

주조방식에 따른 티타늄 주조체의 내부결함 비교

이 경 은* · 김 부 섭 · 정 인 성

(부산가톨릭대학교 보건과학 대학원*, 부산가톨릭대학교 보건과학대학 치기공학과)

Abstract

Comparison of internal porosity of dental titanium castings with different casting machines

Kyung-Eun Lee*, Bu-Sob Kim, In-Sung Chung

Dept. of Dental Lab. Science, Graduate School of Health Science, Catholic University of Pusan, Korea,
Dept. of Dental Lab Science, Catholic University of Pusan, Korea*

The purpose of this study was to evaluate the titanium castability (internal porosity) between pressure type casting machine & centrifugal casting machine with air-vent or not.

Internal porosity is a well-known problem in dental titanium casting, resulting in inferior mechanical properties of dental restorations.

To evaluate the castability, the square plate was chosen. 40 plate patterns(20 ×20 ×1.8mm)were attached to funnel-shaped sprue. Then 20 plate patterns were attached air-vent.

They were invested in titanium investment material and cast in a pressure type casting machine(20castings) and centrifugal casting machine(20castings). Each group were divided with air-vent(10castings) or not(10castings).

The titanium castings were evaluated by radiographic photograph for the location of the internal porosities.

The percentage porosity of each specimen was determined using standardized digital radiographs.

교신	성명	이 경 은	전화	010-4435-0722	E-mail	libra02@hanmail.net
저자	주소	서울시 양천구 신월5동 24-5 강북④ 201호				

The results were analyzed with analysis of variance and t-test for paired comparison between two groups.

• Key word : Air-vent, Casting machine, Internal porosity, Titanium.

I. 서 론

티타늄은 미세경도와 항복강도 같은 기계적 성질이 우수할 뿐만 아니라 낮은 비중, 높은 부식저항성으로 인해 1950년대부터 여러 공학 분야에서 유용하게 사용되어 왔다(Kupper H., 1992; Wang RR.과 Boyle AM., 1993). 또한 생체적합성이 뛰어나고 금합금보다 낮은 열전도성으로 인해 시술 후 열에 의한 지각과민을 감소시키기 때문에 치과보철물의 재료로서도 각광받고 있다(Parr 등, 1985; Eugene과 Peter, 1993).

그러나 용융점이 높고 고온에서 산소, 질소, 수소 등과 친화성이 있어 산화층(TiO_2)을 쉽게 형성하며 비중이 낮아서 통상적인 lost-wax technique 주조법으로는 주조하기 어려운 단점이 있다(Bessing과 Bergman, 1992; Miyazaki, 1995).

이러한 이유로 치과용 티타늄 crown을 제작하는 기법으로 CAD/CAM 또는 방전가공을 이용하여 제작하는 방법이 개발되어 티타늄 주조의 어려움을 해결하였으나 이는 고도의 기술력과 고가의 장비를 필요로 하고 복잡한 형태의 보철물을 제작하는데 한계가 있다(Andersson 등, 1989).

따라서 납형을 형성한 후 매몰·소환하여 주

조하는 기존의 lost-wax technique을 사용하되 티타늄 주조의 어려움을 극복하기 위한 여러 가지 방법이 개발되었다. 티타늄 주조 시 높은 용융온도에서 산화층이 형성되는 것을 최대한 억제시키기 위하여 전기 아크나 고주파 등의 고온의 열원으로 아르곤이나 헬륨 같은 불활성 기체의 분위기 하에서 티타늄을 용융시키고 가압법 또는 가압·흡인법, 원심주조법으로 주조하는 티타늄 전용 주조기가 개발되었고, 또한 티타늄의 높은 용융점에서 견딜 수 있는 충분한 내열성과 티타늄의 수축보상을 보상하고 티타늄의 산화를 억제할 수 있도록 화학적 안정성을 가진 매몰재가 개발되었다(Watanabe 등, 1992; Al-mesmar 등, 1999; Elipoulos 등, 2004).

그러나 이러한 티타늄 전용 주조기와 매몰재의 개발에도 불구하고 티타늄 주조체에는 불완전한 주조와 내부기포 같은 주조결함이 흔히 발견된다. 이 중 내부 기포(internal porosity, 주조소-鑄造巢)의 발생에 관여하는 요인으로는 주조방식, 매몰재의 통기성(Syverud과 Hero, 1995), chamber간의 압력차(Hero 등, 1993; Watanabe 등, 1997), 주조압 작용 방향의 영향(정다운, 2005), 주입선의 형태(Chan, 1997; Al-Mesmar 등, 1999; 허숙명, 2006) 등이 있

다. 특히 주조결함의 대책으로 많이 사용되고 있는 air-vent(배기공) 또한 주조성에 영향을 준다는 것이 연구, 보고 되고 있다(김장주 등, 2002).

주조방식에 따른 주조성의 분석으로는 都賀谷 등이 원심방식과 가압·흡인방식에서 다른 양상의 내부기포 즉, 발생 부위가 다름을 보고한 바 있으며(都賀谷 등, 1986) Eliopoulos 등은 여러 가지 다른 방식의 주조기를 사용한 주조성 실험에서 주조성 차이가 없음을 보고하고 있다(Eliopoulos 등, 2004). 또한 가압·흡인방식에서 티타늄 주조 시 air-vent를 부착하면 내부기포의 발생이 증가한다는 보고도 있다. 이처럼 가압·흡인방식의 주조기에서 air-vent를 부착 시 주조성이 낮아지는 것은 주조방식의 특성 상 매몰재의 통기성이 높아지면 오히려 주조성이 낮아지는 것과 비슷한 현상으로 볼 수 있다(김장주 등, 2002). 그러나 이는 가압·흡인주조방식을 사용한 경우이며 원심주조방식에서의 연구는 아니었다. 특히 티타늄전용 주조기는 초창기 원심주조방식을 채택하다가 가압·흡인방식의 우수성이 인정되어 주류를 이루고 있는 추세인데 근래에는 다시 원심주조방식을 도입한 새로운 기계들이 개발되고 있기 때문에 이에 대해 두 가지 방식의 비교분석도 필요한 시점이다.

본 연구에서는 치과정밀주조에서 주조배압 다

공이나 배압(back-pressure)에 의한 주입불량의 대책으로 자주 이용되는 air-vent의 효과를 티타늄 주조에서 확인하고, 두 가지 다른 방식의 티타늄 주조기를 사용한 주조실험에서 내부 기포의 생성을 상호 비교하고자 하였다.

티타늄주조용 가압주조기와 원심주조기에서 주조 후 주조체의 내부기포 수를 티타늄 전용 X-ray 촬영기로 촬영하여 상호 비교 분석하여 air-vent의 부착유무와 주조방식에 따른 내부 기포의 발생정도를 조사, 보고한다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험군의 분류

주조방법과 air-vent 부착유무에 따른 실험군의 분류는 Table 1과 같다.

가압방식 주조기를 사용하며 air-vent를 부착하지 않은 그룹을 ① PN, 가압방식 주조기를 사용하며 air-vent를 부착한 그룹을 ② PA라 하였다. 또한 원심방식 주조기를 사용하며 air-vent를 부착하지 않은 그룹을 ③ CN, 원심방식 주조기를 사용하며 air-vent를 부착한 그룹을 ④ CA이라 하였다. 각 그룹의 시편 수는 10개씩

Table 1. Classification of experimental groups

Group	Casting machine	Air-vent	number of specimens
① PN	pressure type	no air-vent	10
② PA	pressure type	air-vent	10
③ CN	centrifugal type	no air-vent	10
④ CA	centrifugal type	air-vent	10

으로 하였다.

본 실험에서는 가압주조방식(Rematitan Autocast, Dentaaurum, Germany)주조기와 원심주조방식(Supercast, SEIT, Italy)의 주조

기 2종을 사용하였다(Table 2).

air-vent는 지름이 1.0mm인 round wax를 사용하였다.

Table 2. Experimental casting machines used in this study

Brand	Casting method	Heat source	Atmosphere
Autocast, Dentaaurum, Germany	pressure	Arc	Ar
Supercast, SEIT, Italy	centrifugal	high-frequency	Ar

2. 시편 제작

주조성을 평가하기 위해서 두께 1.8mm인 plate wax를 가로 20mm, 세로 20mm의 정사각형 모양으로 절단한(20mm×20mm×1.8mm) 후 직경 3.0mm, 길이 5.0mm의 sprue를 붙여 40개의 왁스 모형을 제작하였다. 왁스 모형을 20개씩 두 그룹으로 나누어 한 그

룹에는 직경 1.0mm, 길이 20mm의 air-vent를 부착하였고 다른 한 그룹은 air-vent를 부착하지 않았다(Fig. 1).

Sprue 형태는 주조성이 우수한 깔대기 모양을 채택하였다(Guttal와 Patil, 2007).

① PN, ② PA 그룹은 티타늄 가압주조기 전용 매몰재(Rematitan plus, Dentarium, Germany)

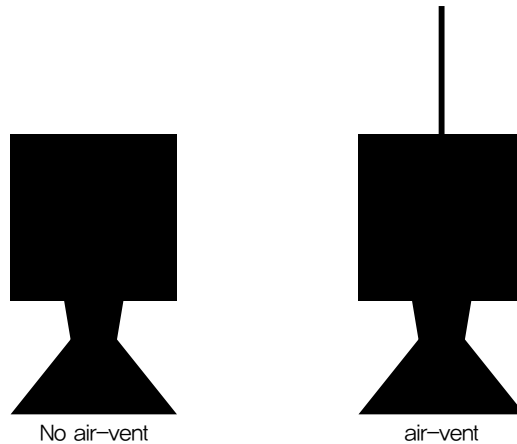


Figure 1. Diagrammatic representation of specimens

로, ③ CN, ④ CA 그룹은 티타늄 원심주조기 전용 매몰재(Ti-tec, SEIT, Italy)로 진공상태에서 혼합하고 매몰하였으며 상부를 슬라이드 글

라스로 덮은 후 표면이 직각이 되도록 경화시켰다. W/P ratio, 매몰재의 경화시간, 그리고 소환 과정은 각 제조사의 매뉴얼에 맞게 처리하였다.

금속은 Cp Titanium ingot를 사용하였다. ① PN, ② PA 그룹은 가압주조기(Rematitan Autocast, Dentaureum, Germany)를 이용하고, ③ CN, ④ CA 그룹은 원심주조기(Supercast, Seit, Italy)를 사용하여 각 그룹 당 10개씩 총 40개의 주조를 하였다.

3. 주조성과 주조결함의 측정

주조 후 왁스 패턴의 재현여부를 관찰하고, 제작된 시편을 티타늄 전용 내부 주조결함 측정기인 x-ray기(Schultz Dental, Germany)를 사용하여 촬영한 다음 내부기포의 형태, 크기를 비교하였다.

4. 통계처리

각 실험군 별로 내부기포 수의 평균과 표준편차를 계산하였다. 통계처리는 SPSS를 사용하였으며, 주조방법과 air-vent의 부착여부에 따른 내부기포의 수를 검정하기 위하여 일원변량 분산분석(one-way ANOVA)을 시행하였다.

Ⅲ. 실험 결과 및 고찰

1. 내부기포 X-ray 검사 결과

Table 3. Porosities of specimens by different casting machines and air-vent(unit: ea)

Group	N	Mean	SD	Max	Min
① PN	10	1.60	4.12	13	0
② PA	10	3.20	6.07	16	0
③ CN	10	0.40	0.52	1	0
④ CA	10	0.10	0.32	1	0

	① PN	② PA	③ CN	④ CA
S1	0	0	0	0
S2	0	3	0	1
S3	0	0	1	0
S4	3	0	0	0
S5	0	16	0	0
S6	0	0	0	0
S7	0	0	0	0
S8	0	0	1	0
S9	13	0	1	0
S10	0	13	1	0
Mean	1.60	3.20	0.40	0.10
SD	4.12	6.07	0.52	0.32

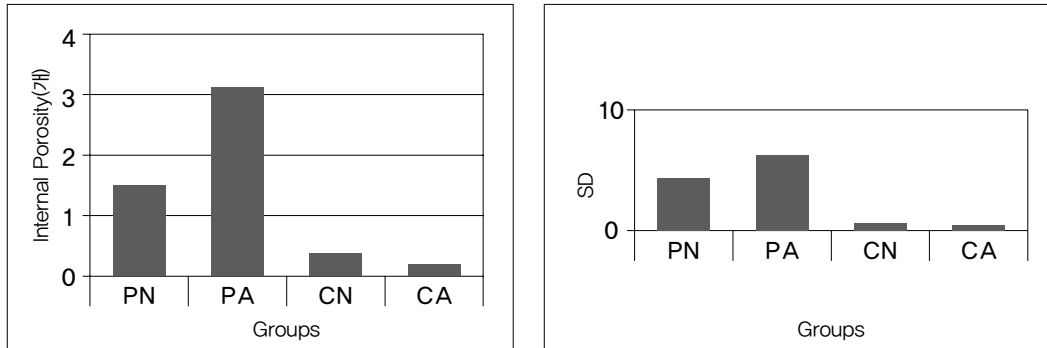


Figure 2. Means and standard deviations(SD) in the number of porosities

Table 4. Measurement of internal porosity between different cast machines with air-vent or not, as analyzed by one-way ANOVA

Group	N	Mean	SD	Std.Error	95% Confidence interval for Mean		Lower bound	Upper bound
					Min.	Max.		
① PN	10	1.6000	4.11501	1.30128	-1.3437	4.5437	.00	13.00
② PA	10	3.2000	6.06996	1.91949	-1.1422	7.5422	.00	16.00
③ CN	10	.4000	.51640	.16330	.0306	.7694	.00	1.00
④ CA	10	.1000	.31623	.10000	-.1262	.3262	.00	1.00
합 계	40	1.3250	3.74431	.59203	.1275	2.5225	.00	16.00

Group	Sum Squares	df	Mean Squares	F	Sig.
Between groups	59.475	3	19.825	1.465	.240
Within groups	487.300	36	13.536		
Total	546.775	39			

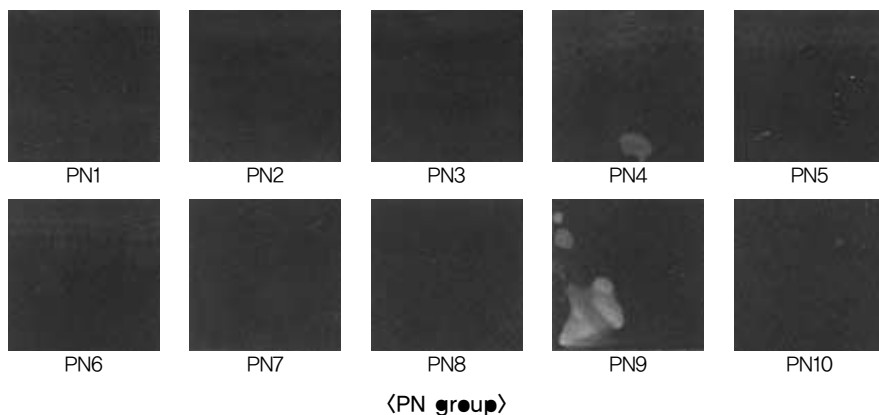


Figure 3. X-ray radiographs of specimens

→ 계속

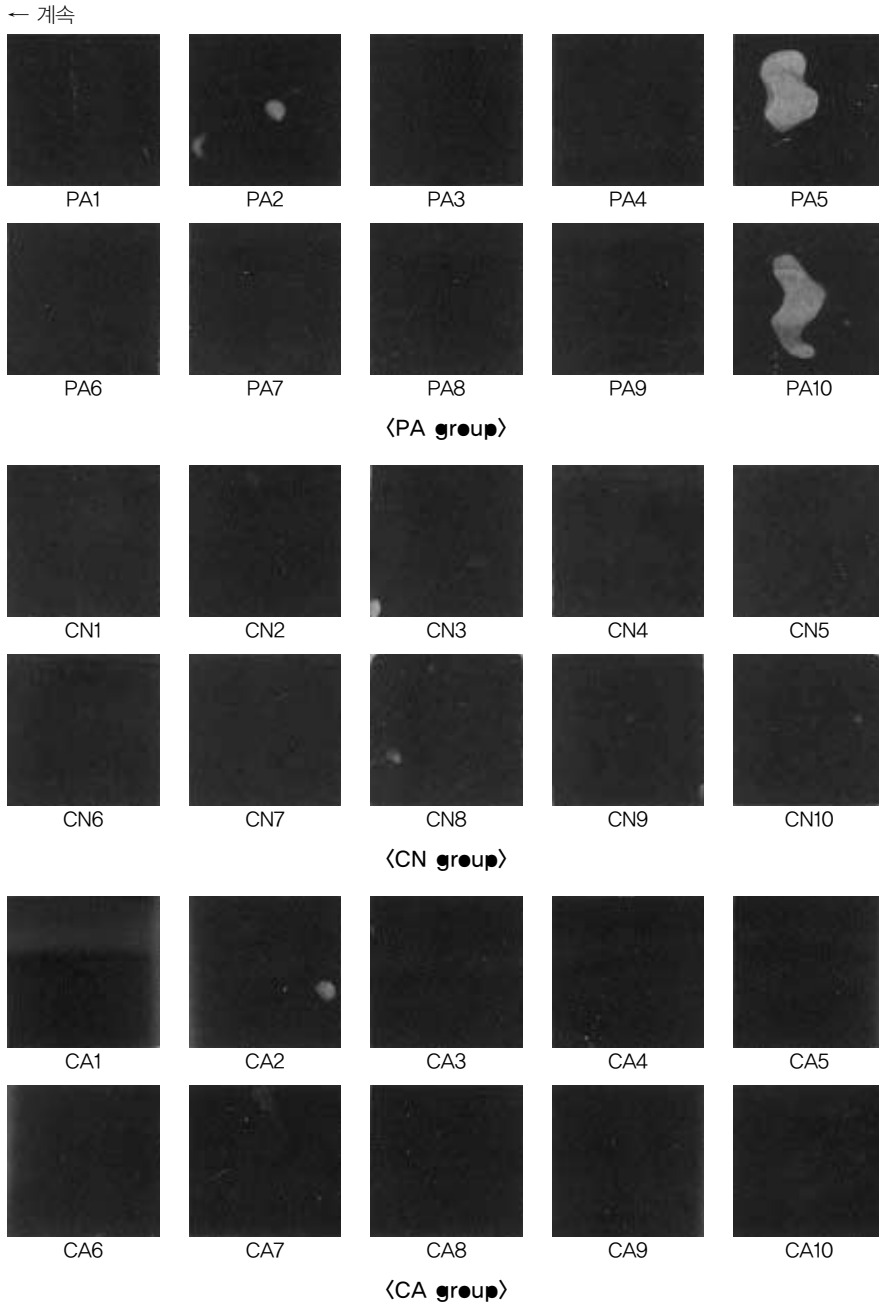


Figure 3. X-ray radiographs of specimens

주조기와 air-vent의 부착 유무에 따른 단위 면적당 내부기포 수는 Table 3, Fig. 2-3과 같다.

Table 3과 Fig. 2는 주조 후 주조체의 내부기포 크기와 개수를 조사한 표와 그래프이다. 가

로, 세로 20mm의 plate를 100등분하여 작은 사각형 1개 크기의 내부 기포를 $1(2 \times 2\text{mm}^2)$ 로 하여 개수를 측정하였다.

Table 4는 주조방법과 air-vent의 부착여부에 따른 내부기포의 수를 검정하기 위하여 일원변량 분산분석(one-way ANOVA)을 시행한 표이다.

Fig. 3은 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 1.8\text{mm}$ plate의 주조체의 X-ray 사진이다.

2. 고 찰

본 연구에서는 air-vent의 부착유무와 주조방식에 따른 정밀주조시의 티타늄의 내부 기포 발생의 차이를 살펴보고자 하였다. 주입선의 길이는 주조 결과에 미치는 영향이 적다는 보고에 따라 제조사의 지시대로 5.0mm가 되도록 설계하였으며(Vidovic Y. 등, 1995), 주입선의 냉각 속도가 왁스 패턴의 냉각보다 빠르면 수축 기포가 발생할 수도 있으므로 주조체의 최후부보다 더 두꺼운 주입선을 사용하였다(Kuroda T. 등, 1971). 또한 주입선과 왁스 패턴의 부착부 형태에 관해서도 부착부를 좁게 해주면 기포가 많이 발생한다는 보고에 따라 부착 부위를 넓게 깔대기 형태로 했다(Verrett RG.와 Duke ES., 1989; Guttal S. 와 Patil NP, 2007). 매몰재는 각 주조기 회사에서 출시되는 티타늄 전용 매몰재를 사용하였으며 W/P ratio, 매몰재의 경화시간 및 소환 계획은 각 제조사의 매뉴얼에 따랐다.

본 실험의 주조 결과 네 그룹 간 통계학적으로 내부 기포 생성의 차이는 없었다. 통계학적으로 측정된 주조 티타늄의 내부기포의 비교에서 주

조결함 발생정도는 원심 주조방식과 가압주조 방식 사이에 통계학적으로 유의차가 없었으며 가압방식, 원심방식 주조기 모두 air-vent의 효과에 대한 유의차가 없었다.

이는 각기 다른 주조법으로 티타늄을 주조하여 주조체의 변연 적합성을 측정한 결과 모두 비슷한 평균값을 가지고, 임상적으로 받아들여질 만한 변연 적합도를 보여 티타늄의 주조법 간에 유의차를 보이지 않는 것으로 보고 된 연구결과와 유사한 양상을 보인다(Christer와 Maud, 1992; Eliopoulos 등, 2004). 근래 개발된 주조기들은 모두 일정 이상의 주조압을 유지하며 주조기의 특성에 맞는 전용 매몰재를 제조하고 있으며, 주조환경을 진공이나 불활성분위기로 만들어 양질의 정밀주조를 행할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한 air-vent의 부착여부에 따른 유의차가 없음도 Chan 등의 연구결과와 유사하게 나타났다(Chan 등, 1997).

본 실험 결과 주조방식과 air-vent의 부착 여부에 따른 내부기포의 유의차는 없었지만 주조 결과 내부기포의 개수 비교에서 기포 발생 정도는 원심주조방식이 더 적었으며 가압주조방식에서는 air-vent를 부착하지 않은 쪽이 내부기포의 발생이 적었고 원심주조방식에서는 air-vent를 부착한 쪽이 내부기포의 발생이 적었다.

매몰재의 통기성은 티타늄의 주조성에 영향을 끼친다. 티타늄 주조에 있어서 가압·흡인식 주조방식 보다는 가압식 주조방식이 보다 우수한 주조성을 나타내는 경향이 있는데, 이는 통기성이 낮은 매몰재를 사용한 경우 흡인력을 병행한다 하더라도 그 흡인력이 매몰재의 미세한 내부까지 미치지 어렵기 때문에 가압만인 상태에서

용융금속이 주형 내로 유입되면서 내부결합이 줄어들는 경향이 있기 때문이다(김장주 등, 2002). 즉 가압구조방식의 경우 통기성이 낮은 매물재를 사용함으로써 내부기포를 감소시켜 줄 수 있다(정다운, 2005). 반면에 매물재의 통기성이 낮은 경우 용융 금속의 주입 시 주형 내에서 배압이 발생함으로써 기포가 생길 수 있으므로 통기성이 높은 매물재를 사용해야 한다는 연구도 있다(Hero 등, 1993). 따라서 선행 연구 결과들로 볼 때 상대적으로 구조압이 낮은 가압식 구조기를 사용할 때에는 통기성이 낮은 매물재를 사용함으로써 미세한 부분까지 가압이 되도록 하여 구조체의 내부결합을 낮춰 주며, 구조압이 높은 원심 구조기의 경우 통기성이 높은 매물재를 사용함으로써 배압을 방지할 필요가 있음을 알 수 있다.

또한, 구조법과 air-vent의 부착 여부에 따른 구조성을 살펴보면 가압·흡인 방식의 경우 가압 방식에 의해 구조한 구조체보다 내부기포가 많이 나타나는 경향이 있는데 이는 흡인력을 병용할 때 용융 금속이 주형 벽을 따라 흐르는 경향이 강하게 나타나는데 이 때 용탕이 흡입되면서 주형벽에 부딪혀서 난류를 형성하기 때문이라는 보고가 있다. 이것은 용융 티타늄이 주형으로 주입될 때 흐름방향이 내부결합과 밀접한 관련이 있음을 나타내고 있다. 또한 티타늄의 비중은 매우 낮기 때문에 중력가속도의 20배가 넘는 원심력을 이용한 원심구조 방식이 가압·흡인 방식보다 정교한 구조체를 만들 수 있다는 연구가 있으나(Greener 등, 1986) 구조 시 높은 구조압으로 인한 배압으로 기체의 충분한 유출이 어렵기 때문에 구조성이 저하될 수도 있다고 하

였다(Watanabe 등, 1991). 반면에 Watanabe는 원심방식의 구조는 원심력이 가스를 분리시켜 기포를 무시할 수 있는 작은 크기로 줄임으로써 우수한 구조성이 보인다고 하였다.

따라서 가압구조 방식은 상대적으로 낮은 압력으로 주형 내 기체가 충분히 유출될 수 있기 때문에 air-vent의 부착이 통기성을 필요이상으로 높임으로써 오히려 구조성이 떨어지며, 원심구조 방식의 경우 높은 구조압으로 인한 기체의 불충분한 유출로 발생하는 구조결합의 대책으로 air-vent 부착하여 통기성을 높임으로써 구조성이 높아진다고 볼 수 있다. 반면에 가압·흡인 방식이 원심구조 방식보다 더 우수한 구조성을 보인다는 보고도 있는데, 이는 가압·흡인 방식에서 용융 금속의 흐름이 판상인 반면 원심구조 방식은 와류상이어서 원심구조 방식에 더 많은 기포가 함입된다는 것이다(Bessing 등, 1992).

이로써 선행된 연구들과 본 실험의 결과로 유추해볼 때 가압구조 방식의 경우 통기성이 낮은 매물재를 사용하는 것이 구조성에 유리하며, 따라서 air-vent를 부착하는 것이 오히려 구조성을 떨어뜨린다고 볼 수 있다. 반면 원심구조방식의 경우 상대적으로 가압구조 방식에 비한 높은 구조압으로 인해 배압이 발생할 수 있으므로 통기성이 좋은 매물재와 air-vent를 사용함으로써 구조성을 높여줄 수 있다.

티타늄 정밀구조는 계속하여 구조기와 재료 및 기술에 대해 개선 연구를 하고 있다. 티타늄이 임상에서 치과보철물의 금속으로써 보다 널리 사용되기 위해서는 티타늄의 구조성은 더욱 향상되어야 하며, 특히 구조체의 미세부분까지

재현하기 위해서는 티타늄의 주조성에 영향을 미치는 여러 가지 요소들에 대한 연구가 복합적으로 이루어져야 할 필요가 있다.

IV. 결 론

주조방식과 air-vent 유무에 따른 티타늄 주조체의 내부기포 발생을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 티타늄 주조체의 내부기포의 비교에서 주조 결합 발생 정도는 ① 가압주조방식을 사용하고 air-vent를 부착하지 않은 그룹(PN)에서 평균 1.6개 ② 가압주조방식을 사용하고 air-vent를 부착한 그룹(PA)에서 평균 3.2개 ③ 원심주조방식을 사용하고 air-vent를 부착하지 않은 그룹(CN)에서 평균 0.4개 ④ 원심주조방식을 사용하고 air-vent를 부착한 그룹(CA)에서 평균 0.1개로 나타나 가압주조방식이 원심주조방식보다 많았으나 통계적으로 유의차는 없었다.

2. 가압주조방식, 원심주조방식 주조기 모두 air-vent의 효과에 대해서는 통계적으로 유의차가 없었다.

참 고 문 헌

김장주, 강후원, 노학, 백승남, 이기대, 이태정, 정

석민, 정종현, 최운재. 치과주조학. 지성출판사, 1986.

정다운. 주조기와 매몰재에 따른 티타늄의 주조성에 관한 연구. 전남대 대학원 석사학위 논문, 2005.

허숙명. 주입선 설계가 티타늄 주조체의 내부기포 발생에 미치는 영향. 부산대 대학원 석사학위 논문, 2006.

Al-Mesmar HS, Morgano SM, Mark LE. Investigation of the effect of three sprue designs on porosity and the completeness of titanium cast removable partial denture frameworks. J Prosthet Dent, 82: 15-21, 1999.

Andersson M, Bergman B, Bessing C, Ericson E, Lundquist P, Nilson H. Clinical result with titanium crowns fabricated with machine duplication and spark erosion. Acta Odont Scand, 47: 279-86, 1989.

Bessing C, Bergman M. The castability of unalloyed titanium in three different casting machines. Swed Dent J, 16: 109-113, 1992.

Chan D, Guilloiry V, Blackman R, Chung KH. The effects of sprue design on the roughness and porosity of porosity of titanium castings. J Prosthet Dent, 78: 400-404, 1997.

Christer B, Maud B. The castability of unalloyed titanium in three different casting machines. Swed Dent J., 16: 109-113, 1992.

- Compagni R, Faucher RR, Yuodelis RA. Effects of sprue during casting, machine, and heat source on casting porosity. *J Prothet Dent*, 52; 41-45, 1984.
- Eliopoulos D, Zinelis S, Papadopous T. Porosity of cpTi casting with four different casting machines. *J Prosthet Dent*, 92; 377-381, 2004.
- Eugene PL, Peter M. Titanium and titanium alloys as dental materials. *Int Dent J*, 43; 245-253, 1993.
- Greener EH, Moser JB, Opp J, Szutgot K, Marker BC. Properties of dental castability of Ti-6Al-4V. *J Dent Res*, 65; 301, 1986.
- Guttal SS, Patil NP. Effect of sprue design on the castability and internal porosity in pure titanium castings. *Quintessence*, 38; 78-82, 2007.
- Hero H, Syverud M, Waarli M. Mold filling and porosity in casting of titanium. *J Dent Res*, 9; 15-18, 1993.
- Kupper H. Pure titanium as an alternative material in restorative dentistry. *QDT*, 143-52, 1992.
- Kuroda T, Ida K, Yamaga R. Solidification time in the sprue during casting. *J. Osaka Univ. Dent Sch.*, 11; 17-30, 1971.
- Miyazaki T. Recent progress in titanium dental casting technologies and current problems for a clinical application. *Quintessence*, 11; 171-182, 1992.
- Miyazaki T. Casting of titanium and its alloys: Metal surface and ceramics Proceeding of international Symposium on titanium in dentistry, 3; 120-133, 1995.
- Parr GR, Gardner LK, Toth RW. Titanium; the mystery metal of implant dentistry Dental materials aspects. *J prothet Dent*, 54; 410-414, 1985.
- Syverud M, Hero H. Mold filling of Ti castings using investments with diffetent gas permeability. *Dent Mater*, 11; 14-18, 1995.
- Takahashi J, Kimura H, Lsutenschlager EP, Chern Lin JH, Moser JB, Greener EH. Casting pure titanium into commercial phosphate-bonded SiO2 investment models. *J Dent Res*, 69; 1800-805, 1990.
- Verrett RG, Duke ES. The effect of sprue attachment design on castability and porosity. *J. prosthent Dent.*, 61; 418-424, 1989.
- Vidovic Y, Chung HG, Mori T. Enhancement of a titanium denture frame model; mold temperature and spuring factors. *Dent Mater J.*, 14; 256-262, 1995.
- Wang RR, Boyle AM. A simple method for inspection of porosity in titanium castings. *J prosthent Dent*, 70; 275-

276, 1993.

Watanabe I, Watkins JH, Nakajima H, Atsuta M, Okabe T. Effect of pressure difference on the quality of titanium casting. *J Dent Res*, 3: 773–779, 1997.

Watanabe K, Okawa S, Miyakawa O, Nakano S, Honma H, Shiokawa N, Kobayashi M. Molten Titanium flow in a mesh cavity by the flow visualization technique. *Dent Mater. J.*, 10: 128–137, 1991.

Watanabe K, Okawa S, Miyakawa O, Nakano S, Honma H, Shiokawa N, Kobayashi M. Relationship between titanium flow and casting contamination caused by mold materials. *J dent Mater*, 11: 662–671, 1992.