Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 21, No. 12 pp. 434-439, 2020

https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.12.434
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

선택적 레이저 용융 그리고 전통적인 주조 기술에 의해 제조된 Co-Cr 합금에 대한 전장용 세라믹의 전단 결합 강도 비교

홍민호
부산가톨릭대학교 치기공학과

Comparison of Shear Bond Strength of Veneer Ceramics to Co-Cr Alloys Produced by Selective Laser Melting and Casting Technique

Min-Ho Hong
Department of Dental Laboratory Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan

요 약 최근, 치과 산업에서 레이저를 열원으로 합금을 제조하는 선택적 레이저 용융법(Selective laser melting, SLM)이 소개되고 있다. 하지만 SLM으로 제작된 금속-세라믹 수복물에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 SLM 그리고 CAST(casting)에 의해 제조된 Co-Cr 합금의 금속-세라믹(metal-ceramic) 결합 강도(bond strength)를 평가하는 것이다. SLM 그리고 CAST 방법을 사용하여 Co-Cr 시편을 제조하고 세라믹을 소결하여 시료를 제작하였다. 연구의 실험은 표본 준비 및 분석을 통해 2020년 1월부터 6월까지 수행되었다. 금속-세라믹 결합 강도는 만능 시험기에 의해 측정되었다. 부착 세라믹의 면적분(The area fraction of adherence ceramic, AFAC)은 SEM/EDS로 시편의 Si 함량을 측정하였다. 금속-세라믹 결합 강도 및 AFAC 결과는 t-test를 사용하여 분석하였다(α = .05). SLM 그리고 CAST Co-Cr 합금 사이의 결합 강도에 대해서는 유의한 차이가 발견되지 않았다(P>.05). SLM은 CAST 그룹보다 많은 세라믹 부착성(ceramic adherence)을 나타냈다(P<.001). 세라믹과 합금의 결합 강도는 제조 방법엔 영향을 받지 않았다. 그러나 SLM은 더 우수한 세라믹 부착성을 보였다. 이는 향후 임플란트 상부 보철물 제작에도 SLM으로 제작한 합금이 사용 가능한 것을 시사한다. CAST 방식의 단점을 극복하고 시간과 비용을 절약할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Selective laser melting (SLM) manufactures an alloy using laser as a heat source, and has recently been introduced in the dental industry. However, there is a lack of analytical research on metal-ceramic restorations achieved by SLM. This study evaluates and compares the metal-ceramic bond strength of Co-Cr alloys produced by selective laser melting and casting methods. Co-Cr samples required for this study were produced through the sintering process of ceramics, by applying the SLM and CAST methods. The metal-ceramic bond strength was measured by applying the shear bond strength test. In order to determine the area fraction of adherent ceramic, Si content of the specimen was measured using scanning electron microscopy SEM/ EDS. Results of the metal-ceramic bond strength and AFAC were analyzed by t-test (α = 0.05). No significant difference was observed comparing the bond strength of SLM and CAST Co-Cr alloys (P> 0.05). However, the SLM group had much better ceramic adherence than the CAST group (P < 0.001). Moreover, oxidation characteristics were similar for both SLM and CAST Co-Cr alloys, but metal structures were different. These results imply that although the bond of ceramic and Co-Cr alloy is not related to the manufacturing method, SLM alloys impart better ceramic adherence. This indicates that alloys made with SLM can be used to fabricate upper implant prostheses in the future. In particular, it is expected to overcome the shortcomings of the CAST method, and save time and cost.

Keywords : Dental Co-Cr alloy, Shear Bond Strength, Dental CAD/CAM, Metal-Ceramic Crown, Selective Laser Melting

*Corresponding Author : Min-Ho Hong(Catholic University of Pusan)
email: mhhong@cup.ac.kr
Received July 22, 2020 Revised August 14, 2020
Accepted December 4, 2020 Published December 31, 2020

1. 서론

금속-세라믹 수복물은 우수한 성능과 심미성을 가지고 있어 임상적으로 많이 적용되고 있다[1]. 일반적으로, 금속-세라믹 수복물의 금속 구조물은 주로 Co-Cr 합금으로 제작되고 있다[2]. 주조법(Casting, CAST)을 이용한 금속 구조물의 제작은 많은 시간과 노력이 필요하며 왁스의 왜곡 및 주조 실패 등을 포함하여 다양한 단점들이 보고되고 있다[3]. 그러나 최근, 치과 산업에서 활용되는 치과용 CAM/CAM(computer-aided design and computer-aided manufacturing) 기술은 레이저를 열원으로 활용하는 선택적 레이저 용융법(Selective laser melting, SLM)이 활용되고 있다. 이러한, 치과용 CAD/CAM 기술은 CAST을 활용한 수복물 제작의 단점을 보완할 수 있다[4].

SLM은 정밀한 고출력 레이저 빔을 열원으로 금속 분말을 용융시켜 층층이 쌓아 올리는 방법으로 3차원 구조의 금속 구조물을 생산하는 적층 가공법으로 알려져 있다[5]. SLM은 높은 치수 정확도와 최대 100% 밀도를 가지는 금속 구조물을 생산할 수 있다[5]. Co-Cr 합금은 생체 적합성이 니켈-크롬 합금보다 우수하기 때문에 SLM 기술에 널리 상용되고 있다[6]. 이러한 기술들은 기존의 주조 기술에 의해 생산된 Co-Cr 합금과 비교했을 때 최소한 동일한 품질의 치과 수복물의 생산이 가능하다는 것을 검증할 필요성이 있다. 임상 적용에 대한 중요한 특성으로는 생체 적합성, 우수한 내부식성, 낮은 내부 기공률, 적절한 기계적 특성, 우수한 변연부 적합도 및 세라믹과 적절한 결합 강도를 가져야 한다[7-11].

국외 금속-세라믹 결합 강도 연구에서 Asakura 등[12]은 금속-세라믹 계면 분석을 통해 도재와 금속 산화물은 밀접하게 접촉된 상태를 유지하고 있으며 성공적인 결합을 얻기 위해서는 금속 산화층이 필수적인 요소라고 보고하였다. 게다가 Ren 등[13]은 금속과 도재 계면에서 화학적으로 형성되는 산화-환원 반응의 거동을 규명하고자 열처리 조건을 달리하여 시편을 제조 후 합금 표면의 산화물의 표면 형상과 생성량 증가를 보고하였다.

금속-세라믹 수복물의 임상적 성공은 주로 세라믹과 금속 구조물 사이의 결합 강도에 의존한다[14]. 금속-세라믹 결합은 화학적 결합, 기계적 결합, 분자 간 인력 및 압축 결합에서 비롯된 것으로 보이지만, 화학 결합이 가장 우세하다고 알려져 있다[15]. 금속 표면에 형성된 산화층은 금속과의 화학적 결합으로 바뀔 수 있다[16]. 따라서 합금에 대한 화학적 결합을 이해하려면 금속 표면 가까이 형성되는 산화물의 특성 및 금속-세라믹 계면을 연구해야 될 필요성이 있다. 이전 연구 결과에 따르면 SLM 그리고 CAST으로 제작된 Co-Cr 합금에 대한 치과용 세라믹의 결합 강도에 대해서 평가를 했지만[17,18] 금속 표면의 산화물, 매트릭스 구조 및 계면 조합 상태의 특성에 대한 연구와 SLM으로 제작된 금속과 세라믹의 결합 강도에 대한 연구는 부족하다.

따라서 치과 산업에서 새롭게 도입되고 있는 SLM과 기존에 활용하고 있는 CAST에 의해서 제조된 Co-Cr 합금에 대한 금속-세라믹 결합 강도를 비교하는 것이다. 본 연구 결과를 바탕으로 향후 SLM을 이용한 치과용 합금을 제조와 임플란트 상부 보철물 제작의 기초 자료로 활용하고자 한다.

Table 1. Co-Cr alloy system used for fabricating the specimens

Manufacturing technique	Group code	Composition (Wt %)	Manufacturer
Selective Laser Melting	SLM	Co 63.8, Cr 24.7 Mo 5.1, W 5.4, Si 1.0, Fe<0.5, Mn<0.1	EOS GmbH, Krailling, Germany
Casting	CAST	Co 54.9, Cr 24.5 W 10, Mo 1.0, Si 1.0, Fe 0.1, Nb 2	Degudent, Hanau, Germany

2. 실험방법

금속-세라믹 간의 전단결합강도 평가에 필요한 Co-Cr 합금을 제작하기 위하여 주조용 Co-Cr 합금으로 StarLoy C(Degudent, Hanau, Germany), 선택적 레이저 용융법에 적용된 Co-Cr 금속 분말은 EOS CobaltChrome SP2(EOS GmbH, Krailling, Germany)를 사용하였다(Table 1). 비니어링 치과용 세라믹은 Vintage Halo(Shofu, Japan)을 사용하였다(Table 2).

Table 2. Veneering ceramic used in this study

Product	Company	Fire temperature	
Vintage Halo	Shofu	Degassing	980°C
		^{1st}Opaque	950°C
		^{2nd}Opaque	945°C
		^{1st}Dentin	920°C
		^{2nd}Dentin	910°C
		Correction	905°C
		Glaze	895°C

실험에 사용된 모든 Co-Cr 합금은 각 변의 길이가 10 mm 두께가 2 mm인 정사각형의 판 형태로 정사각형 중앙에 지름이 3 mm, 높이 5 mm의 원기둥 형태의 손잡이를 가지는 형태로 제작하였다. 또한 2가지 제작 방법에 따라 12개씩 총 24개의 코발트 크롬 합금을 제작하였다. Fig. 1은 본 연구의 흐름도를 나타낸다.

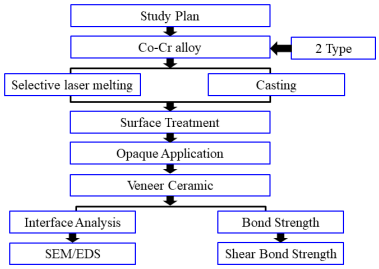

Fig. 1. Study flow

SLM 그룹은 STL 파일을 활용하였다. SLM 장비 EOSINT M270(EOS GmbH, Krailling, Germany)를 사용하였고 금속 분말(EOS CobaltChrome SP2) 도포 두께는 35 μm로 설정하였다. 레이저 용융 적층 시 질소 가스 환경에서 레이저 출력 200 W, 스캔 스피드 128.7 mm/s 그리고 중첩 비율은 52%의 조건에서 제작되었다. 각 그룹에서 제작된 Co-Cr 합금은 Al_2O_3 입자를 0.2 MPa의 압력으로 15초 동안 샌드 블라스팅 전처리 하였다. 이후, 초음파 세척기를 이용하여 시편 세척 후 건조하였다.

CAST을 이용한 Co-Cr 합금의 제작은 StarLoy C를 사용하였다. 주조용 왁스(Fc, Tokyo, Japan)를 이용하여 각 변의 길이가 10 mm 두께가 2 mm인 정사각형의 판 형태로 정사각형 중앙에 지름이 3 mm, 높이 5 mm의 원기둥 형태의 손잡이를 가지는 형태로 제작하였다. 조각이 완료된 납형은 인산염계 매몰재(Univest Plus, Metalor, Switzerland)에 매몰, 소환 후 원심주조기를 사용하여 Co-Cr 합금을 제작하였다. SLM 그리고 CAST으로 제작한 시편을 Vintage Halo를 각 12개씩 비니어링 하였다. 세라믹 축성 방법은 내경 3 mm 직경의 봉을 putty로 채득하였다. Putty 내부에 세라믹 파우더를 축성하고 진동을 주어 응축하였다. 소결 시 수축한 부분은 상아질 세라믹을 추가하여 축성하여 Table 2의 순서로 세라믹 소결을 완료하였다(Fig. 2). 또한, 두 그룹에서 크롬-코발트 합금의 산화물 원소 조성을 분석하기 위해 추가적으로 각 그룹 당 10개의 시료를 제작하였다. 제작된 시료는 샌드 블라스팅 처리 후 그리고 degassing 단계 후에 금속 표면에 존재하는 금속 산화물의 원소 조성을 분석하였다.

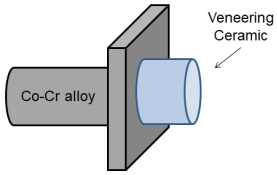

Fig. 2. Shape of specimens

세라믹 소성이 완료된 각 그룹의 시편은 자가 중합형 레진(Ortho-Jet, Lang, Wheeling, USA)으로 포매 하였다. 포매 과정에서 정확한 위치에 시편을 고정하기 위해 바닥면과 평행을 맞추어 고정하였다. 금속-세라믹의 전단결합강도를 측정하기 위해 만능시험기의 전단 시험용 지그를 이용하여 전단력에 의한 세라믹의 파절 강도를 측정하고 파절 강도를 세라믹과 합금 간의 결합력으로 산출하였다. 측정 시 Co-Cr 합금과 세라믹의 접착면에 블레이드형 하중봉을 위치시킨 후 0.5 mm/min의 cross head speed로 전단력을 가해 파절 시의 최대 하중을 기록하였다(Fig. 3).

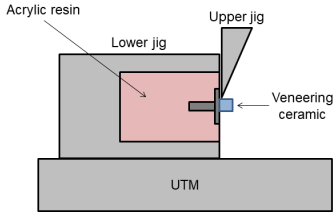

Fig. 3. Schematic diagram of the shear bond strength test

Co-Cr 합금의 계면을 관찰하기 위해 에너지 분산 X-선 분광법(EDS; Oxford-7412; Oxford Instruments)을 이용하여 세라믹 소성 시 형성된 산화물을 관찰하였다. 또한, 모든 그룹의 파절된 시편은 육안으로 관찰되었으며, 대표 이미지는 실제 현미경(SZX7, Olympus, Japan)을 사용하여 분석하였다. 파단면에 잔류된 세라믹의 면적 분율(The area fraction of adherence ceramic, AFAC)을 정량화하기 위해 에너지 분산 X-선 분광법(EDS; Oxford-7412; Oxford Instruments)이 장착된 SEM을 사용하여 각 그룹으로부터 6 개의 표본을 분석하였다. Degassing 단계 그리고 세라믹 소결 후 파절된 단계 이후에 Si X-선 검출기를 사용하여 EDS를 시편의 중앙 부분에 성분분석을 진행하였다. AFAC는

AFAC=(Si_f-Si_m)/(Si_o-Si_m)으로 산술적으로 계산할 수 있으며, 여기서 Si_f는 세라믹 파단 후 표면의 Si 원자 비율이고, Si_o는 세라믹을 소결한 후 표면의 Si 원자 비율이다. Si_m은 세라믹을 도포하기 전에 산화된 금속 표면에서 Si의 원자 백분율이다. 획득한 스펙트럼의 정량 분석은 전용 소프트웨어(INCA Suite v4.13)를 사용하여 수행되었다.

전용 소프트웨어(PASW Statistic v16.0; SPSS Inc)를 사용하여 본 연구의 데이터를 평가하였다. 금속과 세라믹 간의 전단결합강도 및 AFAC 결과는 t-test를 이용하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

SLM 그리고 CAST 그룹에 대한 전단결합강도 및 표준 편차를 Table 3에 나타내었다. t-test 분석 결과 두 그룹 간에 통계학적 유의한 차이를 나타내지 않았다($p > 0.05$). J. Serra-Prat 등[17]은 SLM 그리고 CAST를 사용하여 제조된 Co-Cr 합금의 금속-세라믹 간의 결합을 비교한 결과 통계학적 유의한 차이가 발견되지 않았다. 이는 본 연구와 일치한다. 또한 두 그룹의 Co-Cr 합금은 샌드 블라스팅 처리 그리고 세라믹 소성이 완료된 후 각 그룹의 계면(b)에서 금속과 세라믹이 상호 작용하는 구역에서 접촉이 양호하고 균열이나 결함이 없는 상태로 나타났다(Fig. 4). 또한 Fig. 4의 (c)영역에서 서로 다른 금속 조직이 나타났다.

Table 3. Bond strength values of SLM and CAST groups

Group	n	Mean ± SD[a]
SLM[b]	12	28.74 ± 2.65[a]
CAST[c]	12	28.57 ± 3.01[a]

*Groups with the same superscripted letters were not significantly different at α =.05. [b]Selective laser melting [c]Casting.

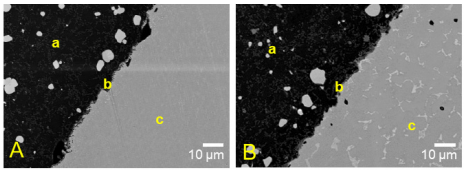

Fig. 4. Interface of metal ceramic specimens (orginal magnigication ×1000); A, SLM. B, CAST; (a) Ceramic substrate; (b) metal-ceramic interaction zone; and (c) metal substrate

Table 4. Mean values for elemental concentrations[a]

Group	Preparation	O	Al	Co	Cr	Mo	W
SLM	APA*	8	15	55	17	3	2
	Degassing	24	10	25	37	2	2
CAST	APA*	8	15	51	17	4	5
	Degassing	25	12	26	30	3	4

[a]Mean values shown for elemental concentrations (by wt %) of selective laser melting (SLM) and casting (CAST) Co-Cr alloys for 2 preparation stages (n=6).
*Airbone-particle abrasion.

Table 4는 두 그룹의 샌드 블라스팅 처리 후, 그리고 불투명 세라믹 소결 후의 평균 조성을 나타낸다. 동일한 세라믹 소성 단계에서 모든 그룹은 비슷한 표면 조성을 나타내었다. 샌드 블라스팅 처리 후, 모든 그룹에서 합금의 조성물 이외에 성분인 Al 과 O의 존재를 나타냈다. 불투명 세라믹 소성 후에는 O 그리고 Cr 함량은 증가하고 Co 함량은 감소하는 반면에, Si, Mo 및 W 함량은 확연한 변화를 나타내지 않았다(Fig. 5). 본 연구에서 두 그룹의 Co-Cr 합금은 동일한 제조 단계 동안 유사한 표면 산화물을 가졌으며, 제조가 진행됨에 따라 유사하게 변했다. Degassing 단계 이후 두 그룹 모두의 O 그리고 Cr 함량이 급격히 증가하여 산화물이 표면에 형성되었음을 시사한다.

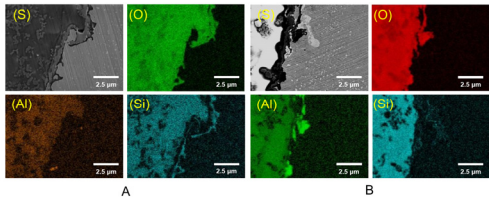

Fig. 5. SEM and corresponding EDS mapping image for each group; A, SLM. B, CAST. (S), SEM images. (O), Oxygen, (Al), Aluminum. (Si), Silicon.

서로 다른 제조 방법은 상이한 합금 미세구조 형태를 야기하고 표면 산화물의 성질을 변화시켜 금속-세라믹 간의 결합 강도에 영향을 줄 수 있다[17]. 하지만 본 연구의 결과에서 금속-세라믹 간의 결합 강도가 Co-Cr 합금 제조 방법과 무관하다는 것을 보여준다. 이 결과는 아마도 125 μm-Al_2O_3를 사용한 샌드 블라스팅 처리 후 두 그룹의 Co-Cr 합금이 유사한 표면 형태를 가졌고 degassing 후 유사한 산화 특성을 가졌기 때문에 서로 비슷한 기계적 및 화학적 결합을 나타낸 것으로 사료된다.

Table 5. AFAC* values of SLM and CAST groups

Group	n	Mean ± SD[a]
SLM[b]	12	74.2 ± 4.0[a]
CAST[C]	12	55.2 ± 7.4[b]

*AFAC, area fraction of adherence ceramic
[a]Groupswithsamesuperscriptedlettersarenotsignificantlydifferent at α =.05. [b]Selective laser melting, [c]Casting.

두 그룹의 파단면 분석 결과 세라믹이 완전히 제거된 영역과 얇은 세라믹 층이 부착된 영역이 남아있는 형태의 복합적인 양상으로 나타났다. Table 5는 정량적인 AFAC 값을 나타낸다. t-test 결과 그룹 간에 통계학적 유의한 차이가 나타났다($p < 0.05$).

SEM/EDS는 silicon x-ray 카운트를 사용하여 금속-세라믹 간의 결합 강도를 평가하기 위해 파단 후 보유된 세라믹의 면적을 측정하였다. 두 그룹의 파단면은 응집성 및 접착성 파단 형태의 조합을 보여 주었지만, SEM/EDS 결과는 SLM 그룹이 CAST 그룹보다 AFAC가 상당히 높은 것으로 나타났다. 그러나, 본 연구에서 적용된 shear bond strength test는 두 그룹 간에 유의한 차이를 나타내지 않았으며, AFAC 결과와 결합 강도 사이의 불일치를 나타냈다. 이는 N. Xiang 등[8]의 연구 결과와 비슷하다. 하지만 금속-세라믹 간의 결합을 평가하기 위한 최적의 시험에 대한 규정은 없다. 또한, 사용된 SEM/EDS가 산화물 두께 측정에 적합하지 않은 것으로 사료된다. 따라서, 새로운 기술에 의해 제조된 금속-세라믹 수복물에 충분히 두꺼운 산화물 층의 존재를 확인하기 위해 산화물 두께를 정량하고 측정하고 Co-Cr 합금 표면상의 산화물 유형을 정확히 식별할 수 있는 연구가 이어져야 될 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 치과 산업에서 새롭게 도입되고 있는 SLM과 그리고 기존에 활용하고 있는 CAST에 의해서 제조된 Co-Cr 합금에 대한 금속-세라믹 결합 강도와 계면 특성을 비교하였다. 본 연구 결과를 바탕으로 향후 SLM을 이용한 치과용 합금을 제조와 임플란트 상부 보철물 제작의 기초 자료로 활용하고자 한다.

1. 국제표준기구 (ISO 9693)에서 금속과 세라믹 사이의 적절한 결합력은 25 MPa 이상으로 규정하고 있으며 본 연구의 전단결합 강도 평가에서 SLM과 CAST 그룹은 임상 적용이 가능한 수치를 나타냈다. 또한, 두 가지 합금 제조 방법에 따른 금속-세라믹 간의 결합 강도에 차이는 없는 것으로 나타났다. 따라서 SLM을 이용한 금속-세라믹 수복물 제조는 임상 적용이 가능할 것으로 사료된다. 게다가, 향후 SLM을 이용한 임플란트 상부 보철물 제조는 일반적인 CAST를 이용한 합금 제조 방법보다 제조 시간과 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.
2. SEM/EDS silicon x-ray 카운트를 사용하여 금속-세라믹 간의 결합 강도를 평가하기 위해 파단 후 합금 표면에 잔류한 세라믹의 면적을 측정하였다. SLM 그룹이 CAST 그룹보다 높은 AFAC 값을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 SLM 그룹은 세라믹 내부에서 파절이 발생한 cohesive failure로 판단된다. 따라서 SLM에 의해서 제작된 합금은 세라믹 부착 평가에서 CAST로 제작된 합금보다 우수한 세라믹 부착성을 가지는 것으로 사료된다. 따라서 향후, SLM으로 치과용 합금을 제조하고 임플란트 상부 구조물의 금속 프레임 제작에도 활용도가 높을 것으로 예상된다.

References

[1] T. R. Walton, “The up to 25-year survival and clinical performance of 2,340 high gold-based metal-ceramic single crowns”, *International Journal of Prosthodontics*, Vol.26, No.2, pp.151-160, Mar. 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.11607/ijp.3136

[2] A. Örtorp, A. Ascher, P. Svanborg, “A 5-year retrospective study of cobalt-chromium-based single crowns inserted in a private practice”, *International Journal of Prosthodontics*, Vol.25, No.5, pp.480-483, Sep. 2012.

[3] E. Tamac, S. Toksavul, M. Toman, “Clinical marginal and internal adaptation of CAD/CAM milling, laser sintering, and cast metal ceramic crowns”, *The Journal of prosthetic dentistry*, Vol.112, No.4, pp.909-913, Oct. 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.prosdent.2013.12.020

[4] M. N. Aboushelib, W. A. Elmahy, M. H. Ghazy, “Internal adaptation, marginal accuracy and microleakage of a pressable versus a machinable ceramic laminate veneers”, *Journal of dentistry*, Vol.40, No.8, pp.670-677, Aug. 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jdent.2012.04.019

[5] K. A. Mumtaz, P. Erasenthiran, N. Hopkinson, “High density selective laser melting of Waspaloy®”, *Journal of materials processing technology*, Vol.195, No1-3,

pp.77-87, Jan. 2008.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.117

[6] X. W. Ren, L. Zeng, Z. M. Wei, X. Z. Xin, B. Wei, "Effects of multiple firings on metal-ceramic bond strength of Co-Cr alloy fabricated by selective laser melting", *The Journal of prosthetic dentistry*, Vol.115, No.1, pp.109-114, Jan. 2016.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.03.023

[7] X. Z. Xin, J. Chen, N. Xiang, B. Wei. "Surface properties and corrosion behavior of Co-Cr alloy fabricated with selective laser melting technique", *Cell biochemistry and biophysics*, Vol.67, No.3, pp.983-990, Dec. 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s12013-013-9593-9

[8] N. Xiang, X. Z. Xin, J. Chen, B. Wei, "Metal-ceramic bond strength of Co-Cr alloy fabricated by selective laser melting", *Journal of dentistry*, Vol.40, No.6, pp.453-457, Jun. 2012.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.jdent.2012.02.006

[9] P. Kohorst, J. Junghanns, M. P. Dittmer, L. Borchers, M. Stiesch, "Different CAD/CAM-processing routes for zirconia restorations: influence on fitting accuracy", *Clinical oral investigations*, Vol.15, No.4, pp.527-536, Aug. 2011.
DOI: http://dx.doi.org/10.1007/s00784-010-0415-9

[10] Y. S. Al Jabbari, T. Koutsoukis, X. Barmpagadaki, S. Zinelis, "Metallurgical and interfacial characterization of PFM Co-Cr dental alloys fabricated via casting, milling or selective laser melting", *Dental Materials*, Vol.30, No.4, pp.79-88, Apr. 2014.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.dental.2014.01.008

[11] L. Zeng, N. Xiang, B. Wei, "A comparison of corrosion resistance of cobalt-chromium-molybdenum metal ceramic alloy fabricated with selective laser melting and traditional processing", *The Journal of prosthetic dentistry*, Vol.112, No.5, pp.1217-1224, Nov. 2014.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.03.018

[12] M. Asakura, Y. Kominami, T. Tsuruta, T. Kawai, "The effect of zinc levels in a gold-based alloy on porcelain -metal bonding", Dental Materials, Vol.28, No.5, pp.35-41, May. 2012.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.02.003

[13] W. X. Ren, L. Zeng, M. Z. Wei, Z. X. Xin, B. Wei, "Effects of multiple firings on metal-ceramic bond strength of Co-Cr alloy fabricated by selective laser melting", The Journal of prosthetic dentistry, Vol.115, No.1, pp.109-114, Jan. 2016.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2015.03.023

[14] R. M. Joias, R. N. Tango, J. E. de Araujo, M. A. de Araujo, G. D. Saavedra, T. J. de Arruda Paes-Junior, E. T. Kimpara, "Shear bond strength of a ceramic to Co-Cr alloys", *The Journal of prosthetic dentistry*, Vol.99, No.1, pp.54-59, Jan. 2008.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0022-3913(08)60009-8

[15] M. Bagby, S. J. Marshall, G. W. Marshall Jr, "Metal ceramic compatibility: a review of the literature", *The Journal of prosthetic dentistry*, Vol.63, No.1, pp.21-25, Jan. 1990.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/0022-3913(90)90259-F

[16] D. M. Schweitzer, G. R. Goldstein, J. L. Ricci, N. R. Silva, E. L. Hittelman, "Comparison of bond strength of a pressed ceramic fused to metal versus feldspathic porcelain fused to metal", *Journal of Prosthodontics: Implant, Esthetic and Reconstructive Dentistry*, Vol.14, No.4, pp.239-247, Dec. 2005.
DOI: http://dx.doi.org/10.1111/j.1532-849X.2005.00052.x

[17] J. Serra-Prat, J. Cano-Batalla, J. Cabratosa-Termes, O. Figueras-Àlvarez, "Adhesion of dental porcelain to cast, milled, and laser-sintered cobalt-chromium alloys: shear bond strength and sensitivity to thermocycling", The Journal of prosthetic dentistry, Vol.112, No.3, pp.600-605, Sep. 2014.
DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.01.004

[18] E. J. Bae, J. H. Kim, W. C. Kim, H. Y. Kim, "Bond and fracture strength of metal-ceramic restorations formed by selective laser sintering", *The journal of advanced prosthodontics*, Vol.6, No.4, Aug. 2014.
DOI: http://dx.doi.org/10.4047/jap.2014.6.4.266

홍 민 호(Min-Ho Hong) [정회원]

- 2013년 2월 : 부산가톨릭대학교 일반대학원 치기공학과 (이학석사)
- 2015년 2월 : 부산가톨릭대학교 일반대학원 치기공학과 (이학박사)
- 2015년 7월 ~ 2019년 2월 : 경북대학교 생체재료연구소 Research fellow
- 2020년 3월 ~ 현재 : 부산가톨릭대학교 치기공학과 조교수

〈관심분야〉
생체재료, 치과용 합금, 분말 야금, 치과용 CAD/CAM