

PMMA 복합재의 기계적 특성 향상을 위한 MMA 및 EGDMA의 역할 연구

아킬라 체 압 라만 · 양시영^{1†} · 임수만^{1†}

전북대학교 유연인쇄전자 전문대학원 및 LANL-JBNU 공학연구소, 전북 전주 54896, 대한민국

The Role of MMA and EGDMA in Enhancing the Mechanical Properties of PMMA Composites

Aqila Che Ab Rahman, Shiyong Yang^{1†} and Sooman Lim^{1†}

[†] Graduate School of Flexible and Printable Electronics, LANL-JBNU Engineering Institute-Korea, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

Abstract

This study explores the enhancement of mechanical properties in Polymethyl Methacrylate (PMMA) composites through the incorporation of Methyl Methacrylate (MMA) and Ethylene Glycol Dimethacrylate (EGDMA). Utilizing Digital Light Processing (DLP) technology, we conducted a series of experiments to analyze the impact of varying concentrations of MMA and EGDMA on PMMA. The results indicate that while MMA demonstrates non-linear and variable mechanical strength across different PMMA concentrations, EGDMA consistently improves mechanical strength as PMMA concentration increases. This consistent enhancement by EGDMA suggests a stable and predictable reinforcement effect, which is critical for applications requiring high mechanical strength. Our comparative analysis highlights that EGDMA is a more effective additive than MMA for optimizing the mechanical performance of PMMA composites. Specifically, EGDMA's ability to provide uniform reinforcement across various PMMA concentrations makes it ideal for high-strength applications. These findings are significant for material scientists and engineers focused on the design and development of advanced PMMA-based materials. In conclusion, this research underscores the importance of selecting appropriate additives to enhance the mechanical properties of PMMA composites. The superior performance of EGDMA in reinforcing PMMA suggests its potential for broader applications in fields such as automotive, construction, medical devices, and 3D printing. This study provides valuable insights that can guide future research and development in high-performance composite materials, paving the way for innovative applications and improved material efficiency.

Keywords: Polymethyl Methacrylate (PMMA), Methyl Methacrylate (MMA), Ethylene Glycol Dimethacrylate (EGDMA), Mechanical Properties, 3D Printing

(Received May 17, 2024; Revised June 4, 2024; Accepted June 4, 2024)

[†] Corresponding author: yangsy@jbnu.ac.kr, smlim@jbnu.ac.kr

1. 서론

디지털 광 처리(Digital Light Processing, DLP)는 3D 프린팅 기술 중 하나로서 다양한 분야에서 상당한 잠재력을 지니고 있다. Zhao(2020)와 Zhang(2019)의 연구는 DLP가 연성 로봇공학, 착용 가능한 전자기기, 센서 및 의료 기기와 같은 다양한 응용 분야에서 활용될 수 있음을 강조하고 있다^[1,2]. 특히, Bifano(2022)는 DLP 기술의 더 미세한 특징과 더 넓은 재료 범위에 대한 요구를 논의했으며^[3], Hornbeck은 이 기술의 개요와 비즈니스 기회를 제공했다^[4]. 이러한 연구들은 DLP가 현대 재료 제조에서 중요한 역할을 하고 있으며, 향후 발전 가능성이 크다는 점을 시사한다.

폴리메틸 메타크릴레이트(Polymethyl Methacrylate, PMMA)는 다양한 응용 분야에서 널리 사용되는 다용도 재료로, 자동차, 건설, 간판 및 조명 산업에서 표면 경도, 투명성 및 내후성으로 인해 인기가 있다^[5]. 치과 보철학 분야에서는 PMMA가 낮은 밀도, 심미성 및 조작 용이성 덕분에 의치 베이스, 인공 치아 및 교정 장치와 같은 치과 응용에 널리 사용된다^[6]. 또한, 생체 적합성, 신뢰성 및 낮은 독성으로 인해 뼈 시멘트, 콘택트 렌즈 및 척추 안정화와 같은 의학 분야에서도 중요한 재료로 자리잡고 있다^[7]. 비록 PMMA가 가수분해 저항성과 항균 활동에서 약점을 보이지만, 나노 필러의 도입을 통해 그 성질을 향상시킬 수 있어 미래의 치과 응용에 유망한 재료로 평가된다^[8].

에틸렌 글라이콜 디메타크릴레이트(Ethylene Glycol Dimethacrylate, EGDMA)는 의치 베이스 아크릴에 일반적으로 사용되는 가교제이다^[9]. 비록 EGDMA가 이러한 아크릴의 기계적 특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있지만, 이는 낮은 가교 효율성 때문일 가능성이 높다. 그러나 DLP 공정에서 EGDMA의 사용은 PMMA의 기계적 특성을 크게 향상시킬 잠재력을 지니고 있다. EGDMA는 화학적 저항성과 기계적 강도를 개선하는 데 기여하며^[10], 이는 높은 온도와 기계적 스트레스를 견뎌야 하는 DLP 공정에서 매우 중요하다. 또한,

EGDMA는 PMMA의 표면 품질을 향상시키는 데도 기여할 수 있어, 이는 향후 연구의 중요한 분야로 부각되고 있다.

본 연구에서는 PMMA의 기계적 특성을 향상시키기 위한 EGDMA와 메틸 메타크릴레이트(Methyl Methacrylate, MMA)의 역할을 탐구하고자 하였다. 기존 연구들은 주로 MMA와 다른 첨가제를 사용한 DLP 공정에 초점을 맞추었으나, EGDMA의 사용에 대한 구체적인 연구는 부족하였다^[11]. EGDMA가 기존의 자유 라디칼 공중합에서 가지 형성과 가교를 조절하는 잠재력을 가지고 있다는 점을 고려할 때^[12], 이를 DLP 공정에 적용하는 것은 매우 유망한 연구 분야로 여겨진다.

본 연구는 다양한 PMMA 농도에서 MMA와 EGDMA의 농도를 조절하여 PMMA의 기계적 강도 변화를 실험적으로 분석하였다. 그 결과, MMA와 PMMA 간의 복잡한 상호작용이 밝혀졌으며, 특히 높은 PMMA 농도에서 EGDMA가 일관되게 기계적 강도를 향상시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 특정 농도와 첨가제 조합이 PMMA 복합재의 기계적 강도를 최적화하는 데 중요하다는 점을 강조하며, 향후 연구와 재료 공학에 귀중한 통찰력을 제공한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

폴리메틸 메타크릴레이트(PMMA, $(\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)(\text{CO}_2\text{CH}_3))_n$, $\geq 99\%$)와 페닐비스(2,4,6-트리메틸벤조일) 포스핀 옥사이드(BAPO, $((\text{CH}_3)_3\text{C}_6\text{H}_2\text{CO})_2\text{P}(\text{O})\text{C}_6\text{H}_5$, $>97\%$)는 Sigma-Aldrich(서울시 강남구)에서 구매하였다. 메틸 메타크릴레이트(MMA, $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$, $>99.8\%$)와 에틸렌 글라이콜 디메타크릴레이트(EGDMA, $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{O}_4$, $>97\%$)는 세진씨엘(서울시 양천구)에서 구매하였다.

2.2. 폴리머 수지 준비

먼저, PMMA 펠릿을 적절한 용매(MMA)에 용해

하여 균일한 용액을 형성하였다. 이 용액에 가교제인 EGDMA를 첨가하고, 300°C에서 12시간 동안 자석 교반기를 사용하여 교반한 후 실온에서 1시간 동안 냉각하여 완전한 용해와 균일한 혼합을 보장하였다. 이후, 가교 공정을 시작하기 위해 광개시제인 BAPO를 첨가하였다. 혼합물은 광개시제가 용액 전체에 고르게 분산되도록 하기 위해 2000rpm에서 5분 동안 행성 혼합기에서 추가로 처리되었다. 최종 UV 경화 PMMA 수지의 기계적 강도, 생체 적합성 및 가교 효율성을 향상시키기 위해 수지 점도와 광개시제 농도를 포함한 제형 매개변수의 최적화가 수행되었다.

2.3. 폴리머 제작

다양한 광중합체 조합의 모든 폴리머 샘플은 PDMS 몰드를 사용하여 제작되었다. 실리콘 엘라스토머 베이스와 실리콘 엘라스토머 경화제를 중량비 9:1로 혼합한 용액을 원하는 크기의 용기에 부었다. 이후 혼합물을 진공 챔버에서 탈기한 다음 70°C에서 2시간 동안 열경화하여 PDMS 몰드를 얻었다. 광중합체 용액을 몰드에 첨가한 후, 전체 PDMS 몰드를 UV 챔버(CL-50, 카리마, 서울시)로 옮겨 20분 동안 광중합하였다. 각 직사각형 막대는 PDMS 몰드에서 제거한 후 30초 동안 에탄올에 담그고 동일한 UV 챔버에서 추가로 30분 동안 후경화한 후 테스트에 사용하였다.

2.4. 힘 범위 곡선

직사각형 구멍(15x20x2mm)을 가진 폴리디메틸실록산(PDMS) 몰드를 사전에 준비하였다. 각 광중합체 조합 600μL를 이 PDMS 몰드에 부은 후 광중합을 실시하였다. 균일성을 보장하고 불규칙한 마이크로니들 형태의 간섭을 피하기 위해 기계적으로 강한 직사각형을 강도 테스트에 사용하였다. 힘 게이지(FG-5005, 루트론)를 이용하여 각 광중합체 조합의 직사각형 막대의 변위 곡선을 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1의 각 막대는 특정 PMMA 농도에서 MMA와 EGDMA 조합의 평균 기계적 강도를 시각화하며 PMMA와 MMA, 그리고 EGDMA의 조합이 기계적 강도에 미치는 영향을 상세히 보여준다. 첫째, PMMA와 MMA의 조합은 다양한 농도에서 비선형적인 강도 변화를 보인다. 이는 MMA가 PMMA와 결합할 때 복잡한 상호작용을 나타내며, PMMA 농도에 따라 강도가 크게 변동한다는 것을 시사한다. 이러한 변동성은 MMA의 호환성과 고유 특성이 PMMA 농도에 의해 영향을 받기 때문으로 보인다. 따라서 MMA는 특정 농도에서 강도가 크게 변동하므로, 이를 사용할 때는 신중한 농도 조절이 필요하다. 특히 고강도를 필요로 하는 응용 분야에서는 MMA의 사용이 제한적일 수 있다. 둘째, PMMA와 EGDMA의 조합은 PMMA 농도가 증가함에 따라 기계적 강도가 일관되게 증가하는 경향을 보인다. 이는 EGDMA가 PMMA와의 상호작용에서 더 일관된 강화 효과를 제공함을 나타낸다. EGDMA의 이러한 특성은 PMMA 기반 재료의 강도를 향상시키는 데 중요한 역할을 하며, 고강도 응용 분야에서 유용하게 활용될 수 있다. 특히, EGDMA는 높은 PMMA 농도에서 일관되게 강도를 증가시키는 경향을 보여, 기계적 강도가 중요한 응용 분야에서 이상적인 첨가제로 작용할 수 있음을 시사한다.

Fig. 2는 다양한 폴리메틸 메타크릴레이트 (Polymethyl Methacrylate, PMMA) 농도(5%, 9%, 13%, 17%, 20%, 23%)에서 100% 메틸 메타크릴레이트(Methyl Methacrylate, MMA)와 100% 에틸렌 글라이콜 디메타크릴레이트(Ethylene Glycol Dimethacrylate, EGDMA)의 평균 기계적 강도를 비교한 막대 그래프를 나타낸다. 이 그래프는 각 PMMA 농도에서 MMA와 EGDMA의 기계적 강도 차이를 명확하게 시각화한다. MMA와 EGDMA의 기계적 성능 차이를 다양한 PMMA 농도에서 비교함으로써 중요한 통찰을 제공한다. 먼저, MMA는 PMMA와 결합할 때 기계적 강도가 농도에 따라 크게 변동하는 복잡한 상호작용을 보인다. 이는 MMA

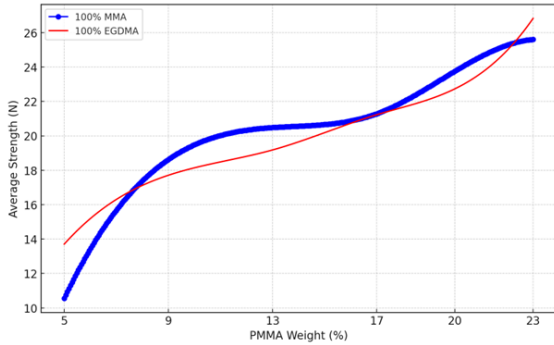


Fig. 1. 다양한 PMMA 농도(5%, 9%, 13%, 17%, 20%, 23%)에서 100% MMA와 100% EGDMA의 평균 기계적 강도 비교. MMA 조합은 비선형적인 강도 변화를 보이며, EGDMA 조합은 PMMA 농도가 증가할수록 일관된 강도 증가를 나타낸다.

가 PMMA와 혼합될 때 일관되지 않은 기계적 강도 특성을 나타내며, 농도에 따라 강도의 비선형적 변동을 초래한다는 것을 시사한다. 이러한 변동성은 MMA를 사용할 때 주의 깊은 농도 조절이 필요함을 강조한다. 반면, EGDMA는 PMMA 농도가 증가함에 따라 기계적 강도가 일관되게 증가하는 경향을 보인다. 이는 EGDMA가 PMMA와의 상호작용에서 보다 안정적이고 예측 가능한 강화 효과를 제공함을 의미한다. EGDMA는 PMMA 농도에 상관없이 일관된 기계적 성능을 보이며, 고강도를 요구하는 응용 분야에서 이상적인 첨가제로 작용할 수 있다. 이러한 결과는 EGDMA가 MMA보다 PMMA 기반 재료의 기계적 강도를 향상시키는 데 더 효과적임을 시사한다.

4. 결론

본 연구에서는 PMMA 복합재의 기계적 특성을 향상시키기 위한 MMA와 EGDMA의 역할을 분석하였다. 실험 결과, 다양한 PMMA 농도에서 MMA와 EGDMA가 기계적 강도에 미치는 영향을 실험을 통해 입증하였다.

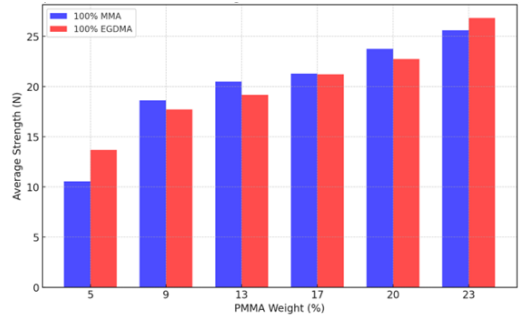


Fig. 2. 다양한 PMMA 농도(5%, 9%, 13%, 17%, 20%, 23%)에서 100% 메틸 메타크릴레이트 (Methyl Methacrylate, MMA)와 100% 에틸렌 글라이콜 디메타크릴레이트(Ethylene Glycol Dimethacrylate, EGDMA)의 평균 기계적 강도 비교. MMA는 PMMA 농도에 따라 비선형적이고 복잡한 강도 변화를 보이는 반면, EGDMA는 PMMA 농도가 증가할수록 일관되게 강도가 증가하는 경향을 나타낸다.

Fig. 1.은 PMMA 농도에 따른 100% MMA와 100% EGDMA의 기계적 강도를 비교한 결과를 보여준다. MMA는 PMMA와 결합할 때 비선형적이고 변동이 큰 기계적 강도 변화를 나타냈다. 이는 MMA가 PMMA와의 상호작용에서 복잡한 영향을 미치며, PMMA 농도에 따라 기계적 강도가 크게 변동할 수 있음을 시사한다. 반면, EGDMA는 PMMA 농도가 증가함에 따라 일관된 기계적 강도 증가를 보였다. 이는 EGDMA가 PMMA와 결합할 때 안정적이고 예측 가능한 강화 효과를 제공함을 나타낸다.

Fig. 2.은 다양한 PMMA 농도에서 100% MMA와 100% EGDMA의 평균 기계적 강도를 비교한 결과를 시각화하였다. MMA는 PMMA와의 결합에서 기계적 강도가 농도에 따라 변동하는 복잡한 상호작용을 보였으나, EGDMA는 PMMA 농도가 증가할수록 일관된 기계적 성능 향상을 보였다. 이러한 결과는 EGDMA가 PMMA 기반 재료의 기계적 강도를 향상시키는 데 더 효과적임을 보여준다.

종합적으로, 본 연구는 PMMA 복합재의 기계적 성능을 최적화하기 위해 EGDMA가 MMA보다 더 유리한 첨가제임을 밝혔다. EGDMA는 PMMA와의

결합에서 일관된 강화 효과를 제공하여, 고강도를 요구하는 다양한 응용 분야에서 이상적인 첨가제로 작용할 수 있다. 따라서, 재료 과학자 및 엔지니어는 PMMA 기반 재료의 기계적 성능을 향상시키기 위해 EGDMA의 사용을 적극 고려해야 한다. 이는 향후 고성능 PMMA 복합재 개발에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Z. Zhao., X. Tian, and X. Song., "Engineering materials with light: Recent progress in digital light processing based 3D printing", *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 8, No. 40, pp. 13896-13917, 2020.
- [2] Y. F. Zhang., C. J. X. Ng, Z. Chen., W. Zhang., S. Panjwani., K. Kowsari., H. Y. Yang., and Q. Ge., "Miniature pneumatic actuators for soft robots by high-resolution multimaterial 3D printing", *Advanced Materials Technologies*, Vol. 4, No. 10, p. 1900427, 2019.
- [3] M. Bifano., "Digital Light Processing: A Review on the Printing Resolution and the Materials Options", *Applied and Computational Engineering*, Vol. 1, pp. 17-25, 2022.
- [4] L. J. Hornbeck., "Digital Light Processing and MEMS: Reflecting the digital display needs of the networked society", *Micro-optical Technologies for Measurement, Sensors, and Microsystems*, Vol. 2783, pp. 2-13, 1996.
- [5] T. Thurn-Albrecht., J. DeRouchey., T. P. Russell., and R. Kolb., "Pathways toward electric field induced alignment of block copolymers", *Macromolecules*, Vol. 35, No. 21, pp. 8106-8110, 2002.
- [6] M. S. Zafar., "Prosthetic Applications of Polymethyl Methacrylate (PMMA): An Update", *Polymers*, Vol. 12, No. 10, p. 2299, 2020.
- [7] R. Q. Frazer., R. T. Byron., P. B. Osborne., and K. P. West., "PMMA: an essential material in medicine and dentistry", *Journal of long-term effects of medical implants*, Vol. 15, No. 6, 2005.
- [8] A. M. Díz-Pascual., "PMMA-Based Nanocomposites for Odontology Applications: A State-of-the-Art", *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 23, No. 18, p. 10288, 2022.
- [9] R. G. Hill., "The Crosslinking Agent Ethylene Glycol Dimethacrylate Content of the Currently Available Acrylic Denture Base Resins", *Journal of Dental Research*, Vol. 60, No. 3, pp. 725-726, 1981.
- [10] H. K. Albeladi., A. N. Al-Romaizan., and M. A. Hussein., "Role of cross-linking process on the performance of PMMA", *International Journal of Biosensor & Bioelectron*, Vol. 3, No. 3, pp. 279-284, 2017.
- [11] S. Kumar., A. Sharma., B. Tripathi., S. Srivastava., S. Agrawal., M. Singh., K. Awasthi., and Y. K. Vijay., "Enhancement of hydrogen gas permeability in electrically aligned MWCNT-PMMA composite membranes", *Micron*, Vol. 41, No. 7, pp. 909-914, 2010.
- [12] S. Camerlynck., P. A. G. Cormack., D. C. Sherrington., and G. Saunders., "Control of branching vs. cross-linking in conventional free radical copolymerization of MMA and EGDMA using CoBF as a

catalytic chain transfer agent”, *Journal of Macromolecular Science*, Vol. 44, No. 6, pp. 881-895, 2005.