

2단계 배합방법이 순환잔골재 혼입 모르타르의 압축강도에 미치는 영향

Contribution of Two-Stage Mixing Approach on Compressive Strength of Mortar Made of Recycled Fine Aggregate

김유진¹ · 김규원¹ · 정철우^{2*}

Yu-Jin Kim¹ · Gyu-Won Kim¹ · Chul-Woo Chung^{2*}

(Received October 21, 2020 / Revised November 20, 2020 / Accepted November 23, 2020)

This work has been initiated to find possibility whether recycled fine aggregate can be used as a source of aggregate for structural concrete or not. Two-stage mixing approach was chosen in order to maximize strength potential from recycled fine aggregate. Moisture content of the recycled fine aggregate was changed, and two different types of two-stage mixing approaches were applied to produce cement mortar. The strength of mortar made of 100% recycled fine aggregate by two-stage mixing approaches was compared to that of mortar made of 100% washed sea sand. According to the results, the effect of moisture content on compressive strength was observed from low water cement mortar(W/C 0.3). In case of W/C 0.5 cement mortar, no clear relationship was observed between moisture content and strength development. It was found that two-stage mixing approach has a potential to increase the strength of mortar made of 100% recycled fine aggregate. In case of modified version of two-stage mixing approach which first prepares cement paste and pours recycled fine aggregate into the cement paste, was more effective to increase the strength of mortar made of 100% recycled fine aggregate.

키워드 : 2단계 배합방법, 순환잔골재, 함수율, 압축강도

Keywords : Two-stage mixing approach, Recycled fine aggregate, Moisture content, Compressive strength

1. 서론

국내에서 건설된 대부분의 건축물은 철근콘크리트(Reinforced Concrete; 이하 RC) 구조로 이루어져 있다. 콘크리트 재료는 다량의 골재 수급을 요구하는 산업으로, 오랜기간 동안의 콘크리트 활용으로 인해, 현재 골재 수급의 문제를 초래한 상황이며, 한국건설자원협회에서는 향후 20년 이내 천연골재 고갈사태가 발생하리라 예상하고 있다(Ahn 2018). 따라서 현재의 골재 수급 문제를 해결할 수 있는 대체 자원의 개발이 시급한 상황이다.

현재 국내에는 순환골재 및 순환골재 재활용제품을 의무적으로 사용하여야 하는 순환골재 의무사용공사가 지정되어 있다(Sim et al. 2006). 국가적으로 전체 발생폐기물의 50%를 차지하는 건설폐

기물의 재활용을 위하여 2003년 “건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률”이 제정되었고 동법시행령 제 4조에서는 순환골재 등의 재활용 용도를 정의(Kwon 2006)하여 순환골재 재활용 촉진을 도모하고 있다. 2005년 건설교통부에서 “순환골재 품질관리기준”을 제정·고시(Kim 2019)하여 기타를 포함한 14개의 용도별 순환골재 품질기준을 제시하여 각 용도별로 사용하고자 하는 경우 품질기준의 적합여부를 반드시 확인한 뒤 사용하도록 권장하고 있다.

이러한 정부의 노력에도 불구하고, 현재 순환골재는 다양한 용도로 활용되지 못하고 주된 사용 용도는 도로용 및 택지기반 조성 등 제한적으로 사용되고 있는 실정이다. 이는 순환골재를 콘크리트에 활용시 발생하는 강도저하의 문제와 관련성이 있다. 현재 순환골재의 강도가 충분히 안전한지에 관한 규정이 제대로 확립되

* Corresponding author E-mail: cwchung@pknu.ac.kr

¹부경대학교 건축공학과 학사과정 (Department of Architectural Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea)

²부경대학교 건축·소방공학부 부교수 (Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea)

어있지 않은 상황이며, 도로의 보조 기층용 또는 아스팔트 콘크리트 포장용일 경우 골재 소요량의 40%이상 사용해야 한다고 명시되어 있을 뿐이다(Kim 2019).

순환골재를 보다 적극적으로 재활용하기 위해서는 구조용 콘크리트의 골재로 사용될 수 있도록 학계의 동의 및 제도적 허용이 필요하다. 순환골재 혼입 콘크리트의 경우, 실제 구조용 콘크리트로 활용되어 건물의 건설에 활용된 경우는 한국건설기술연구원에서 주관한 고속도로 확장설 건설 프로젝트 이외에는 찾아보기 힘들며, 이는 순환골재에 대한 현재의 학계 및 업계의 부정적인 시각을 보여주는 사례로 볼 수 있다. 그러나 현재 구조용으로 사용되는 천연골재의 30%를 순환골재로 대체한다면 건설공사의 골재공급 비용은 약 15% 절감이 예상된다(Park 2008). 순환골재의 사용은 좁은 범위에서 건설공사의 예산 절감이라는 장점을 가지며 더 나아가 국가이익과 사회경제적으로 40배 이상의 이익을 발생시키는 효과를 가질 것으로 예측된다(KICT 2002) 세계적으로 환경에 대한 지속적인 관심이 요구되는 상황에서 건축폐기물을 최소화시키는 것 또한 필수불가결한 상황이므로, 폐기물 처리로 인한 환경적인 부담을 크게 줄일 수 있다(Sung 2001). 따라서 이러한 시대적 요구를 반영하여, 건설시장 및 골재수급 시장에 적극적으로 대응할 수 있도록 순환골재의 재활용 기술을 확보할 필요성이 존재한다.

순환골재는 폐콘크리트를 분쇄하여 생산되며, 생산과정에서 파쇄·마모의 공정을 거치기 때문에 상당한 충격을 받아 자체적으로 다량의 미세균열을 함유하고 있다. 또한 골재 표면에 시멘트 페이스트 성분을 함유하고 있어 다공성을 가진다. 이로 인한 높은 흡수율로 순환골재를 혼입한 콘크리트 배합은 작업성에서 문제를 가지게 된다. 순환골재는 콘크리트 구조재료용으로 사용하기에는 단점이 매우 많으므로 이를 개선하기 위한 연구가 과거부터 현재까지도 끊임없이 지속 중에 있으며, 관련 논문들도 셀 수 없이 많이 존재한다. 국내에서 발표된 다수의 논문에서는 이러한 구모르터를 제거할 방법으로 순환골재 표면의 구 모르타르를 마쇄방식을 이용하여 물리적으로 깎아내거나 산성용액을 사용하여 구모르터와의 중화반응을 일으켜 화학적인 방법으로 구모르터를 제거하는 방법 등이 소개되었다(Kim et al. 2008).

현재 순환골재 생산공정의 발달로 인하여, 순환골재의 경우 상당히 물성이 개선된 골재를 생산할 수 있는 수준까지 도달한 것으로 알려져 있다(Kim et al. 2007). 일반적으로 천연골재를 순환골재로 전량 대체하면 최대 30% 정도 수준의 강도감소가 발생하는 것으로 알려져 있으며(Folino and Xargay 2014; McNeil and Kang 2013), 보다 최근의 연구결과에 따르면 55MPa급 이상

의 콘크리트에 순환골재를 활용하는 경우 약 10% 수준의 강도 감소를 보이는 것으로 나타났다(Knaack and Kurama 2014; Tahar et al. 2017; Xie and Ozbakkaloglu 2016).

그러나 순환골재의 경우 여전히 다량의 공극 및 미세균열을 가지는 시멘트 페이스트 성분의 함유량이 높아, 콘크리트 구조재료용 골재로서의 재활용이 거의 되지 않고 있다. 순환골재의 활용과 관련된 연구문헌은 대부분 천연골재와의 혼합사용에 대한 효과에 관한 내용이거나, 굵은 골재를 포함한 콘크리트의 제조와 관계된 연구문헌이며(Tam et al. 2005; Tam et al. 2006; Tam and Tam 2007; Tam et al. 2007), 순환골재만을 전량 활용하여 시멘트 모르타르를 제조하고, 순환골재가 강도에 미치는 영향을 직접적으로 평가한 연구문헌은 거의 없는 것으로 조사되었다. 몇몇 연구문헌에서 산처리, 세밀화된 순환골재 마모공정, 고온 소성후 처리공정, 표면 코팅공정, 중성화처리 등 다양한 방법을 활용하여 순환골재로부터 시멘트 페이스트의 성분을 최대한 제거하여, 순환골재의 물성을 개선하고자 하는 노력이 있었으나, 이러한 방법들은 비용의 상승을 동반하며, 폐기물의 발생 등 기타 환경문제까지 발생시키기 때문에, 실제 현장에서의 재활용이 극히 제한되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 이러한 부분의 경제적·환경적 부담을 줄이기 위하여 Vivian W. Y. Tam의 연구그룹(Tam et al. 2005; Tam et al. 2006; Tam and Tam 2007; Tam et al. 2007)에서 제안한 도입한 2단계 배합방법(Two-Stage Mixing Approach)을 이용하고 이를 개선시켜, 순환골재 내부의 균열의 치유를 유도하고 이를 통해 순환골재 혼입 시멘트 모르타르의 강도를 상승시키고자 한다.

2. 2단계 배합방법(Two-stage mixing approach)

일반적인 시멘트 모르타르 혹은 콘크리트의 배합에서는 시멘트, 굵은 골재, 잔골재를 섞어 건비빔을 진행한 후, 물을 넣어 반죽을 마무리한다. 그러나 순환골재와 같이 흡수율이 높은 재료를 사용하는 경우, 표건상태의 조절이 어려워, 이의 조절을 실패하는 경우 배합수의 일부가 공극 내부로 스며들어가 작업성의 문제를 초래하는 경우가 많다.

홍콩의 Vivian W. Y. Tam의 연구그룹이 고안한 2단계 배합방법(Tam et al. 2005; Tam et al. 2006; Tam and Tam 2007; Tam et al. 2007) 방식은 순환골재가 가지는 흡수성을 활용하여 고안된 방식으로, 잔골재 및 굵은골재를 넣고 건비빔 후, 배합수의 반만

혼합하여 1단계 배합을 진행하고, 시멘트를 넣고 짧은 배합을 진행한 후 나머지 반의 배합수를 넣어 2단계 배합을 마무리하는 방식이다. 1단계 배합 이후 상대적으로 수분이 많이 존재하는 순환골재 주변으로 시멘트 입자가 붙도록 유도하고, 골재 주변에 위치한 시멘트 입자에 의한 수화반응으로, 순환골재 내부의 균열을 치유하는 방식으로, 순환골재를 사용한 콘크리트의 강도 증진을 확인했다(Tam et al, 2005; Tam et al, 2006; Tam and Tam 2007; Tam et al, 2007).

Vivian W. Y. Tam의 연구그룹에서는 TSMA 방식을 사용해 콘크리트를 만들었을 시 28일 양생 조건하에서 순환골재의 20%에 대해 강도의 개선이 최대 21.19%까지 달성 가능하다고 보고하였다(Tam et al, 2005; Tam et al, 2006; Tam and Tam 2007; Tam et al, 2007). 순환골재의 치환율이 높아질수록 콘크리트의 압축강도는 저하되지만, TSMA 방식을 사용함으로써 압축강도의 개선이 가능함을 확인했다(Tam and Tam 2007). 이후 기존의 TSMA 방식에 추가적인 두 가지 실험을 진행했는데 그 중 변형된 이단 배합 방식을 사용한 실험에서 시멘트와 물을 60초간 사전 혼합하는 절차를 추가하여 TSMA 방식으로 진행했을 시 명확한 강도 향상을 기록했다(Tam et al, 2006).

Vivian W. Y. Tam 등에 의한 연구의 우수성은, 단순한 배합과정의 조절을 통해(이단 배합 방법 사용), 순환골재가 가지는 한계를 극복하고자 한 점이지만(Tam et al, 2007), 이들의 연구는 순환골재에만 집중되었고 현재 재활용이 시급한 순환골재에 대한 부분은 언급되어 있지 않다. 또한, 순환골재의 함수상태가 물의 흡수율 및 작업성을 결정할 수 있는 매우 중요한 요소이며, 시멘트 입자와의 물리적 접촉을 높일 수 있는 중요한 변수임에도 불구하고, 순환골재의 함수상태의 차이에 의해 2단계 배합의 효율성을 판단한 연구결과는 없는 것으로 조사되었다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

본 연구에서는 Vivian W. Y. Tam의 연구그룹에서 순환골재에 적용한 2단계 배합방법이 순환골재를 100% 사용한 모르타르의 강도 향상에도 적용될 수 있을 것으로 판단하여 실험계획을 수립하였다. 순환골재의 함수상태가 2단계 배합방법으로 제작된 모르타르 시험체의 강도에 미치는 영향을 확인하기 위해, 순환골재의 함수상태를 0%, 50%, 및 100%로 조절한 후, 2단계 배합 방법을 이용하여 순환골재 혼입 시멘트 모르타르를 제작하였고,

시험체의 28일 재령 압축강도를 확인하여 최종 결론을 도출하고자 하였다.

3.2 실험재료

순환골재 혼입 시멘트 모르타르의 제조에 활용된 시멘트는 KS L 5201 규준을 따르는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트이며 화학적 조성은 Table 1과 같다. 순환골재는 순환골재 생산 인증을 받은 국내 H의 제품으로, 겉보기 밀도는 각각 2.22g/cm³이며, 흡수율은 약 8.35%로 측정되었다. 대조군 모르타르의 제작은 세척사 잔골재를 이용하여 제작되었으며, 이의 겉보기 밀도는 각각 2.60g/cm³이며, 흡수율은 약 2%로 측정되었다.

Table 1. Chemical compositions of type I ordinary portland cement (%)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃
63.42	19.48	4.69	4.08	3.11	3.04
K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	ZnO	-
1.32	0.38	0.20	0.13	0.11	-

3.3 2단계 배합과정

2단계 배합방식을 통하여 제작한 모르타르와 강도 비교를 위하여 먼저 세척사로 모르타르를 제작하였다. 세척사 모르타르의 경우 일반적인 모르타르의 배합방식(Normal Mixing Approach)인 ASTM C 305의 배합방법에 준하여 제작하였다. Table 2는 각 실험의 배합표로 물·시멘트비는 0.3 및 0.5, 함수상태는 절건(이하 OD), 골재의 함수량 50%(이하 반건상태; HD), 및 골재의 함수량 100%인 표건(이하 SSD)으로 설정을 하여 실험을 진행하였다. 물 시멘트비가 0.3인 모르타르 시험체의 제작에는 충분한 작업성의 확보를 위해 국내 H사의 고성능 감수제가 시멘트 중량대비 2% 사용되었다. 그리고 대조군 시험체를 제외한 모든 배합에서 순환골재의 치환율을 100%로 하였다. 이는 천연골재의 혼합 사용으로 인한 실험결과 해석의 오류를 피하기 위함이다.

순환골재는 105°C 오븐에서 2일간 건조된 순환골재(OD), 절건상태에서 흡수율의 절반에 해당되는 물을 분사시켜 젖은 상태로 만든 순환골재(HD), 및 표건상태의 골재(SSD)를 각각 준비하여 사용하였다. 건조한 골재에 의해 흡수되는 수량을 미리 계산하여, 배합수에 추가하고, 이를 통해 모르타르 시험체의 물시멘트비 차이가 발생하지 않도록 제어하였다.

기존의 Tam et al.(2007)이 제안한 2단계 배합방식을 TSMA,

Table 2. Mix proportions of mortar specimens

	Specimen	Cement	Water	Standard sand	Recycled fine aggregate	Silica fume
		(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
NMA	30 OD	225	67.5	675	0	0
	30 HD					
	30 SSD					
	50 OD		112.5			
	50 HD					
	50 SSD					
T SMA	30 OD	225	67.5	0	675	0
	30 HD					
	30 SSD					
	50 OD		112.5			
	50 HD					
	50 SSD					
T S M A p	30 OD	225	67.5	0	675	0
	30 HD					
	30 SSD					
	50 OD		112.5			
	50 HD					
	50 SSD					
T S M A P (sf)	30 OD	216	67.5	0	675	9
	30 HD					
	30 SSD					

변형된 2단계 배합 방식을 T S M A p라 Table 2에 명시하였다. T S M A p는 시멘트 페이스트를 먼저 제조한 후, 순환잔골재를 이후에 투입하는 배합으로, 순환잔골재가 수분을 흡수할 때 시멘트 입자가 함께 균열 및 공극쪽으로 이동할 수 있도록 유도하여, 균열의 치유를 도모하는 방식이다. 또한 변형된 2단계 배합 방식을 사용하고 실리카폼을 첨가한 것을 T S M A p(SF)이라고 명시하였다. T S M A p(SF) 시리즈의 시험체는 상대적으로 고강도를 발현하기 위한 배합으로, 물 시멘트 비 0.3인 경우에 한해 제작하였다. 이때, 실리카폼을 혼입한 시멘트 페이스트의 충분한 작업성 확보를 위하여, 유동화제를 시멘트 중량대비 4% 첨가하였다.

3.3.1 기존 2단계 배합과정

먼저, 순환잔골재를 믹서(Kitchen Aid, USA)에 넣고 60초간 건비빔 후, 사용하는 배합수(배합수 + 순환잔골재의 SSD를 맞추기 위한 추가수량)의 절반을 넣어 60초 동안 배합을 진행하였다(1단계). 이후에 시멘트를 넣어 30초간 혼합한 후 남은 배합수를 투입

한 후 120초 간 배합을 하여 2단계 배합을 마무리하였다.

3.3.2 변형된 2단계 배합과정

먼저, 시멘트 전량과 배합수의 절반을 믹서에 넣고 60초간 배합을 진행하여 시멘트 페이스트를 먼저 만든 후(1단계), 순환잔골재와 남은 절반의 배합수를 추가하여 120초간 혼합하여 2단계 배합을 마무리하였다. 실리카폼을 혼입한 배합의 경우 시멘트 투입시 실리카폼을 함께 투입한 후, 같은 방법으로 변형된 2단계 배합과정을 진행하였다. 실리카폼은 시멘트량의 1.34% 치환되어 배합에 투입되었다.

3.4 압축강도

2단계 배합방식을 통하여 제작한 모르타르는 크기 50mm × 50mm × 50mm 큐브 몰드에 타설되었다. 타설이 완료된 후, 몰드의 윗면을 플라스틱 시트로 덮어 수분의 증발을 억제한 후, 하루동안 실험실에 방치하였고, 경화가 완료된 후 탈형된 모르타르 시험체를 23±2°C의 포화수산화칼슘 수용액에 침지시켜 28일재령이 될 때 까지 양생을 진행하였다.

압축강도 측정은 재령 28일에 ASTM C 109 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50mm] Cube Specimens)”규정에 따라 실시하였다. 압축강도의 측정은 전통식 압축강도 시험기(S1 industry Co., Korea, S1-1471D)를 사용하여 진행되었다.

4. 실험결과

4.1 물시멘트비 0.5

2단계 배합방법으로 제조된 물시멘트비 0.5의 순환잔골재 혼입 모르타르 시험체의 28일 강도는 Fig. 10에 나타나 있다. Fig. 10에 따르면, 표준사를 이용하여 일반적 배합방법으로 제조된 대조군 시험체(NMA)의 경우, 잔골재가 절건상태였을 경우 압축강도는 28.62MPa, 반건상태였을 경우 27.67MPa, 표건상태였을 경우 27.12MPa로 나타나, 골재의 함수율이 커질수록 모르타르의 압축강도가 다소 감소하는 것으로 나타났다. 기존의 2단계 배합방법으로 제조된 순환잔골재 100% 시멘트 모르타르(TSMA)의 경우, 절건상태일 때 23.70MPa, 반건상태일 때, 21.68MPa, 표건상태일 때 22.76MPa를 보여, 순환잔골재의 함수상태의 변화에 따른 강도변화를 명확하게 관찰할 수 없었다. 반면 변형된 2단계 배합방법을 활용한 경우, 절건상태일 때 23.84MPa, 반건상태일 때, 27.04

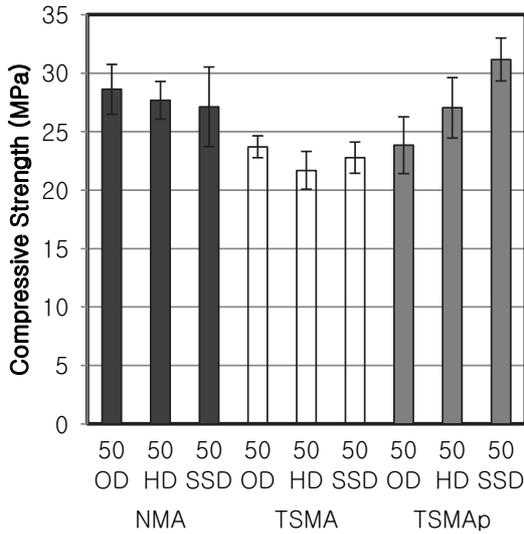


Fig. 1. The 28 day compressive strength of W/C 0.5 mortar depending on moisture content of recycled fine aggregates

MPa, 표건상태일 때 31.16MPa로 골재의 함수율이 커질수록 압축 강도가 상승하는 결과를 얻었다.

본 연구의 결과에 따르면, 기존 2단계 배합방법(TSMa)을 사용하여 제작된 모르타르의 경우(전체 평균강도 22.71MPa) 세척사로 배합된 보통 모르타르시험체(전체 평균강도 27.80MPa)에 비해 18.30%의 강도가 감소하는 것으로 나타났다. Ju et al.(2019)의 연구에 따르면, 천연골재 100%를 순환잔골재로 대체하고 천연굵은 골재를 사용한 30MPa급 보통강도 콘크리트의 강도는 보통강도 콘크리트의 경우 30% 정도 강도하락을 보이는 것으로 나타났으며, 60MPa급 고강도 콘크리트의 경우 10% 수준의 강도감소가 발생하는 것으로 나타났는데, 이는 골재량의 약 60% 정도를 차지하는 굵은골재가 천연굵은골재인 경우 얻어진 결론으로, 본 연구와 같이 골재 전체가 순환잔골재로 구성된 모르타르의 경우 강도감소 폭은 Ju et al.(2019)의 연구결과에 비해 더욱 크게 나타날 수도 있다는 점을 고려하면, 2단계 배합을 활용하는 것이 순환잔골재 혼입 모르타르의 강도발현에 도움이 되는 것으로 판단할 수 있다.

변형된 2단계 배합과정(TSMaP)을 사용한 경우, 모르타르가 100% 순환잔골재로 제조되었음에도 불구하고, 반건상태이거나 표건상태인 경우 표준사를 혼입하여 일반 배합방법으로 제조된 모르타르와 거의 유사하거나, 다소 높은 강도발현특성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 변형된 2단계 배합과정을 활용하여 제조된 모르타르의 28일 평균강도는 27.35MPa로 세척사를 혼입하여 제조한 콘크리트의 압축강도 평균인 27.80MPa와 거의 유사한 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 단위수량이 많은 물시

멘트비 0.5 모르타르의 경우, 페이스트를 먼저 준비한 후 순환잔골재를 2차로 투입하는 변형된 2단계 배합과정이 기존의 2단계 배합 과정에 비해 더욱 효율적일 수 있음을 의미한다.

4.2 물시멘트비 0.3

2단계 배합방법으로 제조된 물시멘트비 0.3의 순환잔골재 혼입 모르타르 시험체의 28일 강도는 Fig. 2에 나타나 있다. Fig. 2에 따르면, 표준사를 이용하여 일반적 배합방법으로 제조된 대조군 시험체의 경우, 잔골재가 절건상태였을 경우 압축강도는 39.31 MPa, 반건상태였을 경우 39.12MPa, 표건상태였을 경우 39.16 MPa로 나타났다.

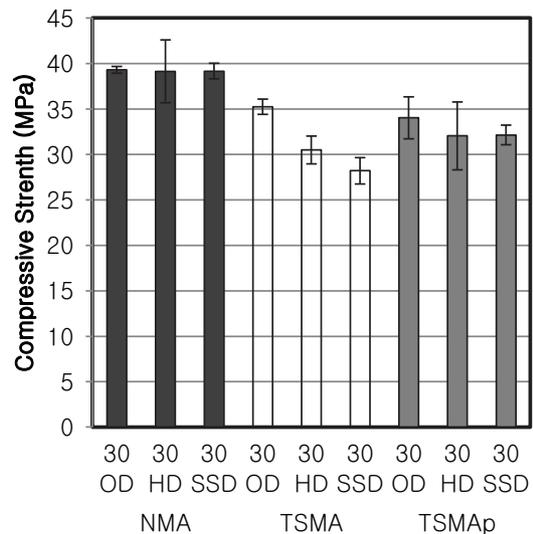


Fig. 2. The 28 day compressive strength of W/C 0.3 mortar depending on moisture content of recycled fine aggregates

기존의 2단계 배합방법으로 제조된 순환잔골재 100% 시멘트 모르타르의 경우(TSMa), 절건상태일 때 35.24MPa, 반건상태일 때, 30.48MPa, 표건상태일 때 28.20MPa로, 절건상태인 경우만 상대적으로 높은 압축강도값을 보였으며, 반건상태 및 표건상태에서는 상대적으로 낮은 압축강도값을 보였다. 변형된 2단계 배합방법을 활용한 경우(TSMaP), 절건상태일 때 34.02MPa, 반건상태일 때, 32.04MPa, 표건상태일 때 32.12MPa로 절건상태일 경우에 반건상태거나 표건상태의 골재를 사용한 경우에 비해 다소 높은 압축강도 값을 보였다. 전반적으로 물시멘트비 0.3인 경우 건조한 상태의 골재를 사용하는 것이 강도발현 측면에서 유리한 것으로 나타났다.

세척사 혼입 모르타르(평균압축강도 39,20MPa) 대비 기존의 2단계 배합방법을 적용한 순환잔골재 혼입 모르타르(TSMA)의 평균압축강도(31,31MPa) 차이는 20,12%로 나타났으며, 변형된 2단계 배합방법을 적용한 경우(TSMAp), 평균압축강도의 차이는 16,50%인 것을 확인하였다. 이는 물시멘트비가 감소하여도, 변형된 2단계 배합방법을 활용하는 것이 순환잔골재 혼입 모르타르의 강도발현에 유리하다는 것을 의미한다.

물시멘트비 0,5의 경우와 마찬가지로, 물시멘트비 0,3인 경우, 세척사 혼입 모르타르에 비해 순환잔골재 100%를 혼입한 모르타르의 강도 감소폭이 유사하게 나타나(물시멘트비 0,5인 순환잔골재 혼입 모르타르의 강도감소비율 18,30%; 물시멘트비 0,3인 TSMA 및 TSMAp 시험체의 강도감소비율은 각각 20,12% 및 16,50%) 2단계 배합방법이 순환잔골재를 활용한 시멘트 모르타르의 강도증진에 기여하는 것으로 판단되었다. 그러나 본 연구에서 얻은 순환잔골재 혼입 모르타르의 28일 압축강도는 최대 32,73 MPa로 기존 문헌에서 제시한(Knaack and Kurama 2014; Tahar et al. 2017; Xie and Ozbakkaloglu 2016, Ju et al. 2019) 55MPa급 이상의 강도수준을 만족하지 못하여, 순환잔골재 혼입 모르타르의 강도감소율을 10% 수준 이하로 끌어올리지 못한 것으로 보인다.

4.3 실리카폼 혼입

변형된 2단계 배합방법으로 제조된 물시멘트비 0,3의 순환잔골재 혼입 모르타르 시험체의 28일 재령 압축강도 데이터는 Fig. 3에 나타나있다. 변형된 2단계 배합방법에 실리카폼을 활용한 이유는 상대적으로 입자 크기가 작은 실리카폼이 순환잔골재의 균열면에 접하도록 유도하여, 균열 치유효과를 보다 더 활성화시켜 강도발현율을 더욱 상승시킬 수 있는지 판단하기 위함이었다.

Fig. 3의 결과에 따르면 변형된 2단계 배합방법에 실리카폼을 활용하면, 절건상태의 경우 36,40MPa, 반건상태의 경우 36,30 MPa, 표건상태의 경우 33,60MPa의 압축강도를 보여, 실리카폼을 활용하지 않은 경우에 34,01MPa(절건), 32,04MPa(반건), 32,12 MPa(표건) 강도를 향상시키는 것으로 나타났다. 평균강도값은 실리카폼을 혼입한 순환잔골재 혼입 모르타르가 35,43MPa로, 실리카폼을 혼입하지 않은 순환잔골재 혼입 모르타르의 강도인 32,73 MPa에 비해 8,25% 상승한 것으로 나타났다.

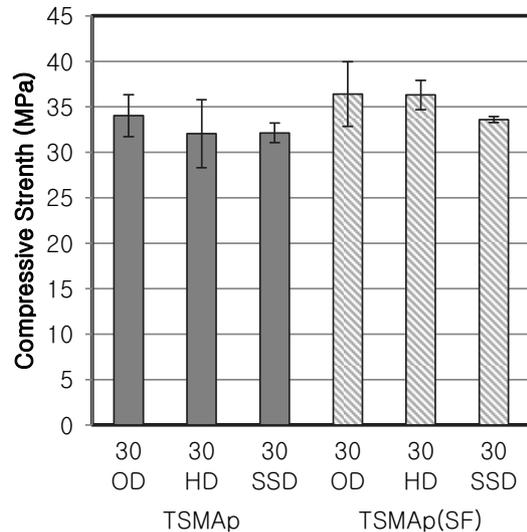


Fig. 3. Comparison between compressive strength of W/C 0.3 mortars mixed using modified two stage mixing approach with and without 4% silica fume

5. 고 찰

본 연구에서는 골재의 함수상태를 조절하고 모르타르 배합과정을 단계별로 분리·진행하여, 이를 통해 모르타르 내부 순환골재의 치유를 유도해 순환골재 혼입 모르타르의 강도를 일반 골재를 활용한 모르타르의 강도에 버금가는 수준까지 상승시키는 것을 목표로 하였다. 함수상태를 조절한 이유는 순환잔골재가 가지는 다공성에 기인한 높은 표면장력이 물을 흡수할 때 시멘트 페이스트 입자를 순환잔골재의 균열면에 침투시키거나, 계면에 더욱 효율적으로 부착시킬 수 있을 것으로 판단하였기 때문이다.

이러한 관점으로 판단하게 되면, 물시멘트비와 관계없이 흡수를 유도하는 힘이 가장 강력한 절건상태의 골재를 활용할 때 강도 상승률이 가장 높아야 하는데, 실험결과는 이에 대한 명확한 경향을 드러내지 않았다. 물시멘트비가 높은 경우(W/C 0.5) 골재의 함수상태 변화에 의한 경향성을 확인하기 어려웠으며, 물시멘트비가 낮은 경우에는(W/C 0.3) 골재의 함수상태에 의한 영향이 나타나는 것으로 관찰되었으나, 함수량이 증가할수록 감소하는 강도의 폭이 매우 적은 것으로 나타났다.

배합시 시멘트 페이스트 성분에 의한 순환잔골재의 치유를 위해서는 순환잔골재에 붙어있는 시멘트 페이스트 내부에 존재하는 균열 및 공극에 새 시멘트 페이스트가 효과적으로 침투하여야 한다. 이를 위해서는 결합재 자체의 입도 분포 또한 매우 중요하며, 유변학적 물성 또한 매우 중요하다. 새 시멘트 페이스트의 입도분

포, 점도 및 항복응력 특성변화에 따른 순환잔골재 혼입 모르타르의 강도변화에 대한 추후 연구가 필요할 것으로 사료된다.

6. 결론

본 논문에서는 순환잔골재의 함수상태의 변화가 2단계 배합 및 변형된 2단계 배합을 활용한 시멘트 혼입 모르타르의 압축강도에 미치는 영향을 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 2단계 배합방법을 활용한 순환잔골재를 100% 활용한 모르타르의 압축강도는 세척사 100%인 모르타르 큐브의 압축강도에 비해 약 20% 감소된 강도 특성을 보였다. 이는 기존 문헌에서 제시한 순환잔골재 혼입시 발생하는 강도감소를 30% 수준에 비해 낮은 값으로, 2단계 배합방법이 순환잔골재 혼입 모르타르의 강도증진에 기여할 수 있음을 의미한다.
- 2) 물시멘트비 0.5에서 변형된 2단계 배합을 사용하였을 때, 압축강도가 세척사 100%로 제조된 모르타르에 거의 근접하는 것으로 나타났다.
- 3) 기존의 2단계 배합방법에 비해 시멘트 페이스트를 먼저 배합한 후, 순환잔골재를 투입한 변형된 형태의 2단계 배합방법이 순환잔골재 혼입 모르타르의 강도발현에 더욱 효율적인 것으로 나타났다.
- 4) 골재의 함수상태에 의한 영향은 물시멘트비가 낮은 경우에 발현되는 것으로 조사되었다. 강도는 절건상태의 골재를 사용한 경우가 가장 높게 나타났으며, 반건상태, 절건상태의 순으로 감소하였는데, 함수율 차이에 의한 강도감소폭은 적은 편이었다.
- 5) 변형된 2단계 배합방법에 4%의 실리카폼을 치환하여 배합한 경우 약 8% 수준의 강도상승이 발생하였다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20CTAP-C151965-02). 실험의 진행에 도움을 준 임태완 연구원에 감사함.

References

- Ahn, B.H. (2018). Performance and Field Application of Rural and Fishing Village Road Concrete Pavement using Air Cooled Blast Furnace Slag Aggregates, Ph.D Thesis, Gongju University, 145 [in Korean].
- American Society for Testing and Materials C 109. (2020), Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50mm] Cube Specimens), West Conshohocken: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials C 305. (2020), Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency West Conshohocken: ASTM International.
- Folino, P., Xargay, H. (2014). Recycled aggregate concrete – Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression, *Construction and Building Materials*, **56**, 21–31.
- Ju, M., Park, K., Park, W. J. (2019). Mechanical behavior of recycled fine aggregate concrete with high slump property in normal- and high-strength, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **13**, 61.
- Kim, G.H., Lee, D.J., Cho, H.C., Ahn, J.H. (2007). Development of recycled aggregate producing circuit using autogenous mill, *The Korean Institute of Resources Recycling*, **16(5)**, 25–30 [in Korean].
- Kim, J.H. (2019). A Study on the Quality Improvement Methods of Recycled Fine Aggregate for Manufacturing of High Quality Recycled Aggregate Concrete, Graduate School of Architecture, Ph.D Thesis, Konkuk University [in Korean].
- Kim, J.M., Kim, H.S., Park, S.G., Kim, B.J., Kwak, E.G. (2008). Optimum abrading condition for recycled fine aggregate produced by low speed wet abraser using sulfur, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **20(5)**, 557–563 [in Korean].
- Knaack, A.M., Kurama, Y.C. (2014). Behavior of reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates, *Journal of Structural Engineering*, **141(3)**, B4014009.
- Korea Institute of Construction Technology (2002). Policy and Technology Development for Promotion of Recycling of Construction Waste, Korea Institute of Construction Technology [in Korean].
- Kwon, G.C. (2006). Major amendments to the act on the promotion of recycling of construction wastes, enforcement decree, and enforcement rules, *Journal of Korean Recycled Construction*

- Resources Institute, **4(1)**, 1975–5201 [in Korean].
- McNeil, K., Kang, T.H.K. (2013). Recycled concrete aggregates: A review, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **7(1)**, 61–69.
- Park, J.H. (2008). Study on the Practical Recycling Strategy of Construction Wastes, Diploma Dissertation, Master’s Thesis, Chung–Ang University [in Korean].
- Sim, H.S., Park, C.W., Park, S.J., Kim, G.J., Kim, H.J., Kim, T.G., Lim, C.H. (2006). Development of Recycling & Practical Using for Value Added Resourcing of the Recycled Aggregate Obtained from Waste–Concrete, The Final Report of Hanyang University’s Industrial–Academic Cooperation Group [in Korean].
- Sung, H.S. (2001). Disposal Difficulty and the Improved Measures of Intermediary Selective Processing on Constructional Waste, Master’s Thesis, Keimyung University [in Korean].
- Tahar, Z.E.A., Ngo, T.T., Kadri, E.H., Bouvet, A., Debieb, F., Aggoun, S. (2017). Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete, *Construction and Building Materials*, **149**, 91–102.
- Tam, V.W.Y., Gao, X.F., Tam, C.M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two–stage mixing approach, *Cement and Concrete Research*, **35(6)**, 1195–1203.
- Tam, V.W.Y., Gao, X.F., Tam, C.M. (2006). Comparing performance of modified two–stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete, *Magazine of Concrete Research*, **58(7)**, 477–484.
- Tam, V.W.Y., Tam, C.M. (2007). Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two–stage mixing approach, *Journal of Materials Science*, **42(10)**, 3592–3602.
- Tam, V.W.Y., Tam, C.M., Wang, Y. (2007). Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using tow–stage mixing approach, *Construction and Building Materials*, **21(10)**, 1928–1939.
- Xie, T., Ozbakkaloglu, T. (2016). Behavior of recycled aggregate concrete–filled basalt and carbon FRP tubes, *Construction and Building Materials*, **105**, 132–143.

2단계 배합방법이 순환잔골재 혼입 모르타르의 압축강도에 미치는 영향

본 연구는 순환잔골재의 사용 촉진을 위한 궁극의 해결방안 중 하나인 구조용 콘크리트의 골재로 사용될 수 있는 가능성을 확인하기 위하여 진행되었다. 순환잔골재의 함수상태 변화에 따라, 2단계 배합방법 및 변형된 형태의 2단계 배합방법을 적용한 모르타르의 강도가 세척사로 제조된 일반배합 모르타르의 강도에 근접하는지를 확인하여, 2단계 배합의 활용성을 증명하고자 하였다. 본 연구의 결과에 따르면, 골재의 함수상태에 의한 영향은 물시멘트비 0.3인 경우에만 발현되었고, 물시멘트비 0.5인 경우에는 명확한 경향을 찾을 수 없었으나, 2단계 배합방법이 순환잔골재 혼입 모르타르의 강도증진에 기여할 수 있는 가능성은 확인하였다. 또한 기존의 2단계 배합방법에 비해 시멘트 페이스트를 먼저 배합한 후, 순환잔골재를 투입한 변형된 형태의 2단계 배합방법을 활용하는 것이 순환잔골재 혼입 모르타르의 강도발현에 더욱 효과적인 것으로 나타났다.