

원심 주조한 니켈-크롬 합금의 성량 변화 및 주조 온도에 따른 산화물 측정

김 원 수

대전보건대학교 치기공학과

Composition of nickel-chromium alloy on the centrifugal casting and the influence of quantitative of oxides on the casting temperature

Won-Soo Kim

Department of Dental Laboratory Technology, Daejeon Health College

[Abstract]

Purpose: The aim of this study was to analysis the composition on the centrifugal casting and the oxide on the casting temperature.

Methods: The nickel based alloy were used in this study. Wax pattern specimens (10*10*2) were invested with phosphate-bonded investment in metal rings, the liquid/powder ratio and overall burn-out schedules for these investments were followed in accordance with the manufacturer's instructions. After casting, the alloy specimens were evaluated as regards composition(EPMA). The casting temperatures were as follows: 1400°C and 1700°C. The quantitative analysis of oxides were scanning electron microscope(SEM), energy dispersive spectroscopy(EDS) and line scanning.

Results: Nearer the injection lines showed that there is a large amount of nickel. Quantitative of oxides of Ni-Cr alloy cast from 1400°C is lager than Ni-Cr alloy cast from 1700°C .

Conclusion: Casting when using a centrifugal casting machine centrifugal force affects the composition of the alloy. The higher the temperature, the amount of oxide that is generated many.

○Key words : Beryllium, Casting, Dental alloy, Ni-Cr alloy

교신저자	성명	김 원 수	전화	042-670-9185	E-mail	wskim@hit.ac.kr	
	주소	대전시 동구 가양2동 77-3번지 대전보건대학교 치기공과					
접수일	2012. 9. 4		수정일	2012. 11. 12		확정일	2012. 12. 24

I. 서 론

합금은 그들의 우수한 물리적, 기계적 특성으로 인해 오랜 기간 동안 치과 보철치료를 위한 재료로 사용되어 왔다. 치과계에서 상업적으로 사용될 수 있는 합금에는 몇 가지가 있다. 그 중 금합금은 높은 생체 적합성과 뛰어난 물리적 성질을 갖고 있으나, 비싼 가격 탓에 그것을 대신하기 위한 합금들이 소개되었다.

니켈-크롬 합금은 오랜 기간 동안 금합금을 대신할 수 있는 합금으로 역할을 해왔다. 니켈을 기초로 하는 니켈-크롬 합금은 금속도재관 제작 시 상부 도재를 축성하기 위한 하부 금속 구조물인 코핑 제작 시 가장 많이 사용되는 합금 중 하나로서, 니켈-크롬 합금의 높은 탄성계수는 금을 기초로 하는 합금보다 약 2배 정도 높고, 포세린을 위한 공간을 많이 부여할 수 있다(Leinfelder KF, 1988). Benatti 등(2000)은 니켈-크롬 합금이 뛰어난 부식 저항성을 갖고 있다고 보고하였으며, Aysu 등(2000)은 니켈-크롬 합금이 포세린과의 적절한 열 적합성을 갖고 있다고 보고하였다. 이 밖에도 저렴한 가격과 사용이 편리한 것 등의 장점이 있다.

그러나 몇 종류의 니켈-크롬 합금은 베릴륨을 첨가하고 있는데, 그 이유는 베릴륨을 첨가하면 주조성이 좋으며 상부 도재와의 결합력에도 좋은 영향을 미치기 때문이다. 금속 공학에서는 니켈-크롬 합금에 베릴륨을 첨가하면 니켈과 베릴륨이 서로 공정합금 상을 나타낸다고 발표하였는데, 이 발표 내용에 의하면 공정합금 상은 다른 상에 비하여 낮은 용융온도를 갖으며, 이러한 공정 합금 상은 용융 시 가장 먼저 용융되는 부분으로서 해당 합금의 용융 온도를 감소시키며, 합금의 유동성을 증가시킨다고 보고하였다(Bezzin OL, 1998; Okuno O, 1989). 그러나 Gordon 과 Bowser(2003)는 주조 시 베릴륨 가스를 흡입하거나 주조 후 마무리 또는 광택 작업 시 날리는 베릴륨 분말을 흡입한다면 이것이 발암물질로 작용할 수 있다 보고하였다.

베릴륨을 포함하고 있는 니켈-크롬 합금은 벌크 합금일 때보다 주조 후 대부분의 베릴륨이 소멸되면서 미량만 남으며, 남은 베릴륨은 합금의 표면에 위치하게 된다(Covington JS, 1985). 니켈-크롬 베릴륨 합금의 부식도

는 니켈-크롬의 공정 구조에서 크롬이 대폭 감소함에 따라 상승한다(Hero H, 1987). 크롬, 니오븀, 몰리브덴과 같은 원소들을 니켈-크롬 합금에 첨가하게 되면 합금의 부식 저항성이 상승하게 되는데, 이는 크롬이 크롬옥사이드로 변태되며 해당 합금을 감싸줌으로써 부식을 막아주는 기능을 하기 때문이다(Huang HH, 2003). 니오븀의 경우 낮은 수소이온지수(pH)를 갖는 니오븀옥사이드로 바뀌면서 부식 저항성을 올려주고(Pourbaix M, 1974), 몰리브덴은 다몰리브덴산 화합물의 형태로서 낮은 용해도를 갖으며, 이것은 합금 표면의 피팅형상(부식에 의한 점 형태의 자국)을 지연시키는 역할을 한다(Ogura K, 1984).

이들 크롬, 니오븀, 몰리브덴을 대신하여 합금의 부식 저항성을 높여주기 위한 새로운 방법으로서 합금에 티타늄을 첨가하는 방법이 소개되었는데, 티타늄은 산소와의 친화력으로 인해 부동태 피막을 형성함으로써 우수한 부식 저항성과 함께 우수한 생체적합도를 갖고 있는 것으로 알려졌다(Atwood RC, 2005). 그러나 티타늄 합금의 주조 시 대기로부터의 가스와 반응성이 높기 때문에 주조하기 위해서는 특별한 장비의 사용이 요구된다(Bauer J, 2004). 그리고 사용될 장비는 비활성 환경을 만들어 줄 수 있어야 하고, 오염물질로부터 합금을 보호할 수 있어야 하며, 주조 환경으로부터 가스의 흡수를 막을 수 있어야 한다(Zinelis S, 2000). 금속 주조 시 가스의 소멸은 대부분 가열 시간, 합금의 구성요소 그리고 주조 방법에 의존한다(Tajima K, 1984). 특수 장비의 사용은 강력한 열원으로 짧은 시간 안에 가열할 수 있기 때문에 가스의 흡수를 최소화 할 수 있으며, 주조 후 결과물의 기계적 성질 또한 향상 시킬 수 있다. 주조 시 산소의 존재는 합금 요소의 산화를 야기할 수 있다. 때문에 주조 장비의 사용은 여러 주조 환경을 조절할 수 있을뿐더러 특히 비 귀금속의 경우 주조 결과가 만족스러우면 해당 결과물인 보철물의 완성도까지 좌우할 수 있다(Pagnano VO, 2009).

니켈-크롬 합금의 성량과 주조체 표면의 산화물 생성 여부는 니켈-크롬 합금으로 제작된 보철물이 구강 내에서의 부식 및 수명 기간을 좌우한다(Christopher M, 2007). 적절한 산화막의 생성은 상부 포세린과의 결합에 도움이 되지만, 산화막과 금속과는 열팽창률이 다르기 때

문에 산화막이 과도하게 형성될 경우 산화막이 금속 또는 포세린에 부착된 상태로 박리 현상이 일어나게 되거나 산화막 자체의 파절에 의한 박리 현상이 일어날 수 있다. 이러한 사실들은 이미 오래 전부터 잘 알려진 사실이며 부식의 독성에 대해서도 이미 많은 연구가 논의되었다 (Geis-Gestorfer J, 1989; Hulterstrom M, 1994). 때문에 본 연구에서는 기공소에서 가장 많이 사용하는 주조 방식인 원심 주조를 이용하여 베릴륨이 함유되지 않은 니켈-크롬 합금을 주조한 뒤 주조 시 금속을 주입하는 원심력이 주조 후 합금의 성량에 영향을 미치는지 알아보기 위하여 주조가 완료된 합금을 부위 별로 성량을 분석하여 성량 변화를 살펴봄으로써, 원심주조한 치과 보철물에서 합금 성량의 균질성 여부를 알아보고 주조온도를 1400°C와 1700°C로 나누어 주조한 뒤 생성된 산화물을 측정하여 주조 온도에 따른 산화물 양을 비교해보고, 주조 온도 변화에 따른 산화물 형성과의 상관관계를 알아보고자 한다.

II. 연구 방법

1. 실험 재료

본 연구를 위하여 치과용 왁스(Yetti wax, Yetti Dental International GmbH, Germany)를 이용하여 10mm×10mm×2mm의 판상의 형태로 조각하였다. 조각이 완료된 납형은 통법대로 주입선을 설치하고 매몰, 소환 과정을 실행하였다. 소환 과정이 완료된 후 주조 시편을 제작하기 위하여 치과 보철 치료 시 사용되는 니켈-크롬 합금(New crown, RUBY dental alloy works, Japan)을 선

택하였다. 선택된 니켈-크롬 합금의 성량은 <Table 1>과 같다. 니켈-크롬 합금을 <Fig. 1>과 같은 원심 주조기(Kerr Centrifugal casting machine, Kerr dental, USA)를 이용하여 통법대로 주조를 실시하였다.

Table 1. Composition of nickel chromium alloy ingot

Composition	Nickel	Chromium	Copper	Others
Percentage	74	5	13	8

2. 전자 탐침 미세 분석 시스템(EPMA)을 이용한 원심 주조한 시편의 성량분석

첫 번째로 통상 방법을 이용한 원심 주조 시 금속이 용융된 후 소환 완료된 링으로 주입될 때 작용하는 원심력이 합금의 성량에 영향을 미치는지 알아보기 위하여 주조가 완료된 시편을 <Fig. 2>와 같이 5군데를 지정한 후 해당 부위의 성량을 분석하였다. 1번이 주입선과 가장 가까운 곳이며, 5번은 주입선과 거리가 가장 먼 곳으로 원심력에 의한 합금의 성량이 영향을 받는지 총 5군데를 분석하였으며, 성량 분석에는 전자 탐침 미세 분석 시스템(EPMA)(JXA-8100, JEOL, Japan)을 이용하였다(Fig. 3).

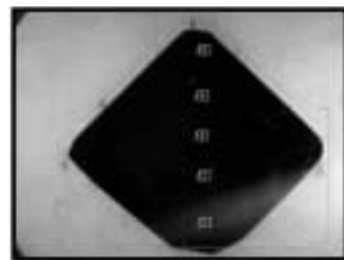


Fig. 2. Casting metal specimens



Fig. 1. Centrifugal casting machine

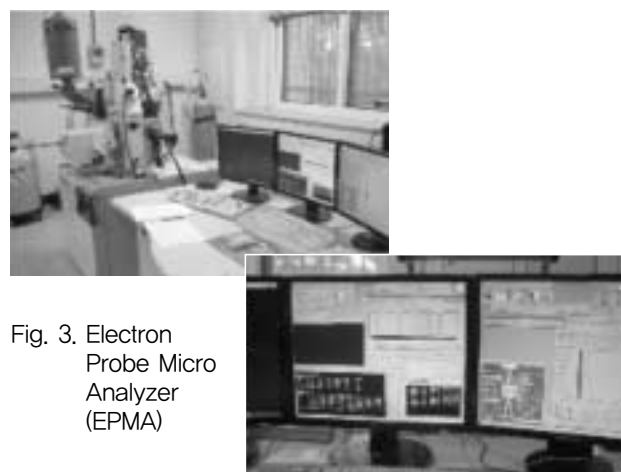


Fig. 3. Electron Probe Micro Analyzer (EPMA)

3. 주조 온도에 따른 합금의 표면 관찰과 생성된 산화물 측정

주조 온도에 따른 주조 체 합금의 표면을 관찰하고 산화막의 양을 조사하기 위하여 10mm×10mm×2mm의 형태로 주조하였다. 첫 번째 그룹은 1,400℃로 주조하였으며, 두 번째 그룹은 1,700℃로 각 그룹 당 시편 1개씩을 주조하였다. 주조는 원심 주조기를 이용하여 주조하였으며(Fig. 1), 주조 온도를 조절하기 위하여 비 접촉식 고온용 적외선 온도계(HH21, Omega, USA)를 사용하여 주조 온도를 조절하였다. 주조 후 합금의 표면은 광학사진(Optical photograph)(I-Scope2001, Leica, Germany)을 이용하여 미세구조를 관찰하였으며, 산화막의 양의 분석은 전자주사현미경(SEM)(XL30S FEG, Philips, USA)을 이용하여 산화물의 위치를 확인한 후 산화물이 있는 곳과 없는 곳을 EDS(XFlash® 5010, Bruker, USA)를 이용하여 성

량을 분석하였다. 또한 주조 온도에 따른 산화막의 양을 보다 정밀하게 비교하기 위하여 산화막 부위를 중심으로 line scanning을 실시하였다.

III. 결 과

1. 원심력에 의한 합금의 성량 분석 결과

원심 주조기를 이용하여 금속을 주조할 때 발생하는 원심력이 주조 후 합금의 성량에 영향을 미치는지 알아보기 위하여 <Fig. 2>와 같이 1, 2, 3, 4, 5번 총 5군데를 지정하여 성량을 측정하였다. 용융상태에서의 합금이 주입 시 발생하는 원심력에 의해 성량 중 비교적 비중이 높은 금속일수록 주입선과는 거리가 먼 5번 지점에 가장 많이 있을 것으로 예상하였으며, 실험 결과는 <Table 2>와 같다.

Table 2. Compositional changes due to the influence of the centrifugal force

Atomic %	1	2	3	4	5
Si	8.2119	7.6685	6.9687	6.7294	6.6612
Cu	11.1822	10.9610	10.4097	10.0774	9.9912
Sn	0.7216	0.6892	0.5967	0.5093	0.4862
Ni	72.8020	73.4531	74.6087	75.0738	75.2312
Cr	7.0823	7.2282	7.4162	7.6102	7.6301
Total	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000	100.0000

예상한 것과 마찬가지로 성량 중 비교적 비중이 높은 금속인 니켈(비중:8.9)이 원심력의 영향을 가장 많이 받아 다른 지점보다 주입선과 거리가 가장 먼 5번 지점에서 가장 많은 양이 있는 것으로 조사되었으며, 반면 성량 중 비교적 비중이 가벼운 규소(비중:2.33)의 경우는 주입선과 가까운 1번 지점에서 다른 지점보다 함량이 많은 것으로 조사되었다(Table 2). 나머지 구리(비중:8.96), 주석(비중:7.298) 그리고 크롬(비중:7.19)은 앞의 니켈과 규소와는 달리 비중과 원심력과의 상관관계의 뚜렷한 경향성을 보이지는 않았다. 5부위에서 측정된 함량을 보다 명확한 차이를 알기 위하여 실시한 통계적 분석 결과에서는 측정된 5부위 간에는 통계적으로 유의한 차이를 보이지는 않았다($p > 0.05$).

2. 주조 온도에 따른 표면 미세구조 관찰 및 산화막의 양 분석 결과

주조 온도를 다르게 하여 주조하였을 때, 발생하는 산화막의 양과 표면을 분석하기 위하여 두 그룹의 시편을 주조하였다. 첫 번째 그룹은 1,400℃로 주조하였으며, 두 번째 그룹은 1,700℃로 주조하였다. 주조가 완료된 시편의 표면을 관찰하기 위하여 광학사진을 촬영한 결과 <Fig. 4>와 같이 두 그룹 모두에서 수지상 결정(dendrite)이 관찰되었다. 그러나 1,400℃에서 주조된 니켈-크롬 합금의 주조체 보다 1,700℃에서 주조된 니켈-크롬 합금의 주조체 표면의 미세구조가 더욱 조대한 것을 알 수 있었다.

1,400℃와 1,700℃에서 주조된 합금 표면을 전자주사

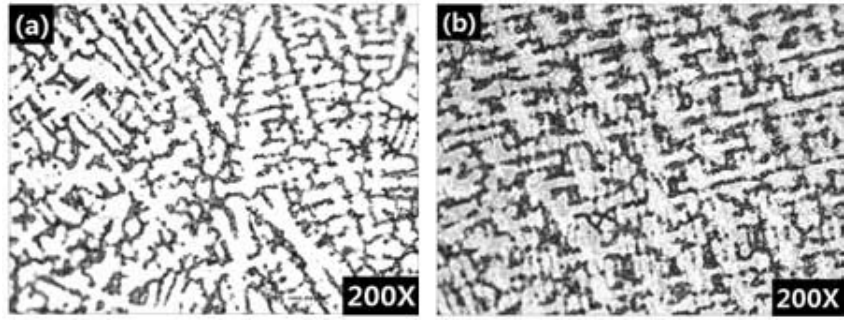


Fig. 4. Optical image of the specimen (a: 1,400°C, b: 1,700°C)

현미경을 이용하여 <Fig. 5>와 같이 각각 300배, 1,000배 확대하여 촬영하여 산화막의 위치를 확인하였다. <Fig. 5>의 ①번은 1,400°C로 주조가 완료된 시편 표면에 산화막이 존재하는 부위이며, ②번은 1,400°C로 주조된 시편 표면에서 산화막이 없는 부위이고, ③번은 1,700°C로 주조한 시편 표면에서 산화막이 존재하는 부위, ④번

은 1,700°C로 주조가 완료된 시편 표면에서 산화막이 존재하지 않는 부위이다. ①, ②, ③, ④번을 중심으로 성량 분석을 EDS를 이용하여 실시한 결과 <Table 3>과 같은 결과를 얻었으며, 1,400°C에서 보다 고온인 1,700°C에서 주조된 니켈-크롬 합금의 주조체가 산화물의 양이 훨씬 많은 것으로 분석되었다.

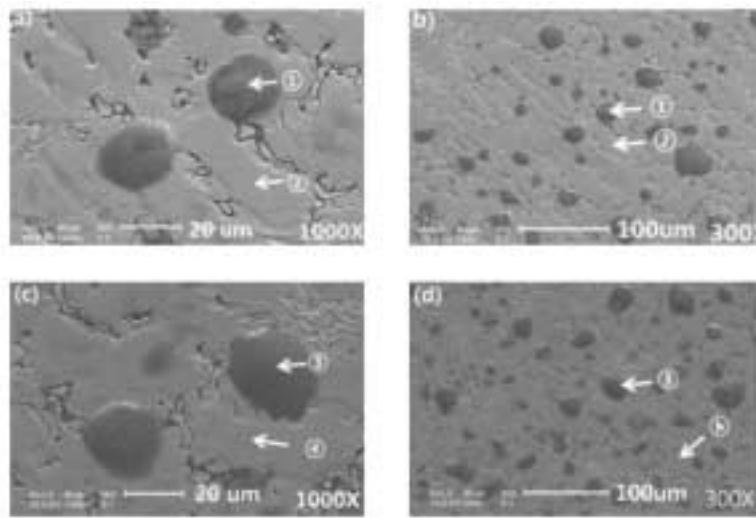


Fig. 5. SEM image of the specimens (a,b: 1,400°C, c,d: 1,700°C)

Table 3. Casting temperature changes according to the amount of oxide

Temp.°C	Point	%	O	Si	Cr	Ni	Cu
1,400°C	1	Wt %	57.09	1.79	4.21	18.54	5.95
		At %	84.41	1.51	1.92	7.47	2.22
	2	Wt %		6.86	7.54	75.27	10.33
		At %		12.31	7.91	69.91	8.87
1,700°C	3	Wt %	73.59		1.28	20.52	4.62
		At %	91.15		0.49	6.93	1.44
	4	Wt %		6.51	7.06	75.67	10.76
		At %		12.69	7.44	70.59	9.28

두 그룹의 시편에서의 산화막 부위를 line scanning을 실시한 결과는 <Fig. 6>과 같다. 노란색 픽이 산화막의 양을 의미하는데, line scanning의 결과 에서도 역시 1,400°C에서 주조된 니켈-크롬 합금 주조체 보다 1,700°C에서

주조된 니켈-크롬 합금 주조체가 산화물의 양이 많다는 것을 확인할 수 있었으며(Fig. 6), 붉은색 픽은 탄화물을 의미하는데 주조 온도가 높아짐에 따라 탄화물의 양 또한 증가한 것을 알 수 있었다.

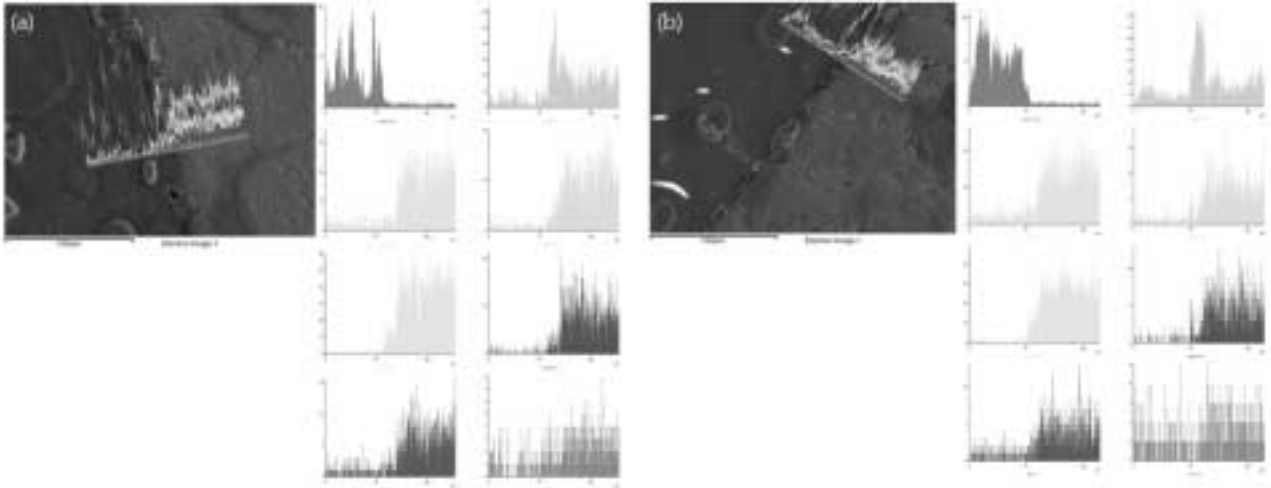


Fig. 6. Line scanning image of the specimens (a: 1,400°C, b: 1,700°C)

IV. 고 찰

비록 그 동안의 니켈-크롬 합금이 우수한 성질을 갖고 있다 하더라도 전문가들이 사용하는데 있어서 합금에 베릴륨을 포함하고 있는 문제 등과 같은 몇 가지 제한점이 있었다. 베릴륨은 니켈-크롬 합금 주조 시 용융점을 낮추어 줌으로써 주조성을 높여주는 역할을 한다(Bezzon OL, 1998; Okuno O, 1989). 베릴륨을 첨가하고 있는 니켈-크롬 합금의 또 다른 장점은 니켈과 베릴륨의 공정합금의 표면에 베릴륨이 산화막으로 작용함으로써 코어를 제작하고 그 위에 상부 포세린 축성 시 포세린과의 결합력을 증진시켜준다(Mackert JR, 1986). 이런 장점들이 있는 반면 베릴륨을 함유한 니켈-크롬 합금은 낮은 부식 저항성을 갖는다(Geis-Gerstorfer J, 1993). 또한 베릴륨이 함유된 합금을 사용하는 경우 사용자에게 해로운 영향을 미칠 수 있는 잠재적 위험이 있기 때문에 현재의 합금에는 베릴륨이 포함되지 않는다. 그러나 베릴륨을 함유한 니켈-크롬 합금이 임상에서 직접 환자들에게 어떠한 문제를 일으켰는지에 대한 연구는 부족한 실정이며, 베릴륨이 함유되어 있지 않은 니켈-크롬 합금의 성질과 관련한

연구 역시 부족한 실정이다.

때문에 본 연구에서는 베릴륨이 함유되어 있지 않은 니켈-크롬 합금을 가지고 원심 주조기를 이용한 주조를 하였을 때 원심력이 합금의 성량에 어떠한 영향을 미치는지 알아보고, 주조 시 작용하는 온도에 따른 산화막의 양의 차이를 조사하여 보았다. 그 결과 비교적 비중이 높은 금속이 원심력에 영향을 미치는 경향성을 보이긴 하였으나, 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($P > 0.05$). 산화막의 경우 1,400°C에서 주조된 합금보다 1700°C에서 주조된 합금 표면에 산화막의 양이 훨씬 많은 것을 알 수 있었다. 때문에 주조 보철물 제작을 위한 주조 시 적절한 온도에서 적절한 시간을 이용한 주조는 정밀한 보철물 제작을 위해서 무엇보다 중요하다. 적절한 온도와 적절한 시간이란 같은 종류의 합금이라 할지라도 합금마다 제조 회사 별로 약간의 성분의 차이가 있을 수 있기 때문에 제조 회사에서 제시하는 온도를 지켜 주조하는 것이 가장 좋다.

본 연구에서는 시편을 제작할 때 원심 주조기를 이용하여 주조를 실시하였다. 본 연구 결과를 볼 때 1,400°C에서 주조된 주조체 보다 1,700°C에서 주조된 주조체의 표면의 산화막의 양이 더욱 많은 것을 확인할 수 있었다. 때

문에 주조 시 주조 온도를 조절하는 것은 무엇보다 중요하다. 주조 시 온도를 적절하게 조절하게 된다면, 주조하는 합금의 과열을 막을 수 있으므로, 합금 내 기포가 생성되는 것도 막을 수 있다. 이는 결과적으로 주조가 완료된 주조체 표면의 형태를 매끄럽게 하여주는 역할을 하며, 표면이 매끄러우면 주조 후 실시하는 마무리 작업과 광택 작업을 용이하게 할 수 있으므로, 결과적으로 작업시간 또한 단축된다는 장점이 있다(Bezzon OL, 2004). 또한 주조 시 합금에 충분한 유동성을 부여하여 주조성을 높이는 것은 완성된 보철물의 임상적인 적합도까지도 영향을 미치기 때문에 각 합금에 맞는 적절한 주조 방법을 적용하여 보철물을 제작하는 것은 무엇보다 중요하다(Bezzon OL, 2006).

제한된 조건 하에서 수행된 본 실험에서는 원심 주조기를 이용하여 니켈-크롬 합금을 주조하였을 때 원심력의 합금의 성량 변화에 영향을 미치는지 알아보고, 주조 온도에 따른 니켈-크롬 합금 표면의 산화물의 양을 분석하고, 표면 미세 결정을 살펴보았다. 그 결과 원심력이 합금의 성량 변화에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었는데, 성분 중 비교적 비중이 무거운 금속인 니켈이 원심력의 영향을 많이 받는 경향을 보였으나, 통계적으로 유의한 차이는 검증되지 않았다($P > 0.05$). 또한 주조 온도가 높을수록 생성되는 산화물의 양이 많아지는 경향을 확인할 수 있었으며, 1,400°C로 주조할 때보다 1,700°C로 주조할 경우 생성되는 산화물의 양이 더 많은 경향을 보였다. 때문에 원심 주조를 이용한 치과 보철물 제작 시 적절한 온도와 시간을 준수하며, 제작하여야 할 것으로 사료된다. 또한 추후에 수행될 연구에서는 원심주조기 뿐만 아니라 기타, 다른 주조 방법을 이용하여 주조를 한 주조체의 성량변화에 대한 연구가 필요하며 산화막의 양이 완성된 금속도재관에 하부 코핑과 상부 포세린과의 결합력에 얼마만큼 영향을 미치는가에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

V. 결 론

1. 원심 주조기로 주조 된 니켈-크롬 합금은 주조 시 발생하는 원심력의 차이에 의하여 성분 중 비교적 비중이

높은 니켈(8.9)이 원심력의 영향을 많이 받았으며, 비교적 비중이 낮은 규소(2.33)가 원심력의 영향을 덜 받은 것으로 확인되었고, 나머지 구리(8.96), 주석(7.298) 그리고 크롬(7.19)은 비중과 원심력의 영향을 연관짓기에는 다소 무리가 있었다. 또한 원심력이 합금의 성량에 영향을 미쳤는지 알아보기 위하여 실시한 통계 분석의 결과에서 측정된 5부위 간에는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($P > 0.05$).

2. 니켈-크롬 합금의 주조 온도가 고온일수록 발생하는 산화물의 양이 더욱 많은 결과를 얻었다.

따라서 원심 주조기를 이용한 주조 시 정확한 온도와 원심력으로 주조하였을 경우 보다 완벽한 보철물을 제작할 수 있으며, 더욱 정밀한 주조체를 제작을 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

Atsu S, Berksun S. Bond strength of three porcelains to two forms of titanium using two firing atmospheres. *J Prosthet Dent*, 84, 567-574, 2000.

Atwood RC, Lee PD, Curtis RV. Modeling the surface contamination of investment castings. *Dent Mater*, 21, 178-186, 2005.

Bauer J, Cella S, Pinto MM, Rodrigues-Filho LE, Reis A, Loguercio AD. Effect of argon purity on mechanical properties, microstructure and fracture mode of commercially pure(cp) Ti and Ti-6Al-4V alloys for ceramometal dental prostheses. *Biomed Mater*, 4, 065002, 2009.

Benatti OF, Miranda Jr WG, Muench A. In vitro and in vivo corrosion evaluation of nickel-chromium- and copper-aluminum-based alloys. *J Prosthet Dent*, 84, 360-363, 2000.

Bezzon OL, de Mattos MGC, Ribeiro RF, Rollo JM. Effect of beryllium on the castability and

- resistence of cerometal bonds in nickel-chromium alloys. *J Prosthet Dent*, 80, 570-574, 1998.
- Bezzon OL, Pedrazzi H, Zaniquelli O, da Silva TB. Effect of casting technique on surface roughness and consequent mass loss after polishing of NiCr and CoCr base metal alloys: a comparative study with titanium. *J Prosthet Dent*, 92, 272-277, 2004.
- Bezzon OL, Barros C, Pagnano VO, Soriani NC. Effect of casting temperature and atmosphere on castability of Ni-Cr alloys: a comparative study with direct flame casting method. *Mater Res*, 9, 237-241, 2006.
- Covington JS, McBride MA, Slagle WF, Disney AL. Castability of alloys of base metal and semiprecious metal for dental castings. *Oper Dent*, 10, 93-97, 1985.
- Covington JS, McBride MA, Slagle WF, Disney AL. Beryllium localization in base metal dental casting alloys. *J Biomed Mater Res*, 19, 747-750, 1985.
- Geis-Gersotfer J, Weber H. In vitro substance loss due to galvanic corrosion in Ti implant/Ni-Cr superconstruction systems. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 6, 475-480, 1989.
- Geis-Gerstorfer J, Passler K. Studies on the influence of Be content on the corrosion behavior and mechanical properties of Ni-25Cr-10Mo alloys. *Dent Mater*, 9, 177-181, 1993.
- Gordon T, Bowser D. Beryllium: genotoxicity and carcinogenicity. *Mutat Res*, 533, 99-105, 2003.
- Hero H, Valderhaug J, Jorgensen RB. Corrosion in vivo and in vitro of a commercial NiCrBe alloy. *Dent Mater*, 3, 125-130, 1987.
- Huang HH. Surface characterization of passive film on NiCr-based dental casting alloys. *Biomaterials*, 24, 1575-1582, 2003.
- Hulterstrom M, Nilsson U. Cobalt-Chromium as a framework material in implant-supported fixed prostheses: A 3-year follow-up. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 9, 449-454, 1994.
- Leinfelder KF, Lemons JE. *Clinical restorative materials and techniques*. Philadelphia: Lea & Febiger, 1988.
- Mackert JR, Parry EE, Fairhurst CW. Oxide morphology and adherence on dental alloys designed for porcelain bonding. *Oxid Met*, 5, 319-333, 1986.
- Ogura K, Ohama T. Pit formation in the cathodic polarization of passive iron IV. Repair mechanism by molybdate, chromate and tungstate. *Corrosion*, 40, 47-51, 1984.
- Okuno O, Tesk JA, Penn R. Mesh monitor casting of Ni-Cr alloys: element effects. *Dent Mater*, 5, 294-300, 1989.
- Pagnano VO, Esquivel Mde C, Leal MB, Felipucci DN, Bezzon OL. Effect of casting atmosphere on the shear bond strength of a ceramic to Ni-Cr and Ni-Cr-Be alloys. *Braz Dent J*, 20, 138-142, 2009.
- Pourbaix M. *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*, 2nd ed., Houston: National Association of Corrosion Engineers, 1974.
- Tajima K, Kakigawa H, Kozono Y, Hayashi I. Oxygen and nitrogen uptake in dental Ni-Cr alloy castings by several melting methods. *Dent Mater J*, 3, 262-271, 1984.
- Wylie CM, Shelton RM, Fleming GJ, Davenport AJ. Corrosion of nickel-based dental casting alloys. *Dent Mater*, 23, 714-723, 2007.
- Zinelis S. Effect of pressure of helium, argon, krypton, and xenon on the porosity, microstructure, and mechanical properties of commercially pure titanium castings. *J Prosthet Dent*, 84, 575-582, 2000.