

# 결합재의 함량에 따른 순환굵은골재 사용 무세골재 폴리머 콘크리트의 성능 발현 특성

## Performance Characteristics of No-Fines Polymer Concrete using Recycled Coarse Aggregate with Binder Contents

김도현<sup>1</sup> · 정혁상<sup>2\*</sup> · 김동현<sup>2</sup>

Do-Heon Kim<sup>1</sup> · Hyuk-Sang Jung<sup>2\*</sup> · Dong-Hyun Kim<sup>2</sup>

(Received September 24, 2021 / Revised October 29, 2021 / Accepted October 29, 2021)

In this study, the properties of no-fines polymer concrete with different polymer binder contents were evaluated. The polymer concrete was formulated using a polymeric binder (unsaturated polyester resin), fly ash, and recycled coarse aggregate (60%) and crushed coarse aggregate (40%). The polymeric binder content (4.0-6.0wt.%) was used as an experimental variable because it dramatically affects both the cost-effectiveness and material properties. The results showed that the density, compressive strength, flexural strength both before and after exposure to freezing and thawing increased as the polymer binder content increased, while the absorption, void ratio, permeable voids, coefficient of permeability, and acid resistance (mass loss by acid attack) decreased as the polymeric binder content increased. In particular, even though the void ratio was 18.4% and the water permeability coefficient was 7.3mm/sec, the compressive strength and flexural strength were as high as 38.0MPa and 10.0MPa, respectively, much more significant than those of previous studies. Other properties such as absorption and acid resistance were also found to be excellent. The results appear to be rooted in the increased adhesion of the binder by adding a cross-linking agent and the surface hydrophobicity of the polymer.

**키워드** : 순환굵은골재, 무세골재 폴리머 콘크리트, 폴리머 결합재 함량, 결합력, 표면 소수성

**Keywords** : Recycled coarse aggregate, No-fines polymer concrete, Polymeric binder content, Cohesive strength, Surface hydrophobicity

### 1. 서론

우리나라에서는 경제성장에 따른 사회기반시설의 수요증가로 인하여 시설물의 철거와 신축이 빈번하게 이루어지고 있으며, 이 과정에서 건설폐기물의 발생량이 지속적으로 증가하고 있다. 특히 최근 몇 년간 노후주택의 재개발 및 재건축이 활발해지면서 건설 폐기물 발생량이 급격히 늘어나고 있으며, 앞으로 서울 및 수도권권을 중심으로 더욱 증가 될 것으로 예상하고 있다(Woo et al. 2020). 지속적으로 발생하는 건설 폐기물의 재활용은 골재 수

요량의 상당부분을 충당할 수 있으며, 자원의 고갈 및 환경파괴를 최소화 하는 효과를 가져 올 수 있다. 그리하여 최근 수년간 순환 골재 활용연구, 품질향상을 위한 지침 제정 등 건설용 골재로서 효율적인 이용방안이 모색 되고 있다(Li and Kim 2017).

우리나라에서 발생하는 건설폐기물의 양은 221,102톤/일(2019년 기준)로서 건설폐기물의 점유율은 44.5%이다. 건설폐기물의 재활용률은 98.9%이고, 소각률은 0.3%, 매립률은 0.8% 이다 (Ministry of Environment 2020).

이와 같은 건설폐기물에서 생산되는 콘크리트용 순환골재는

\* Corresponding author E-mail: yoricom@dyu.ac.kr

<sup>1</sup>동양대학교 건설공학과 박사과정 (Graduate student, Department of Construction Engineering, Dongyang University, Yeongju-si, 36040, Rep. of Korea)

<sup>2</sup>동양대학교 철도안전건설공학과 교수 (Professor, Department of Railway Safety and Construction Engineering, Dongyang University, Yeongju-si, 36040, Rep. of Korea)

「건설폐기물의 재활용촉진에 관한 법률」 제35조에 따라 건설교통부 장관이 공고한 「순환골재의 품질 기준」 가운데 ‘3. 콘크리트용’에 부합하여야 한다. 이 품질기준은 「골재채취법」 및 「골재채취법시행령」에 근거한 「골재의 용도별 품질기준」에서 정하고 있는 ‘부순굵은골재(일반골재)의 품질기준’에서 요구하는 조건을 만족시키고 있다.

그럼에도 아직까지 순환골재에 대한 인식부족과 순환골재 콘크리트에 대한 연구의 부족, 그리고 순환골재의 원천적인 문제인 고르지 못한 품질 등으로 인하여 대부분의 순환골재는 제한적으로 이용되고 있다(Lee and Shim 2010).

특히 토목분야에서는 의무 사용으로 인해 활용이 되고 있으나 건축분야에서는 콘크리트용 순환골재가 거의 사용되지 않고 있다. 더욱이 순환골재의 높은 흡수율, 낮은 밀도, 품질의 편차 등으로 인하여 콘크리트용으로서의 사용을 기피하고 있는 실정이다(Woo et al. 2020). 더군다나 순환굵은골재를 사용할 경우 일반 부순굵은골재를 사용한 경우 보다 더 유리한 결과를 얻을 수 있는 요인은 찾아보기 어렵다. 그렇다면 효율적인 이용 방안을 찾아내는 것이 중요하며, 압축강도와 공극률 등 주요 성능이 결합재의 성질과 골재의 크기에 영향을 받는 다공질 콘크리트(Chindaprasirt et al. 2009)에 적용하여 보는 것도 다양한 방안 중의 하나가 될 수 있다.

이와 같은 점에 착안하여 고강도이면서 빠르게 경화할 뿐만 아니라 물리·화학적 성능이 우수한 폴리머 콘크리트의 제조기술을 이 연구에 적용하여 보기로 하였다. 폴리머 콘크리트에 사용되는 결합재는 미립의 충전재와 혼합되어 페이스트 형태로 골재입자를 부착시켜주는 역할을 한다.

구체적으로 이 연구에서는 폴리머 콘크리트의 결합재로 가장 많이 사용되는 불포화 폴리에스터 수지의 함량을 실험변수로 하여 순환골재 사용 ‘무세골재 폴리머 콘크리트’에 대한 성능 발현 특성을 규명하여 봄으로써 사면 보강용 블록 등 기반시설용 구조물에 적용하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 불포화 폴리에스터 수지

이 연구에서 사용한 불포화 폴리에스터 수지는 코발트계 경화 촉진제가 첨가되어 있는 올소타입(Ortho type)으로서 그 성질은 다음의 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of unsaturated polyester resin

Specific gravity (25°C)	Viscosity (25°C, poise)	Acid value	Gel time (25°C)	Styrene content
1.13	3.0±0.4	20.0	7-11	40

#### 2.1.2 개시제

개시제는 메틸에틸케톤 프록사이드(MEKPO) 55%, DMP 45% 인 용액을 사용하였으며, 그 성질은 Table 2와 같다.

Table 2. Properties of initiator

Component	Specific gravity(25°C)	Active oxygen
MEKPO 55% DMP 45%	1.12	10.0

#### 2.1.3 가교제

폴리머 콘크리트는 유기질인 폴리머 매트릭스와 무기질인 골재와의 결합으로 이루어진다. 이 두 재료의 결합력 증진을 위한 가교제(cross-linking agent)로서 시란(silane)을 사용하였으며, 그 성질은 Table 3과 같다.

Table 3. Properties of silane

Specific gravity (25°C)	Viscosity (25°C, mm <sup>2</sup> /sec)	Atomic weight	Flash point (°C)	Appearance (color)
1.04	2.42	248.4	125	Colorless

#### 2.1.4 플라이 애시

폴리머 콘크리트에서는 단위체적당 수지의 양을 줄이고, 점성의 조절을 위해 충전재가 이용된다. 이 연구에서는 플라이 애시를 사용하였으며, 그 성질은 Table 4와 같다.

Table 4. Properties of fly ash

Density (g/cm <sup>3</sup> )	SiO <sub>2</sub> (%)	Loss ignition (%)	Specific surface (cm <sup>2</sup> /g)
2.22	51.9	3.2	3,651

#### 2.1.5 순환굵은골재

이 연구에서 사용된 순환굵은골재는 「순환골재 품질 기준」 중 ‘콘크리트용’에 적합한 것으로 실적률은 58.4%이며, 세종시 소재 A사에서 생산된 것이다.

### 2.1.6 부순굵은골재

사용된 부순굵은골재는 「골재의 용도별 품질기준」에 적합한 것으로 실적률은 58.9%이며, 충북 진천군 소재 B사에서 생산된 것이다.

### 2.1.7 혼합굵은골재

행정규칙인 「순환골재의 품질 기준」에서 정하고 있는 ‘콘크리트용 순환골재 사용비율’에 따라 순환굵은골재는 용적의 60%로 하였으며, 나머지 40%는 부순굵은골재를 혼합하여 사용하였다. 2가지 굵은 골재에 대한 성질은 Table 5, 혼합굵은골재에 대한 체분석 결과는 Table 6, 그리고 각각의 형상은 Fig. 1에서 보는 바와 같다.

Table 5. Physical properties of aggregate

Items	Gradation (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption capacity(%)	Solid volume percentage(%)
Recycled coarse aggregate	5-20	2.56	2.73	58.4
Crushed coarse aggregate	5-20	2.69	0.95	57.5

Table 6. Sieve analysis of mixed coarse aggregate

Sieve size(mm)	2.5	5	10	20	25
Grading requirements (20mm, %)	0-5	0-10	20-55	90-100	100
Test values(%)	0	0.2	28	99	100



a) Recycled coarse aggregate      b) Crushed coarse aggregate

Fig. 1. Shape of coarse aggregate used

## 2.2 배합비 및 시험체 제작

### 2.2.1 무세골재 폴리머 콘크리트의 배합비

재료비 가운데 가장 비중을 높게 차지하고, 성능 발현에 가장

큰 영향을 미치는 폴리머 결합재(불포화폴리에스터 수지)의 함량을 변수(4.0~6.0wt.%)로 하였으며, 예비실험을 통하여 결정된 배합비는 Table 7과 같다.

Table 7. Mix design of no-fines polymer concrete

Polymeric binder content (wt.%)	Mixing ratio(kg/m <sup>3</sup> )			
	Polymeric binder	Fly ash	Cycled coarse aggregate	Crushed coarse aggregate
4.0	70	105	958	638
4.5	82	122	958	638
5.0	93	140	958	638
5.5	105	157	958	638
6.0	116	175	958	638

### 2.2.2 폴리머 결합재의 배합비

이 연구에서 사용한 폴리머 결합재의 배합비는 Table 8과 같다.

Table 8. Mix proportion of polymeric binder

Unsaturated polyester resin	Initiator contents(phr*)	Silane (phr*)	Remarks
100	1.0	2.0	

phr\* : parts per hundred parts of resin

### 2.2.3 시험체 제작

원주형 시험체 (∅100×200mm)와 사각형 시험체(200×200×60mm)를 제작하였다. 골재와 충전재를 건비법 한 후 결합재를 투입한 후 강제식 믹서로 혼합하였으며, 봉 다짐을 하였다. 시험체는 온도 60±5°C, 습도 50±5%인 챔버(chamber)에서 3±1시간 양생시킨 후 상온 (23±2°C)에서 7일간 양생하였다.

## 2.3 시험방법

### 2.3.1 밀도

KS F 2505에 제시된 방법을 준용하여 다음 (1) 식에 의해 산출하였다.

$$T = \frac{m_1}{V} \quad (1)$$

여기에서,  $T$ 는 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $V$ 는 시험체의 용적(m<sup>3</sup>),  $m_1$ 은 시험체의 질량 (kg)이다.

### 2.3.2 흡수율

KS F 2503을 준용하여 다음 (2)식에 의해 구하였다.

$$Q = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (2)$$

여기에서,  $Q$  는 흡수율(%),  $A$  는 절대 건조 상태의 시료 질량(g),  $B$  는 표면 건조 포화 상태의 시료 질량(g)이다.

### 2.3.3 공극률

공극률은 다음 (3)식에 의해 구하였다(Japan Concrete Institute 1995).

$$\text{공극률(\%)} = \left(1 - \frac{W_2 - W_1}{V}\right) \times 100 \quad (3)$$

여기에서,  $W_1$  은 충분히 포화시킨 시험체의 수중 질량(g),  $W_2$  는 드라이오븐(60±3°C)에서 24시간 건조시킨 후의 절대건조 질량(g),  $V$  는 시험체의 체적(cm<sup>3</sup>)이다.

### 2.3.4 연속공극률

연속공극률은 다음 (4)식에 의하여 산출하였다(Japan Concrete Institute 1995).

$$\text{연속공극률(\%)} = \left(1 - \frac{W_3 - W_1}{V}\right) \times 100 \quad (4)$$

여기에서,  $W_1$  은 충분히 포화시킨 공시체의 수중 질량(g),  $W_3$  는 표면건조포화상태의 질량(g),  $V$  는 공시체의 체적(cm<sup>3</sup>)이다.

### 2.3.5 투수계수

투수계수 시험은 KS F 4419에 따랐으며, 다음 (5)식으로 계산하였다.

$$K = \frac{d}{h} \times \frac{Q}{A \times 30s} \quad (5)$$

여기에서,  $K$  는 투수계수(mm/sec),  $Q$  는 배수되는 유출수량(mm<sup>3</sup>),  $d$  는 블록의 두께(mm),  $h$  는 수위의 차(mm),  $A$  는 블록의 단면적(mm<sup>2</sup>),  $30s$  는 측정시간(s)이다.

### 2.3.6 압축강도

KS F 2405에 규정된 방법으로 Φ100x200mm 크기의 시험체에 대하여 시험 하였다.

### 2.3.7 휨강도

KS F 4419에 규정된 방법으로 200x200x60mm 크기의 시험체를 제작하여 3점 재하방법에 의해 휨강도를 시험하였다.

### 2.3.8 동결융해 후 휨강도

GR F 4007에 따라 동결융해 100 사이클을 작용시킨 후 KS F 2456 B 방법에 의해 휨강도를 시험하였다. 시험체의 크기는 200x200x60mm로 하였다.

### 2.3.9 내산성

200x200x60mm 크기의 시험체에 대하여 황산 용액(5%)에 168시간 침지한 다음 측정된 중량 변화율을 내산성으로 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 밀도

밀도시험 결과는 Fig. 2와 같다. 여기에서 볼 수 있는 바와 같이 밀도는 1798~1906kg/m<sup>3</sup>의 범위에 있으며, 폴리머 결합재 함량이 증가할수록 커지는 경향을 보였다.

선행 연구에 대하여 살펴보면 Mounika and Srinivas(2018)은 무세골재 시멘트 콘크리트의 밀도는 1738~1963kg/m<sup>3</sup>로서 기존 콘크리트보다 작았다고 하였으며, Malik(2016)는 일반 골재 사용 무세골재 시멘트 콘크리트의 밀도는 1795~ 1945kg/m<sup>3</sup>이었다고 하였다.

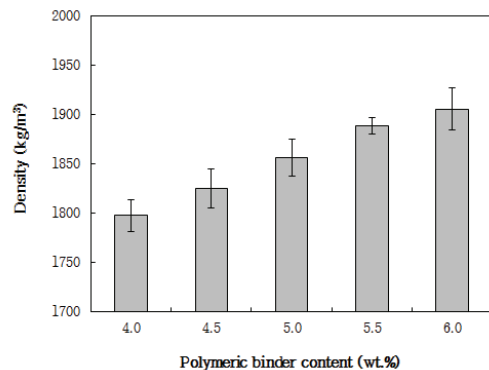


Fig. 2. Effects of polymeric binder content on density

이 연구에서 구한 밀도와 선행 연구에서의 밀도를 비교해 보면 다소 작은 값을 알 수 있는데 이는 순환굵은골재의 밀도 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

### 3.2 흡수율

흡수율 시험 결과는 Fig. 3과 같다. 이 결과에서 흡수율은 0.047~0.151%의 범위에 있음을 알 수 있으며, 폴리머 결합재 함량이 증가함에 따라 작아졌다.

선행 연구를 살펴보면 무세골재 콘크리트의 최대 흡수량은 부피 기준으로 25%, 또는 질량 기준으로 50%에 달할 수 있지만 일반 콘크리트 흡수량의 1/5을 초과하지 않는 것으로 되어있다 (Naville 2011),

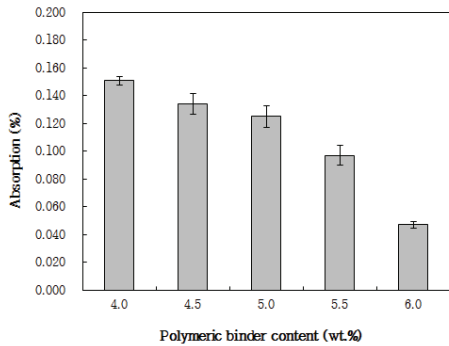


Fig. 3. Effects of polymeric binder content on absorption

그리고 무세골재 콘크리트는 모세관이 없지만 질량 기준으로 최대 12%의 높은 흡수율로 인하여 물과 접촉할 수 있는 환경에서 사용하기에 부적합하다고 보고도 있다(Engineering notes).

이러한 선행 연구에서의 흡수율과 이 연구에서 구한 흡수율을 비교하여 보면 매우 큰 차이가 있다. 즉 이 연구에서 구한 흡수율이 매우 낮았는데, 이는 폴리머 결합재인 불포화폴리에스터 수지가 표면 소수성(surface hydrophobicity)을 갖고 있기 때문이다.

따라서 무세골재 폴리머 콘크리트는 물이나 흙과 접하는 구조물에 이용할 수 있기 때문에 현장 적용성 측면에서 매우 유리함을 보여주는 결과라고 하겠다.

### 3.3 공극률

목표공극률을 18% 이상으로 하여 공극률을 시험 결과는 Fig. 4와 같다. 이 결과에서 보면 공극률은 18.4~35.3%의 범위에 있음을 알 수 있으며, 폴리머 결합재의 함량이 증가함에 따라 공극률

은 감소하였다.

선행 연구를 살펴보면, Mounika and Srinivas(2018)은 무세골재 시멘트 콘크리트의 공극률이 13~28%라고 하였고, Muthaiyan and Thirumalai(2017)은 투수성 시멘트 콘크리트의 공극률은 18.68~28.70%이며, 투수성 플라이애시-시멘트 콘크리트는 18.19~26.47%라고 하였다.

그리고 Alam and Naz(2015)은 골재/시멘트 비와 물/시멘트 비가 동일할지라도 20mm 골재의 경우 최대 36%인 반면, 10mm 골재는 29%로서 무세골재 콘크리트의 공극률은 골재의 크기에 영향을 받는다고 하였다.

이와 같은 기존의 연구결과들과 비교하여 볼 때, 이 연구에서 얻어진 공극률의 범위와 비교적 큰 차이를 보였는데 이는 결합재의 양과 굵은골재의 입도 차이에 기인하는 것이다.

한편 밀도와 공극률의 관계를 분석하여 보았던 바 그 결과는 Fig. 5와 같다.

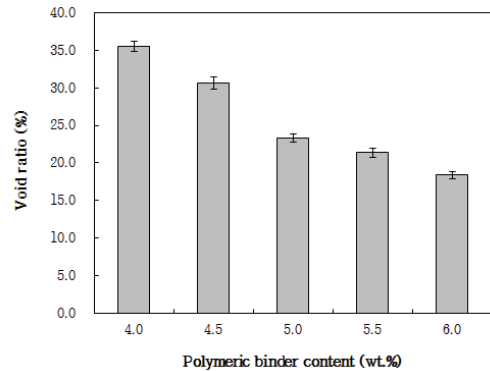


Fig. 4. Effects of polymeric binder content on void ratio

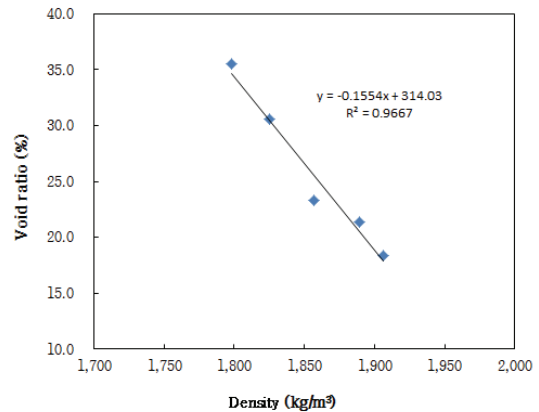


Fig. 5. Relation between void ratio and density

공극률과 밀도는 직선 관계이며,  $R^2=0.9667$ 로서 상관성이 높게 나타났다. 이러한 결과는 밀도가 증가함에 따라 공극률이 감소하는 것으로 나타났으며, 가장 높은 공극률은 38%라고 보고한 연구결과(Ibrahim et al, 2014)와 유사한 경향을 보이는 것이다.

### 3.4 연속 공극률

연속공극률에 대한 시험 결과는 Fig. 6과 같다. ‘연속공극’이란 전체 공극 중 물이 연속적으로 침투하여 흐를 수 있는 공극을 말한다. 이 연구결과에서 연속 공극률은 15.4~ 27.1%의 범위로 나타났으며, 이는 공극률의 83.6~76.7% 수준이다.

이러한 연속공극률은 투수성 시멘트 콘크리트의 경우 17.85~27.23%, 투수성 플라이애시 시멘트 콘크리트의 경우 15.01~24.79%의 범위였다는 연구결과(Muthaiyan and Thirumalai 2017), 그리고 최대골재치수 5~13mm일 때 연속공극률은 4.2~23.8%이었다는 보고(Moon et al, 1998)와 비교하여 볼 때, 다소 큰 값을 알 수 있다.

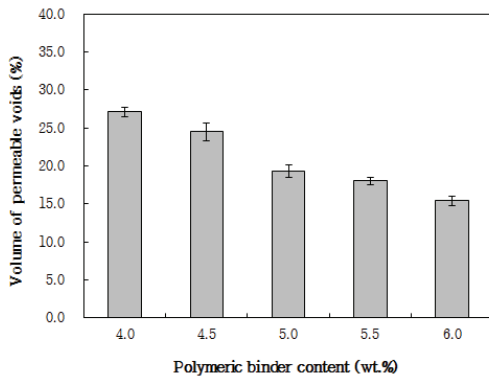


Fig. 6. Effects of polymeric binder content on volume of permeable voids

### 3.5 투수계수

투수계수 시험 결과는 Fig. 7과 같다. 이 결과에서 투수계수는 7.3~16.1mm/sec의 범위에 있는 것으로 나타났다.

선행연구를 살펴보면 Muthaiyan and Thirumalai(2017)은 투수성 시멘트 콘크리트의 경우 8.9~16.5mm/sec 투수성 플라이애시 시멘트 콘크리트는 3.5~10.9mm/sec 라고 하였다.

Chae(2002)는 최대치수 13mm인 부순골재와 폴리머 혼화제를 사용한 투수성 무세골재 콘크리트의 경우 투수계수는 0.92~1.05mm/sec이었다고 하였다.

그리고 Pio et al.(1988)은 부순잔골재(2.5~5mm)와 불포화 폴

리에스터 수지(5~7%)를 사용한 투수성 폴리머 콘크리트의 경우 투수계수는 2.2~4.4mm/sec이었다고 하였으며, Choi and Yu (2010)은 부순골재의 크기 2.5~5mm, 불포화 폴리에스터 수지 6~7wt.%를 사용한 투수성 폴리머 콘크리트의 경우 투수계수는 1.0~7.2mm/sec의 범위였다고 하였다.

Lee et al.(2019)은 결합재로 폴리우레탄 5%, 골재는 10mm 크기와 1.4~2.2mm의 비율을 변화시켜 혼합한 것을 사용한 투수성 폴리머 콘크리트의 경우 투수계수는 5~10mm/sec의 범위라고 보고하였다.

이러한 선행연구에서의 투수계수에 비하여 이 연구에서 얻어진 투수계수가 현저히 큰 값을 보였다. 이는 KS F 4419 에 규정된 투수성 블록의 투수계수 기준이 0.1mm/sec 이상이고, 한국콘크리트협회(SPC)의 단체표준 SPS-KCIC 0001-0703 에 규정된 투수계수 기준이 0.3mm/sec 이상인 것에 비하면 월등히 높음을 알 수 있다.

한편 연속공극률과 투수계수의 관계를 분석하여 본 바 Fig. 8

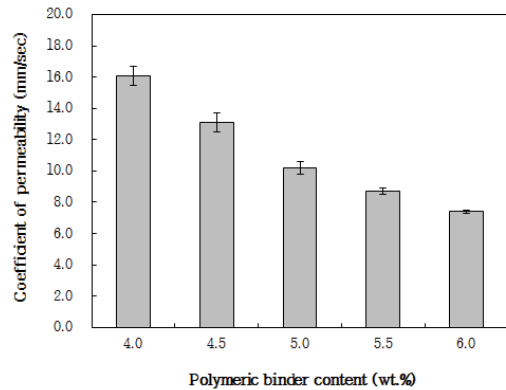


Fig. 7. Effects of polymeric binder content on coefficient of permeability

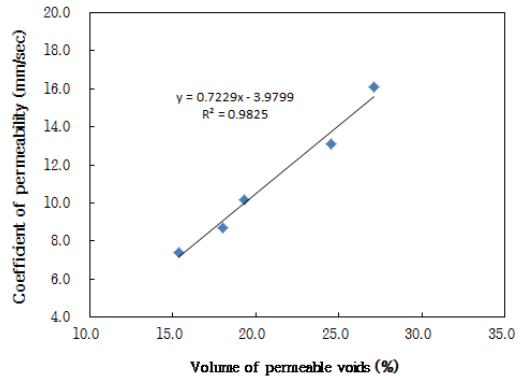


Fig. 8. Relation between coefficient of permeability and volume of permeable voids



과 같다. 이 결과에서 보면 연속공극률과 투수계수의 관계는 직선 관계이며,  $R^2=0.9825$ 로서 상관성이 높은 것으로 나타났다.

### 3.6 압축강도

압축강도 시험결과는 Fig. 9와 같다. 이 결과로부터 압축강도는 15.0~38.0MPa 범위에 있으며 결합재 함량이 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다.

선행연구의 결과를 보면, Macintosh et al.(1956)는 무세골재 콘크리트의 28일 압축강도는 밀도에 따라 1.5~14.0MPa 정도로 다양하다고 하였다.

그리고 Chae(2002)는 최대치수 13mm인 부순골재와 수용성 폴리머 혼화재를 사용한 투수성 무세골재 콘크리트의 경우 압축강도는 13.2~22.1MPa이라고 하였다.

또한 Pio et al.(1988)은 부순잔골재(2.5~5mm)와 불포화 폴리에스터 수지(5~7%)를 사용한 투수성 폴리머 콘크리트의 경우 압축강도는 25~27MPa이라고 하였고, Choi and Yu(2010)은 부순골재의 크기 2.5~5mm, 불포화 폴리에스터 수지 6~7wt.%를 사용한 투수성 폴리머 콘크리트의 경우 압축강도는 20.0~34.7MPa의 범위라고 하였으며, Lee et al.(2019)은 결합재로 폴리우레탄 5%, 골재는 10mm 크기와 1.4~2.2mm의 비율을 변화시켜 혼합한 것을 사용한 투수성 폴리머 콘크리트의 경우 압축강도는 7.8~9.9MPa의 범위라고 하였다.

이러한 선행연구들과는 재료의 구성 요소나 배합비 등이 다르긴 하지만 이 연구에서 구한 압축강도는 폴리머 결합재의 함량이 4~6wt.%에 불과함에도 선행연구에서 얻어진 압축강도에 비해 현저하게 높았다는 점이 특징적이라고 하겠다.

이러한 연구결과는 폴리머 결합재 함량이 4.0wt.%인 경우를 제외하고는 한국콘크리트협동조합연합회 단체표준 SPS-KCIC0001-0703에서 정하고 있는 압축강도 16.0MPa에 비해서도 월등히 높은 값이다.

한편 압축시험 후 시험체의 파괴양상은 Fig. 10과 같다. 폴리머 결합재 함량 5.0wt.% 부터 6.0wt.%의 경우 골재부분에서 파괴가 일어난 것으로 보아 높은 강도를 얻기 위해서는 폴리머 결합재의 함량을 5.0wt.%에서 6.0wt.%로 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

그리고 공극률과 압축강도의 관계를 분석한 결과 Fig. 11과 같다.

이 결과로부터 공극률과 압축강도는 지수적인 관계로서 공극률이 증가함에 따라 압축강도는 낮아지는 경향을 보였으며,

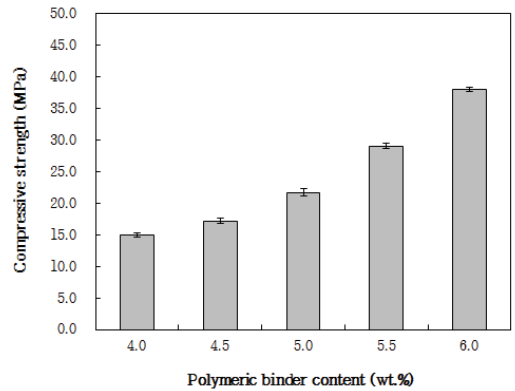


Fig. 9. Effects of polymeric binder content on compressive strength

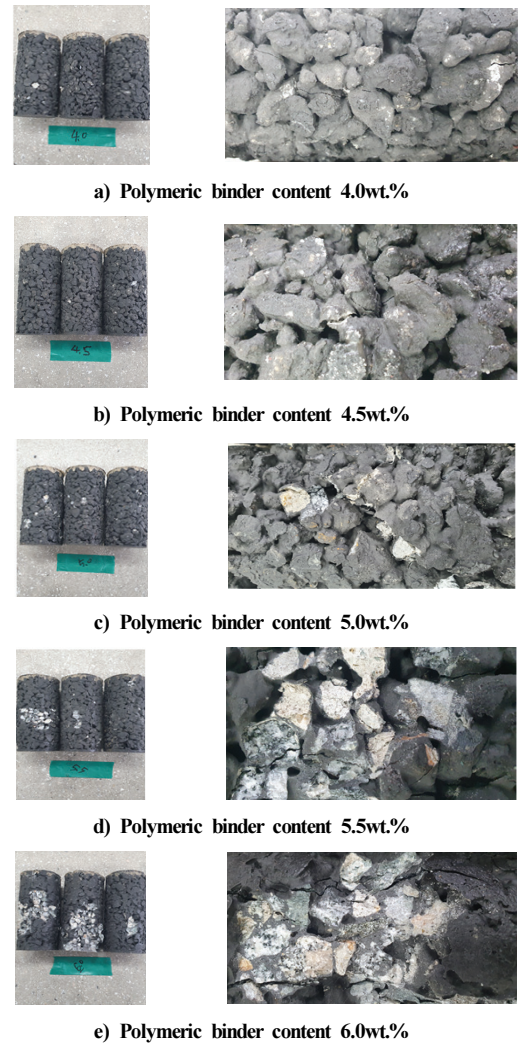


Fig. 10. Failure pattern by compression test with polymeric binder content

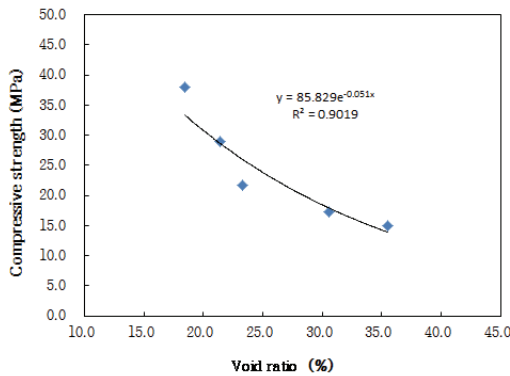


Fig. 11. Relation between compressive strength and void ratio

$R^2=0.9099$ 로서 상관성이 높음을 알 수 있다.

### 3.7 힘강도

힘강도 시험 결과는 Fig. 12와 같다. 이 결과에서 보면 힘강도는 5.3–10.0MPa의 범위로 나타났으며, 폴리머 결합재 함량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.

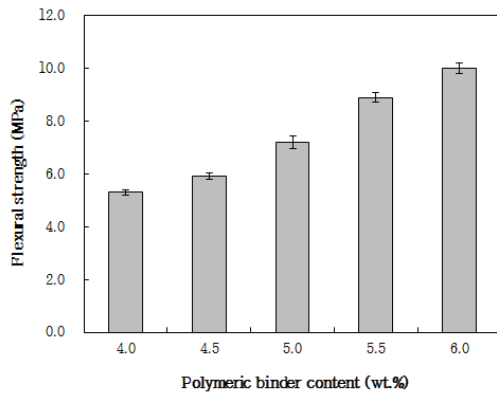


Fig. 12. Effects of polymeric binder content on flexural strength

선행 연구 결과를 보면 Mounika and Srinivas(2018)는 0.89–1.72MPa의 범위, Malik(2016)은 0.78–1.52MPa의 범위라고 하였다.

그리고 Chae(2002)는 최대치수 13mm인 부순골재와 수용성 폴리머 혼합재를 사용한 투수성 무세골재 콘크리트의 경우 힘강도는 3.6–5.4Mpa이었고, Pio et al.(1988)은 부순잔골재(2.5–5mm)와 불포화 폴리에스터 수지(5–7%)를 사용한 투수성 폴리머 콘크리트의 경우 힘강도는 8.7–9.4Mpa이었다고 하였으며, Choi

and Yu(2010)은 부순골재의 크기 2.5–5mm, 불포화 폴리에스터 수지 6–7wt.%를 사용한 투수성 폴리머 콘크리트의 경우 힘강도는 2.0–9.0MPa의 범위였다고 하였다.

이러한 선행연구에서의 힘강도에 비해 이 연구에서 얻어진 힘강도가 압축강도와 마찬가지로 현저히 높은 값을 보였다.

특히 KS F 4419에 규정된 투수성 블록의 힘강도 기준이 보도용은 4.0MPa 이상, 차도용은 5.0MPa 이상인 것에 비하면 폴리머 결합재 함량을 5.0–6.0wt.%로 하여도 월등히 높은 힘강도의 확보가 가능함을 알 수 있다.

### 3.8 동결융해 후 힘강도

동결융해 후 힘강도 시험 결과는 Fig. 13과 같다. 이 결과에서 동결융해 후 힘강도는 동결융해 전 힘강도의 94–98%의 수준으로서 5.0–9.8MPa의 범위에 있으며, 이는 우수 재활용품(GR) 제품표준 GR F 4007에 규정된 5.0MPa를 만족한다. 특히 폴리머 결합재 함량 5.0–6.0wt.%에서는 이 기준보다 월등히 높게 나타났다.

이는 폴리머 콘크리트의 경우 완전한 가까운 불투수성 미세구조(microstructure)로서 수분이나 물이 침투할 수 없기 때문에 동결융해 저항성이 우수한데 기인하는 것이다(Chandra and Ohama 1994).

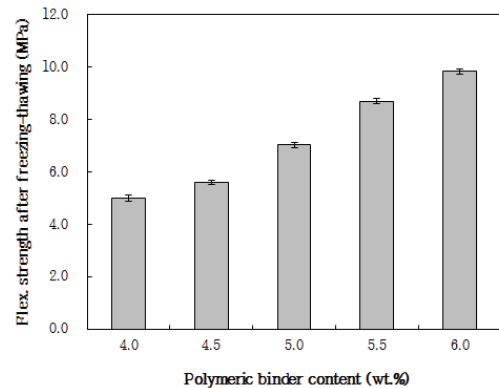


Fig. 13. Effects of polymeric binder content on flexural strength after freezing and thawing

### 3.9 내산성

내산성 시험 결과는 Fig. 14와 같다. 이 결과에서 내산성 시험에 의한 질량 감소율은 0.11–0.14%의 범위에 있으며, 시멘트 콘크리트에 비해서 매우 낮아 내산성이 우수함을 알 수 있다.



이는 폴리머 결합재가 시멘트에 비해 내화학성을 감소시키는 요소를 적게 가지고 있을 뿐만 아니라 불투수성 미세구조를 갖고 있기 때문이다. 특히 불포화 폴리에스터 수지는 내산성에 강한 화학적 특성을 가지고 있다(Chandra and Ohama 1994).

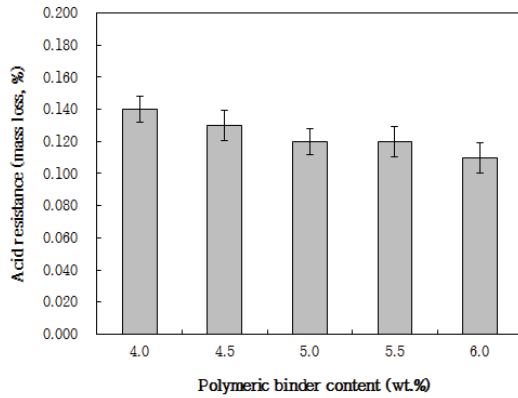


Fig. 14. Effects of polymeric binder content on acid resistance

#### 4. 결론

이 연구에서는 순환골은골재를 사용한 무세골재 폴리머 콘크리트의 성능 9가지에 대한 발현 특성을 실험적으로 구명하였으며, 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 밀도는 1798–1906kg/m<sup>3</sup>의 범위, 공극률은 18.4–35.3%의 범위, 연속공극률은 15.4–27.1%의 범위에 있으며, 이는 폴리머 결합재 함량이 증가할수록 증가하였다. 투수계수는 7.3–16.1mm/sec의 범위에 있으며 폴리머 결합재 함량이 증가함에 따라 작아지는 경향을 보였다.
2. 흡수율은 0.047–0.151%의 범위로서 무세골재 시멘트 콘크리트에 비해 훨씬 작고, 동결융해 후 휨강도는 5.0–9.8MPa의 범위로서 이 값은 우수 재활용품 (GR) 제품표준에 규정된 5.0MPa를 만족시키며, 폴리머 결합재 함량 5.0–6.0wt.%에서는 이 기준보다 현저히 높은 것으로 나타났다.
3. 압축강도는 15.0–38.0MPa 범위, 휨강도는 5.3–10.0MPa의 범위에 있으며, 폴리머 결합재의 함량이 4–6wt.%에 불과함에도 선행연구에서 얻어진 압축강도와 휨강도에 비하여 현저히 높게 나타났다. 이는 폴리머 결합재가 근본적으로 강도가 높은 데다가 가교제를 사용함으로써 결합재와 골재의 부착력이 증진되었기 때문이다. 그리고 파괴 양상을 볼 때 높은 강도를 얻기 위해서는 폴리머 결합재의 함량을 5.0–6.0wt.%로 하는 것

이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 내산성 시험 결과 질량 감소율은 0.11–0.14%의 범위에 있으며, 시멘트 콘크리트에 비해서 매우 우수한 내산성을 보였다.
5. 이상에서와 같은 결과들은 재료비 가운데 비중이 가장 큰 결합재의 함량만을 변수로 하여 연구한 것으로서, 앞으로 순환골재의 대체율, 충전재의 종류와 사용량, 섬유 등 보강재의 첨가량 등을 실험변수로 한 연구와 더불어 압축 및 휨하중에 의한 거동 특성, 경제성 분석 등에 대한 연구도 이루어져야 할 것이다.

#### Conflicts of interest

None.

#### References

Alam, M.A., Naz, S. (2015). Experimental study of the properties of no-fines concrete, *International Journal of Informative & Futuristic Research*, **2(10)**, 3687–3694.

Chae, C.U. (2002). Physical properties of porous concrete using admixtures, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **14(2)**, 257–265 [in Korean].

Chandra, S., Ohama, Y. (1994). *Polymers in Concrete*, CRC Press.

Chindaprasirt, P., Hatanaka, S., Mishima, N., Yuasa, Y., Chareerat, T. (2009). Effects of binder strength and aggregate size on the compressive strength and void ratio of porous concrete, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **16(6)**, 714–719.

Choi, J.J., Yu, H.J. (2010). Effects of filling materials on the physical properties of permeable polymer concrete, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, **30(2A)**, 177–184 [in Korean].

Engineering notes. No fines concrete: Properties and uses/Concrete technologe <https://www.engineeringenotes.com/concrete-technology/light-weight-concrete/no-fines-concrete-properties-and-uses-concrete-technology/31852>.

Ibrahim, A., Mahmoud, E., Yamin, M., Patibandla, V.C. (2014). Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties, *Construction and building materials*, **50**, 524–529.

Japan Concrete Institute. (1995). *Technical Committee Report on Eco-Concrete*.

Lee, S.H., Shim, J.W. (2010). Enactment provision of recycled

- aggregate concrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, **22(1)**, 33–35 [in Korean].
- Lee, Y., Marcaida, A.K., Ahn, J., Lee, T., Cha, M. (2019). Porosity, permeability, and compressive strength after freezing and thawing of permeable polymer concrete, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, **19(3)**, 203–208 [in Korean].
- Li, Z.R., Kim, Y.J. (2017). Analytic review of research trends on recycling of construction wastes: 1995–2016, The Journal of the Korea Contents Association, **17(1)**, 485–495 [in Korean].
- Macintosh, R.H., Bolton, J.D., Muir, C.H. (1956). No-Fines Concrete as a Structural Material, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, **5(6)**, 677–694.
- Malik, A. (2016). An experimental study on properties of no-fines concrete, Imperial Journal of Interdisciplinary Research(IJIR), **2(10)**, 2075–2079.
- Ministry of Environment, Korea Environment Corporation. (2020). The Current Status of Waste Generation and Disposal Nationwide in 2019 [in Korean].
- Moon, H. Y., Kim, S. S., & Jung, H. S. (1998). An experimental study of permeable concrete pavement for application, Magazine of the Korea Concrete Institute, **10(3)**, 165–173 [in Korean].
- Mounika, P., Srinivas, K. (2018). Mechanical properties of no-fines concrete for pathways, International Journal of Engineering and Techniques, **4(2)**, 68–81.
- Muthaiyan, U.M., Thirumalai, S. (2017). Studies on the properties of pervious fly ash-cement concrete as a pavement material, Cogent Engineering, **4(1)**, 1–17.
- Neville, A.M. (2011). Properties of Concrete, 5th Edition, Longman, England.
- Pio, Y.M., Jo, Y.K., Soh, Y.S. (1988). A study on the physical properties and permeability of permeable polymer concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **10(6)**, 213–222 [in Korean].
- Woo, G.S., Kim, J.H., Lee, S.H., Oh, J.K. (2020). A study on the quality properties when applying recycled aggregate concrete for the construction standard mitigation, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **24(3)**, 63–69 [in Korean].

### 결합재의 함량에 따른 순환굵은골재 사용 무세골재 폴리머 콘크리트의 성능 발현 특성

이 연구에서는 폴리머 결합재(불포화 폴리에스터 수지), 플라이 애시, 그리고 순환굵은골재(60%)와 부순굵은골재(40%)를 사용하여 폴리머 결합재 함량의 변화에 따른 무세골재 폴리머 콘크리트의 성질(9개항)에 대하여 연구하였다. 폴리머 결합재 함량(4.0–6.0wt.%)을 실험 변수로 한 이유는 비용측면에서 가장 큰 비중을 차지할 뿐만 아니라 각종 성능에 미치는 영향이 크기 때문이다. 연구결과 밀도, 압축강도, 휨강도, 동결융해 후 휨강도는 폴리머 결합재 함량이 증가함에 따라 증가하였고, 흡수율, 공극률, 연속공극률, 투수계수, 내산성(산에 의한 밀도 감소율)은 폴리머 결합재 함량이 증가함에 따라 감소하였다. 특히 폴리머 결합재 함량 6wt.%에서는 공극률이 18.4%, 투수계수가 7.3mm/sec 임에도 압축강도는 38.0MPa, 휨강도는 10.0MPa로서 기존의 연구결과들에 비해 월등히 높고, 흡수율, 내산성 등 다른 성질들도 우수한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 가교제의 첨가에 의해 높아진 결합재의 부착력과 폴리머 결합재가 가진 표면 소수성에 기인하는 것이라고 하겠다.