시멘트 복합체의 레이저 커팅에 관한 실험적 연구

서 영 진* · 표 석 훈** · 이 동 경*,†

*공주대학교 기계자동차공학부

**울산과학기술원 도시환경공학부

Experimental Investigation of Laser Cutting on Cement Composites

Youngjin Seo*, Sukhoon Pyo**, and Dongkyoung Lee*,†

*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Cheonan, 31080, Korea

**School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, 44919, Korea

†Corresponding author : ldkinka@gmail.com

(Received April 30, 2019 ; Revised June 3, 2019 ; Accepted June 20, 2019)

Abstract

This study proposed the applicability of laser cutting technology for cement composites using multi-mode fiber laser. Moreover, the results of an experimental investigation on the visual observation and chemical analysis of cement composites under the laser cutting are presented. The experimental variables are water to cement ratio, types of mixtures for cement composites, laser speed. The laser used in this study is multi-mode fiber laser (IPG YLS-10000) and the laser power is set at 9 kW. After the laser cutting, the surface and cross-section of the cement composite are observed. Furthermore, the kerf width and penetration depth of specimens were measured to analyze the kerf width and penetration depth according to the laser cutting speed. In addition to these observation, EDX component analysis is performed to analyze chemical composition changes before and after laser cutting.

Key Words : Cement composites, Laser cutting, Multi-mode fiber laser, Chemical analysis

1. 서 론

시멘트 복합체는 건축, 도로, 교량 및 원자력 발전소 등 다양한 분야에서 응용되고 있다^{1,2)}. 하지만, 최근 대기 중의 탄산가스 농도의 증가, 펌프 보급에 의한 물/시멘트 비의 증가 등의 원인으로 인해 콘크리트의 열화현상이 발생된다. 이와 같이, 콘크리트의 훼손된 부분에 대한 제거 수요는 꾸준히 증가하고 있지만 다이아몬드 커팅(Diamond blade cutting, Diamond saw cutting)과 워터젯(water jet)과 같은 기존의 절단 방법이 여전히 사용되고 있다^{3,4)}. 이러한 방법은 많은 소음 및 먼지 방출을 발생시키고 시간 소모적이며, 접촉식 가공 방법일 경우 공구 마모로 인해 추가적인 비용이

발생한다. 또한, 약화된 콘크리트와 부식성 염화물의 완전한 제거에 대한 불확실성을 보이며 진동으로 인해 건전한 콘크리트에 미세 균열을 일으켜 불필요한 콘크리트 제거를 초래한다.

이와 반대로 레이저 가공은 비접촉식 가공, 빠른 가공처리 속도, 먼지 및 소음이 극소량인 생산이 가능하여 다양한 분야에서 사용된다. 특히, 레이저에 의해 발생하는 열영향부는 매우 작으므로 가공 후의 재료 변형의 가능성이 현저히 낮아진다. 따라서, 레이저는 매우 높은 효율을 가지며 정밀한 작업으로 정확한 사본들을 제작할 수 있다. 뿐만 아니라, 레이저는 높은 에너지 밀도를 매우 작은 지점으로 초점을 맞추는 것이 가능하기 때문에 암석, 목재, 복합재료, 고무 및 특정 금속 등 광범위한 재료에 적용할 수 있다^{5,6)}. 시멘트 복합체에

레이저 스케블링(scabbling) 및 레이저 드릴링을 적용한 연구 사례는 많았으나, 시멘트 복합체에 레이저 커팅을 적용하여 실험결과를 분석한 연구는 거의 진행되지 않았다⁷⁻¹⁶⁾. 따라서, 본 연구에서는 시멘트 복합체에 레이저 커팅을 적용한 연구를 수행하였다. 이 연구의 목적은 고출력 레이저를 이용하여 시멘트 복합체를 절단한 후에 시멘트 복합체의 물리적 및 화학적 변화에 대해 논의하는 것이다. 실험에서 사용된 유일한 매개변수를 레이저 절단속도로 설정하였고 시멘트 복합체와 레이저의 상호작용을 통해 시멘트 복합체에 대한 레이저 절단 적용가능성을 평가하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

실험재료는 시멘트 페이스트(cement paste), 시멘트 모르타르(cement mortar), 초강도 콘크리트(Ultra-High-Performance Concrete, UHPC)로 세가지 유형의 시멘트 혼합물을 제작하였다. 실험재료 제작할 때 사용된 시멘트 혼합물의 중량비율을 Table 1에 나타내었다.

시멘트 페이스트는 물과 시멘트, 시멘트 모르타르는 물, 시멘트와 규사, UHPC는 물, 시멘트, 규사, 실리카 파우더와 실리카 폼(fume)이 실험실 콘크리트 믹서를 통해 혼합되었다. 특히, 시멘트 모르타르와 UHPC는 고인화제(superplasticizer)를 사용하여 적절하게 혼합하였다. 혼합한 시편이 적절한 점도를 보이면 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ 몰드에 부어서 시편을 제작하였다. 건조한 상태로 28일 경화된 후, 실온에서 24시간동안 보관 후에 탈형하였다.

레이저 적용 실험은 Multi-mode fiber laser를 이용하여 수행되었다. Multi-mode CW fiber laser (IPG-YLS-10000 MM)는 레이저 빔 직경이 $150 \text{ }\mu\text{m}$ 이고 최대 출력은 10 kW 이며 레이저 파장은 1070nm 이다. 본 실험에서 설정된 레이저 출력은 9 kW 이며 N_2 보조 가스는 7 bar 로 수행하였다. 또한, 레이저 절단속도는 4 m/min 에서 1 m/min 까지 1 m/min 간격으로 감소시키면서 진행하였고 추가적으로 0.5 m/min 을 수행하였다. 실험 변수를 간단하게 나타내기 위해 레이저 절단속도를 유일하게 제어가능한 매개변수로 지정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Visual observation

시편의 표면과 단면적을 통해 레이저 절단 속도에 따른 시멘트 복합체의 kerf width와 Penetration depth를 Fig. 1에 각각 나타내었다. Fig. 1 (a)를 보면, 시멘트 페이스트의 kerf width는 레이저 절단 속도가 증가함에 따라 감소하였다. 또한, 시멘트 페이스트의 평균 kerf width는 2.61 mm 로 다른 시편에 비해 가장 낮은 kerf width를 나타내었다 (Fig. 2, a). 다른 시편과 비교하였을 때, 상대적으로 가장 양호한 절단 품질로 관찰되었지만 kerf width 주변에서 크고 작은 균열들이 관찰되었다. 한편, kerf width와 같이, 레이저 절단 속도가 증가할수록 시멘트 페이스트의 penetration depth가 감소하였다. 시멘트 페이스트의 평균 penetration depth가 21.5 mm 로 시편 중 가장 깊은 깊이를 나타내었다 (Fig. 2, b). 또한, 시멘트 페이스트의 penetration depth에서 절단 속도가 감소할수록 점차적으로 타원형상으로 재료가 제거되는 것이 관찰되었다.

시멘트 페이스트에 추가적으로 규사가 혼합된 시멘트 모르타르 또한, 레이저 절단속도가 증가함에 따라 kerf width가 감소하였다 (Fig. 1, b). 평균 kerf width는 3.47 mm 로 관찰되었으며 kerf width 주변에서 레이저에 의해 그을린 영역과 균열이 관찰되었다 (Fig. 2, a). 시멘트 페이스트와 같이, 레이저 절단속도가 증가함에 따라 시멘트 모르타르의 penetration depth가 감소하였다. 평균 penetration depth는 19.1 mm 로 관찰되었으며 시멘트 페이스트와는 달리, 직선 형상으로 재료가 제거되었다 (Fig. 2, b). 이러한 관찰들을 통해 규사가 시멘트 복합체에 미치는 영향이 명확히 관찰되었다.

Fig. 1 (c)를 보면, 규산염 계 재료가 혼합된 UHPC는 절단속도가 증가함에 따라 kerf width가 감소하였으며 평균 kerf width가 4.2 mm 로 가장 큰 폭이 관찰되었다 (Fig. 2, a). kerf width에서 표면 위로 하얀 불순물들이 부풀어 오른 현상이 관찰되었으며 이로 인해 불규칙한 kerf width를 나타내었다. 다른 시편과

Table 1 Mix design of the cement composites (Proportions by weight)

Series	Cement	Water	Silica Fume	Silica Powder	Silica Sand I	Silica Sand II	Super plasticizer
Cement paste	1	0.25	-	-	-	-	-
Cement mortar	1	0.25	-	-	-	1.0	0.009
UHPC	1	0.25	0.25	0.25	0.30	0.70	0.009

Fig. 1 The kerf width and the penetration depth of the (a) cement paste, (b) cement mortar, (c) UHPC

마찬가지로, 절단속도가 증가함에 따라 UHPC의 penetration depth가 감소하였으며, 평균 penetration depth는 16.8 mm로 시편 중 가장 얇은 깊이를 나타내었다 (Fig. 2, b). 또한, 시멘트 모르타르와 같이, 직선 형상으로 재료가 제거되었으며 절단 속도에 따른 penetration depth가 가장 낮게 관찰되었다.

결과적으로, SiO_2 가 주 성분인 규산염 계 재료의 양이 증가할수록 시멘트 복합체의 kerf width는 증가하지만 penetration depth는 감소하였다. 또한, 시멘트 복합체에 혼합되는 재료의 양이 증가함으로써, 시편의 particle packing이 더욱 밀집하게 구성되므로 penetration depth가 감소하였다.

Fig. 2 Comparison between (a) the kerf width, and (b) the penetration depth, on the cement composites according to the laser cutting speed

3.2 Chemical analysis (EDX)

시멘트 페이스트에 대해 기계식 절단과 레이저 절단을 각각 진행한 후, 절단면(cut surface)에서 성분변화를 비교하였다. 기계식 절단이 레이저 절단에 비해 상대적으로 절단면에 대한 품질은 좋지만 큰 열영향부와 진동으로 인해 균열이 발생하여 불필요한 콘크리트 제거가 발생된다. 또한, 레이저 절단은 에너지를 작은 영역에 집중시킬 수 있으므로 두꺼운 콘크리트에 대한 효율적인 가공이 가능하다. Fig. 3 (c)를 통해 기계식 절단과 레이저 절단 후의 절단면에 대해 EDX 성분분석 결과를 나타내었다. 시멘트 페이스트인 경우, 절단 방법에 따른 EDX 성분분석 결과는 거의 동일하게 관찰되었다.

Fig. 4와 같이, 시멘트 모르타르의 횡단면에서 EDX 성분분석을 진행하였다. 추가적으로, 다이아몬드 커팅 후의 시멘트 복합체에 대한 EDX 성분분석을 수행하였다. Penetration depth에서 세가지 영역을 나누어 point 분석으로 성분분석 결과를 나타내었다. 시멘트 페이스트와 달리, 시멘트 모르타르와 UHPC는 세 가지 특성

Fig. 3 SEM images of cut surface after (a)mechanical cutting, and (b)laser cutting, on the cement paste. (c)EDX analysis of mechanical cutting and laser cutting on cement paste

으로 분류되었다. 레이저에 의해 간접적으로 열영향을 받은 Heat-affected zone, 시편이 직접적으로 레이저 영향을 받아 용융풀(molten pool)로 상변화가 진행된 후 재응고된 Re-solidified zone, 재료가 제거된 영역에서 시편의 표면에 다량의 SiO_2 성분인 Glassy layer로 구성된다.

레이저 조사로 인해 레이저가 콘크리트와 상호 작용

할 때, 레이저의 의해 시멘트 복합체의 표면과 내부 온도가 증가하여 시멘트와 규사가 용융되고 이로 인해 재료가 제거된 영역에 SiO_2 성분으로 구성된 용융풀이 발생한다. 또한, 시멘트 복합체의 표면과 내부에서 수산화칼슘의 탈수 및 탄산칼슘의 분해로 CO_2 와 H_2O 가 방출된다. 시멘트 복합체의 표면온도가 기화 온도에 도달하면 용융풀은 레이저에 의해 증발되고, 동시에 반동압력이 생성된다. 이로 인해, Fig. 1 (c)의 kerf width와 같이, 시멘트 복합체 표면에서 재응고된 용융풀이 관찰되었다. 추가적으로 레이저 조사가 끝난 후 재응고가 진행되면서 기체들이 방출되는 흔적들이 관찰되었다 (Fig. 4, c). 재료가 제거된 영역의 표면에서 Fig. 4 (d)와 같이 SiO_2 성분으로 구성된 층상구조의 Glass layer가 관찰되었다.

4. 결 론

본 논문은 Multi-mode fiber laser를 이용하여 시멘트 복합체를 레이저 절단함으로써, 적용가능성에 대해 논의하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실험에 설정된 매개변수 범위에서 시멘트 페이스트의 kerf width가 가장 양호한 절단 품질을 나타내었다. 또한, UHPC의 평균 kerf width는 4.2 mm로 시편 중 가장 높은 값을 나타내지만 평균 penetration depth는 16.8 mm로 가장 낮은 값이 관찰되었다.

Fig. 4 SEM images of (a)cross-sectional view of cement mortar, and EDX analysis of (b) Heat-affected zone, (c) Re-solidified zone, and (d) Glassy layer

2) 레이저 절단속도가 증가할수록 실험에 사용된 모든 시편의 kerf width와 penetration depth는 감소하였다.

3) 시멘트 모르타르와 UHPC를 통해 규산염 계 물질의 양이 증가할수록 penetration depth가 감소함을 확인하였다.

4) EDX 성분분석 결과, 성분 중량에 따라 세가지 특성으로 분류되었다. 또한, 콘크리트에 대해 효과적으로 레이저 절단하기 위해서는 규산염 계 물질이 용융되면서 생성된 SiO₂ 성분의 용융풀이 제거되어야 한다.

후 기

본 논문은 2019년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다. (No.2017R1C1B507916)

ORCID: Youngjin Seo: <https://orcid.org/0000-0003-2207-1021>

ORCID: Sukhoon Pyo: <https://orcid.org/0000-0002-0983-2431>

ORCID: Dongkyoung Lee: <https://orcid.org/0000-0001-9404-2321>

References

1. M. Zhou, W. Lu, J. Song, and G. C. Lee, Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering, *Construction Building Materials*, 186 (2018), 1256-1267 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.036>
2. Y. Meng, Y. Fang, M. Wan, Q. Su, B. Tian, and F. Tong, Research of concrete dam leakage detection based on anomaly current field of reservoir water, *Journal Applied Geophysics*, 160 (2019), 242-253 <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.11.016>
3. L. Sitek *et al.*, Effects of water jet on heat-affected concretes, *Procedia Engineering*, 57(2013), 1036-1044 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.131>
4. J. Skarabis and U. Stöckert, Noise emission of concrete pavement surfaces produced by diamond grinding, *J. Traffic Transportation Engineering (English Ed.)*, 2(2) (2015), 81-92 <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.02.006>
5. A. Bharatish, B. Kishore Kumar, R. Rajath, and H. N. Narasimha Murthy, Investigation of effect of CO₂ laser parameters on drilling characteristics of rocks encountered during mining, *Journal of King Saud University - Engineering. Sciences*, (2018), 1-7 <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2017.12.003>
6. M. Li, B. Han, Q. Zhang, S. Zhang, and Q. He, Investigation on rock breaking for sandstone with high power density laser beam, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 180(2018) (2019), 635-647 <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.10.059>
7. B. Peach, M. Petkovski, J. Blackburn, and D. L. Engelberg, An experimental investigation of laser scabbling of concrete, *Construction Building Materials*, 89 (2015), 76-89 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.037>
8. N. P. Long *et al.*, Experimental evaluation of performance of concrete removal in pulsed laser irradiation, *Journal of Laser Application*, 29 (2017), 041501 <https://doi.org/10.2351/1.5008326>
9. B. Peach, M. Petkovski, J. Blackburn, and D. L. Engelberg, Laser scabbling of mortars, *Construction Building Materials*, 124 (2016), 37-44 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.038>
10. M. Savina, Z. Xu, Y. Wang, M. Pellin, and K. Leong, Pulsed laser ablation of cement and concrete, *Journal of Laser Applications*, 11(6) (2010), 284-287
11. J. Lawrence and L. Li, Surface glazing of concrete using a 2.5 kW high power diode laser and the effects of large beam geometry, *Optics and Laser Technology*, 31(8) (1999), 583-591
12. B. Peach, M. Petkovski, J. Blackburn, and D. L. Engelberg, The effect of ageing and drying on laser scabbling of concrete, *Construction Building Materials*, 188 (2018), 1035-1044 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.131>
13. B. Peach, M. Petkovski, J. Blackburn, and D. L. Engelberg, The effect of concrete composition on laser scabbling, *Construction Building Materials*, 111(2016), 461-473 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.115>
14. J. Lawrence and L. Li, The effects of process gas type on the surface condition of high-power diode laser-treated ordinary Portland cement, *Optics and Lasers Engineering*, 36(6) (2001), 599-605
15. D. Lee and S. Pyo, Experimental investigation of multi-mode fiber laser cutting of cement mortar, *Materials (Basel)*, 11(2) (2018), 278 <https://doi.org/10.3390/ma11020278>
16. D. Lee, Y. Seo, and S. Pyo, Effect of laser speed on cutting characteristics of cement-based materials, *Materials (Basel)*, 11(7) (2018), 1055 <https://doi.org/10.3390/ma11071055>