 공유결합 강도를 나타내는 결합차수와 임계양극 전류밀도 사이에는 정량적인 관계가 있고 결합차수가 크면 임계양극 전류밀도는 작아져 내식성이 높게 나타나는데, Fig. 8에서 보는 와 같이 Zr은 결합차수를 크게 증가시키지만 Al은 반대로 크게 감소시키며 V은 약간 증가시킨다고 보고하였다.

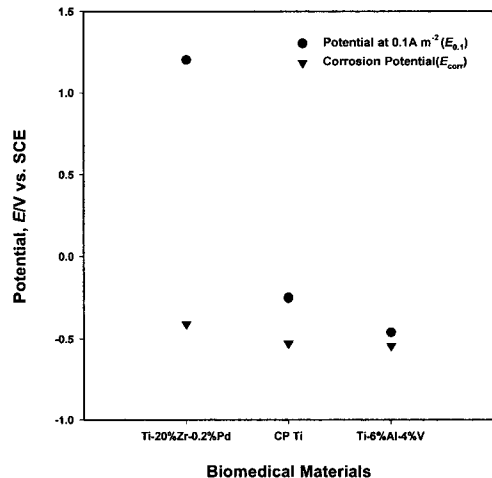
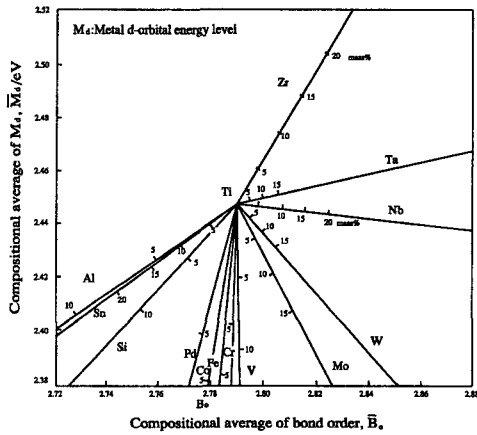


Fig. 7. Comparison with potential at 0.1A · m² vs. SCE and corrosion potential estimated by anodic polarization test for biomedical alloys in the deaerated 5% HCl solution at 37°C.



\overline{Bo} : Average of the bond order
 \overline{Md} : Average of the metal d-order energy level

Fig. 8. $\overline{Bo} - \overline{Md}$ lines drawn for various hcp Ti-M binary alloys.

따라서 본 연구에서 개발된 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금이 상용화된 다른 생체용 합금보다 내식성이 우수한 이유는 Zr이 높은 전위에서도 Ti와 같이 화학적으로 안정하여 용출 되지 않고 Ti계 합금에 보호 피막인 부동태막을 더욱 견고하게 형성되도록 해주기 때문이며, Ti-6%Al-4%V 합금에서는 Al과 V 원소들이 우선적으로 용출이 일어나기 때문에 전위가 낮아지며 내식성이 약해지는 것으로 생각된다. Co-30%Cr-6%Mo 합금에서는 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금, Ti-6%Al-4%V 합금 및 CP Ti보다 낮은 전위에서 부동태통과 구역이 나타나며 곧 전류밀도가 급상승하고 있기 때문에 부동태 구간이 매우 좁고, 부동태 구역의 전류밀도도 높게 나타나 있어 H.0나 E0.1거동을 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금, Ti-6%Al-4%V 합금 및 CP Ti과 비교할 수가 없었다.

3. ESCA분석 특성

Fig. 9(a)~(c)는 본 연구의 결과에서 내식성이 우수한 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금의 부동태피막에 관련된 합금 첨가원소의 효과를 조사하기 위해 37°C, 5% HCl용액에서 -1~1V vs. SCE전위 구간을 양극분극 시험 후 시료합금 표면에 형성된 부동태 피막을 ESCA로 분석하여 나타낸 것이다. (a)는 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금의 부동태피막 표면을 정성 분석한 피크들로서 Ti와 합금원소인 Zr의 각 궤도의 결합에너지 피크는 보이나 미량으로 첨가된 Pd에 대해서는 관찰되지 않았다. (b)~(c)는 부동태피막을 미세분석한 피크들로서 부동태피막은 주로 TiO₂, Ti화합물 및 ZrO₂ 등으로 형성되어 있었고, 역시 미량으로 첨가된 Pd에 대해서는 나타나지 않았다.

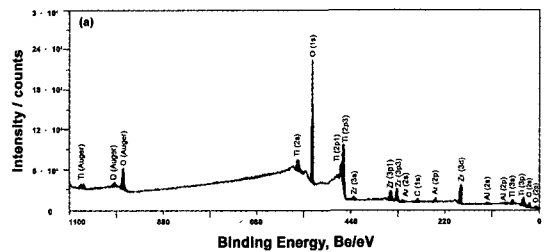
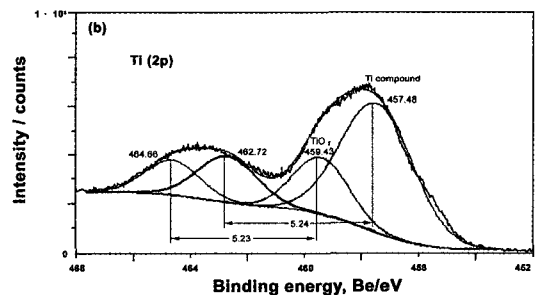


Fig. 9. ESCA spectra for the passive films formed on Ti-20%Zr-0.2%Pd alloy in the deaerated 5% HCl solution at 37°C.



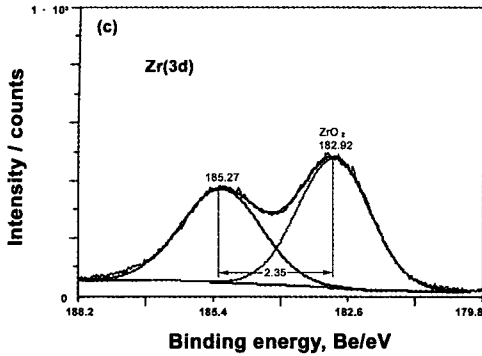


Fig. 9. (Continued.)

Fig. 10(a)~(d)은 Ti-6%Al-4%V 합금의 부동태 피막에 관련된 합금 첨가원소의 효과를 조사하기 위해 37°C, 5% HCl 용액에서 -1~1V vs. SCE 전위 구간을 양극분극 시험 후 시료합금 표면에 형성된 부동태 피막을 ESCA로 분석하여 나타낸 것이다. (a)는 Ti-6%Al-4%V 합금의 부동태 피막의 표면을 정성분석한 피크들인데 Ti와 합금원소인 Al, V의 각 궤도의 결합에너지 피크가 보인다. (b)~(d)는 부동태 피막을 미세분석한 피크들의 결과로 주로 TiO₂, Ti화합물, Al₂O₃ 및 V₂O₃ 등이 부동태 피막을 형성하고 있었다. 생체용 순 Ti 및 Ti계 합금이 뼈조직에 매식 되면 뼈조직과 직접 접촉하여 반응하는 부분은 Ti산화막이다. 순 Ti 및 Ti계 합금은 TiO, TiO₂ 및 Ti₂O₃ 등의 산화물을 형성하며 Pourbaix diagram에 따르면 이들 중 TiO₂가 가장 안정한 상태로 존재하여 생체의 부식환경에서 가장 강한 것으로 알려져 있는데(Park, 1984), Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금 및 Ti-6%Al-4%V 합금 모두에서 TiO₂가 부동태 피막을 형성하고 있음을 확인할 수 있었다.

Photo. 1은 37°C, 5% HCl 용액에서 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금, Ti-6%Al-4%V 합금 및 CP Ti을 -1V~5V vs.

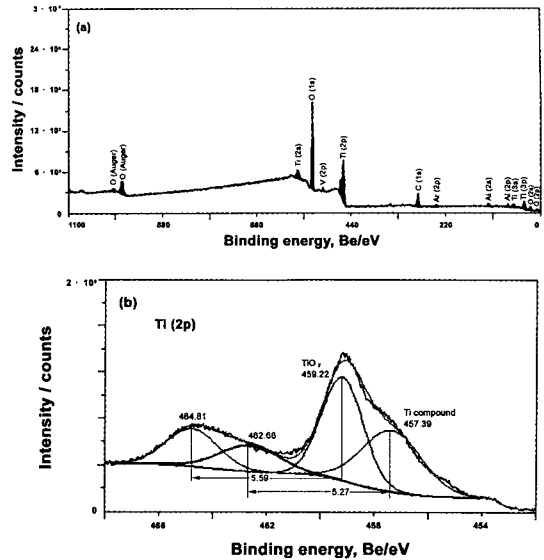


Fig. 10. ESCA spectra for the passive films formed on Ti-6%Al-4%V alloy in the deaerated 5% HCl solution at 37°C.

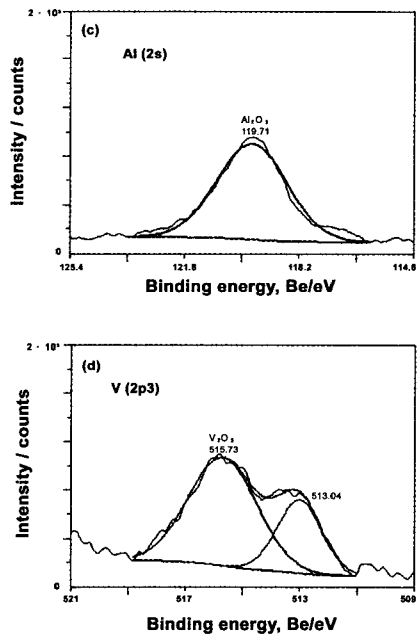


Fig. 10. (Continued.)

SCE전위 구간까지, Co-30%Cr-6%Mo 합금을 -1V ~ 0.5V vs. SCE전위 구간까지 양극분극시험 후 표면을 관찰한 현미경 사진이다. Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금은 입계부위에 부식정도가 심하지 않은 약간의 부식이 나타났으나 Ti-6%Al-4%V 합금 및 CP Ti은 입계와 입내 전체에 균일부식이 나타났고 Co-30%Cr-6%Mo 합금에서는 입계에 침식이 일어나 부식정도가 심하게 나타났다. 따라서 양극분극시험 결과, Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금이 상용화된 Ti-6%Al-4%V 합금, CP Ti 및 Co-30%Cr-6%Mo 합금들보다 내식성이 우수함을 알 수 있었다.

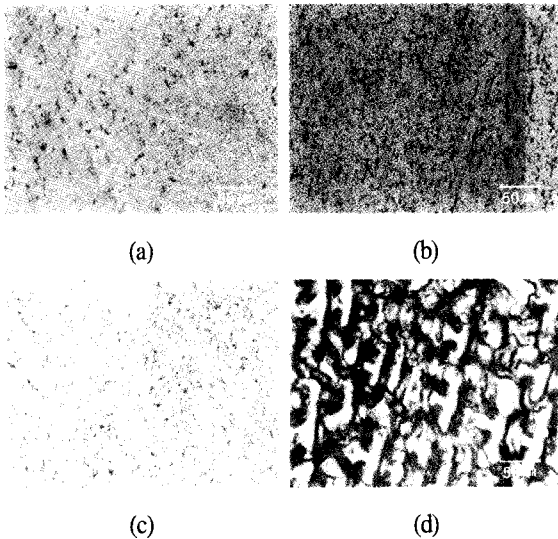


Photo. 1. Optical and scanning electron micrographs on corrosion surfaces after the anodic polarization test in the deaerated 5% HCl solution at 37°C; (a)Ti-20%Zr-0.2%Pd alloy, (b)Ti-6%Al-4%V alloy, (c)CP Ti and (d)Co-30%Cr-6%Mo alloy.

IV. 결 론

Ti의 일부를 생체적합성이 우수한 Zr 및 Pd으로

치환한 Ti-X%Zr-Y%Pd(X:10~20, Y:0.2 or 0.4) 합금의 첨가원소가 내식성에 미치는 영향을 37°C의 5% HCl용액에서 전기 화학적 방법인 양극분극 특성실험으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Ti-X%Zr-0.4%Pd(X:10~20) 합금은 Zr함량이 증가할 수록 부동태구역 1.0V vs. SCE전위의 전류밀도(I1.0)는 낮아지고 전류밀도 $0.1A \cdot m^{-2}$ 의 전위(E0.1)는 높아져 Zr함량이 20%일 때 내식성이 가장 우수하였다.
2. Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금, Ti-6%Al-4%V 합금 및 CP Ti의 경우 부동태구역 1.0V vs. SCE전위의 전류밀도(I1.0)는 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금, CP Ti, Ti-6%Al-4%V 합금 순으로 높아지고 전류밀도 $0.1A \cdot m^{-2}$ 의 전위(E0.1)는 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금, CP Ti, Ti-6%Al-4%V 합금 순으로 낮아져 내식성은 Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금이 가장 우수하였다.
4. Co-30%Cr-6%Mo 합금은 Ti계 합금에 비해 낮은 전위인 700mV vs. SCE 부근에서 부동태 통과 구역으로 진입하며 곧 전류밀도가 급상승하기 때문에 부동태 구역이 매우 좁고 Ti계 합금에 비해 내식성은 우수하지 않았다.
5. Ti-20%Zr-0.2%Pd 합금의 부동태피막 조성은 주로 TiO_2 , Ti금속화합물 및 ZrO_2 등으로 형성되어 있으며, Ti-6%Al-4%V 합금의 부동태 피막조성은 TiO_2 , Ti금속화합물, Al_2O_3 및 V_2O_3 등으로 주로 형성되었다.

참고문헌

- Hanawa T, Okuno O, Hamanaka H. Compositional Change in Surface of Ti-Zr Alloys in Artificial Bioliquid. J Japan Inst Metals, 56(10) : 1168, 1992.

- Lampman S. Wrought Titanium and Titanium Alloys, Metals Handbook, Properties and Selection, Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, 10th eds., Metals Handbook, Vol 2, 597, 1990.
- Morishita M, Kawai N, Yoshikawa K, Morinaga M, Yukawa N, Adachi H. Evaluation of Corrosion Resistance of Ti-Based Alloys by Electron Theory. J Japan Inst Metals, 54 : 568, 1990.
- Okazaki Y, Ito A, Tateishi T, Ito Y. Effect of Alloying Elements on Anodic Polarization Properties of Titanium Alloys for Medical Implants in Acid Solution. J Japan Inst Metals, 57 : 338, 1993.
- Okazaki Y, Kyo K, Rao S, Tateishi T. Corrosion Resistance and the Relative Growth Ratios of Mouse Fibroblasts L929 Cells for Various Pure Metals. J Japan Inst Metal, 61 : 656, 1997.
- Okazaki Y, Ohota M, Ito Y, Tateishi T. Corrosion resistance of implant alloys in pseudo physiological solution and role of alloying elements in passive films. J Japan Inst Metals 59 : 229, 1995.
- Park, JB. Biomaterials Science and Engineering. Plenum Press, New York, 212-233, 1984.
- Pourbaix M. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. Pergamon Press, 1966.
- Stern M, Wissenberg H. J Electrochim Soc, 106 : 759, 1959.
- Yau TL, Webster RT. Corrosion of Zirconium and Hafnium, Metal Handbook, 9th eds., Corrosion, Vol 13, 707, 1987.
- 川原春幸, 越智茂三, 種谷克巳, 加藤邦雄, 磯貝満彦, 水野善雄, 山本廣之, 山上哲賢. 齒科理工學雜誌, 4 : 65, 1963.