

## 도재용착용 Ni-Cr 합금과 Co-Cr 합금의 열처리에 따른 전단결합강도 비교

안 재 석, 고 은 경\*, 주 규 지  
광주보건대학 치기공과, 광양보건대학 치위생과\*

## Comparison of Shear Bond Strength of Ceramic Fused to Ni-Cr and Co-Cr Alloy by Heat Treatment

Jae-seok Ahn, Eun-Kyung Ko\*, Kyu-Ji Joo

Gwangju Health College  
Gwangyang Health College\*

### [Abstract]

**Purpose:** This study was to evaluate the shear bond strength of the ceramic fused to Ni-Cr alloy(Bellabond plus) and Co-Cr alloy(Wirobond C) by heat treatment.

**Methods:** Metal specimens were divided into 5 groups for each alloy according to heat treatment conditions prior to porcelain application. Fifteen specimens from each group were subjected to a shear load a universal testing machine using a 0.1mm/min cross-head speed and one specimen from each group was observed with EDX line profile.

**Results:** The diffusion of metal oxide observed far in the specimen heat treated than no heat treated in the opaque layer. The shear bond strength measured highest to BP3(50.50MPa), WC2(50.49MPa) groups and measured lowest from BP1(35.19MPa), WC1(39.66MPa) groups which were not treated with heat, and there was a significant difference ( $p<0.05$ ).

**Conclusion:** The shear bond strength of Ni-Cr alloy(Bellabond plus) and Co-Cr alloy(Wirobond C) measured similar 5 groups all.

○Key words : Ni-Cr Alloy, Co-Cr Alloy, Shear Bond Strength

\* 본 연구는 2011년도 광주보건대학 연구비 지원에 의하여 수행된 것임.

교신저자	성명	주 규 지	전화	062-958-7691	E-mail	jookj@ghc.ac.kr	
	주소	광주광역시 광산구 신창동 683-3번지 광주보건대학					
접수일	2011. 7. 22		수정일	2011. 9. 4		확정일	2011. 9. 20

## I. 서 론

도재용착주조관( Porcelain Fused to Metal Crown: PFM)은 금속의 우수한 기계적 성질과 도재(Dental Porcelain)의 심미성이 조화된 이종물질 간 이상적 결합을 보여주는 수복물의 하나이다.

도재용착주조관용 비귀금속 합금으로는 Ni-Cr계 합금, Co-Cr계 합금, Ti, Ti-6Al-4V 합금을 사용하고 있다. 주조성과 조작성이 우수한 Ni-Cr 합금이 주로 사용되어 왔으나 Ni은 조직자극성, 알러지, 과민반응 및 세포독성을 나타내고 Ni-Cr-Be 합금의 Be은 주조과정에서 증기화와 연삭과정에서 발생하는 미세 분진의 흡입 시 만성염증성 폐질환을 유발시킬 수 있어 유해성이 문제가 되고 있다(Kuschner, 1981; Tsalve와 Zaprianov, 1983). Co-Cr 합금은 Cr의 함량이 많으므로 주조 온도가 높고 주조 후 매몰재 제거가 어렵지만 Ni과 Be의 독성에 따른 잠재적 위험요인으로 인해 생체안전성이 우수한 Co-Cr 합금을 이용한 심미보철물에 관심이 증대되고 있다. De Melo 등(2005)은 합금과 도재와의 전단결합강도는 합금의 조성과 열팽창계수, 산화막 두께에 의해 좌우되며 조성에 따라 Co-Cr 합금도 Ni-Cr 합금보다 전단결합강도가 우수할 수 있음을 보고하였다.

금속-도재간 결합에 대해서는 일반적으로 금속과 도재의 미세기계적 결합, 금속산화물과 도재 성분의 확산에 의한 화학적 결합, 분자간 인력(van der waals force)에 의한 결합, 금속과 도재간의 열팽창계수의 차이로 인한 압축력 결합 등이 있으며 이중 금속산화물과 도재간의 화

학적 결합이 결합기전에 가장 많은 영향을 미치고 있음을 보고하였다(Knap과 Ryge, 1966; Vickery 와 Badinell, 1968). 화학적 결합은 합금의 열처리 과정이나 도재소성 중에 산소와의 친화력이 크고 확산속도가 빠른 원소들이 금속 표면으로 이동하여 형성된 금속 산화물이 도재내로 확산되어 도재의 성분원소들과 산화 환원 반응에 의해 화학적 결합이 일어난다(Cascone 등 1978). 따라서 금속표면의 산화막 형성은 금속소부도재관 제작에 있어 매우 중요한 과정이며 합금의 종류에 따라 적절한 열처리 조건을 추구하여야 한다.

본 연구는 도재용착용 Ni-Cr 합금 중 Be-free의 Bellabond plus와 Co-Cr 합금인 Wirobond C을 이용하여 열처리 조건에 따른 금속 산화물과 불투명 도재 층 사이의 반응을 EDX line profile 방법으로 관찰하였으며, 두 합금의 적절한 열처리 조건을 알아보고자 고온계류시간과 진공여부를 달리한 다음 도재를 소성하여 금속-도재 시편 군들의 전단결합강도를 측정, 비교 분석해 보았다.

## II. 연구 방법

### 1. 실험 재료

치과용 합금은 Ni-Cr-Be free계 합금인 Bellabond plus(BEGO, Germany)와 Co-Cr계 합금인 Wirobond C(BEGO, Germany)를 사용하였고(Table 1), 도재는 Noritake Kizai Co.(Japan)의 Super Porcelain EX-3을 사용하였다.

Table 1. Physical properties of alloys used in this study

Alloy	Bellabond plus	Wirobond C
Composition(%)	Ni(65.2), Cr(22.5), Mo(9.5) Fe, Si, Mn, Nb(<2.0)	Co(61.0), Cr(26.0), Mo(6.0) Si, Fe, Ce, C(<2.0)
Modulus of elasticity(GPa)	200	210
Tensile strength(MPa)	560	720
Elongation limit(MPa)	320	480
Vickers Hardness	200	310
CTE*(@500°C)	13.9×10 <sup>-6</sup>	14.0×10 <sup>-6</sup>

\*CTE : coefficient of thermal expansion

2. 실험 방법

1) 금속시편의 제작

금속시편을 제작하기 위해 아크릴을 4×4×10mm의 크기로 제작하고, 주입선을 10gauge round wax로 부착한 다음 인산염계 매몰재(CB-30, Ticonium, U.S.A)로 매몰하였다. 실온에서 60분간 경화시킨 뒤 제조회사 지시대로 소환한 후 고주파 원심 주조기(Decatron, Ugindentaire, France)로 주조하였다.

주조시편은 110 $\mu$ m Aluminum oxide(Korox Bego, Bremen, Germany)로 분사하여 잔여 매몰재를 제거하고 초음파 세척 후 건조 시켰다. 시편 표면은 #400, #600, #800, #1000 SiC paper로 연마한 후 증류수와 에탄올에 10분간 초음파 세척을 한 후 증기세척을 시행하였다.

2) 금속 시편의 표면 열처리

동일한 조건으로 주조하고 연마한 시편 표면의 열처리는 도재 소성로(Vacumat40, Vita, Germany)에서 시행하였다. 실험 1군은 표면 열처리를 하지 않았고, 2군은 대기중에 600 $^{\circ}$ C에서 분당 45 $^{\circ}$ C의 온도상승률로 980 $^{\circ}$ C까지 열처리, 3군은 진공하에서 600 $^{\circ}$ C에서 980 $^{\circ}$ C까지 상승 후 5분간 계류, 4군은 진공하에서 600 $^{\circ}$ C에서 980 $^{\circ}$ C까지 상승 후 10분간 계류, 5군은 대기하에서 600 $^{\circ}$ C에서 980 $^{\circ}$ C까지 상승 후 10분간 계류하였다. 시편 수는 Ni-Cr합금, Co-Cr합금을 각 군당 16개씩 총 160개를 제작하였고, 그중 15개씩은 전단결합강도 측정에 이용하였고 1개씩은 도재-금속계면의 특성을 비교하는데 사용하였다(Table 2).

Table 2. Codes of specimens

Bellabond plus	Wirobond C	Oxidizing Treatment		
BP1	WC1	No treatment		
BP2	WC2	600 $^{\circ}$ C-980 $^{\circ}$ C	Air	
BP3	WC3	600 $^{\circ}$ C-980 $^{\circ}$ C	5min hold	Vacuum
BP4	WC4	600 $^{\circ}$ C-980 $^{\circ}$ C	10min hold	Vacuum
BP5	WC5	600 $^{\circ}$ C-980 $^{\circ}$ C	10min hold	Air

BP: Bellabond plus alloy, WC: Wirobond C alloy

3) 도재의 축성

도재는 Super Porcelain EX-3을 사용하여 제조회사 소성방법에 따라 A3O opaque powder를 2회, A3 Body powder를 2회 소성하였다. 축성 방법은 내경이 4×4×3mm가 되도록 putty로 채득하고 그 안에 Body powder를 축성한 후 진동을 주어 응축하여 소성하였다. 소성 후 금속 위의 과잉된 powder는 #1000 SiC paper로 연마하였다(Fig.1).

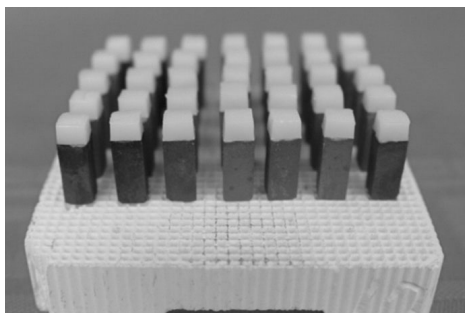


Fig.1. Photograph of specimens used in this study

4) 주사전자현미경 관찰

각 군의 표면 열처리한 금속시편위에 도재를 축성한 후 금속연마기(i-POL, Excelab, Korea)를 사용하여 회전속도 150RPM으로 #400, #600, #800, #1000 SiC paper로 연마하고 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>분말을 첨가하여 경면연마를 한 후 도재-금속 계면에서의 산화층 확산을 관찰하기 위하여 EDX line profile(Scanning electron microscope, S-4700, Hitachi, Japan)를 시행하였다.

5) 도재와 합금의 전단결합강도 측정

전단 결합강도의 측정을 위해 Fig.2.와 같은 시편의 고정 장치를 제작하였다. 시편을 고정 장치에 고정하고 인스트론 만능시험기(Model 1125, instron, Canton, MA)를 사용하였다. 금속-도재 경계부에 upper jig를 위치시킨 후 cross-head speed 0.1mm/min의 속도로 압축력을

가하여 파절시의 순간 최대 하중을 측정하고 도재와 합금 간의 결합력을 산출하였다.

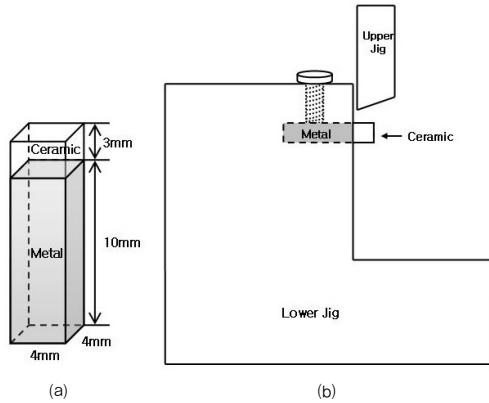


Fig. 2. (a) Final shape and the dimensions of the ceramic-alloy specimen  
(b) Schematic diagram of the shear bond strength test setup the universal testing machine

6) 통계처리

각 군의 결합강도 값의 결과는 일원배치분석(One way ANOVA analysis)을 사용하여 통계처리 하였고, 사후검정은 Duncan's test를 이용하여 유의수준  $\alpha=0.05$ 에서 검증하였다.

III. 결 과

1. EDX analysis

도재-금속관에서 표면 열처리된 금속시편 위에 도재를 소성한 후 금속-도재 계면에서의 결합 형태와 산화층 확산을 관찰하기 위한 것으로 Fig.3.은 BP1에서 BP5까지의 EDX line profile 사진이고, Fig.4.는 WC1에서 WC5까지의 사진이다.

합금을 열처리 하면 산소와의 친화력이 크고 확산속도가 빠른 원소들이 표면으로 이동하여 산화물을 형성하게 되는데, 금속표면 산화막에서 산소농도가 급격하게 증가된 것은 금속표면에 산화물이 형성된 결과로 판단된다. BP1과 WC1은 열처리를 하지 않고 도재를 소성하였지만 도재가 녹기 전에 금속표면에 산화물이 형성되어 도재와 금속 산화물이 결합하고 있음을 관찰하였고 열처리를 하면 도재내로의 금속원소들의 확산은 더욱 멀리까지 관찰되었다. 두 금속 모두 열처리 시간이 길수록 Cr 산화물이 산화층에서 높게 나타났고 도재내로의 확산이 관찰되었으며 도재성분인 Si 이온과 Al 이온이 산화피막내로 확산되는 것이 관찰되었다.

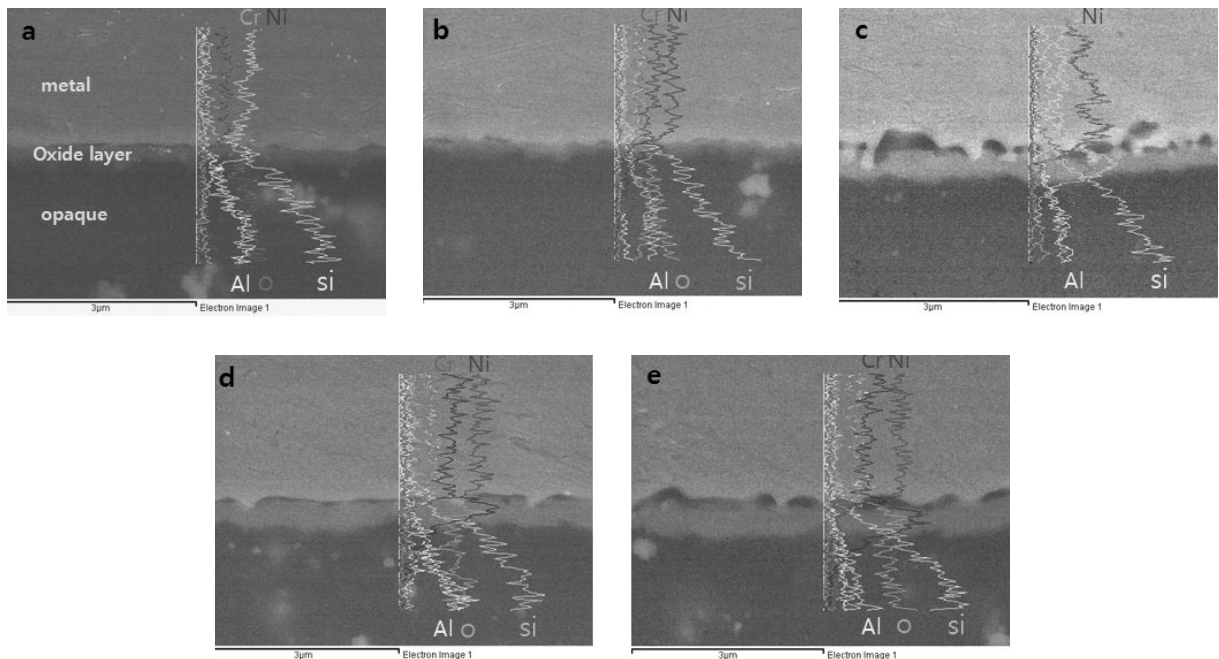


Fig. 3. EDX line profiles on cross section of specimens (a: BP1, b: BP2, c: BP3, d: BP4, e: BP5)

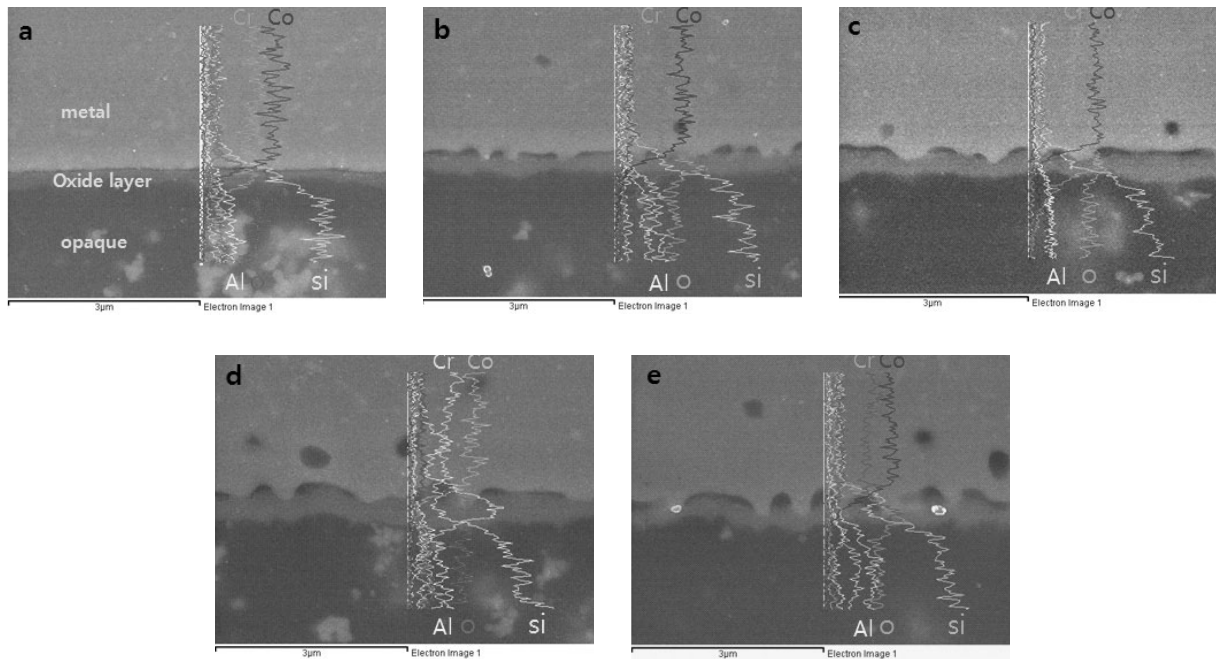


Fig. 4. EDX line profiles on cross section of specimens (a: WC1, b: WC2, c: WC3, d: WC4, e: WC5)

## 2. 전단 결합강도 분석

합금과 도재간의 전단결합강도를 분석한 결과 Bellabond plus 시편의 경우 진공하 980°C에서 5분간 계류한 BP3군이 가장 높은 결합력(50.50MPa)을 보였고, 대기하에서 10분간 계류한 BP5(49.30MPa), 진공하에서 10분 계류한 BP4군(48.04MPa), 대기하에서 가열 후 계류하지 않은 BP2군(47.71MPa), 열처리하지 않은 BP1군(35.19MPa) 순으로 평균 결합강도를 나타내었으며, 통계학적 유의한 차이를 나타냈다( $p < 0.05$ )(Table 3). Wirobond C 시편의 경우 WC2군(50.49MPa), WC5군

(49.00MPa), WC4군(48.99MPa), WC3군(48.14MPa), WC1군(39.66MPa) 순으로 평균 결합강도를 나타내었으며, 통계학적 유의한 차이를 나타냈다( $p < 0.05$ )(Table 4).

Bellabond plus 합금은 BP3군, Wirobond C 합금은 WC2군이 가장 높은 결합강도를 나타냈고 열처리하지 않은 BP1군, WC1군에서 가장 낮은 결합강도를 나타냈다. 두 합금 모두 열처리를 하지 않은 군보다 열처리를 한 경우 높은 결합강도를 나타냈으며, 열처리 시 계류시간과 진공 유무에 따라서는 결합강도가 유사하게 나타났다. (Fig. 7).

Table 3. Shear bond strength of pressed ceramics to Bellabond plus, as analyzed by one way ANOVA

Item	Classification	N	Mean(MPa)±SD	F-value	p
Bellabond plus	BP1	15	35.19±8.87 <sup>a</sup>	7.319	0.000*
	BP2	15	47.71±9.11 <sup>b</sup>		
	BP3	15	50.50±7.89 <sup>b</sup>		
	BP4	15	48.04±9.06 <sup>b</sup>		
	BP5	15	49.30±8.30 <sup>b</sup>		
	Total	75	46.23±10.08		

Note) post-hoc test of Duncan. The group of same alphabet means the same group of average level. The alphabet order means a difference between groups.

Table 4. Shear bond strength of pressed ceramics to Wirobond C, as analyzed by one way ANOVA

Item	Classification	N	Mean(MPa)±SD	F-value	p
Wirobond C	WC1	15	39.66±6.82 <sup>a</sup>	3.285	0.017*
	WC2	15	50.49±7.54 <sup>b</sup>		
	WC3	15	48.14±9.89 <sup>b</sup>		
	WC4	15	48.99±8.51 <sup>b</sup>		
	WC5	15	49.00±8.23 <sup>b</sup>		
	Total	75	47.39±8.90		

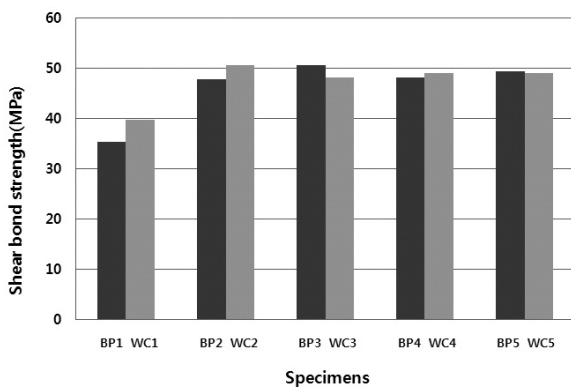


Fig. 5. Means of the bond strength for 5 groups

#### IV. 고 찰

도재용착구조관용 비귀금속 합금은 Ni-Cr계 합금, Co-Cr계 합금, Ti, Ti-6Al-4V 합금을 사용하고 있다. 구조성과 조작성이 우수한 Ni-Cr 합금이 주로 사용되어 왔으나 Ni은 조직자극성, 알러지, 과민반응 및 세포독성을 나타내고 Ni-Cr-Be 합금의 Be은 유해성이 문제가 되고 있다. Co-Cr 합금은 Cr의 함량이 많으므로 구조 온도가 높고 매몰재와의 반응으로 구조 후 매몰재 제거가 어렵지만 Ni-Cr 합금보다 생체안전성이 우수한 Co-Cr 합금을 이용한 심미보철물에 관심이 증대되고 있다.

도재용착구조관은 금속과 무기재료라는 이종 재료간의 가열에 의한 용착으로 결합되는데, 도재를 축성하기 전에 시행되는 금속의 열처리는 금속 표면에 오염된 유기물질을 제거하고 훈주조나 기공과정에서 생긴 내부의 stress를 없애 소둔(annealing) 효과를 얻고 금속 내부의 gas를 방출시켜 도재 제작 시 기포로 인한 균열을 방지하며 도

재와의 결합에 도움을 주는 산화막을 형성하기 위한 것이다(Dent 등, 1982; O'Brien 등, 1976).

도재와 금속 간 용착력은 기계적인 결합, 금속산화물과 도재간의 화학적 결합, 분자간 인력(van der Waals force)에 의한 결합, 금속과 도재간의 열팽창계수의 차이로 인한 압축력 등이 있으며 화학적 결합은 금속의 열처리나 도재소성 과정 중에 금속 표면에 형성된 산화물이 도재 내로 확산되어 도재 내 산화물과 공유결합이나 이온결합을 함으로써 이루어진다(Shell 과 Nielson, 1962; Baran, 1984).

본 연구는 도재용착용 Ni-Cr 합금인 Bellabond plus와 Co-Cr 합금인 Wirobond C를 5가지 열처리 방법을 적용하여 160개의 시편을 제작하였다. 합금의 열처리 조건에 따른 금속 산화물과 불투명 도재 층 사이의 반응을 EDX line profile 방법으로 관찰하였으며, 두 합금의 적절한 열처리 조건을 알아보기와 고온계류시간과 진공여부를 달리한 다음 도재를 소성하여 금속-도재 시편 군들의 전단결합강도를 측정, 비교 분석해 보았다.

합금을 열처리 하면 산소와의 친화력이 크고 확산속도가 빠른 원소들이 표면으로 이동하여 산화물을 형성하게 되는데, 금속 산화물과 도재의 성분 원소들 간에 산화 환원 반응에 의한 화학적 결합을 이룬다(Shell 과 Nielsen, 1962). 열처리에 따른 금속 표면에 산화물이 생성되어 표면 형태가 불규칙해지고 거칠어짐으로써 도재와의 접촉각이 작아지고 젖음성이 향상되어 기계적인 결합력이 높아질 뿐만 아니라 금속의 표면적이 증가되어 원소이동이 더욱 활발해짐으로 화학적 결합도 촉진된다.

도재-금속 계면에서의 EDX line profile을 관찰한 결과, 금속표면의 산화막에서 산소농도가 급격히 증가된 것

은 금속표면에 산화물이 형성되었음을 보여준다. Opaque 분말의 구성성분은 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, SnO<sub>2</sub>로 되어 있어서 이러한 산화물이 도재 용착 시 금속의 산화물과 전자구조로 연결하게 되고 도재와 금속의 결합을 이루게 된다. BP1과 WC1은 열처리를 하지 않고 도재를 소성하였지만 도재가 녹기 전에 금속표면에 산화물이 형성되어 도재와 금속 산화물이 결합하고 있음을 관찰하였고(Bruggers 등, 1986; Hinman 등, 1983) 열처리를 한 나머지 군들은 도재내로 금속원소들의 확산이 더욱 멀리까지 관찰되었다. Bellabond plus와 Wirobond C 합금 모두 열처리 시간이 길수록 Cr 산화물이 산화층에서 높게 나타났고 도재내로의 확산이 더욱 멀리까지 관찰되었으며, 도재의 주성분인 Si 이온과 Al 이온이 산화피막내로 확산되는 것이 관찰되었다.

합금-도재간의 결합강도를 비교하는데 가장 큰 문제는 임상적 실패를 이상적으로 반영하는 적절한 결합강도 실험방법이 없고(Anusavice 등, 1980), 3점 및 4중굽힘 만곡 시험은 도재의 굴곡이 일어나기 전에 금속판의 굴곡이 일어나야 함으로 금속판의 탄성률이 금속-도재간 결합강도에 많은 영향을 주게 되므로(DeHoff 등, 1982) 본 연구에서는 금속의 탄성을 최소화한 전단결합강도 방법을 선택하여 측정하였다.

합금과 도재간의 전단결합강도를 분석한 결과 Ni-Cr 합금인 Bellabond plus 시편의 경우 진공하 980℃에서 5분간 계류한 BP3군이 가장 높은 결합력(50.50MPa)을 보였고, 대기하에서 10분간 계류한 BP5(49.30MPa), 진공하에서 10분 계류한 BP4군(48.04MPa), 대기하에서 가열 후 계류하지 않은 BP2군(47.71MPa), 열처리하지 않은 BP1군(35.19MPa) 순으로 평균 결합강도를 나타내었으며, 통계학적 유의한 차이를 나타냈다(p<0.05). Co-Cr 합금인 Wirobond C 시편의 경우 WC2군(50.49MPa), WC5군(49.00MPa), WC4군(48.99MPa), WC3군(48.14MPa), WC1군(39.66MPa) 순으로 평균 결합강도를 나타내었으며, 통계학적 유의한 차이를 나타냈다(p<0.05).

두 합금 모두 열처리를 하지 않은 군보다 열처리를 한 경우 높은 결합강도를 나타내어 열처리에 의해 생성된 산화물이 도재와의 결합력에 중요한 역할을 한다는 것을 확

인 했고, 계류시간과 진공 유무에 따라 두 금속 모두 결합강도가 비슷하게 나타난 것은 금속과 금속 산화물 사이에서 파절이 일어나는 접착성(adhesive) 결합 실패로 두꺼운 산화층이 쉽게 형성된 결과라 사료된다. 또한 합금과 도재와의 전단결합강도는 합금의 조성과 열팽창계수, 산화막 두께에 의해 좌우되며 조성비에 따라 Co-Cr 합금도 Ni-Cr 합금보다 전단결합강도가 우수할 수 있음을 보고(De Melo 등, 2005)한 결과와 일치하였다.

본 실험을 통해 Co-Cr 합금과 Ni-Cr 합금의 전단결합강도가 유사함을 확인하였고, Ni-Cr 합금의 Ni과 Be의 독성에 따른 잠재적 위험요인으로 인해 생체안전성이 우수한 Co-Cr 합금을 이용한 심미보철물 제작이 증가할 것으로 전망된다.

## V. 결 론

본 연구는 도재용착용 Ni-Cr 합금 중 Be-free의 Bellabond plus와 Co-Cr 합금인 Wirobond C를 이용하여 열처리 조건에 따른 금속 산화물과 불투명 도재 층 사이의 반응을 관찰하였으며, 금속-도재 간 전단결합강도를 측정, 비교 분석해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 열처리를 시행한 군이 열처리를 하지 않은 군보다 도재내로 금속원소들의 확산이 더욱 멀리까지 관찰되었다.
2. 전단결합강도 파절 양상은 두 금속 모두 금속-금속 산화물 사이에서 파절이 일어나는 접착성(adhesive) 결합 실패로 관찰되었다.
3. 전단결합강도는 BP3군, WC2군에서 가장 높게 나타났고 열처리를 하지 않은 BP1군, WC1군에서 가장 낮은 결합강도를 나타냈으며 통계학적으로 유의하였다(p<0.05).
4. 전단결합강도는 Ni-Cr 합금인 Bellabond plus와 Co-Cr 합금인 Wirobond C가 5개군 모두 유사하게 나타났다.

## 참 고 문 헌

- Anusavice KJ, DeHoff PH, Fairhurst CW. Comparative evaluation of ceramic-metal bond tests using finite element stress analysis. *J Prosthet Dent* 59(4), 603, 1988.
- Baran GR. The metallurgy of Ni-Cr alloys for fixed prosthodontics. *J Prosthet Dent* 50(5): 639, 1983.
- Baran GR. Auger chemical analysis of oxides on Ni-Cr alloys. *J Dent Res* 63(1), 76, 1984.
- Bruggers K, Corcoran C, Jeansonne EE, and Sarkar NK. Role of manganese in alloy-porcelain bonding. *J Prosthet Dent* 55(4), 453, 1986.
- Cascone PJ, Massimo m, Tuccillo JJ. Theoretical interfacial reactions responsible for bonding in porcelain-to-metal systems. Part II - Oxidation of alloys. *J Dent Res*, 57, 872, 1978.
- Deger S, Caniklioglu MB. Effects of tin plating on base metal alloy-ceramic bond strength. *Int J Prosthodont*, 11, 165-72, 1998.
- DeHoff PH, Anusavice KJ, Hathcock PW. An evaluation of the four point flexural test for metal-ceramic bond strength. *J Dent Res* 61 (9), 1066-1069, 1982.
- De Melo RM, Travassos AC, Neiaaer MP. Shear bond strengths of a ceramic system to alternative metal alloys. *J Prosthet Dent*. 93 (1), 64-69, 2005.
- Dent RJ, Preston JD, Moffa JP, Caputo A. Effect of oxidation on ceramometal bond strength. *J Prosthet Dent*, 47(1), 59-62, 1982.
- Hinman RW, Widera GEO, Holmes AD Cassel JM. Effects of porcelain/alloy interfacial diffusion zones on thermo-mechanical strain. *J Dent Res*, 62(5), 585, 1983.
- Knap FJ, Ryge G. Study of bond strength of dental porcelain fused to metal. *J Dent Res*, 45(4), 1047, 1966.
- Kuschner M. The carcinogenicity of beryllium. *Environ Health Perspect*, 40, 101, 1981.
- O'brien WJ, Seluk W, Fan OL, Saunders DN. Classification of porcelain enamel interfacial fractures. *J Dent Res*, 55(Special issue B) B188, IADR Abst, 506, 1976.
- O'brien WJ, Ryge G. Contact angles of drops of enamels on metals. *J Prosthet Dent*, 15, 1094, 1965.
- Shell JS, Nielson JP. Study of the bond strength of dental porcelain fused to metal. *J Dent Res*, 41(6), 1424-37, 1962.
- Tsalve DL, Zaprianov ZK. Atomic Absorption Spectrometry in Occupational and Environmental Health practice. *Environ Health Perspect*, 96-101, 1983.
- Vickery RC, Badinell LA. Nature of attachment forces in porcelain-gold systems. *J Dent Res*, 47(5), 683, 1968.
- Wu Y, Moser JB, Jameson LM. The effect of oxidation heat treatment of porcelain bond strength in selected base metal alloys. *J Prosthet Dent*, 66(4), 439, 1991.