

진공함침을 적용한 바인더젯 3D 프린팅 출력물의 성능 평가

박광민^{1*}, 박수현², 이봉춘³, 노영숙⁴

Evaluation of Binder jetting 3D Printed Specimens Using Vacuum Impregnation

Kwang-Min Park^{1*}, Su-Hyeon Park², Jun Lee³, Bong-Chun Lee⁴, Young-Sook Roh⁵

Abstract: This study examined the applicability of the vacuum impregnation post-processing to enhance the strength of binder jet 3D printed output. In addition, permeability, bulk density, and compressive strength of 10 mm, 20 mm, 30 mm, and 40 mm cubic specimens were examined to check the strength limit depending on the 3D printed output size. In result, as the maximum pressure increased, the post-processing storage solution permeated to the inside of the 3D printed sample and thus the permeation area ratio was improved. The compressive strength and the permeation area indicate the correlation between the exponential function of the adjusted R-square factor 0.992. In addition, the bulk density was increased, which can be inferred as the post-processing solution permeated to the inside. In conclusion, in order to enhance the compressive strength of the binder jet 3D printed output, it is essential to permeate the post-processing solution to the inside of the output, and vacuum impregnation can be proposed as an effective method.

Keywords: Additive Manufacturing, 3D Printing, Binder Jetting, Vacuum Impregnation, Post-processing

1. 서 론

1.1 3D 프린팅 기술 개요

일반적으로 3D 프린팅이라고 불리는 적층 제조 기술은 (Additive Manufacturing, AM)은 재료를 자르거나 깎아서 생산하는 절삭 제조 기술(Subtractive Manufacturing, SM)과 대비되는 개념으로 ASTM F2792-12(2015)에서는 '3D 모델 데이터로부터 형상을 만들기 위하여 연속된 재료를 한층 한층씩(layer upon layer) 적층하는 방법으로 절삭 제조 기술과 대비되는 기술이다'라고 정의하고 있다.

국내외적으로 3D 프린팅 기술 및 소재 개발이 진행되고 있으며 생활용품, 기계 및 전자 분야 등으로 적용 범위를 확장하고 있다. 마찬가지로 3D 프린팅 기술을 건설 분야에도 적용하려는 시도가 진행되고 있다. 전통적 건설 기술과 비교해 3D 프린팅을 적용함에 따라 (1) 노동력을 줄일 수 있어서 이에 따른 건설 비용 저감 및 안전성이 높아지고, (2) 일정한 조건으로 운용됨에 따라 시간 단축이 가능하고, (3) 정밀한 재료 적층에 따른 시공 오류를 최소화할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 그

리고 무엇보다도 (4) 비정형 형상 등 정교한 설계가 가능해서 건설의 의장적 자유도를 높일 수 있다.

1.2 Binder Jetting 3D 프린팅 기술 개요

3D 프린팅을 건설 분야에 적용하기 위한 다양한 기술이 개발되고 있으며, 대표적인 출력 방식은 재료 압출(Material Extrusion, ME) 및 접착제 분사(Binder Jetting, BJ)방식이다.

바인더젯 3D 프린팅(Binder Jetting 3D Printing, BJ3DP)의 개요는 Fig.1과 같다. 파우더 형태의 소재를 레벨링 롤러(Leveling Roller)로 파우더 베드(Powder Bed)에 얇게 도포한 후 액체 형태의 접착제를 선택적으로 분사하여 분말 사이를 한층 결합한다. 순차적으로 파우더 베드가 한층 내려가고 새로운 파우더를 도포하는 과정을 한층 한층씩(layer upon layer) 반복 하면서 3차원 구조물을 출력하는 방식이다. 적층 공정이 완료 되면 출력물을 꺼내서 에어블로우(Air blow)를 사용하여 결합되지 않은 파우더를 제거한다. BJ3DP 방식은 재료 압출 3D 프린팅(Material Extrusion 3D Printing, ME3DP) 식과 비교해 복잡하고 기하학적인 형상 구현이 가능한 점이 강점이다.

국내외적으로 파우더 소재를 시멘트 복합소재로 대체하여 BJ3DP에 시도하는 연구를 진행하고 있으며, Rael et al.(2011)의 Emerging Objects, Cesaretti et al.(2014)의 D-Shape, Ming et al.(2016)의 지오폴리머 BJ3DP, Gibbons et al.(2010)의 소경시멘트기반 BJD 및 Park et al.(2018)의 알칼리 활성화 결합재(Alkali Activated Material, AAM)기반 BJD가 대표적이다.

¹정희원, (재)한국건설생활환경시험연구원, 건설기술연구센터, 선임연구원

²정희원, (재)한국건설생활환경시험연구원, 건설기술연구센터, 연구원

³정희원, (재)한국건설생활환경시험연구원, 내진센터, 센터장

⁴정희원, 서울과학기술대학교 건축학부 건축공학전공, 교수

*Corresponding author: kmpark@kcl.re.kr

Korea Conformity Laboratories(KCL), Seoul, 08503, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1.3 Binder Jetting 3D 프린팅 출력물 한계

Ming et al.(2016) 및 Park et al.(2018)에 따르면 BJ3DP 출력물의 초기 압축강도는 약 0.9 MPa에서 1.5 MPa 수준이다. 이는 파우더 사이의 결합이 접착제에만 의존하기 때문이고, 따라서 BJ3DP은 후처리 공정을 통한 강도 증진이 반드시 필요하다고 보고하고 있다. 상기에서 제안하고 있는 후처리 공정은 액상형 규산나트륨(Sodium silicate, Na_2SiO_3)기반의 알칼리성 용액에 출력물을 침지함으로써 압축강도 증진을 도모하고 있다.

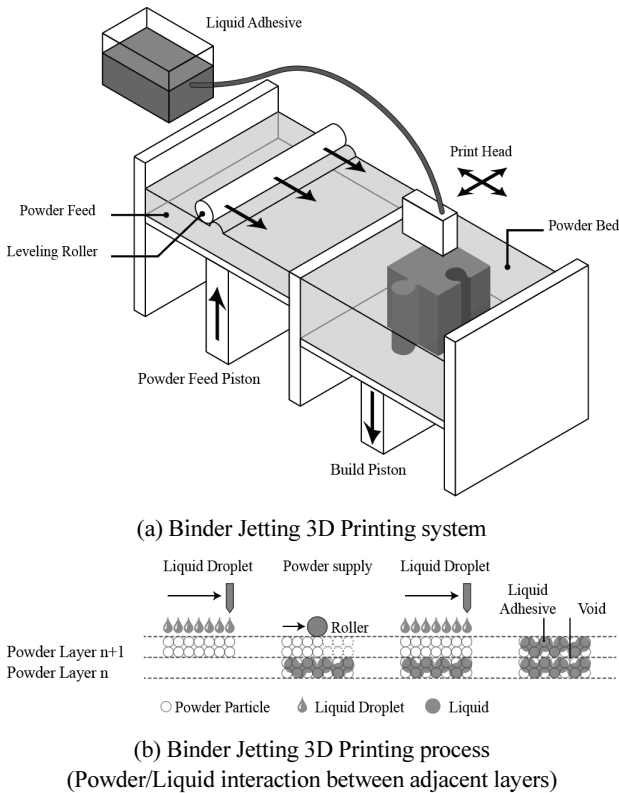


Fig. 1 Schematic illustrations of Binder Jetting 3D Printing process



Photo 1 Binder Jetting 3D Printed Specimens after post-processing

1.4 본 연구 목표

Ming et al.(2016)은 Na_2SiO_3 , 고로슬래그미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS) 및 평균입도 0.184 mm 규사를 혼합하여 BJ3DP용 파우더를 개발하였다. 20 mm × 20 mm × 20 mm 큐빅 시험체의 출력 직후 압축강도는 0.9 MPa 수준으로 보고하고 있다. 압축강도 증진을 위해 Na_2SiO_3 기반의 후처리 용액에 침지하였고 그 결과 재령 7일의 압축강도는 16.5 MPa로 증진되었다고 보고하고 있다.

Park et al.(2016)은 Na_2SiO_3 , 고로슬래그미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS) 및 플라이애시(Fly Ash, FA)를 혼합하여 BJ3DP용 파우더를 개발하였다. 20 mm × 20 mm × 20 mm 큐빅 시험체의 출력 직후 압축강도는 1.46 MPa 수준이며, Na_2SiO_3 및 수산화나트륨(Sodium hydroxide, NaOH)을 혼합한 후처리 용액에 침지한 결과 재령 3일의 압축강도가 7.10 MPa로 증진되었다고 보고하고 있다.

이처럼 BJ3DP 출력물의 압축강도 증진을 위해 후처리 공법과 관련된 연구가 국내외에서 진행되고 있다. 그러나 출력물의 크기를 20 mm × 20 mm × 20 mm 큐빅 시험체에 한정되어 진행되고 있으며, 후처리 용액의 침투 정도 및 출력물 시험체 크기에 따른 강도 증진에 대한 검토는 국내외에서 전무한 실정이다. BJ3DP 출력물이 커짐에 따라 강도 증진 후처리 용액이 출력물 내부까지 침투하지 않는 상황을 가정한다면, 동일한 후처리 방법을 적용하여도 출력물 크기가 커짐에 따라 압축강도는 저하될 우려가 있다. 따라서 본 논문에서는 BJ3DP 출력물 크기를 10 mm, 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 시험체로 설정하고 후처리 용액의 침투 정도를 확인하였다. 또한, 진공침투법에 따른 침투 성능 개선 및 이에 따른 출력물 시험체 압축강도를 확인하는 것을 목표로 하고 있다.

2. 출력 개요

2.1 출력 재료 개요

2.1.1 파우더

KS F 2563 2종 고로슬래그미분말(Ground Granulated Blast Furnace Slag, GGBFS), KS L 5405 2종 플라이애시(Fly Ash, FA), 분말형 규산나트륨(SiO_2 52.5 %, Na_2O 25.5 %, insoluble H_2O 22.0 %, Sodium silicate, Na_2SiO_3) 및 수산화칼슘(Calcium hydroxide, $\text{Ca}(\text{OH})_2$)을 특정 비율로 배합하였다. 본 실험에 사용한 원재료의 물리적 성질은 Table 1과 같다.

2.1.2 접착제

접착제는 Z-Corp사의 Zb 63 binder를 사용하였다. 본 접착

체는 증류수에 0% ~ 1% 수준의 2-피롤리돈(2-Pyrrolidone)을 첨가한 것으로 보고하고 있다(3D Systems, 2019).

2.2 출력 장비 개요

본 연구에서는 3D Systems사의 ProJet CJP360 프린터를 사용하였다. 출력 조건으로 레이어 높이(layer thickness)는 0.1 mm로 적층하고, 적층 속도는 20 mm/h로 진행하였다. 파우더/접착제비(Powder-Binder ratio, P/B)는 0.30으로 하였다.

3. 후처리 개요

3.1 후처리 용액

Park et al.(2018)의 선행 연구에 따라서 규산나트륨(SiO_2 52.5%, Na_2O 25.5%, insoluble H_2O 22.0%, Sodium silicate, Na_2SiO_3) 8M 수용액 75 vol.% 및 순도 $\geq 98\%$ 수산화나트륨(Sodium hydroxide, NaOH) 3M 수용액 25 vol.%로 혼합하였다. 후처리 용액의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

3.2 후처리 장비(진공함침)

최대압력 0.06 MPa 및 0.10 MPa의 오일 로터리 방식 진공 펌프(vacuum pump)를 사용하였다.

3.3 후처리 진행

후처리 과정은 Fig.2와 같다. (1) BJ3DP 출력물을 후처리 용액에 침지한 채로 진공함침기에 존치한다. (2) 최대압력 0.06 MPa 및 0.10 MPa 상태를 유지하여 출력물 내부 공극에 후처리 용액을 침투한다. (3) 진공함침 운용 시간은 출력물에서 기포가 발생하지 않을 때까지 진행한다. 본 연구에서는 약 5분간 진행하였다. (4) 후처리 용액에 침지한 채로 재령 7일까지 60 °C 고온 챔버에 존치한다. (5) 후처리 용액에서 빼낸 후 증류수를 살수하여 출력물 표면에 있는 후처리 용액을 제거한다. (6) 온도 20 ± 2 °C, 상대습도 $60 \pm 5\%$ 의 항온항습실에

Table 1 Physical properties of materials

Item	GGBFS	FA	Na_2SiO_3	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Type	II	II	-	-
Density (g/cm^3)	2.93	2.35	2.40	2.21
BET (m^2/g)	1.68	1.68	-	-
Mean Diameter (μm)	5.30	5.23	-	-

Table 2 Physical properties of post-processing storage solution

Item	pH	specific gravity	viscosity ($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	appearance
Post-processing storage solution	11.35	1.5	200	Viscous liquid

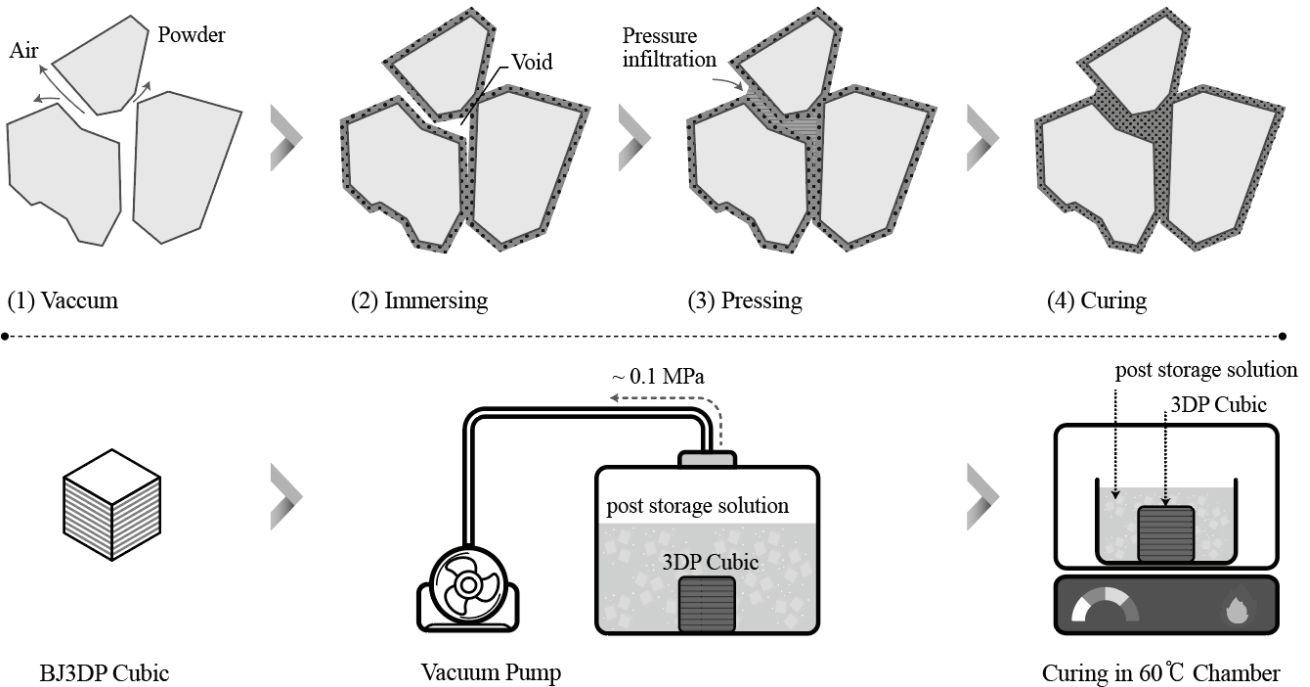
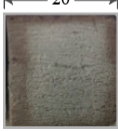
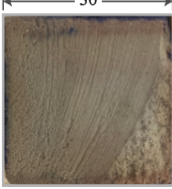




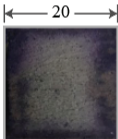
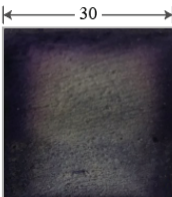
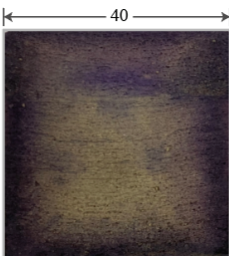
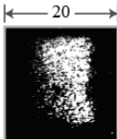
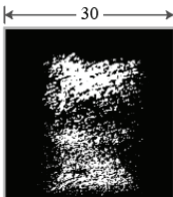
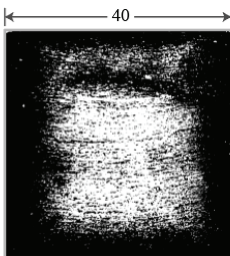
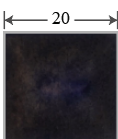
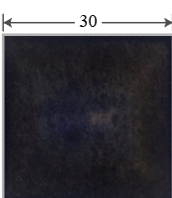
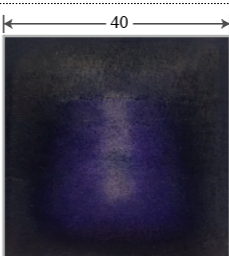
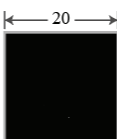
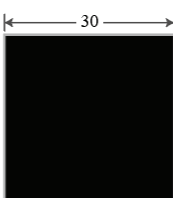
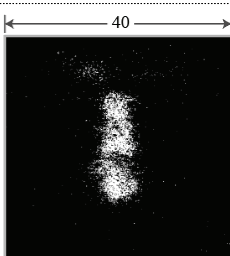


Fig. 2 Concept of Post-processing using vacuum impregnation

Table 3 Image analysis of post-processing

Condition	Original image (mm)			Binary image (mm)		
Non vacuum impregnation						
0.06 MPa vacuum impregnation						
0.10 MPa vacuum impregnation						

서 24시간 자연 건조한 후 부피밀도 및 압축강도를 측정한다.

4. 실험 개요

4.1 침투성

후처리 용액과 잉크를 5:5의 용적 비율로 혼합하여 착색 용액을 제작하고 3.3 후처리 진행 (1)~(3)에 준하여 10 mm, 20 mm, 30 mm 및 40 mm 출력물을 착색하였다. 후처리 과정에서 발생할 수 있는 잉크 번짐을 최소화하기 위하여 안료 잉크를 선택하였으며 점도는 10 ± 0.5 mPa·s이다. 진공함침 후에 출력물을 100 °C 고온 챔버에 1시간 존치하여 건조한 후 고속 절단기를 사용하여 출력물 중심을 Z-방향(적층 방향)으로 절단하였다. 단, 절단 과정의 위험성을 고려하여 10 mm 출력물은 생략하였다. 절단면의 착색부를 분석함으로써 최대압력 0.06 MPa 및 0.10 MPa에 따른 침투면적 및 깊이를 확인하였다. 착색 용액의 점도 및 적층 방향성에 따른 침투 성능은 향후 계속적으로 연구를 진행할 예정이다.

촬영 상황에 따른 영향을 최소화하기 위하여 동일한 환경 조건에서 휴대용 카메라를 사용하여 촬영하였고, 다음과 같

이 이미지 프로세싱 기법을 활용하여 침투면적 및 깊이를 검토하였다. (1) 이미지를 8-bit Grayscale로 변환한다. (2) 이미지 전역에서 기본 임계처리(Simple thresholding)로 이진화 처리(Binary)한다. 여기서 임계값은 다이어그램 피크값으로 설정한다. (3) 후처리 용액의 침투면적 분석은 착색된 영역(검정색)의 픽셀 면적을 합산한다. 여기서 최소단위 픽셀 면적(1 pixel × 1 pixel)까지 합산한다. 최종적으로 전체면적 대비 침투면적으로 침투면적률을 구한다. (4) 후처리 용액의 침투 깊이는 Z-방향(적층 방향) 및 XY-면(적층 방향에 직각 방향)을 검토한다. 최소·최대 침투깊이의 평균값을 산정한다.

4.2 부피밀도

후처리 진행 후의 부피밀도를 식 (1)과 같이 측정함으로써 최대압력 0.06 MPa 및 0.10 MPa에 따른 부피밀도 변화를 확인하였다.

$$\rho_{bulk} = \frac{m_d}{V_M} \quad (1)$$

여기서, ρ_{bulk} 는 부피밀도(g/cm³), m_d 는 실온에서 24시간 자

Table 4 Test results

Condition	Cubic size (mm)	Mark	Permeation area percentage (%)	Permeation depth (mm)		Bulk density (g/cm ³)	Compressive strength (MPa)
				XY-plane	Z-axis		
Non post-processing	20×20×20	NP_20cu	0	0	0	0.94	0.66* ¹
	10×10×10	N_10cu	N/A* ²	N/A	N/A	1.02	1.72
Non vacuum impregnation (=Atmospheric immersion)	20×20×20	N_20cu	16.4	0.89	0.66	1.00	1.30
	30×30×30	N_30cu	9.5	0.89	0.96	1.02	1.19
	40×40×40	N_40cu	15.9	1.84	1.94	1.02	1.19
0.06 MPa vacuum impregnation	10×10×10	0.06V_10cu	N/A	N/A	N/A	1.21	13.52
	20×20×20	0.06V_20cu	88.7	6.27	3.22	1.33	12.33
	30×30×30	0.06V_30cu	83.5	8.47	3.94	1.40	6.50
	40×40×40	0.06V_40cu	69.2	8.00	4.62	1.41	4.14
0.10 MPa vacuum impregnation	10×10×10	0.10V_10cu	N/A	N/A	N/A	1.47	19.87
	20×20×20	0.10V_20cu	100.0	fill* ³	fill	1.46	21.67
	30×30×30	0.10V_30cu	100.0	fill	fill	1.54	19.39
	40×40×40	0.10V_40cu	98.7	15.90	11.01	1.67	14.62

*1 : 1-day compressive strength after printing

*2 : not applicable : the permeation test was not conducted due to safety issues.

*3 : permeate the entire specimen

연 건조한 질량(g), V_M 는 디지털 버니어 캘리퍼스를 사용한 실제 부피(cm³)이다.

4.3 압축강도

재령 8일(항온항습실 존치 1일 포함)에서 만능재료시험기 (INSTRON 50 kN)을 사용하여 재하속도 40 N/s로 압축강도를 측정하였다. 단, 본 논문에서는 Z-방향(적층 방향)에 한정하여 측정하였다. 향후 적층방향이 압축강도에 미치는 영향에 대해 연구를 진행할 예정이다.

5. 실험 결과 및 분석

5.1 침투성

20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물을 대상으로 4.1 침투성 이미지 프로세싱 기법에 따라 이진화 처리를 수행한 결과를 Table 3에 표기하였다. 육안 판단 결과, 진공함침을 실시하지 않은 시편은 착색 용액이 출력물 내부까지 침투하지 않는 것을 확인하였다. 반면에 진공함침을 실시한 경우 최대압력이 커짐에 따라 착색 용액의 침투면적 및 침투깊이가 개선되는 것을 확인하였다. 이를 정량적으로 분석하기 위하여 픽셀 단위로 침투면적을 및 침투깊이를 계산하였고 그 결과를

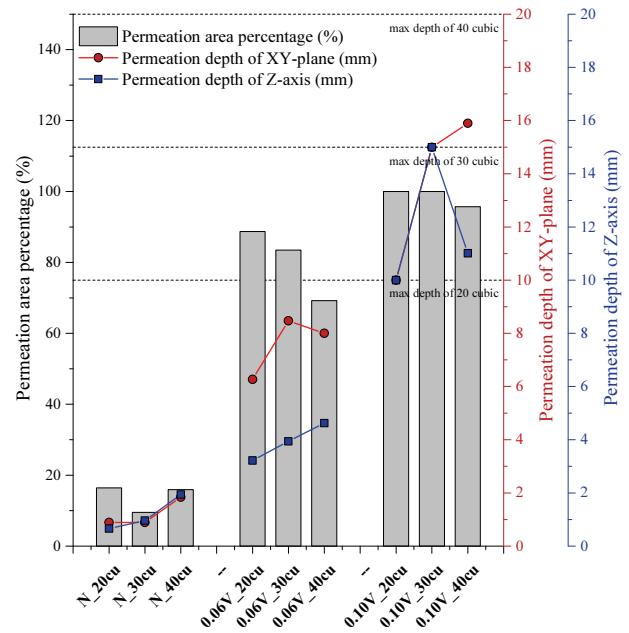


Fig. 3 Permeation performance of vacuum pressure

Table 4 및 Fig.3에 표기하였다.

진공함침 미실시(Non vacuum impregnation)의 경우 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물의 침투면적률은 16.4 %, 9.5 % 및 15.9 %로 확인되었다. XY-면 침투깊이는 0.89 mm,

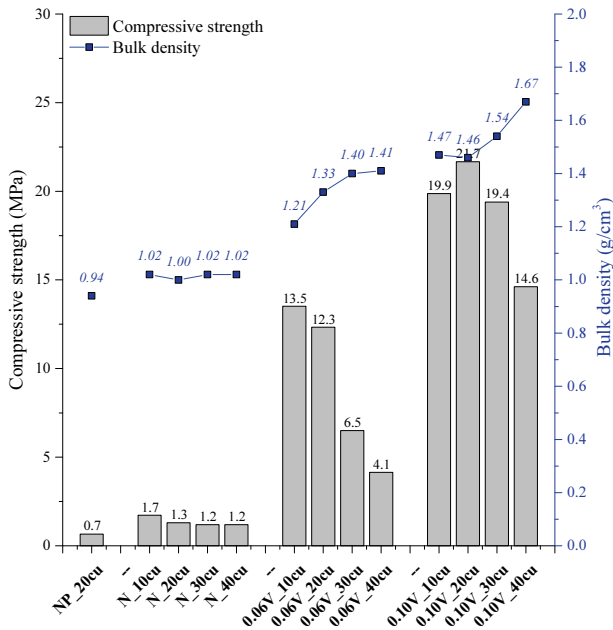
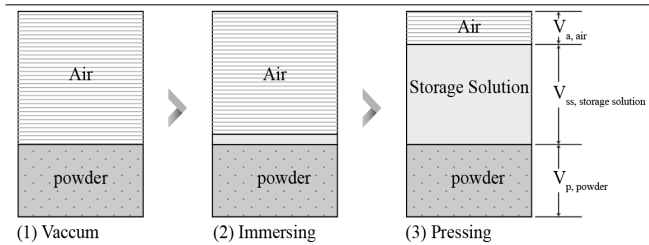


Fig. 4 Physical Properties of vacuum pressure

Table 5 Estimated volumetric content of post-processing

mark	$V_{p(\text{powder})}$ (%)	$V_{ss(\text{storage solution})}$ (%)	$V_{a(\text{air})}$ (%)
NP_20cu		0.0	64.8
N_10cu		5.3	59.5
N_20cu		4.0	60.8
N_30cu		5.3	59.5
N_40cu		5.3	59.5
0.06V_10cu		18.0	46.8
0.06V_20cu	35.2	26.0	38.8
0.06V_30cu		30.7	34.1
0.06V_40cu		31.3	33.5
0.10V_10cu		35.3	29.5
0.10V_20cu		34.7	30.1
0.10V_30cu		40.0	24.8
0.10V_40cu		48.7	16.1



0.89 mm 및 1.84 mm이며, Z-방향 침투깊이는 0.66 mm, 0.96 mm 및 1.94 mm로써 출력물 표면부만 침투된 것을 확인하였다. 여기서 출력물 크기에 따른 경향은 명확하지는 않았다.

최대압력 0.06 MPa 진공함침의 경우 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물의 침투면적률은 88.7 %, 83.5 % 및 69.2 %로 확인하였다. XY-면 침투깊이는 6.27 mm, 8.47 mm 및 8.00 mm이며, Z-방향 침투깊이는 3.22 mm, 3.94 mm 및 4.62 mm 로 확인하였다. 결론적으로 진공함침 미실시와 비교해 침투 깊이가 개선되고 이에 따라서 침투면적률이 개선된 것을 의미한다. 0.06 MPa 진공함침의 침투깊이는 6.27 mm ~ 8.47 mm 수준이기 때문에 출력물이 커짐에 따라 침투면적률은 작아지는 결과가 나타났다. Z-방향 침투깊이는 XY-면 침투깊이의 47 % ~ 58 % 수준으로 확인되었다. 이는 적층계면에 간극이 생성되고 이 간극을 통해 용액이 침투되는 것으로 추측할 수 있다. Table 3의 40 mm 큐빅 출력물 이진화 처리 이미지에 서도 용액이 XY-면을 따라 침투되는 형상을 확인할 수 있다.

최대압력 0.10 MPa 진공함침의 경우 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물의 침투면적률은 100.0 %, 100.0 % 및 98.7 %로 확인하였다. XY-면 침투깊이는 10.00 mm(fill), 15.00 mm(fill) 및 15.90 mm이며, Z-방향 침투깊이는 10.00 mm(fill), 15.00 mm(fill) 및 11.01 mm로 확인하였다. Z-방향 침투깊이는 XY-면 침투깊이의 69 % 로 확인되었다.

최대압력이 증가함에 따라 침투깊이가 개선되고 이에 따라 침투면적률이 개선된 것을 의미한다. 따라서 BJ3DP 출력물의 강도증진을 위해 출력물 내부까지 후처리 용액을 침투하는 방법으로 진공함침의 유효성을 확인할 수 있다.

5.2 부피밀도

10 mm, 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물의 부피밀도는 Table 4 및 Fig.4와 같다. 후처리 공정을 수행하지 않은 출력물(Non post-processing)의 밀도는 0.94 g/cm³로 복합 파우더의 밀도가 2.67 g/cm³인 것을 고려하면 공극률(porosity)은 64.8 %로 추정할 수 있다(Table 5).

진공함침 미실시로써 상압에서 후처리 용액에 침지(Non vacuum impregnation)한 경우 10 mm, 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물의 부피밀도는 1.00 g/cm³ ~ 1.02 g/cm³수준으로 증가하였다. 여기서 후처리 용액의 밀도가 1.5 g/cm³인 것을 고려하면 후처리 용액이 침투한 체적률은 4.0 % ~ 5.3 %로 추정할 수 있다.

최대압력 0.06 MPa 진공함침의 경우 10 mm, 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물의 부피밀도는 1.21 g/cm³, 1.33 g/cm³, 1.40 g/cm³ 및 1.41 g/cm³으로 상압조건에 비해 증가하였다. 따라서 후처리 용액이 침투한 체적률은 18.0 %, 26.0 %, 30.7 % 및 31.3 %로 추정할 수 있다.

최대압력 0.10 MPa 진공함침의 경우 10 mm, 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물의 부피밀도는 1.47 g/cm³, 1.46 g/cm³, 1.54 g/cm³ 및 1.67 g/cm³로 0.06 MPa에 비해 증가하였

다. 따라서 후처리 용액이 침투한 체적률은 35.3 %, 34.7 %, 40.0 % 및 48.7 %로 추정할 수 있다.

결론적으로 최대압력이 증가함에 따라 부피밀도가 증가하는 결과가 나타났다. 이는 침투성의 결과와 마찬가지로 출력물 내부까지 후처리 용액이 침투한 것을 의미한다. 단, 출력물 크기에 따라서 부피밀도가 증가하는 현상 및 추정 체적률에 대한 실험적 근거는 추후 연구를 통해 검증할 필요가 있다.

5.3 압축강도

10 mm, 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물의 압축강도는 Table 4 및 Fig.4와 같다. 후처리 공정을 수행하지 않고 출력 후 재령 1일의 압축강도는 0.66 MPa로 나타났다. Park et al.(2018)의 선행 연구에 따르면 FA 및 GGBFS 기반의 BJ3DP 출력물은 알칼리성 후처리 용액과 반응하여 C-S-H 및 Calcite가 생성되어 강도증진이 발현된다고 보고하고 있다. 따라서 후처리 용액을 출력물 내부까지 침투함으로써 강도증진을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

진공함침 미시시으로써 상압에서 후처리 용액에 침지(Non vacuum impregnation)한 경우 10 mm, 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물의 압축강도는 1.72 MPa, 1.30 MPa, 1.19 MPa 및 1.19 MPa로 나타났다. 이는 침투깊이가 0.66 mm ~ 1.96 mm에 국한되어 출력물 내부까지 후처리 용액이 침투하지 못한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

최대압력 0.06 MPa 진공함침의 경우 10 mm, 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물의 압축강도는 13.52 MPa, 12.33 MPa, 6.50 MPa 및 4.14 MPa로 상압조건에 비해 786 %, 948 %, 546 % 및 348 % 증가하였다. 이는 침투깊이가 3.22 mm ~ 8.47 mm로 증가함에 따라 출력물 내부까지 후처리 용액이 침투한 것에 기인하고 있다. 그러나 출력물 크기가 커짐에 따라 압축강도가 선형적으로 감소하는 경향이 나타났다. 이는 크기가 커짐에 따라 Fig.3과 같이 침투면적률이 선형적으로 감소하였고, 출력물 내부에 적층된 파우더가 후처리 용액과 반응하지 못한 것에 기인한 것으로 판단된다.

최대압력 0.10 MPa 진공함침의 경우 10 mm, 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물의 압축강도는 19.87 MPa, 21.67 MPa, 19.39 MPa 및 14.62 MPa로 상압조건에 비해 1155 %, 1667 %, 1629 % 및 1229 % 증가하였다. 이는 침투깊이가 11.01 mm ~ 15.90 mm로 증가함에 따라 출력물 내부까지 후처리 용액이 침투한 것에 기인하고 있다. 또한 40 mm 큐빅을 제외하고는 침투면적률이 100 %이므로 출력물 크기에 따른 강도변화도 미비한 수준으로 나타났다. 여기서, 40 mm 큐빅의 침투면적률은 98.7 %이기 때문에 30 mm 큐빅과 비교해 4.77 MPa가 작은 압축강도가 나타난 것을 알 수 있다.

상기 결과로부터 BJ3DP 출력물 압축강도는 후처리 용액의

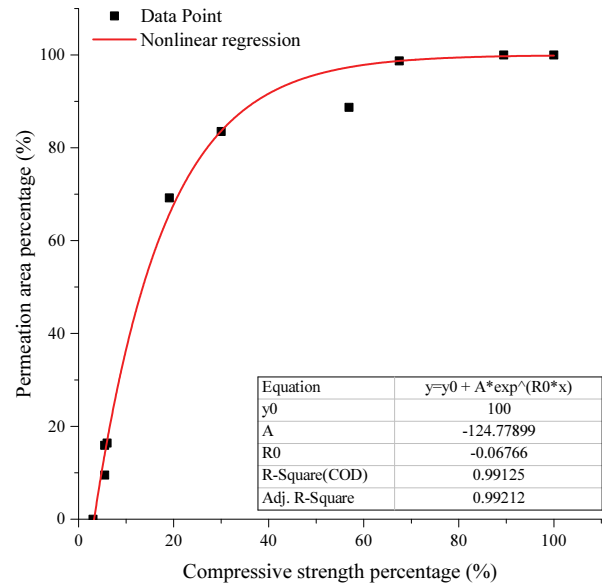


Fig. 5 Relationship of permeation area and compressive strength ratio

침투면적률과 상관관계가 있는 것으로 판단된다. 침투면적률과 압축강도율의 상관관계를 Fig.5에 나타내었으며 식(2)와 같이 지수함수 형태로 상관관계가 나타난다. 여기서 향후 데이터 표본수를 다각화하는 것을 목표로 하고 있기 때문에 압축강도율로 상관관계를 표기하였다. 식(2)에서 침투면적률 최대값은 100 %이므로 상수 y_0 는 100으로 고정하였으며, x (압축강도율)은 0 % 초과 100 % 이하로 조건을 추가하였다. 그 결과 보정결정계수(R^2 , R-Square)는 0.992로써 높은 상관관계를 나타내고 있다.

$$y = y_0 + A e^{R_0 x} \quad s.t. (0 < x \leq 100) \quad (2)$$

여기서, y 는 침투면적률(%), x 는 압축강도율(%), y_0 , A , R_0 는 상수로써 100, -124.77899 및 -0.06766이다.

본 연구에서는 최대 압축강도 21.67 MPa에 해당되는 결합구성 및 후처리 공정에 한정된 결과이므로, 복합파우더의 결합구성비 및 후처리 공정을 다각화하여 데이터 표본수(자유도)를 확보함으로써 상관관계식의 신뢰성을 확보해 나갈 필요가 있다.

6. 결론

본 연구는 바인더젯 3D 프린팅 출력물의 강도증진을 위하여 진공함침 후처리 공정의 적용성을 검토하였다. 또한, 출력

물 크기에 따른 강도발현 한계를 확인하기 위하여 침투성, 부피밀도 및 압축강도를 확인하였다.

- 1) 진공함침 후처리 공정에서 최대압력을 증가함에 따라 침투깊이 및 침투면적률이 개선되었다. 바인더젯 3D 프린팅 출력물의 강도증진을 위해 출력물 내부까지 후처리 용액을 침투하는 방법으로 진공함침은 유효하다고 판단된다.
- 2) 최대압력 0.10 MPa 진공함침의 경우 XY-면 침투깊이는 15.90 mm이며, Z-방향 침투깊이는 11.01 mm로 확인되었다. 여기서, Z-방향 침투깊이는 XY-면 침투깊이의 69 %로 수준이다. 이는 적층계면에 간극이 생성되고 이 간극을 통해 용액이 침투되는 것으로 판단된다.
- 3) 진공함침 최대압력이 증가함에 따라 부피밀도가 증가하였고, 이는 출력물 내부까지 후처리 용액이 침투한 것을 의미한다. 출력물의 부피밀도를 이용하여 파우더, 후처리 용액 및 공기의 공극을 산출할 수 있다.
- 4) 진공함침 최대압력이 일정할 경우, 바인더젯 3D 프린팅 출력물 크기가 커짐에 따라 후처리 용액의 침투면적률이 낮아짐에 따라 압축강도 저하가 발생한다.
- 5) 바인더젯 3D 프린팅 출력물 압축강도율은 후처리 용액 침투면적률과 보정결정계수 0.992의 지수함수 형태의 상관관계를 나타낸다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업 “소형 건축물 및 비정형 부재 대상 3D 프린팅 설계, 재료 및 장비 개발(20AUDP-B121595-05)”에 의해 수행하였다.

References

1. ASTM F 2792-12 (2015), Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.
2. Rael, R. and San Fratello, V. (2011), Developing concrete polymer building components for 3D printing, *Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, (ACADIA 11), Banff, Canada, University of Calgary, 13-16 October, 2011, 152-157.
3. Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., and Pambaguian, L. (2014), Building Components for an Outpost on the Lunar Soil by Means of a Novel 3D Printing Technology, *Acta Astronaut*, 93, 430-450.
4. Ming Xia, Jay Sanjayan (2016), Method of formulating geopolymers for 3D printing for construction applications, *Materials and Design*, 110, 382-390.
5. Park K.M, Lee J, Lee B.C, (2018), Effects Improvement in Strength of 3D Printed Alkali-activated Slag/Fly Ash Paste, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 30(6), 641-648.(In Korean).
6. Gibbons, G. J., Williams, R., Purnell, P., and Farahi, E. (2010). 3D Printing of cement composites, *Advances in Applied Ceramics*, 109(5), 287-290.
7. 3D systems (2019), Safety Data Sheet, Available online at: <http://infocenter.3dsystems.com/materials/auxiliary/binders/zb63/>(accessed 11, Dec 2019).

Received : 03/27/2020

Revised : 04/04/2020

Accepted : 04/07/2020

요 지 : 본 연구는 바인더젯 3D 프린팅 출력물의 강도증진을 위하여 진공함침 후처리 공정의 적용성을 검토하였다. 또한, 출력물 크기에 따른 강도발현 한계를 확인하기 위하여 10 mm, 20 mm, 30 mm 및 40 mm 큐빅 출력물을 대상으로 침투성, 부피밀도 및 압축강도를 확인하였다. 그 결과, 진공함침 후처리 공정에서 최대압력이 증가함에 따라 후처리 용액이 출력물 내부까지 침투하게 되고 이에 따라서 침투면적률이 개선되는 것을 확인하였다. 출력물 압축강도율과 후처리 용액 침투면적률은 보정결정계수 0.992의 지수함수 형태의 상관관계를 나타내고 있다. 또한, 부피밀도가 증가하였으며 이는 후처리 용액이 내부까지 침투한 것으로 유추할 수 있다. 결론적으로 바인더젯 3D 프린팅 출력물의 강도증진을 위해서는 출력물 내부까지 후처리 용액을 침투하는 것이 필수적이며, 이를 위한 유효한 방법으로써 진공함침을 제안한다.

핵심용어 : 적층제조, 3D 프린팅, 바인더젯, 진공함침, 후처리 공법
