

주입선 설계가 티타늄 주조체의 내부기포 발생에 미치는 영향

부산대학교 치과대학 보철학교실

허숙명 · 전영찬 · 정창모 · 임장섭 · 정희찬

I. 서 론

티타늄은 귀금속 합금에 대한 대체 금속의 하나로써 임플란트 재료로 사용되어 왔으며,¹⁾ 최근에는 단 일관이나 고정성 국소의치 및 가철성 국소의치의 주조용 금속으로 그 사용 범위가 점차 확대되고 있다.²⁻⁴⁾

티타늄은 미세경도나 항복강도와 같은 기계적 성질이 우수할 뿐만 아니라, 낮은 밀도로 인해 가벼운 보철물을 제작할 수 있는 장점을 가진다.^{5,6)} 또한, 천 금속의 알러지 반응과 관련하여 티타늄의 뛰어난 생체적합성은 대체 금속으로 주목받을만 하다.⁷⁾

티타늄 관을 제작하는 방법으로는 Procera 기법과 전통적인 lost-wax technique이 있다.⁸⁾ Procera 기법은 티타늄 피를 CAD/CAM 또는 방전가공을 이용하여 만들기 때문에 주조 결함과 같은 문제는 발생하지 않으나 고도의 기술력과 고가의 장비를 필요로 하고 복잡한 형태의 보철물 제작에는 어려움이 있다.⁹⁾ Lost-wax technique은 납형을 형성한 후 매몰, 소환하여 주조하는 것으로 통상적인 금속 수복물 제작에 사용되는 친숙한 방법이다. 하지만, 티타늄은 용점이 높고 고온에서 산소, 질소, 수소 등과 친화성이 있으며 비중이 낮아 일반 원심 주조기로는 주조할 수 없는 어려움을 갖는다.^{10,11)}

티타늄 주조의 어려움을 극복하기 위해 전용 주조기와 매몰재가 개발되었으며, 최근 티타늄 주조는 전기 아크나 고주파 등의 고온의 열원으로 아르곤이나 헬륨 가스와 같은 불활성 기체 하에서 티타

늄을 용융시킨 다음, 가압흡인 또는 티타늄 전용의 원심주조 방식으로 주조하는 방법에 바탕을 두고 있다.^{12,13)}

티타늄 전용 주조기와 매몰재의 개발에도 불구하고, 티타늄 주조체에는 내부 기포와 주조 결함 등이 흔히 발견된다.¹⁴⁻¹⁶⁾ 1720℃로 용융된 티타늄 금속이 800℃보다 낮은 온도로 가열된 몰드 내로 주입될 때, 몰드의 온도와 주입된 금속의 온도 차이로 인해 금속의 급격한 냉각이 일어남으로써 기포가 발생할 수 있다. 그 외에 주조기의 종류, 티타늄과 매몰재 간의 반응, 매몰재의 투과성, 가스압 뿐만 아니라^{17,18)} 주입선의 설계, vent의 유무^{19,20)}도 기포 발생에 영향을 미치는 요인이 된다. 이 중 주입선 설계는 몰드 내로 유입되는 용융 금속의 속도와 양을 조절하는 요소로 주조에 관한 몇몇 연구에서 주입선의 크기 뿐만 아니라 종류, 모양, 위치 및 방향의 중요성에 관해서 언급하였다.²¹⁻²⁴⁾

Vidovic 등²⁵⁾은 주입선의 직경이 클수록 티타늄의 주조성이 우수하다고 하였고, Chan 등¹⁸⁾과 Park 등²⁶⁾은 single sprue 디자인보다 double sprue 디자인이 주입 속도가 빠른 충분한 양의 금속을 제공함으로써 주조성을 향상시킨다고 하였다. 반면, Watanabe²⁷⁾는 기포 형성의 원인을 와류로 보고, 이를 줄이기 위해 직경이 작은 주입선을 선택하거나 판형 주입선 디자인을 사용할 것을 추천하였다. 다수치형 티타늄 보철물 제작에 있어 Chai와 Stein²⁸⁾은 큰 직경을 갖는 개별 주입선을 이용한 직접 주입 방식이 주조체의 기포 형성을 감소시킨다고 한 반면,

Wu 등¹⁷⁾은 직접 주입 방식보다는 runner bar를 사용하는 방식이 기포 발생이 적다고 하였다. 이처럼 티타늄의 주조성은 주입선의 크기 뿐만 아니라 개수, 위치 및 디자인에 따라 달라질 수 있으나, 티타늄의 주입선 설계에 대해서는 아직 일치된 견해가 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 세 가지의 주입선 디자인별로 주입선 단면적을 달리한 티타늄 3본 고정성 국소의 치를 제작하여 주조체 절단면 상의 내부 기포 수를 사진 촬영하여 관찰함으로써 주입선의 디자인과 단면적이 티타늄 주조체의 내부 기포 발생에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

II. 연구재료 및 방법

1. 시편 제작

1) 지대치 형성(Fig. 1)

3본 고정성 국소치의 티타늄 주조체를 제작하기 위하여 하악 제 2소구치와 제 2대구치의 레진치(Columbia Co., USA)를 다음과 같은 규격으로 삭제하였다.

- 교합면 삭제: 1.5 mm
- 변연부 형태: 1 mm heavy chamfer 변연
- 측면 경사도: 3°

2) 초경석고 다이 제작

삭제된 레진 치아를 실리콘 인상재(Provil novo;

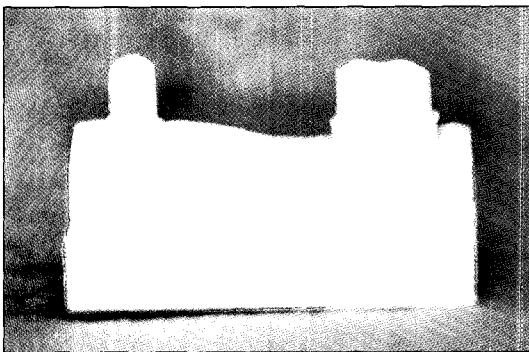


Fig. 1. Resin model of master die.

Heraeus Kulzer, Germany)로 인상을 채득하여 초경석고(Die Keen; Heraeus Kulzer, Germany)로 30개의 다이를 제작하였다.

3) 납형 제작

다이 상에서 dipping용 왁스(Elaflex, bredent Mfg.Co., Germany)를 이용하여 납형 내면을 형성한 다음 교합면과 측면에 주조용 왁스(Perfect fit system, GC Co., Japan)를 첨가하였다. 지대치 납형은 교합면 왁스 두께를 1.5 mm로 조절하고 측면은 0도 milling하여 실린더 형태가 되도록 하였으며, 실험의 규격화를 위해 실리콘 몰드로 복제한 동일한 크기의 가공치를 지대치 사이에 부착하여 3본 고정성 국소의 치 형태의 납형을 제작하였다. 납형의 총 개수는 30개로 하여 주입선 디자인과 단면적을 달리하여 여섯 군으로 구분하기 위하여 각군에 5개씩 총 30개의 납형을 제작하였다(Table I).

4) 주입선 형성(Fig. 2)

주입선 디자인은 single sprue, double sprue, plate sprue 세 가지로 분류하고, 각각에 대하여 단면적이 큰 것과 작은 것을 적용하여 Table I과 같이 여섯 군으로 설정하였다. Single sprue는 Table I과 같은 직경의 원형 주입선 한 개를 부착하였고, double sprue는 원형 주입선 두 개를 부착하였으며, plate sprue는 판상이 되도록 하였다. 주입선 단면적이 작은 것은 6.3-7.0 mm이고, 큰 것은 12.5-13.4 mm이 되도록 정하였다. 교합면-측면 이행선각에 각 주입선을 45도의 각도로 5 mm 길이가 되도록 부착하였고, 이 주입선들을 runner bar로 연결한 후 crucible former에 부착하였다.

5) 매몰과 주조

납형 매몰은 제조회사의 지시에 따라 티타늄 전용 인산염계 매몰제인 Rematitan plus (Dentaurum, Germany)를 1분간 진공 상태에서 혼합하여 주조링에 매몰하였고, 실온에서 40분간 경화 시킨 후 Table II와 같이 소환처리 하였다. 2실 가압 흡인형 주조기인 Rematitan autocast(Dentaurum, Germany)를 사용하여 실험군별로 상용 순수 티타늄인 Tritan (ASTM Grade I; Dentaurum, Germany)을 사용

Table I. Classification of experimental groups

Group	Sprue design	Cross sectional area of sprue (mm ²)	n
SS	ø 3 mm, round, single sprue	6.7	5
SD	ø 2 mm, round, double sprue	6.3	5
SP	3.5 mm × 2 mm, plate sprue	7.0	5
LS	ø 4 mm, round, single sprue	12.5	5
LD	ø 3 mm, round, double sprue	13.4	5
LP	6.5 mm × 2 mm, plate sprue	13.0	5

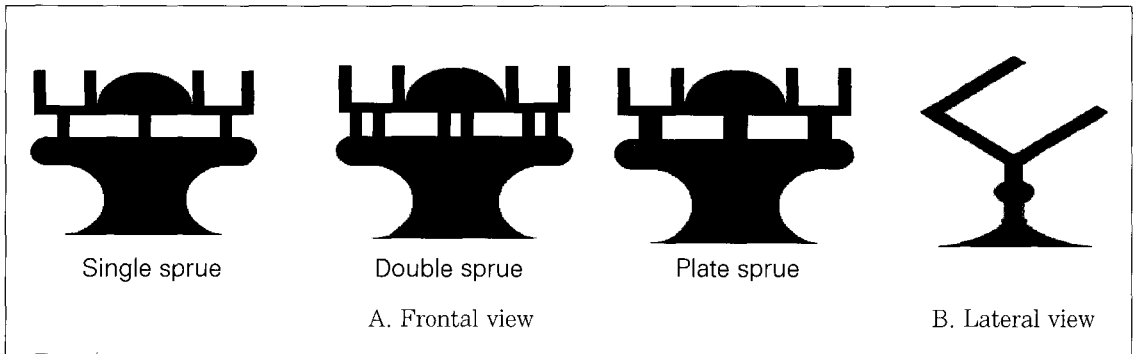


Fig. 2. Diagrammatic representation of sprue designs.

Table II. Casting mold preparation

Phase (°C)	Time (min)
20→150	30
150	90
150→250	20
250	90
250→1000	150
1000	60
1000→430	114

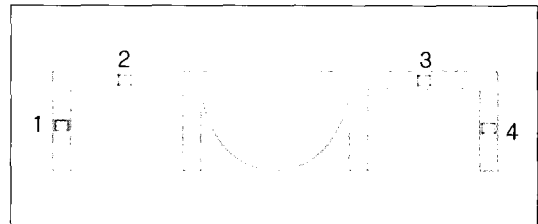


Fig. 3. Measurement site of sectioned cast specimen.

1 and 4, 2mm from the margin; 2 and 3, center of occlusal.

하여 주조하였다. 주조 후 실온에서 공냉하고 50 μ m aluminium oxide로 sandblasting 처리한 후, 주입선을 절단하고 2분간 초음파 세척하였다.

2. 내부 기포 검사

티타늄 주조체를 아크릴릭 레진으로 포매하여 각

시대치 장축을 중심으로 근원심 방향으로 절단하였다. 절단면에서 네 부위의 측정점(Fig. 3)을 설정하고, 계측 현미경(Compact measuring microscope STM5; Olympus, Japan)을 이용하여 가로 1 mm, 세로 0.5 mm 넓이를 100배율로 사진 촬영하여 단위 면적당(0.5 mm²) 내부 기포 수를 관찰하였다(Fig. 4).

3. 통계처리

각 실험군별로 내부 기포 수의 평균과 표준편차를 계산하였다. 주입선 단면적에 따른 내부 기포의 수를 검정하기 위하여 동일한 주입선 디자인 간에 95% 신뢰도로 t-test를 실시하였으며, 유사한 주입선 단면적 내에서 주입선 디자인에 따른 내부 기포의 수를 검정하기 위하여 일원배치 분산분석법을 실시하였다.

Ⅲ. 연구성적

주입선 디자인과 단면적에 따른 단위면적당 내부 기포 수는 Table III과 Fig. 5와 같다.

동일한 주입선 디자인 내에서 주입선 단면적에 따른 내부 기포 수를 two sample t-test로 검정한 결과는 Table IV와 같다. 동일한 주입선 디자인의 경우 단면적이 작은 경우보다 단면적이 큰 경우 내부 기포 수가 적었으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다($P < .05$).

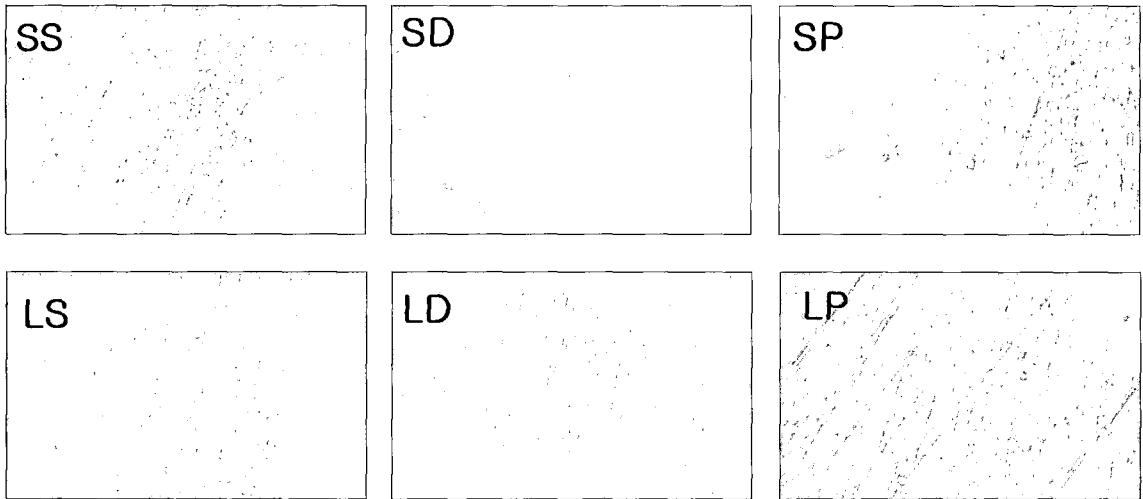


Fig. 4. Photomicrographs of internal porosities(original magnification $\times 100$).

Table III. Means and standard deviations in the number of porosities(/0.5 mm²)

Group	Mean	SD
SS	20.1	2.2
SD	22.3	1.8
SP	19.4	1.1
LS	17.7	0.6
LD	18.5	0.9
LP	17.4	0.9

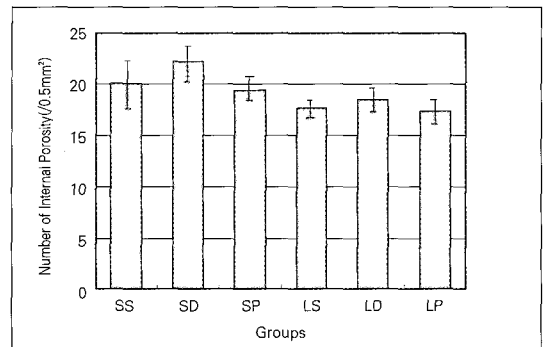


Fig. 5. Means and standard deviations in the number of porosities(/0.5 mm²).

Table IV. T-test results comparing internal porosity of each sprue design between small and large cross sectional area of sprue

	Single sprue	Double sprue	Plate sprue
T value	2.328	4.193	3.086
P value	0.042	0.006	0.015

Table V. Results of one-way ANOVA test of each sprue design

	Source	df	Sum of square	Mean square	F value	P value
Small cross sectional area of sprue	Group	2	22.058	11.029	3.539	.062
	Error	12	37.400	3.117		
	Corrected Total	14	59.458			
Large cross sectional area of sprue	Group	2	3.233	1.617	2.352	.138
	Error	12	8.250	.688		
	Corrected Total	14	11.483			

유사한 주입선 단면적 내에서 주입선 디자인에 따른 내부 기포 수를 일원배치 분산분석법으로 검정한 결과는 Table V와 같으며, 주입선 디자인에 따른 내부 기포 수는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($P>.05$).

IV. 총괄 및 고찰

티타늄은 치과 임플란트 제조사에 의해 치과계에 소개된 이후, 그 사용 범위가 점차 확대되고 있다. 티타늄은 피로 저항성 및 부식 저항성이 뛰어나지만 아니라 III, IV급 치과 금합금과 유사한 물리적 성질을 가지면서, 무게는 금합금에 비해 1/4에 지나지 않아 가벼운 보철물을 제작할 수 있는 장점을 가진다. 그리고, 니켈이나 베릴륨과 같은 친금속과는 달리 뛰어난 생체친화성을 가지며, 가격도 그리 비싸지 않아 보철물의 제작에 널리 사용될 수 있다.⁴⁾

그러나 티타늄은 고융점과 낮은 밀도 및 기체와의 강한 친화성, 매몰재와의 높은 반응성으로 인해 주조하기 어려운 단점을 가진다. 이런 어려움을 극복하기 위해 전용의 주조기와 매몰재 등이 개발되고 있음에도 불구하고 여전히 내부 기포와 같은 주조 결함이 발생하고 있는 실정이다.^{14,15)} 주조체의 기포

는 강도와 부식 저항성 측면에서 나쁜 영향을 미칠 수 있고 표면 기포는 심미적인 문제를 일으킬 수 있으며, 가철성 국소의치의 클라스프와 레스트 부위에 생긴 기포는 임상적 실패를 야기할 수 있으므로 이에 대한 평가가 필요하다.

기포는 크게 두가지로 나눌 수 있는데 첫 번째는 냉각과 고체화 동안 일어나는 수축에 의한 기포이고, 두 번째는 가스 함입에 의한 기포이다. 수축 기포는 주입선의 조기 고체화에 의해 주조체에 야기되는 것으로 적절한 주입선 설계를 통해 방지할 수 있으며, 가스 기포는 mold filling 동안 가스가 함입하여 발생하는 것으로 통기성이 강한 매몰재를 사용하거나 주입선 또는 vent를 따라 가스가 빠져나가게 함으로써 줄일 수 있다.²⁹⁾ 이러한 기포 발생과 부적절한 mold filling에 영향을 주는 요소로는 주조기의 종류, 티타늄과 매몰재 간의 반응, 매몰재의 통기성 및 가스압 차이 뿐만 아니라, 주입선 디자인과 vent의 유무 등을 들 수 있다.

티타늄 주조기는 주조 방식에 따라 원심 주조 방식과 가압 흡인 방식으로 나눌 수 있다. 원심 주조 방식은 원심력이 가스를 분리시켜 기포를 무시할 수 있는 작은 크기로 줄임으로써 우수한 주조성을 보인다고 하였다.³⁰⁾ 그러나 높은 주조압으로 인해 기체의

충분한 유출이 어렵고 와류가 형성될 수 있으며 용융 금속과 몰드 간 큰 온도 차이로 인해 합입된 가스가 빠져나갈 시간이 짧아지는 단점을 가진다.³¹⁾ 반면에, 가압 흡인 방식이 원심 주조 방식보다 더 우수한 주조성을 보인다는 보고¹¹⁾도 있는데, 가압 흡인 방식에서 용융 금속의 흐름은 판상인 반면 원심 주조 방식은 와류상이어서 원심 주조 방식에 더 많은 기포가 합입된다는 것이다. 그리고 가압 흡인 방식은 용융 금속의 흐름이 주입 방향에 대해 대칭적이고 균일하게 주조되는 장점을 가진다.³¹⁾ 하지만 서로 다른 두 주조기 간에 티타늄 주조체의 내부 기포 발생에 대한 영향은 유의한 차이를 보이지 않는 것으로 보고된 바 있다.¹³⁾

티타늄 주조체의 문제점 중 하나는 인산염계 매몰재와의 높은 반응성으로 인해 표면 반응층이 형성되어 주조체 표면이 거칠어진다는 것인데,^{31,32)} 이러한 반응층은 보철물의 신장과 피로 한계를 감소시키고, 표면 거칠기와 적합성의 측면에서도 바람직하지 못하다. 하지만, 최근에는 MgO, Al₂O₃, ZrO₂, CaO를 포함하는 내화재의 개발로 인해 반응층의 두께가 과거에 비해 현저히 개선되었으며, 통상적인 인산염계 매몰재를 사용하는 경우 zirconite로 왁스 패턴을 코팅하면 안정된 산화막이 형성되어 반응층의 두께가 감소하고, 표면 강도가 증가한다고 보고된 바 있다.³³⁾ 그리고, 매몰재의 통기성이 나쁜 경우 용융 금속의 주입시 주형 내에서 back pressure가 생김으로써 기포가 생길 수 있으므로 통기성이 좋은 매몰재를 사용해야 한다.¹⁶⁾ 통상적인 인산염계 매몰재보다는 마그네슘계 매몰재가 입자의 크기가 커서 통기성이 더 우수하다고 하였다.¹⁵⁾

이론적으로 아르곤 압력이 높으면 몰드 내로 용융 금속이 유입되는 속도가 커지므로, 가스 합입을 줄이고 냉각 시간과 기포 생성을 줄여준다고 볼 수 있다.³⁴⁾ 하지만, 아르곤 압력이 과도하게 높을 경우 용융 금속의 와류의 발생으로 가스 합입이 많아져 더 많은 내부 기포가 발생할 수 있으며,¹⁴⁾ 아르곤 압력이 낮을 경우 충분한 용융 금속이 유입되지 못해 부적절한 mold filling이 일어날 수 있으므로 적절한 아르곤 압력이 요구된다. 최근에는, 아르곤 가스 대신 크립톤이나 제논 같은 상대적으로 원자량이 큰 가스를 사용하면 기포의 확산 속도를 감소시킬 수 있다

고 하였다.³⁵⁾

주입선 디자인은 몰드 내로 금속이 유입되는 속도와 양을 조절하는 기전으로, 주입선의 크기 뿐만 아니라 주입선의 형태, 모양, 위치와 방향 등이 금속의 주조성에 영향을 미칠 수 있다. 주입선의 냉각 속도가 왁스 패턴의 냉각보다 빠르면 수축 기포가 발생하므로, 주조체의 가장 두꺼운 부위보다 더 넓은 주입선의 사용을 추천하였다.³⁶⁾ Compagni 등³⁷⁾도 주조체의 크기가 클수록 주입선의 직경도 커야 한다고 보고함으로써 용융 티타늄의 수축 기포 발생을 막기 위해 주입선의 직경이 커야 한다고 추천하고 있다. 그리고, single sprue에 비해 double sprue가 몰드 내로 충분한 용융 금속이 유입되게 함으로써 주조성을 향상시킬 수 있다고 하였고,^{18,26)} 이와는 반대로 Watanabe²⁷⁾는 가능한 한 가는 주입선을 선택하거나 판형 주입선 형태를 사용할 것을 추천하였다. 뿐만 아니라, 주입선의 부착부 형태에 관해서도 부착부를 좁게 해주면 기포가 많이 발생한다는 보고가 있는 반면,³⁸⁾ 와류 형성을 줄이기 위해 주입선의 부착 부위를 좁게 형성해야 한다는 상반된 주장도 있다.³⁹⁾ 이와 같이, 티타늄 주조체 주입선 설계에 대한 일치된 견해가 없으며, 주조성에 대한 연구 결과가 단순히 주입선 단면적의 영향인지 주입선 디자인 차이에 의한 것인지는 불분명하다.

따라서 본 연구에서는, 주입선의 단면적과 디자인을 달리하여 티타늄 주조체의 내부 기포 발생의 차이를 보고자 하였다. 주입선의 길이는 주조 결과에 미치는 영향이 적다는 보고²⁵⁾에 따라 제조사의 지시대로 5 mm가 되도록 설계하였으며, runner bar는 몰드 내로 용융 금속이 직접적으로 초기 높은 속도로 주입되는 것을 방지해서 와류를 감소시키기 위해 설계하였다. 또한, 처음 유입되는 용융 티타늄은 상대적으로 기포를 많이 함유하고 불순물이 많으므로 runner bar의 말단부를 채워 주조체의 주조성을 향상시키고자 하였다. 그리고, 배기를 위한 vent의 부착이 티타늄의 주조성에 유의할 만한 영향을 미치지 않았다는 보고¹⁸⁾에 따라 사용하지 않았다. 티타늄 주조체의 내부 기포를 관찰하기 위해 흔히 방사선 사진이 이용되는데, 이 경우 큰 기포의 확인만이 가능하고 미세 기포는 식별하기 어려우므로 본 연구에서는 주조체 절단면 상의 내부 기포를 현미경으로 관

찰하고자 하였다. 완성된 티타늄 보철물의 기포 검사는 비파괴적인 방법인 방사선 사진으로만 조사할 수 있지만, 실험용 주조체를 조사할 때는 방사선 사진으로 큰 기포를 확인하고 절단면을 현미경으로 관찰해야만 미세 기포를 관찰할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 주입선의 단면적이 큰 그룹이 단면적이 작은 그룹에 비해 유의하게 적은 내부 기포를 보였다. 이는 주입선의 면적이 넓어 충분한 용융 금속의 공급이 가능하였고, 주입선이 reservoir 역할을 하여 주조 수축을 어느 정도 보상해 준 것으로 생각된다. 주입선의 단면적이 작은 실험군에서 기포가 많이 발생한 것은 주입선의 조기 교체화가 일어나 주조체 상에서 hot spot이 생겨 수축 기포가 야기되는 것이며, 단면적이 작은 그룹의 double sprue에서 상대적으로 큰 기포가 많이 나타난 것도 이런 이유일 것이다.

유사한 단면적을 가진 그룹 내에서, 주입선 디자인에 따른 내부 기포의 발생은 통계적으로는 유의한 차이를 보이지 않았으나, plate sprue가 가장 적은 기포를 보였고 single sprue, double sprue로 갈수록 기포가 증가하는 경향을 보였다. Plate sprue의 경우 판상으로 용융 금속이 유입됨으로써 와류를 감소시킨 것으로 생각되며, double sprue의 경우 좁은 직경으로 인해 충분한 용융 금속이 흘러 들어가지 못했고 주입선의 조기 냉각으로 인해 기포가 많이 발생한 것으로 생각된다. 하지만, 가압 흡인 주조기의 경우 와류 형성이 적은 점으로 인해 유의한 차이가 발생하지 않은 것으로 보여진다.

이상의 연구에서 티타늄의 주조성에 있어 주입선의 디자인보다는 단면적이 더 유의할 만한 영향을 미친다는 결과를 얻었으나, 주입선의 직경이 커질수록 주입선의 절단과 교합면의 형태 부여, 연마 등에 많은 시간이 소요된다는 점을 고려하면 적절한 주조성을 보이는 주입선의 최소 직경에 대한 연구가 차후 필요할 것으로 생각된다. 그리고, 본 연구에서 주조체의 방사선 사진 상 큰 기포는 관찰되지 않았으나 미세 기포는 모든 시편에서 관찰되었는데, 이러한 미세 기포가 보철물의 강도와 부식저항성 측면에서 임상적 실패에 어떤 영향을 미칠 것인지에 관한 연구가 이어져야 할 것으로 생각된다.

V. 결 론

본 연구에서는 세 가지의 주입선 디자인(single sprue, double sprue and plate sprue)별로 단면적을 달리한 티타늄 3본 고정성 국소의치를 제작하여 주조체 절단면 상의 내부 기포 수를 사진 촬영하여 관찰함으로써 주입선의 디자인과 단면적이 티타늄 주조체의 내부 기포 발생에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

1. 주입선 단면적에 따른 내부 기포 수는 유의한 차이를 보였으며($P < .05$), 단면적이 큰 그룹에서 내부 기포가 적게 나타났다.
2. 주입선 디자인에 따른 내부 기포 수는 유의한 차이를 보이지 않았다($P > .05$).

참고문헌

1. Parr GR, Gardner LK, Toth RW. Titanium: the mystery metal of implant dentistry. Dental materials aspects. J Prosthet Dent 1985;54:410-4.
2. Blackman R, Barghi N, Tran C. Dimensional changes in casting titanium removable partial denture framework. J Prosthet Dent 1991;65:309-15.
3. Hruska AR, Borelli P. Quality criteria for pure titanium casting, laboratory soldering, intraoral welding, and a device to aid in making uncontaminated casting. J Prosthet Dent 1991;66:561-5.
4. Wang RR, Boyle AM. A simple method for inspection of porosity in titanium casting. J Prosthet Dent 1993;70:275-6.
5. Kupper H. Pure titanium as an alternative material in restorative dentistry. QDT 1992;143-52.
6. Wang RR, Fenton A. Titanium for prosthodontic applications: a review of the literature. Quintessence Int 1996;27:401-8.
7. Jang KS, Youn SJ, Kim YS. Comparison of castability and surface roughness of

- commercially pure titanium and cobalt-chromium denture frameworks. *J Prosthet Dent* 2001;86:93-8.
8. Leong D, Chai J, Lautenschlager E, Gilbert J. Marginal fit of machine-milled titanium and cast titanium single crowns. *Int J Prosthet* 1994;7:440-7.
 9. Andersson M, Bergman B, Bessing C, Ericson E, Lundquist P, Nilson H. Clinical results with titanium crowns fabricated with machine duplication and spark erosion. *Acta Odont Scand* 1989;47:279-86.
 10. Eugene P. Titanium and titanium alloy as dental materials. *Int Dent J* 1993;43:245-53.
 11. Bessing C, Bergman M. The castability of unalloyed titanium in three different casting machines. *Swed Dent J* 1992;16:109-13.
 12. Al-Mesmar HS, Morgano SM, Mark LE. Investigation of the effect of three sprue designs on the porosity and the completeness of titanium cast removable partial denture frameworks. *J Prosthet Dent* 1999;82:15-21.
 13. Eliopoulos D, Zinelis S, Papadopoulos T. Porosity of cpTi casting with four different casting machines. *J Prosthet Dent* 2004;92:377-81.
 14. Watanabe I, Watkins JH, Nakajima H, Atsuta M, Okabe T. Effect of pressure difference on the quality of titanium casting. *J Dent Res* 1997;3:773-9.
 15. Syverud M, Herø H. Mold filling of Ti castings using investments with different gas permeability. *Dent Mater* 1995;11:14-8.
 16. Herø H, Syverud M, Waarli M. Mold filling and porosity in casting of titanium. *Dent Mater* 1993;9:15-8.
 17. Wu M, Augthun M, Schadlich-Stubenrauch J, Spiekermann H, Sahm PR. Numerical simulation of porosity free titanium dental castings. *Eur J Oral Sci* 1999;107:307-15.
 18. Chan D, Guillory V, Blackman R, Chung K. The effects of sprue design on the roughness and porosity of titanium casting. *J Prosthet Dent* 1997;78:400-4.
 19. Sunnerkrantz PA, Syverud M, Herø H. Effect of casting atmosphere on the quality of Ti-crowns. *Scand J Dent Res* 1990;98:268-72.
 20. Herø H, Syverud M, Waarli M, Jorgensen RB. Casting of dental titanium crowns: surface reactions and dimensional fit. In: *Proceedings of the 1990 International Conference on Titanium. Products and Applications. Vol. II.* Dayton, Ohio: Titanium Development Association; 1990:612-21.
 21. Ryge G, Kozak SF, Fairhurst CW. Porosities in dental gold castings. *J Am Dent Assoc* 1957;54:746-54.
 22. Strickland WD, Sturdevant CM, Hill NC. Porosity in the full cast crown. *J Am Dent Assoc* 1959;58:448.
 23. Young HM, Coffey JP, Caswell Wayne. Sprue design and its effect on the castability of ceramometal alloy. *J Prosthet Dent* 1987;57:160-4.
 24. Love LD. Sprue design to minimize casting defects in base-metal castings. *Quintessence Dent Technol* 1987;11:195-7.
 25. Vidovic Y, Chung HG, Mori T. Enhancement of a titanium denture frame model: mold temperature and spruing factors. *Dent Mater J* 1995;14:256-62.
 26. Park JK, Jeong CM, Jeon YC. The effect of sprue design on the marginal reproducibility of cast titanium crowns. *J*

- Korean Acad Prosthodont 2002;40:352-63.
27. Watanabe K. Merit and demerit of runner bar for crown-bridge titanium casting-sink vortex causes internal defects [in Japanese]. *Quintessence Dent Technol* 1999;24:19-25.
 28. Chai TI, Stein RS. Porosity and accuracy of multiple unit titanium castings. *J Prosthet Dent* 1995;73:534-41.
 29. Wu M, Augthun M, Wagner I, Sahm PR, Spiekermann H. Numerical simulation of the casting process of titanium tooth crowns and bridges. *J Mater Sci* 2001;12:485-90.
 30. Watanabe I, Woldu M, Watanabe K, Okabe T. Effect of casting method on castability of titanium and dental alloys. *J Mater Sci* 2000;547-53.
 31. Watanabe K, Okawa S, Miyakawa O, Nakano S, Shiokawa N, Kobayashi M. Molten titanium flow in a mesh cavity by the flow visualization technique. *Dent Mater J* 1991:128-37.
 32. 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* 1990;69:1800-5.
 33. Luo XP, Guo TW, Ou YG, Liu Q. Titanium casting into phosphate bonded investment with zirconite. *Dent Mater* 2002;18:512-5.
 34. Phillips RW. *Skinner's science of dental materials*. 9th ed. Philadelphia: WB Saunders; 1991:434-44.
 35. 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* 2000;84:575-82.
 36. Kuroda T, Ida K, Yamaga R. Solidification time in the sprue during casting. *J Osaka Univ Dent Sch* 1971;11:17-30.
 37. Compagni R, Faucher RR, Yuodelis RA. Effects of sprue design, casting machine, and heat source on casting porosity. *J Prosthet Dent* 1984;52:41-5.
 38. Verrett RG, Duke ES. The effect of sprue attachment design on castability and porosity. *J Prosthet Dent* 1989;61:418-24.
 39. Englemann MA, Blechner C. The Expansion technique for casting without metal rings. *Quint Dent Tech* 1981;3:277-88.

Reprint request to:

Hee-Chan Jeong, D.D.S., M.S.D.

Department of Prosthodontics, College of Dentistry, Pusan National University
 #1-10, Ami-dong, Seo-Gu, Pusan, 602-739, Korea
 ideamemo@pusan.ac.kr

ABSTRACT

THE EFFECT OF SPRUE DESIGN ON THE INTERNAL POROSITY OF TITANIUM CASTINGS

Sook-Myeong Heo, D.D.S, M.S.D., Young-Chan Jeon, D.D.S, M.S.D, Ph.D.,
Chang-Mo Jeong, D.D.S, M.S.D, Ph.D., Jang-Seop Lim, D.D.S., M.S.D, Ph.D.,
Hee-Chan Jeong, D.D.S, M.S.D.

Department of Prosthodontics, Collage of Dentistry, Pusan National University

Statement of problem: The high melting temperature and chemical reactivity of titanium necessitates casting machines different from those used in conventional casting. Despite the new developments in Ti casting systems, inadequate mold filling and internal porosity are frequently observed casting defects. Therefore, the study on the fabrication technique including sprue design to solve these casting defects is still necessary.

Purpose: The purpose of this study was to evaluate the effect of sprue design and cross sectional area of sprue on the internal porosity.

Materials and methods: 30 simulated cast three units titanium crowns were prepared. 5 cast crowns for each with different sprue design(single sprue, double sprue and plate sprue) of two cross sectional areas(small and large cross sectional areas) were fabricated. The sections of titanium castings were photographed in a microscope at $\times 100$ magnification to record internal porosities.

Results and Conclusion:

Within the limits of this study, the following conclusions were drawn:

1. There was a significantly lower in internal porosity of titanium castings for large cross sectional area of sprue group than the small group($P < .05$).
2. There was no significant difference in internal porosity among sprue designs in similar cross sectional area of sprue($P > .05$).

Key words: Titanium, Sprue design, Internal porosity