

적층 두께 및 출력 각도가 수리된 3D 프린팅 의치상 레진의 굴곡강도와 표면 거칠기에 미치는 영향

Influence of Layer Thickness and Build Angle on the Flexural Strength and Surface Roughness of Repaired 3D-Printed Denture Base Resin

최재원*

Jae-Won Choi*

〈Abstract〉

The purpose of this study was to evaluate the effects of various layer thicknesses and build angles on the flexural strength and surface roughness of repaired 3D-printed denture base resin. 3D-printed bar-shaped specimens with a 45° bevel were fabricated according to layer thickness(50 μ m and 100 μ m) and build angle(0-degree, 45-degree, and 90-degree). Denture relining resin was applied to the 2 mm repair area. Flexural strength was measured by a three-point bending test using a universal testing machine, and surface roughness(Ra) and surface topography were observed using a digital optical microscope at $\times 500$ magnification. Statistical significance was analyzed using two-way ANOVA, one-way ANOVA, and Games-Howell post hoc($\alpha = .05$). Except for the 90-degree group, the group with a layer thickness of 100 μ m showed better flexural strength values than the group with a layer thickness of 50 μ m($p < .05$). Additionally, within the same layer thickness, the 45-degree group showed the lowest flexural strength value. The Ra values of the 0-degree and 90-degree groups, where the build angle was 45° to the layer orientation, were higher at 100 μ m than at 50 μ m layer thickness($p < .05$), and the Ra value of the 45-degree group, where the build angle was parallel to the layer orientation, was lower than those of other build angles($p < .05$). Layer thickness and build angle significantly affected the surface roughness of 3D-printed denture base resin, and the

* 정회원, 교신저자, 부산가톨릭대학교 치기공학과, 조교수
E-mail: jwchoi@cup.ac.kr

* Assistant Professor, Dept. of Dental Laboratory Science,
College of Health Science, Catholic University of Pusan

surface roughness was confirmed to be closely related to the bonding strength with denture relining resin.

Keywords : 3D printing, Layer Thickness, Build Angle, Flexural Strength, Surface Roughness

1. 서론

총의치와 가철성 국소의치는 의학적 및 재정적인 이유로 치과 임플란트의 사용이 어려운 환자에게 여전히 선택 가능한 치료법이 될 수 있다[1]. 이러한 가철성 보철물은 무치악 환자의 저작, 심미, 발음 기능을 회복시켜 준다[2]. Polymethyl methacrylate(PMMA)는 높은 생체 적합성, 가공 용이성, 낮은 생산 비용 및 우수한 심미적 특성으로 오랫동안 가철성 보철물의 의치상 재료로 선택되어 왔다[3]. 그러나 가압성형법 및 주입성형법을 통해 제작된 기존의 의치상은 중합 수축으로 인한 치수 부정확성을 야기할 수 있고, 기계적 및 생물학적 합병증의 발생빈도 또한 높다고 보고되고 있다[1,4].

최근 computer aided design and computer aided manufacturing(CAD-CAM) 기술의 발전으로 가철성 보철물 제작에 절삭 가공방식(subtractive manufacturing) 및 적층 가공방식(additive manufacturing)을 활용함으로써 기존 제작 방법의 한계를 극복하려는 시도가 이루어지고 있다[5]. 절삭 가공방식(밀링 가공)은 최적의 조건에서 사전 중합된 블록을 사용함으로써 우수한 기계적 특성을 보이고 기존의 중합 수축으로 인한 단점 또한 제거할 수 있다[6]. 하지만 재료나 공구의 낭비가 심하고 복잡한 형상은 가공하기 어렵다[4,7]. 적층 가공방식(3D 프린팅)은 비용이 저렴하고 여러 보철물을 동시에 제작할 수 있으며 재료의 낭비가 적을 뿐만 아니라 복잡한 형상도 제작이 가능하여 디자인에 제약이 없어 절삭 가공방식보다 큰 관심

을 받고 있다[5,8].

적층 가공방식에서 중합 깊이, 수축량, 광원의 강도 및 각도와 같은 다양한 조건은 출력물의 품질과 직접적인 관련이 있다[9]. 특히 치과 영역에 많이 사용되고 있는 광중합 방식(vat photopolymerization)에서 적층 두께 및 출력 각도는 출력물의 기계적 및 물리적 특성에 영향을 미치는 중요한 매개변수이다[4]. Arnold 등은 적층 두께가 3D 프린팅 출력물의 표면 거칠기와 젖음성에 영향을 미친다고 하였고[10], 보철물의 수명과도 연관이 있는 굴곡 강도, 세균막 접착, 정확도와 같은 변수에도 영향을 미친다고 보고하였다[1]. 또한, 다양한 선행연구에서 출력 각도가 출력물의 기계적 특성, 정확성, 세균막 접착 및 표면 거칠기에 밀접한 영향을 미친다고 보고하였다[4,11].

가철성 보철물은 시간이 지남에 따라 변화하는 지지조직과의 적합도를 향상시키기 위해 주기적인 침상(relining)이 필요하다[12]. 침상은 가철성 보철물의 적합도뿐만 아니라 유지력 및 기능을 회복하고 삶의 질을 향상시킨다[13,14]. 의치가 제 기능을 하기 위해서는 의치상 레진과 이장재 간의 적절한 결합강도가 필요하다[12]. 결합강도가 약하면 박테리아 증식, 이장재의 착색 및 박리를 촉진하고 침상된 의치상 전체의 기계적 강도에도 악영향을 미칠 수 있다[15,16].

3D 프린팅된 의치상 레진과 이장재와의 결합강도를 평가한 선행연구들은 대부분 의치상의 수리면에 시행한 표면처리 방법(기계적, 화학적, 기계 화학적 방법 등)이나[6,17-20], 이장 재료의 종류

(자가중합형 vs 열중합형 레진, 연성 vs 경성 이장재 등)에 따른 비교에만 국한되어 왔다[12,21-23]. 더욱이 앞서 언급한 출력 매개변수가 3D 프린팅된 의치상 레진과 이장재와의 결합강도에 미치는 영향을 평가한 연구는 전무하다.

따라서 본 연구의 목적은 다양한 적층 두께와 출력 각도가 수리된 3D 프린팅 의치상 레진의 굴곡강도와 표면 거칠기에 미치는 영향에 대해 평가하는 것이다.

2. 재료 및 방법

본 연구를 위해 3D 프린팅 의치상용 레진(Denture Base, ODS, Incheon, Korea)과 직접 침상용 레진(Tokuyama Rebase II Normal, Tokuyama Dental Corp., Tokyo, Japan)을 사용하였으며, 적층 두께(50 μm , 100 μm) 및 출력 각도(0-degree, 45-degree, 90-degree)에 따라 총 6개의 군으로 나누었다; 50 μm : 0-degree 군, 50 μm : 45-degree 군, 50 μm : 90-degree 군, 100 μm : 0-degree 군, 100 μm : 45-degree 군, 100 μm : 90-degree 군.

CAD 프로그램(Inventor 2022, Autodesk, San Rafael, CA, USA)으로 64 mm \times 10 mm \times 3.3 mm의 직육면체를 디자인하고 stereolithography(STL) 파일로 변환하였다[17]. 50 μm 적층 두께, 0° 출력 각도로 LCD 방식의 3D 프린터(Halot-Sky, Creality, Shenzhen, China)를 사용하여 출력하였다. 출력 후 에탄올로 20분간 초음파 세척을 시행하였으며, UV LED 광경화기(ODS Cure Box, ODS, Incheon, Korea)를 사용하여 5분 동안 후경화를 시행하였다. 최종적으로 지지대가 부착된 면을 SiC 사포(220-, 600-, 800-, 1000-grit)로 순차적으로 연마하였다. 완성된 시편은 실리콘 퍼

티(Duosil Putty Hard, Bukwang, Busan, Korea)를 이용하여 몰드를 제작하였다.

선행연구를 참조하여[18,24], 수리를 목적으로 시편의 기저부 중간에 2 mm의 간격과 45°의 경사면을 부여한 접합부를 형성하기 위해 한쪽 면이 45° 경사진 31 mm \times 10 mm \times 3.3 mm 시편을 디자인하였다. 슬라이서 프로그램(Halot Box, Creality, Shenzhen, China)을 사용하여 적층 두께 및 출력 각도를 설정하였으며(Fig. 1), 위에서 언급한 방법으로 각 군당 20개의 시편을 제작하였다.

수리를 위해 각 군에서 한 쌍의 시편을 실리콘 몰드에 고정하였다. 직접 침상용 레진을 제조사의 지시에 따라 혼합(powder/liquid ratio: 2.4 g/1.0 mL)하고 2 mm의 공간에 약간 과잉되도록 주입하였다. 8분간 실온에서 경화 후, 경화촉진제를 혼합한 50°C의 물에서 3분간 중합하였다. 수리된

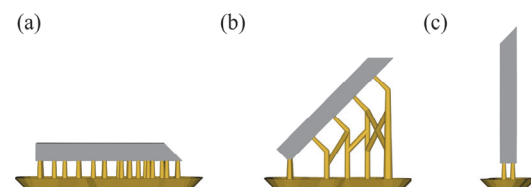


Fig. 1 Preparation of specimens at build angle
(a) 0-degree (b) 45-degree (c) 90-degree

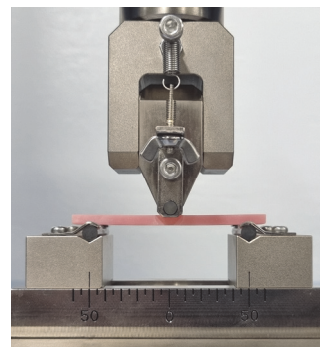


Fig. 2 Configuration of three-point flexural strength test

시편을 실리콘 몰드에서 제거하고 SiC 사포로 연마 후, 0.01 mm 정확도를 가지는 디지털 캘리퍼 (CD-15APX, Mitutoyo, Sakado, Japan)로 너비와 두께를 확인하였다. 최종 완성된 시편을 37°C의 증류수에 50시간 동안 보관하였다(각 군당 n=10).

굴곡강도는 만능시험기(AGS-10kNX, Shimadzu Corp., Kyoto, Japan)를 사용하여 3점 굽힘 시험을 통해 측정하였다. 분당 5 mm의 속도로 수리 영역의 중앙에 하중을 가하고(Fig. 2), 시편이 파절될 때의 하중을 뉴턴(N) 단위로 측정하였다. 다음의 공식에 따라 굴곡강도(MPa)를 계산하였다; $\sigma = 3Fl/2bh^2$, σ : 굴곡강도(MPa), F: 파절 하중(N), l: 지지대 간의 거리(50 mm), b: 시편의 폭(10 mm), h: 시편의 두께(3.3 mm).

디지털 광학 현미경(RH-2000, Hirox, Tokyo, Japan)을 이용하여 50배율로 시편 당 세 지점의 표면 형상을 관찰하고, 표면 거칠기(Ra)의 평균값을 계산하였다(각 군당 n=10).

결과값은 통계분석 프로그램(SPSS ver. 28, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 사용하여 분석하였으며, Shapiro-Wilk test와 Levene test를 실시하여 정규성과 등분산성을 검정하였다. 이원분산분석(two-way ANOVA)을 통해 적층 두께와 출력 각도의 상호작용효과를 확인하였으며, 모든 군 간 차이 검정을 위해 일원분산분석(one-way ANOVA)과 Games-Howell 사후 검정을 시행하였다. 통계적 유의성은 $\alpha = .05$ 수준에서 검정하였다.

3. 결과 및 고찰

이원분산분석 결과, 굴곡강도와 표면 거칠기에 대해 적층 두께와 출력 각도는 유의미한 상호작용효과를 보여주었으며($p < .001$, $p < .001$), 각각의 주효과에서도 모두 유의미한 차이가 있었다(p

Table 1. Mean \pm standard deviation (SD) of flexural strength (MPa)

Group	Mean \pm SD	p value
50 μ m: 0-degree	23.71 \pm 3.24 ^a	<.001
50 μ m: 45-degree	14.03 \pm 1.96 ^b	
50 μ m: 90-degree	30.95 \pm 5.02 ^c	
100 μ m: 0-degree	32.61 \pm 7.56 ^c	
100 μ m: 45-degree	23.95 \pm 8.61 ^{ac}	
100 μ m: 90-degree	24.93 \pm 3.58 ^{ac}	

Different letters indicate significant differences($p < .05$).

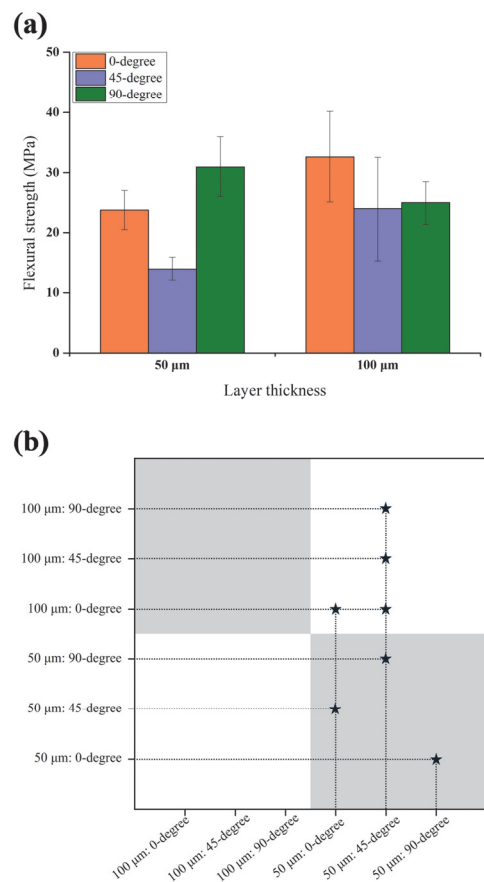


Fig. 3 Flexural strength of tested specimens. (a) Flexural strength values of all groups. (b) Games-Howell post hoc multiple comparisons between each group. Asterisks show significant differences($p < .05$)

= .004, $p < .001$; $p < .001$, $p < .001$) (Fig. 3a, 4a).

굴곡강도의 경우, 100 μm : 0-degree 군 (32.61 ± 7.56 MPa), 50 μm : 90-degree 군 (30.95 ± 5.02 MPa), 100 μm : 90-degree 군 (24.93 ± 3.58 MPa), 100 μm : 45-degree 군 (23.95 ± 8.61 MPa), 50 μm : 0-degree 군 (23.71 ± 3.24 MPa), 그리고 50 μm : 45-degree 군(14.03 ± 1.96 MPa) 순으로 큰 굴곡강도 값을 보였으며, 100 μm : 0-degree 군, 50 μm : 90-degree 군, 100 μm : 90-degree 군, 그리고 100 μm : 45-degree 군 및 100 μm : 90-degree 군, 100 μm : 45-degree 군, 그리고 50 μm : 0-degree 군 사이에는 통계학적으로 유의한 차이가 없었다($p > .05$) (Table 1, Fig. 3b). 50 μm : 45-degree 군은 모든 군에 비해 유의하게 낮은 굴곡강도 값을 보였다($p < .05$) (Table 1, Fig. 3b).

표면 거칠기의 경우, 100 μm : 0-degree 군 (2.57 ± 0.37 μm), 100 μm : 90-degree 군 (2.36 ± 0.30 μm), 50 μm : 0-degree 군(0.99 ± 0.46 μm), 50 μm : 90-degree 군(0.52 ± 0.21 μm), 50 μm : 45-degree 군(0.11 ± 0.04 μm), 그리고 100 μm : 45-degree 군(0.09 ± 0.03 μm) 순으로 높은 Ra 값을 보였고, 100 μm : 0-degree 군과 100 μm : 90-degree 군, 50 μm : 45-degree 군과 100 μm : 45-degree 군 사이에는 유의한 차이가 관찰되지 않았다($p > .05$) (Table 2, Fig. 4b).

결과를 종합해볼 때, 90-degree 군을 제외하고 적층 두께가 100 μm 인 군이 50 μm 인 군보다 우수한 굴곡강도 값을 보였다($p < .05$). 한편, 동일한 적층 두께 내에서 출력 각도가 적층 방향과 평행한 45-degree 군에서 가장 낮은 굴곡강도 값을 보였다. 이는 표면 거칠기와 연관이 있을 것으

Table 2. Mean \pm standard deviation (SD) of surface roughness (μm)

Group	Mean \pm SD	p value
50 μm : 0-degree	0.99 \pm 0.46 ^a	<.001
50 μm : 45-degree	0.11 \pm 0.04 ^b	
50 μm : 90-degree	0.52 \pm 0.21 ^c	
100 μm : 0-degree	2.57 \pm 0.37 ^d	
100 μm : 45-degree	0.09 \pm 0.03 ^b	
100 μm : 90-degree	2.36 \pm 0.30 ^d	

Different letters indicate significant differences($p < .05$).

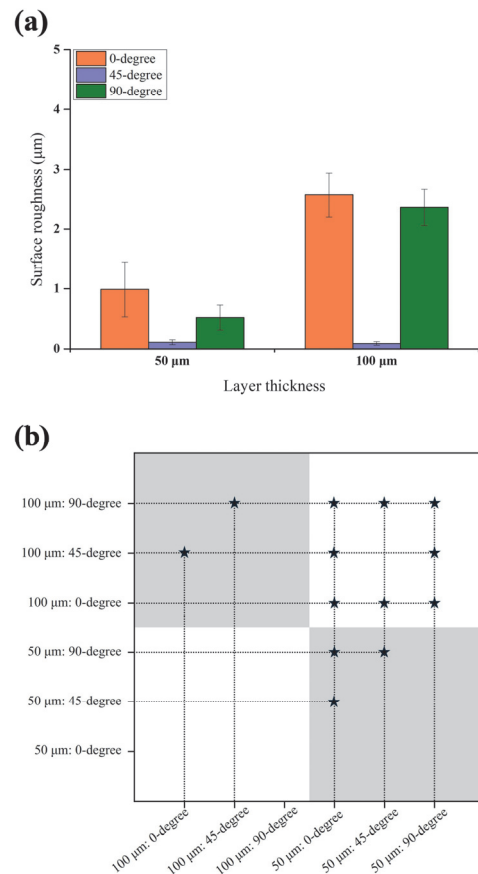


Fig. 4 Surface roughness of tested specimens. (a) Surface roughness values of all groups. (b) Games-Howell post hoc multiple comparisons between each group. Asterisks show significant differences($p < .05$)

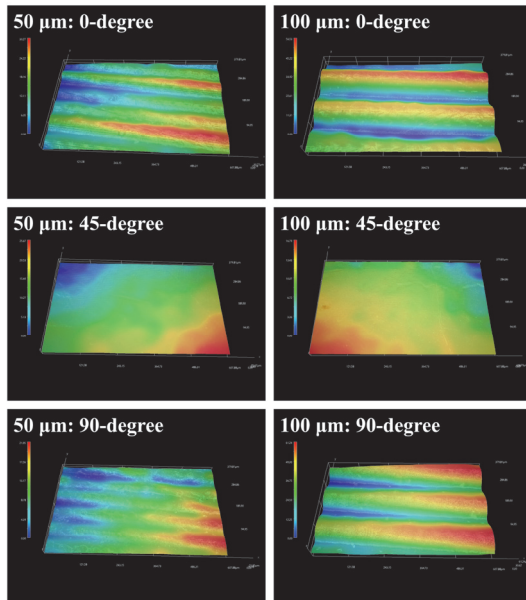


Fig. 5 3D images of tested specimens on surface topography

로 사료된다. 선행연구에 따르면, 표면 거칠기가 클수록 재료 간의 기계적인 결합력은 향상되고 결과적으로 더 강한 결합력을 초래하는 것으로 보고되었다[18]. 출력 각도가 적층 방향에 45° 인 0-degree 군과 90-degree 군의 Ra 값은 적층 두께가 $50 \mu\text{m}$ 인 경우보다 $100 \mu\text{m}$ 에서 더 높았는데($p < .05$), 이는 표면 거칠기가 적층 두께를 낮춤으로써 개선될 수 있다는 이전의 연구 결과와 일치한다[1,4,11]. 또한, 출력 각도가 적층 방향과 평행한 45-degree 군의 Ra 값은 다른 출력 각도에 비해 낮게 나타났는데($p < .05$), 이는 인접한 층간에서 나타나는 계단효과(stair-stepping effect)에 기인할 수 있을 것이다[8]. 즉, 45-degree 군은 수평면을 기준으로 한 개의 층으로 나타나는 것이다. Fig. 5가 이러한 사실을 뒷받침할 수 있는데, 적층 두께와 관계없이 45-degree 군에서는 규칙적인 질감과 매끄러운 표면 형상을 관찰할 수 있는 반면, 0-degree 군과 90-degree 군에서는 사

다리와 같은 표면 형상이 관찰되었으며, 적층 두께가 높아질수록 더 깊고 뚜렷한 형상을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 적층 두께와 출력 각도에 따른 수리된 3D 프린팅 의치상 레진의 굴곡강도와 표면 거칠기를 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

적층 두께가 높은 군($100 \mu\text{m}$)이 낮은 군($50 \mu\text{m}$)보다 대체적으로 높은 굴곡강도와 표면 거칠기를 보였으며, 동일한 적층 두께 내에서 출력 각도가 적층 방향에 평행한 군(45-degree)이 45° 인 군(0-degree, 90-degree)보다 낮은 굴곡강도와 표면 거칠기를 보였다.

본 연구의 한계 내에서, 적층 두께와 출력 각도는 3D 프린팅 의치상 레진의 표면 거칠기에 유의한 영향을 미쳤으며, 이러한 표면 거칠기가 직접 침상용 레진과의 결합력과 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Çakmak, G., Asadolahi, N. W., Schimmel, M., Molinero-Mourelle, P., Akay, C., Donmez, M. B., Yilmaz, B., Effect of coffee thermal cycling on the surface properties and stainability of additively manufactured denture base resins in different layer thicknesses, *J. Prosthodont.*, Online ahead of print, (2023).
- [2] Lee, W-J., Jo, Y-H., Yilmaz, B., Yoon, H-I., Effect of layer thickness, build angle, and viscosity on the mechanical properties and

- manufacturing trueness of denture base resin for digital light processing, *J. Dent.*, 135: 104598, (2023).
- [3] Alqanas, S. S., Alfuhaid, R. A., Alghamdi, S. F., Al-Qarni, F. D., Gad, M. M., Effect of denture cleansers on the surface properties and color stability of 3D printed denture base materials, *J. Dent.*, 120:104089, (2022).
- [4] Lee, W.-J., Jo, Y.-H., Yilmaz, B., Yoon, H.-I., Effect of build angle, resin layer thickness and viscosity on the surface properties and microbial adhesion of denture bases manufactured using digital light processing, *J. Dent.*, 137: 104608, (2022).
- [5] Alharethi, N. A., Evaluation of the Influence of Build Orientation on the Surface Roughness and Flexural Strength of 3D-Printed Denture Base Resin and Its Comparison with CAD-CAM Milled Denture Base Resin, *Eur. J. Dent.*, 18:1 p.321-328, (2024).
- [6] Gad, M. M., Abualsaud, R., Effect of repair and surface treatments on the strength of digitally fabricated resin-based dental prostheses: A systematic review of in vitro studies, *J. Dent.*, 141:104806, (2024).
- [7] Kim, H.-B., Choi, J.-W., Effect of Washing Solvent and Washing Method on Flexural Strength of 3D-Printed Temporary Resin Material, *KSIC*, 27:2 p.389-395, (2024).
- [8] Al-Dulaijan, Y. A., Alsulaimi, L., Alotaibi, R., Alboainain, A., Alalawi, H., Alshehri, S., Khan, S. Q., Alsalam, M., AlRumaih, H. S., Alhumaidan, A. A., Gad, M. M., Comparative Evaluation of Surface Roughness and Hardness of 3D Printed Resins, *Materials (Basel)*, 15:19 p.6822, (2022).
- [9] Puebla, K., Arcaute, K., Quintana, R., Wicker, R. B., Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type I specimens manufactured via stereolithography, *Rapid Prototyp. J.*, 18:5 p.374-388, (2012).
- [10] Arnold, C., Monsees, D., Hey, J., Schweyen, R., Surface Quality of 3D-Printed Models as a Function of Various Printing Parameters, *Materials (Basel)*, 19:12 p.1970, (2019).
- [11] Li, P., Fernandez, P. K., Spintzyk, S., Schmidt, F., Yassine, J., Beuer, F., Unkovskiy, A., Effects of layer thickness and build angle on the microbial adhesion of denture base polymers manufactured by digital light processing, *J. Prosthodont. Res.*, 67:4 p.562-567, (2023).
- [12] Pereira, A. L. C., Troconis, C. C. M., Curinga, M. R. S., Curinga, M. A. S. E., Barão, V. A. R., Carreiro, A. da F. P., Bond strength between denture lining material and CAD-CAM denture base resin: A systematic review and meta-analysis, *J. Prosthet. Dent.*, S0022-3913:23 p.00607-8, (2023).
- [13] Pisani, M. X., Malheiros-Segundo, A. L., Balbino, K. L., de Souza, R. F., Paranhos, H. F. O., da Silva, C. H. L., Oral health related quality of life of edentulous patients after denture relining with a silicone-based soft liner, *Gerodontology*, 29:2 p.e474-e480, (2012).
- [14] Sônego, M. V., Neto, C. L. M. M., dos Santos, D. M., Moreno, A. L. M., Bertoz, A. P. M., Goiato, M. C., Quality of Life, Satisfaction, Occlusal Force, and Halitosis after Direct and Indirect Relining of Inferior Complete Dentures, *Eur. J. Dent.*, 16:1 p.215-222, (2022).
- [15] Choi, J. E., Ng, T. E., Leong, C. K. Y., Kim, H., Li, P., Waddell, J. N., Adhesive evaluation of three types of resilient denture liners bonded to heat-polymerized, autopolymerized, or CAD-CAM acrylic resin denture bases, *J. Prosthet. Dent.*, 120:5 p.699-705, (2018).
- [16] Fatemi, F. S., Vojdani, M., Khaledi, A. A. R., The Effect of Food-Simulating Agents on the Bond Strength of Hard Chairside Reline Materials to Denture Base Resin, *J. Prosthodont.*, 28:1 p.e357-e363, (2019).
- [17] Viotto, H. E. do C., Silva, M. D. D., Nunes, T. S. B. S., Coelho, S. R. G., Pero, A. C., Effect of repair methods and materials on the flexural strength of 3D-printed denture base

- resin, *J. Adv. Prosthodont.*, 14:5 p.305-314, (2022).
- [18] Asli, H. N., Rahimabadi, S., Hemmati, Y. B., Falahchai, M., Effect of different surface treatments on surface roughness and flexural strength of repaired 3D-printed denture base: An in vitro study, *J. Prosthet. Dent.*, 126:4 p.595.e1-595.e8, (2021).
- [19] Gad, M. M., Albazroun, Z., Aldajani, F., Elakel, A. M., El Zayat, M., Akhtar, S., Khan, S. Q., Ali, S., Rahoma, A. M., Repair Bond Strength of Conventionally and Digitally Fabricated Denture Base Resins to Auto-Polymerized Acrylic Resin: Surface Treatment Effects In Vitro, *Materials (Basel)*, 15:24 p.9062, (2022).
- [20] Li, P., Krämer-Fernandez, P., Klink, A., Xu, Y., Spintzyk, S., Repairability of a 3D printed denture base polymer: Effects of surface treatment and artificial aging on the shear bond strength, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, 114:104227, (2021).
- [21] Awad, A. N., Cho, S-H., Kesterke, M. J., Chen, J-H., Comparison of tensile bond strength of denture relining materials on denture bases fabricated with CAD-CAM technology, *J. Prosthet. Dent.*, 129:4 p.616-622, (2023).
- [22] Wemken, G., Burkhardt, F., Spies, B. C., Kleinvogel, L., Adali, U., Sterzenbach, G., Beuer, F., Wesemann, C., Bond strength of conventional, subtractive, and additive manufactured denture bases to soft and hard relining materials, *Dent. Mater.*, 37:5 p.928-938, (2021).
- [23] Koseoglu, M., Tugut, F., Akin, H., Tensile bond strength of soft and hard relining materials to conventional and additively manufactured denture-base materials, *J. Prosthodont.*, 32:S1 p.74-80, (2023).
- [24] Gad, M. M., Rahoma, A., Abualsaud, R., Al-Thobity, A. M., Akhtar, S., Helal, M. A., Al-Harbi, F. A., Impact of different surface treatments and repair material reinforcement on the flexural strength of repaired PMMA denture base material, *Dent. Mater.*, J., 39:3 p.471-482, (2020)

(접수: 2024.08.25. 수정: 2024.09.27. 게재확장: 2024.10.02.)