

사용수명이 종료된 태양광 패널에서 분리된 강화유리가 모르타르의 역학적 특성에 미치는 영향

최소영¹, 김상우², 김일순¹, 양은익^{3*}

Effect of Extracted Tempered Glass from End-of-Life Solar Panels on Mechanical Properties of Mortar

So Yeong Choi¹, Sang Woo Kim², Il Sun Kim¹, Eun Ik Yang^{3*}

Abstract: As the installation of solar panel accelerates, so does the number of solar panels reaching their end-of-life (EOL). However, the EOL solar panels is becoming a concern, as they contain potentially hazardous materials and are not easily recycled. Coping strategies such as effective collection, disposal, and recycling methods will be important to manage the growing number of EOL solar panels in the coming years. Therefore, many studies have focused on the development of EOL solar panel recycling technology. One recycling technology for EOL solar panels applicable to the construction field is the application of extracted tempered glass from EOL solar panels as construction materials. This study summarized the EOL solar panel disassembly technology and evaluated the mechanical properties of mortar using extracted tempered glass as fine aggregate. The results showed that when tempered glass was used as a fine aggregate in mortar, the compressive strength, flexural strength, and macro pores in the 1-3 μm with 200-300 μm range were affected, regardless of the disassembly technology of EOL solar panels. Especially, we found that the mechanical performance of mortar using chemically treated tempered glass was noticeably decreased due to changes in the chemical composition of the extracted tempered glass resulting from the removal of K₂O and CuO due to chemical reactions. Meanwhile, it was found that when fly ash was used as a binder, the reduction of mechanical performance could be alleviated.

Keywords: End-of-life solar panel, Mechanical properties, Pore distribution, Solar panel disassembly technology, Tempered glass

1. 서론

화석연료의 고갈로 인한 자원확보 경쟁 및 고유가의 지속 등으로 인해 에너지 공급방식의 다양화가 필요해지면서 우리나라는 태양광 발전 시설을 주거용에서부터 상업용에 이르기 까지 적극적으로 활용하고 있다. 그러나, 2000년대 초반에 보급된 1세대 태양광 패널(c-Si, 실리콘 결정질)의 예상 사용 수명의 종료 시점이 도래함에 따라 태양광 폐패널의 발생이 예상된다(Corcelli et al., 2018; Domínguez and Geyer, 2017). 그러므로 대량 발생이 예상되는 시점에서 적용할 수 있는 사용 수명이 종료된 태양광 패널의 관리 및 재자원화 기술 확보를 통해 무분별한 매립량 감소와 재활용 원천기술 확보를 위한

체계 구축이 요구된다. 우리나라와 달리 이미 EU, 미국 및 일본 등 선진국에서는 태양광 패널의 재활용을 위한 관리 체계를 구축하고자 재활용 방안에 관한 제도를 수립하고 이를 운영하고 있으며(Mo and Kim, 2020), 우리나라도 2023년부터 생산자책임재활용제도(EPR)의 도입으로 수거되고 있는 태양광 패널의 적절한 재활용 방안 마련이 시급한 상황이다.

한편, 태양광 패널의 제작방식에 따라 약간의 차이는 있으나, Fig. 1에 나타난 바와 같이 일반적으로 태양광 패널은 샌드위치와 유사한 구조를 가지며 태양광 패널을 보호할 수 있도록

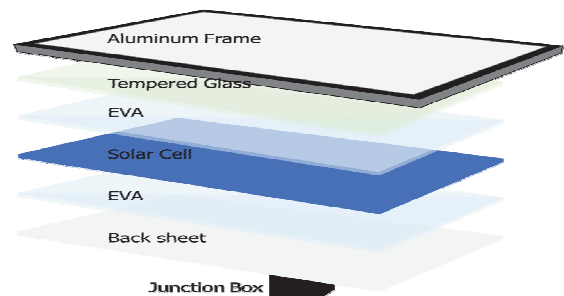


Fig. 1 Structural composition of solar panels

¹정회원, 강릉원주대학교 방재연구소 연구교수

²정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 겸임교수

³정회원, 강릉원주대학교, 건설환경공학과 정교수

*Corresponding author: eiyang@gwnu.ac.kr

Department of Civil and Environmental Eng., Gangneung-Wonju National University, Gangneung, 25457, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

알루미늄 프레임으로 외부를 감싸고 있다. 또한, 태양광 패널은 셀의 종류에 따라 약간의 차이가 있지만 1세대 태양광 패널인 c-Si 태양광 패널은 알루미늄 프레임, 강화유리, 셀, 백시트 및 정선박스와 강화유리와 셀, 셀과 백시트를 접착하는 EVA로 구성되어 있다. 특히, 태양광 셀은 접착력이 매우 우수한 EVA를 사용하여 강화유리로 보호되기 때문에 사용수명이 종료된 태양광 패널을 재활용하기 위해서는 모든 구성품을 일체로 분리 추출하는 과정이 선행되어야 한다(Wang et al., 2020).

따라서 본 연구에서는 태양광 패널로부터 강화유리를 분리하는 기술에 따라 분리된 강화유리를 분류하고, 분류된 강화유리를 콘크리트용 건설재료로의 적용 가능성을 검토하기 위하여 강화유리 분리 기술에 따른 강화유리의 기초물성 평가와 강화유리의 종류를 변수로 하여 제작한 모르타르의 역학적 특성을 평가하였다.

2. 사용수명이 종료된 태양광 패널의 강화유리 분리 기술

태양광 패널의 구성 요소 분리 기술은 강화유리를 분리하는 기술, 태양광 셀과 같이 유가 금속을 함유하여 금속을 회수하는 기술로 크게 두 가지로 구분될 수 있으며, 그중 강화유리를 분리하는 방법 또한 크게 세 가지 측면으로 접근할 수 있다.

본 논문에서는 사용수명이 종료된 태양광 패널의 분리 기술은 크게 3가지로 구분하고 그 방법을 다음과 같이 소개하고자 한다.

2.1 열처리 방법

열처리에 의한 분리 기술은 강화유리 분리 기술 개발이 시작되면서 적용된 기술로 고주파 가열방식, 할로겐램프를 이용한 방식, 열분해 방식 등으로 열을 태양광 패널에 직접 적용하는 방식이다.

고주파 가열방식은 태양광 패널에 손상된 강화유리를 쉽게 분리할 수 있는 기술인 반면 강화유리의 전량 회수가 쉽지 않고 구성품의 회수율이 불분명하다(Doni and Fabrizio, 2012). 따라서, 이를 개선하여 제안된 할로겐램프 방법은 두 가지 공정으로 나뉘어 진행되며, 1단계에서는 백시트에 부착된 EVA에 열을 가하여 연화시킨 후, 2단계에서는 가열 조건(온도 및 시간)을 변화시켜 EVA를 전량 연소하는 기술이다. 그러나 이 방법은 가열 온도와 시간, 열효율 및 작업자의 기술 능력도에 의해 분리 효율의 격차가 발생한다(Riech et al., 2021).

열분해 방법은 태양광 패널 전체를 가열하여 EVA와 백시트를 높은 온도에서 연소시켜 태양광 패널에 있는 모든 폴리머를 제거하는 방식이다. 다만 1단계 연화 과정을 거치지 않고 유리만 직접적으로 회수할 경우, 강화유리는 약 80% 수준

만 회수할 수 있고, 연소 과정에서 백시트는 불소화 부산물인 유해 물질을 생성하므로 이에 대한 주의가 필요하다.

이러한 내용을 종합하면, 열처리 방법은 열을 발생시키는 에너지 소비와 환경오염을 유발할 가능성이 있어 이를 개선할 수 있는 기술 개발이 필요한 실정이다(Choi and Kim, 2017; Fiandra et al., 2019(a); Frisson et al., 2020; Wang et al., 2019).

2.2 기계적 처리 방법

기계적 처리 방법은 열분해 방법 중에서 백시트로 인한 유해 물질 생성을 억제하고자 백시트를 물리적으로 제거하는 과정에서 도입된 방법으로, 분쇄 및 파쇄법, 고전압 펄스 법 및 핫나이프(Hot knife) 방법이 있다(Fiandra et al., 2019(a); Fiandra et al., 2019(b); Riech et al., 2021; Wang et al., 2019).

분쇄 및 파쇄 기술은 태양광 패널의 다양한 구성인자를 고려하지 않고 정선박스, 알루미늄 프레임만을 제거한 후 태양광 패널을 단순 분쇄(파쇄)하는 방법으로 모터 크러셔 혹은 해머크러셔의 효율에 따라 유리의 회수율이 결정된다. 이 기술은 다른 처리 방법과 비교하여 단순한 공정이므로 처리비용이 저렴한 장점이 있다. 그러나 구성 요소를 재분류하는 열처리 방법 또는 화학적 처리 방법 등의 추가공정이 수반되거나, 셀에 포함된 유가 금속 회수 또한 어려운 단점이 있다(Azeumo et al., 2019; Dias et al., 2018; Granata et al., 2014; Pagnanelli et al., 2017).

고전압 펄스 기법은 고순도 금속의 높은 회수율을 보이며 전압과 방출 시간을 달리한다면, 사용자가 원하는 금속을 추출할 수 있는 장점이 있으나, 비 금속은 회수될 수 없는 단점이 있다(Bluhm et al., 2000; Nevala et al., 2019).

한편, 적외선 온열 방법과 주파수를 이용하는 방법을 발전시켜 개발된 핫나이프 방법은 셀과 강화유리의 접착제인 EVA를 절단하도록 나이프에 전류(열)를 통과시키고 이 열을 이용하여 셀과 강화유리를 분리, 추출하는 기술이다. 이 기술은 강화유리의 본질을 유지하면서 추가적인 손상 없이 강화유리를 회수할 수 있으며, 기존 기계적 처리 방법들과 비교하여 친환경적이고 추가적인 공정이 요구되지 않기 때문에 신속한 작업이 가능한 장점이 있다(Latunussa et al., 2016).

2.3 화학적 처리 방법

화학적 처리 방법은 사용수명이 종료된 태양광 패널 전체를 유·무기용매에 일정 시간 침지한 후 가열하여 태양광 패널의 강화유리를 분리하는 기술로 이 과정에서 EVA의 용해가 진행된다. EVA의 용해 과정에서 발생하는 팽창압과 EVA의 경화는 태양광 셀의 손상을 유발하므로 셀이 손상되어 강화유리만을 수거하여 강화유리를 재사용하고자 하는 경우이거나, 파손된 강화유리만 제거하고 손상된 셀에서 유가 금속만

회수하고자 할 경우, 적용하기에 적합한 방법이다. 따라서 이러한 한계점을 개선하고자 셀이 손상되지 않은 태양광 패널에서도 적용할 수 있도록 셀의 손상을 최소화할 수 있는 용매의 종류와 농도, 침지 시간 및 가열 시간을 변수로 하여 태양광 패널의 강화유리 분리의 최적 조건을 도출하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다(Bruton, 1994; Lovato et al., 2021; Tembo et al., 2021; Yan et al., 2020).

3. 실험 계획 및 분석

3.1 사용재료 및 실험 변수

3.1.1 강화유리

본 연구에서 사용된 강화유리는 태양광 패널에 적용되지 않은 건전한 강화유리(이하 TG), 사용수명이 종료된 태양광 패널에서 기계적 처리 방법을 통해 분리된 강화유리(이하, MG) 및 화학적 처리 방법을 통해 분리된 강화유리(이하, CG)를 Jaw crusher를 이용하여 분쇄 후, 잔골재로 적용하였으며, 본 논문에서 사용된 강화유리의 형상은 Fig. 2에 나타내었다.

3.1.2 잔골재

본 연구에서 사용된 잔골재는 하천에서 채취한 잔골재로, 밀도는 2.6 g/cm^3 이며, 조립률은 2.79인 것을 사용하였다.

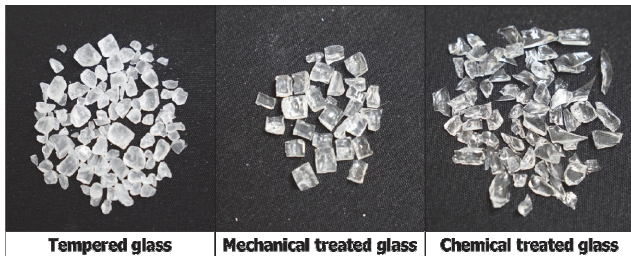


Fig. 2 Appearance of glass

Table 1 Physical and chemical properties of the binders

Properties		Type	OPC	FA
Physical	Specific gravity		3.15	2.19
	Blaine (cm ² /g)		3,200	3,840
Chemical (%)	SiO ₂		21.36	51.74
	Al ₂ O ₃		5.03	21.47
	Fe ₂ O ₃		3.31	3.16
	CaO		63.18	1.10
	MgO		2.89	-
	SO ₃		2.30	-
	LOI		1.40	2.56

3.1.3 결합제

모르타르 제작에 사용된 시멘트는 국내 H사에서 생산된 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였다. 또한, 유리 골재를 사용할 경우, 알칼리-골재 반응에 의한 팽창이 발생할 것이 예상되어 S사에서 제작된 2종 플라이애시를 사용 시멘트량의 20%를 치환한 경우를 추가하여 평가하였다. 본 연구에서 사용된 결합제의 구성 성분은 Table 1과 같다.

3.2 실험 변수

본 연구에 사용된 실험 변수는 사용수명이 종료된 태양광 패널의 강화유리 분리 방법에 따라 분류된 강화유리의 종류와 결합제로 결정하였다. 이때, 동일한 조건에서 분쇄를 실시함에도 불구하고 강화유리 처리 방법에 따라 입도가 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 잔골재의 입도에 따른 영향을 최소화하기 위하여 천연 잔골재와 동일한 조립률을 갖도록 모든 강화유리의 입도를 천연 잔골재와 동일하게 구성하여 모르타르의 잔골재로 적용하였다.

모르타르 시험체 제작에 사용된 배합은 ASTM C 109-21M에 제안된 S/C는 2.75, W/B는 48%로 제작하였다. Table 2에는 모르타르의 역학적 특성 평가에 사용된 실험 변수에 관한 내용을 나타내었다.

3.3 실험 방법

3.3.1 압축강도 및 휨강도

본 연구에서 압축 및 휨강도 측정에 사용한 시험체의 크기는 $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ 이며, 모든 시험체는 종류별로 3개씩 제작하였다. 휨강도 측정에 사용된 실험 규격은 ASTM C 348-16이고, 압축강도는 ASTM C 349-18에 따라 휨강도를 측정 후의 시험체인 6개의 평균값을 사용하였다.

압축강도 및 휨강도의 측정은 탈형 후 시험체를 온도 $20 \pm$

Table 2 Experimental variables

Item	Contents
Type of Tempered Glass	New Tempered Glass (i.e., TG)
	Tempered Glass with Mechanical treatment technology(i.e., MG)
	Tempered Glass with Chemical treatment technology (i.e., CG)
Tempered glass Replacement Ratio	0%, 100% (By weight)
W/B Ratio	48%
S/C	2.75
Mineral Admixture	OPC100, FA20+OPC80
Curing Condition	Standard water curing

1°C에서 수증양생을 실시한 후, 재령 7일, 28일 및 91일에 실시하였다.

3.3.2 공극 구조

수화 반응 후 경화된 모르타르는 다양한 크기의 공극이 존재하고 이러한 공극은 사용재료에 의한 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 10~1000 μm의 범위를 갖는 공극은 리니어 트레이버스법을 자동화한 측정법을 이용하여 정성적으로 산출하였으며, 5 nm~100 μm의 범위를 갖는 공극은 수은 압입법으로 평가하였다. 한편, 시험체는 재령 28일과 재령 91일 수증양생한 시험체를 사용하였으며, 재령 7일의 경우, 충분한 수화 반응이 진행되지 않아 수은 압입에 의한 공극 분포를 다소 크게 평가할 가능성이 있어 이를 제외하고 측정하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 강화유리의 기초물성 평가

4.1.1 강화유리의 구성 성분

Table 3에는 처리 방법에 따른 강화유리를 잔골재로 적용하기 위하여 X-선 형광 분석법(XRF)을 통해 분석한 결과를 강화유리 종류에 따라 나타내었다.

Table 3에 나타낸 바와 같이, 처리 방법과 관계없이 모든 강화유리는 SiO₂ 및 CaO가 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 그러나, K₂O와 CuO는 일반유리를 강화하는 방법으로 유

Table 3 Chemical composition of solar panel glass

Properties	Type	TG	MG	CG
Concentration (%)	SiO ₂	70.28	72.56	73.35
	CaO	23.92	20.13	20.07
	Na ₂ O	1.94	2.75	2.75
	Al ₂ O ₃	0.97	1.09	0.93
	Fe ₂ O ₃	0.10	0.46	0.31
	MgO	1.10	1.62	1.43
	SO ₃	0.34	0.27	0.34
	SbO ₃	1.21	0.70	0.50
	K ₂ O	0.04	0.05	-
	CuO	0.01	0.01	-
	ZnO	-	0.12	0.08
	Cl	-	0.06	0.08
	MnO	-	0.04	0.02
	Cr ₂ O ₃	-	0.04	0.03
	TiO ₂	-	0.06	0.08
	etc	0.09	0.04	0.03

리표면의 화학 처리하는 방법인 이온교환법 중 칼륨 사용으로 존재하는 화합물이다. 즉, 기계적 처리를 통해 사용수명이 종료된 태양광 패널에서 분리된 강화유리(MG)는 건전한 강화유리(TG)와 마찬가지로 일반유리에 비해 화학 강화된 상태가 유지됐지만, 화학적 처리로 분리된 강화유리(CG)의 경우에는 화학 처리에 사용된 용매로 인하여 화학반응 후 K₂O와 CuO가 소산되어 강화유리에서 일반 유리로 성질이 변화한 것으로 나타났다. 한편, ZnO, Cl, MnO, Cr₂O₃는 접착제인 EVA를 제조할 때 사용되는 화합물로 태양광 패널을 제작할 때 사용되는 EVA로 인해 존재하는 것으로 사료된다. 또한, TiO₂는 반도체 물질이나 셀을 코팅할 때 사용되는 화학 약품에 의한 것으로 태양광 패널에 적용된 것에 기인한 것으로 판단된다.

4.1.2 강화유리 처리기술에 따른 강화유리 입도 분포

사용수명이 종료된 태양광 패널에서 분리한 강화유리와 건전한 강화유리를 잔골재로 사용하기 전에 Jaw crusher로 분쇄한 직후 측정된 입도 분포 곡선과 조립률을 Fig. 3과 Table 4에 각각 나타내었다. 그 결과, MG의 경우를 제외하고 모두 ASTM C136-19에 따른 최적 입도 분포 범위를 만족하며, 일반적인 잔골재의 조립률 범위인 2.3~3.1에 포함되므로 분쇄 직후 잔골재로 추가적인 공정 없이 바로 적용할 수 있는 것으로 판단된다. 그러나, MG의 경우, 1.5 및 2.5 mm의 입경을 갖는 유리가 다른 경우보다 많은 것으로 나타났으며, 이는 EVA를 강화유리에서 제거하더라도 일부 잔존하는 EVA로 인해

Table 4 Fineness modulus of sand and glass

Type of Fine aggregate	Natural sand	TG	MG	CG
Fineness Modulus	2.79	3.04	3.40	4.03

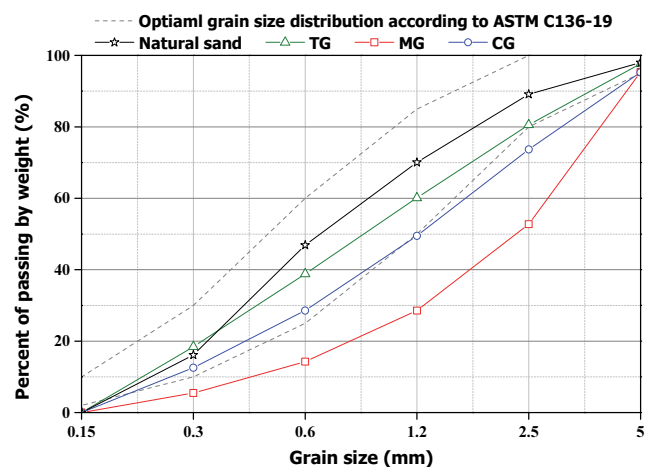


Fig. 3 Grain-size distribution curve

직경 1.5~2.5 mm를 갖는 강화유리의 비율이 높게 나타난 것으로 사료된다. 따라서 MG를 잔골재로 적용하여 입도에 의한 모르타르의 성능 저하를 방지하기 위해서는 입도 조절 공정이 수반되어야 할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 강화유리 종류와 관계없이 모두 천연 잔골재와 동일한 입도를 갖도록 조절하여 모르타르 제작에 사용하였다.

4.2 강화유리 혼입 모르타르의 유동성 평가 결과

Fig. 4에는 강화유리 처리 방법에 따른 모르타르의 플로우 측정값을 나타내었다. 그 결과, 강화유리의 종류와 관계없이 모두 천연 잔골재에 비하여 플로우가 감소하였으며, 특히 CG의 경우가 급격하게 감소하였다. 이러한 이유는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 CG의 입형이 TG나 MG에 비하여 날카롭고 각진 형상과 높은 중횡비가 모르타르의 흐름을 방해한 것에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 플라이애시를 혼입한 경우, 전반적으로 낮은 흐름값을 갖는 경향이 나타났다. 이는 시멘트에 비해 높은 분말도를 갖는 플라이애시에 영향을 받아 점성이 증가하여 모르타르 흐름을 저해한 것에 기인한 것으로 판단된다.

4.3 강화유리 혼입 모르타르의 강도 특성

4.3.1 압축강도 측정 결과

강화유리 혼입에 따른 모르타르의 압축강도는 재령 7, 28 및 91일에서의 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 그 결과, 강화유리를 잔골재로 사용할 경우, 강화유리의 분리 방법 및 플라이애시 혼입과 관계없이 모든 배합에서 일반 모르타르의 경우보다 압축강도가 감소하는 것으로 나타났다.

OPC만을 결합재로 사용한 경우를 살펴보면 (Fig. 5(a)), 천연 잔골재를 사용한 모르타르 대비 TG와 MG를 사용한 모르타르의 압축강도의 감소율은 12.6~22.7%, 20~27.2%로 유사

한 수준이나, CG의 경우는 27.1~37.4%로 가장 큰 압축강도 감소율이 나타났다.

한편, 유리를 잔골재로 적용할 경우, 천연 잔골재의 표면보다 매끄러운 표면 특성으로 인해 시멘트 수화물과의 부착성이 저하되어 천연 잔골재를 사용할 경우보다 강도가 감소하는 것이 보고된 바 있다(Choi et al., 2015; Kim et al., 2018; Choi et al., 2019). 따라서 본 연구 결과에서 발생한 강화유리 대체에 의한 강도 감소 역시 위와 동일한 이유로 인해 강도가 감소한 것으로 판단된다. 또한, CG의 경우에는 화학적 처리로 인해 유리 자체의 강도가 감소하므로 TG 및 MG 사용에 비해 높은 강도 감소율을 보이는 것으로 사료된다.

한편, 플라이애시를 혼입한 경우, OPC의 경우와 마찬가지로 TG의 경우, 일반 모르타르 대비 강도 감소율은 8~23.9%이며, MG 및 CG의 경우는 각각 20.6~27.2%, 24.4~34.7%로 나타났다. 강화유리의 처리 방법과 관계없이 모두 OPC를 사용한 경우보다 강도 감소율이 감소하였으며 특히, 재령 91일에서의 압축강도 감소는 개선되었다. 이는 플라이애시 사용에 의한 포졸란 반응이 장기강도 개선에 기여한 것으로 판단된다. 그러므로 플라이애시를 적절하게 혼입할 경우, 강화유리 사용에 의한 강도 감소를 완화할 수 있을 것으로 사료된다.

4.3.2 휨강도 측정 결과

Fig. 6에는 재령 증가에 따른 강화유리를 혼입한 모르타르의 휨강도 측정 결과를 나타내었다. OPC의 경우(Fig. 6(a))를 살펴보면, TG 및 MG의 경우, 천연 잔골재를 사용한 모르타르에 비해 각각 21.2~31.4%, 27.7~32.1%만큼 감소하는 것으로 나타났으나, CG의 경우, 34.8~41.8%까지 감소하였다. 이러한 경향은 압축강도 측정 결과와 유사하였으며, 또한, 플라이애시를 혼입한 경우(Fig. 6(b)), TG를 사용하면 11.4~26.8%, MG 및 CG의 경우는 각각 10~26.2%, 16.4~31.9%의 휨강도

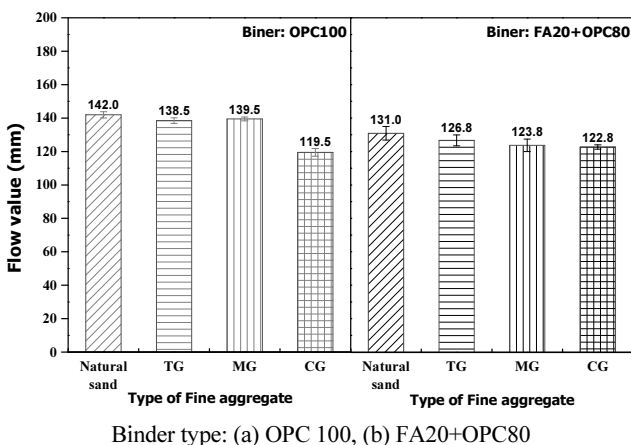


Fig. 4 Results of flow test

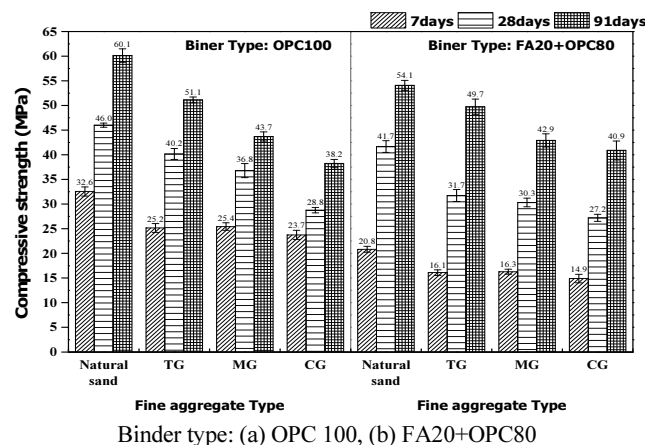


Fig. 5 Results of compressive strength test

감소가 나타났다. 이러한 휨강도 감소는 압축강도와 동일한 원인에 기인한 것으로 판단되며, 태양광 패널에 적용되었던 MG에 의한 강도 감소는 TG와 유사한 수준으로 나타났다.

4.4 공극 분포

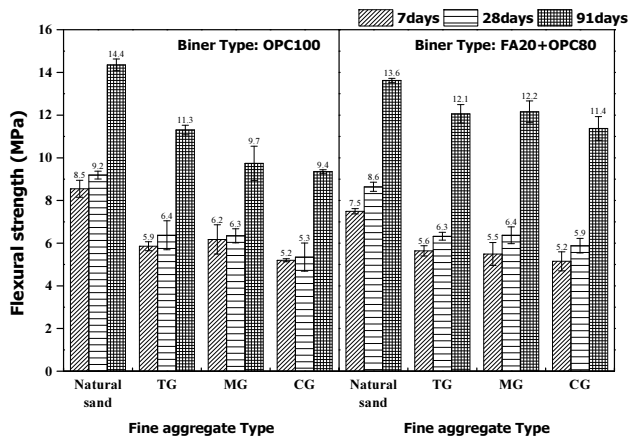
4.4.1 거시 공극 분포

강화유리를 혼입한 모르타르의 10 μm 이상의 공극 분포를 화상분석법을 이용하여 평가하였으며, 강화유리의 처리 방법과 재령 변화에 따라 Fig. 7에 나타내었다. 이때, 그래프의 X축은 공극의 크기를, Y축은 전체 공극량에 대한 각 공극 크기의 비율을 의미한다.

우선, 강화유리 혼입 및 결합재 사용과 관계없이 모두 100~200 μm 영역에서의 공극들이 가장 많이 분포하는 것으로 나타났으며, 공극 분포 형태는 잔골재 종류에 따라 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다.

한편, 결합재로 OPC만을 사용한 경우(Fig. 7(a)), 강화유리 처리 방법과 관계없이 강화유리를 혼합할 경우, 천연 잔골재보다 100~200 μm 영역의 공극 비율이 작은 것으로 나타났다. 이 영역의 공극 비율 감소는 큰 공극의 증가로 이어져 강화유리 혼입에 의한 모르타르의 성능 저하를 의미한다. 또한, 재령이 증가함에 따라 200~300 μm 영역의 공극이 감소하고 100~200 μm 영역의 공극이 증가하였으며, 공극 크기의 감소는 모르타르의 강도 개선에 기여한 것으로 판단된다.

플라이애시를 결합재로 사용한 경우(Fig. 7(b)), 공극 분포와 재령 변화에 따른 공극 크기 개선은 OPC를 사용한 경우와 유사한 경향이 나타났다. 그러나, OPC 경우와 달리, TG와 MG는 200 μm 이상의 공극의 비율이 천연 잔골재를 혼입한 모르타르와 유사한 것으로 나타나므로, TG와 MG를 사용할 때, 플라이애시와 혼용한다면 천연 잔골재를 사용한 모르타르와 유사한 공극 분포를 확보할 수 있는 것으로 판단된다.



Binder type: (a) OPC 100, (b) FA20+OPC80

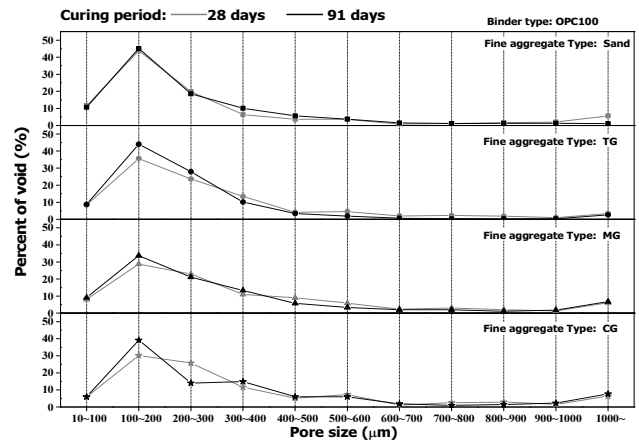
Fig. 6 Results of flexural strength test

4.4.2 미세 공극 분포

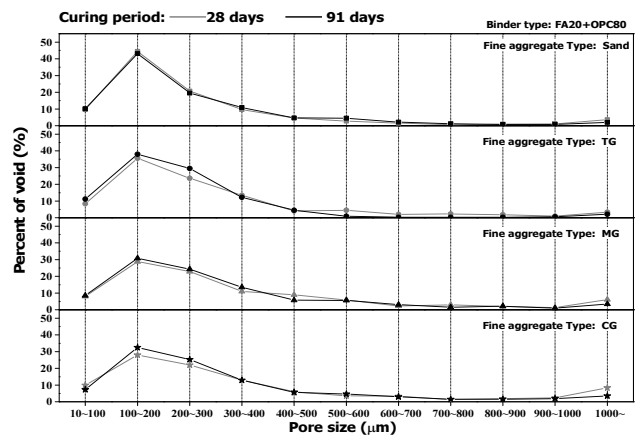
Fig. 8에는 수은 압입법을 통해 측정된 미세공극 분포를 강화유리의 종류와 광물질 혼화제의 혼입 여부에 따라 나타내었다. 이때 그래프의 X축은 공극의 크기를, Y축은 공극에 압입된 수은의 양을 의미한다.

Fig. 8에 나타낸 바와 같이, 모든 모르타르에서는 다양한 크기를 갖는 공극이 존재하며 특히, 50~100 nm 영역에서 공극의 피크점이 나타났다. 이는 일반적인 모르타르에서 나타나는 공극 분포이며, 특히 재령이 증가함에 따라 피크점에서의 공극의 크기가 점차 감소하였다. 이러한 이유는 재령이 증가함에 따라 내부 조직이 치밀해지면서 모세관 공극이 발달한 것에 기인한 것으로 판단된다(Choi et al., 2019).

한편, Fig. 8(a)의 경우, 강화유리 처리 방법과 관계없이 강화유리를 혼입한 모르타르는 천연 잔골재를 사용한 모르타르에 비해 모두 50~100 nm 영역의 공극의 피크가 감소하고, 1000~3000 nm (1~3 μm) 영역의 공극이 증가하는 것으로 나타났다. 1~3 μm 영역의 공극은 C-S-H와 골재 사이의 존재하는 공극으로 시멘트 페이스트와 골재 사이의 부착력 감소의

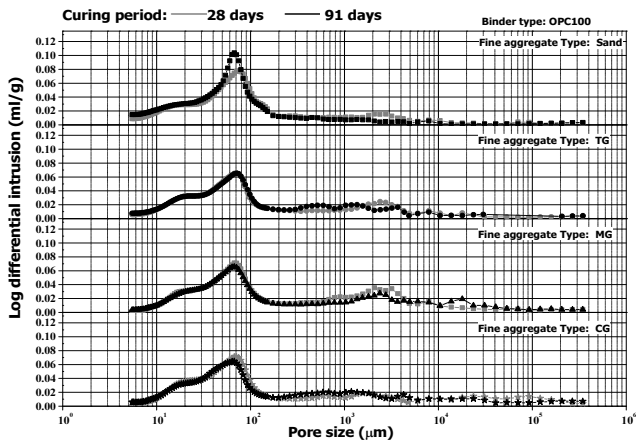


Binder type: (a) OPC 100

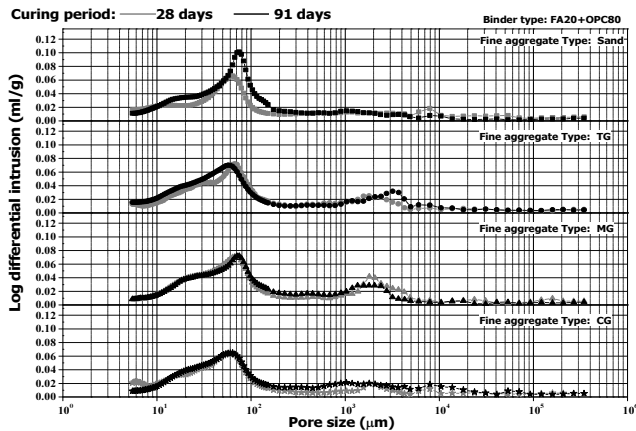


Binder type: (b) FA20+OPC80

Fig. 7 Pore size distribution (macro size)



Binder type: (a) OPC 100



Binder type: (b) FA20+OPC80

Fig. 8 Pore size distribution (micro size)

원인이 되며, 강화유리를 사용한 모르타르의 강도 저하를 유도 한 것으로 판단된다.

또한, Fig. 8(b)에 나타난 플라이애시를 혼입한 경우, OPC를 사용한 경우와 유사한 경향이 나타났으며, 플라이애시로 인한 미세공극 구조 개선 효과는 미비한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 사용수명이 종료된 태양광 패널의 강화유리 분리 기술에 따라 분류된 강화유리를 모르타르의 잔골재로 적용하여 역학적 특성을 평가하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 사용수명이 종료된 태양광 패널의 강화유리 분리 기술 중 기계적 처리 방법을 적용할 경우, 기존의 강화유리와 동일한 성분의 강화유리 회수가 가능하지만 화학적 처리 방법을 이용할 경우, 용매에 의한 화학반응 후, K_2O 와 CuO 가 소산되어 일반 유리로 성질이 변화하는 것으로 나타났다.

2. 강화유리 종류와 관계없이 강화유리를 잔골재로 사용한 모르타르의 경우, 강화유리와 시멘트 수화물의 부착력 저하로 압축 강도 및 휨강도가 감소하였다. 그러나 강화유리 분리 기술 중 기계적 방법으로 태양광 패널에서 분리된 강화유리를 잔골재로 적용한 경우와 건전한 강화유리를 잔골재로 적용한 모르타르의 강도 감소 수준은 유사한 것으로 나타났다. 그러나, 화학적 처리를 통해 분리된 강화유리를 모르타르의 잔골재로 사용할 경우, 주목할 만한 강도 저하가 발생하므로 화학적 처리를 통한 강화유리의 추출 방법은 강화유리의 성상 변화로 인한 모르타르 성능 저하를 유발하는 것으로 판단된다.
3. 강화유리를 잔골재로 사용할 경우, 모르타르 내부 공극의 분포가 변화하는 것으로 나타났으며, 1~3 μm 영역과 200~300 μm 영역의 공극이 영향을 받는 것으로 나타났다.
4. 실험 결과를 종합하여 보면, 태양광 패널에서 분리된 강화유리를 잔골재로 사용할 경우, 천연 잔골재를 사용한 모르타르와 비교하여 압축 및 휨강도가 저하하며, 플라이애시를 함께 사용할 경우, 강화유리 사용에 의한 강도 감소를 일부분 완화할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 이에 감사드립니다(No. 2021R1A2C2008923).

References

1. Azeumo, M. F., Conte, G., Ippolito, N. M., Medici, F., Piga, L., and Santilli, S. (2019), Photovoltaic module recycling, a physical and a chemical recovery process, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 193, 314-319.
2. Bluhm, H., Frey, W., Giese, H., Hoppe, P., Schultheiss, C., and Strassner, R. (2000), Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7(5), 625-636.
3. Bruton T. M. (1994), Re-cycling of high value, high Energy content components of Silicon PV modules, *12th EU-PVSEC*, 303-344.
4. Choi, S. S., and Kim, E. (2017), Analysis of pyrolysis products of ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA) using pre-deacetylation, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 127, 1-7.
5. Choi, S. Y., Choi, Y. S., Won, M. S., and Yang, E. I. (2015), Evaluation on the Applicability of Heavy Weight Waste Glass as Fine Aggregate of Shielding Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(4), 101-108 (in Korean).
6. Choi, Y. S., Lee, S. M., Kim, T. S., Kim, I. S., and Yang, E. I.

- (2019), Effect of Replacing Fine Aggregate by Cathode-Ray Tube(CRT) Waste Glass on Gamma-ray Shielding Properties of Cement Mortar Specimen, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 23(7), 172-180 (in Korean).
7. Corcelli, F., Ripa, M., Leccisi, E., Cigolotti, V., Fiandra, V., Graditi, G., Sannino, L., Tammaro, M., and Ulgiati, S. (2018), Sustainable urban electricity supply chain – Indicators of material recovery and energy savings from crystalline silicon photovoltaic panels end-of-life, *Ecological Indicators*, 94(3), 37-5.
 8. Dias, P., Schmidt, L., Gomes, L. B., Bettanin, A., Veit, H., and Bernardes, A. M.(2018), Recycling waste crystalline silicon photovoltaic modules by electrostatic separation, *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4, 176-186.
 9. Domínguez, A., and Geyer, R. (2017), Photovoltaic waste assessment in Mexico, Resources, *Conservation and Recycling*, 127, 29-34.
 11. Doni, A., and Fabrizio D. (2012), Electrothermal heating process applied to c-Si PV recycling. *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 757-762.
 12. Fiandra, V., Sannino, L., Andreozzi, C., Corcelli, F., and Graditi, G. (2019), Silicon photovoltaic modules at end-of-life: removal of polymeric layers and separation of materials, *Waste Management*, 87, 97-107.
 13. Fiandra, V., Sannino, L., Andreozzi, C., and Graditi, G. (2019), End-of- life of silicon PV panels: a sustainable materials recovery process, *Waste Management*, 84, 91-101.
 14. Frisson, L., Lieten, K., Bruton, T., Declercq, K., Szlufcik, J., De Moor, H., Gorts, M., Benal, A., and Aceves, O. (2020), Recent improvements in industrial PV module recycling, *Sixteenth European Photovoltaic Solar Energy*, 1-5.
 15. Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., and Toro, L. (2014), Recycling of photovoltaic panels by physical operations, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 123, 239-248.
 16. Latunussa, C. E. L., Ardenne, F., Blengini, G. A., and Mancini, L. (2016), Life cycle assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156, 101-111.
 17. Lovato, E. S., Donato, L. M., Lopes, P. P., Tanabe, E. H., Bertuol, D. A. (2021), Application of supercritical CO₂ for delaminating photovoltaic panels to recover valuable materials, *Journal of CO₂ Utilization*, 46, 101477.
 18. Kim, Y. M., Choi, S. Y., Kim, I. S., and Yang, E. I. (2018), A study on the Mechanical Properties of Concrete using Electronic Waste as Fine Aggregate, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 22(2), 90-97 (in Korean).
 19. Mo, J. Y., and Kim, M. J. (2020), Economic analysis of Solar PV panel recycling project, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 21(5), 585-591.
 20. Nevala, S. M., Hamuyuni, J., Junnila, T., Sirviö, T., Eisert, S., Wilson, B. P., Serna- Guerrero, R., and Lundström, M. (2019), Electro- hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels – impact on recycling, *Waste Management*, 87, 43-50.
 21. Pagnanelli, F., Moscardini, E., Granata, G., Abo Atia, T., Altimari, P., Havlik, T., and Toro, L. (2017), Physical and chemical treatment of end of life panels: an integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies, *Waste Management*, 59, 422-431.
 22. Riech, I., Castro-Montalvo, C., Wittersheim, L., Giacomani-Vallejos, G., González-Sánchez, A., Gamboa-Loira, C., Acosta M., and Méndez-Gamboa, J. (2021), Experimental Methodology for the Separation Materials in the Recycling Process of Silicon Photovoltaic Panels, *Materials*, 14(3), 581.
 24. Shi, F., Zuo, W., and Manlapig, E. (2013), Characterisation of pre-weakening effect on ores by high voltage electrical pulses based on single-particle tests, *Minerals Engineering*, 50-51, 69-76.
 25. Tembo, P. M., Heninger, M., and Subramanian, V. (2021), An investigation of the recovery of silicon photovoltaic cells by application of an organic solvent method, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 10, 025001.
 26. Wang, R., Song, E., Zhang, C., Zhuang, X., Ma, E., Bai, J., Yuan, W., and Wang, J. (2019), Pyrolysis-based separation mechanism for waste crystalline silicon photovoltaic modules by a two-stage heating treatment. *RSC Advances*, 9(32), 18115-18123.
 27. Wang, X., Tian, X., Chen, X., Ren, L., and Geng, C. (2022), A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 248, 111976.
 28. Yan, Y., Wang, Z., Wang, D., Cao, J., Ma, W., Wei, K., and Yun, L.(2020), Recovery of silicon via using KOH-ethanol solution by separating different layers of end-of-life PV modules, *Recycling Silicon and Silicon Compounds*, 72, 2624-2632.

Received : 03/24/2023
 Revised : 04/10/2023
 Accepted : 04/11/2023

요 지 : 태양광 패널의 설치가 가속화됨에 따라 사용수명이 종료된 태양광 패널도 증가하고 있다. 그러나 사용수명이 종료된 태양광 패널은 잠재적으로 위험한 물질을 포함하고 쉽게 재활용되지 않으므로 문제를 야기하고 있다. 사용수명이 종료된 태양광 패널의 효과적인 수거, 폐기 및 재활용 방법과 같은 대처 방안이 요구된다. 따라서 사용수명이 종료된 태양광 패널 재활용 기술 개발에 많은 연구가 진행되고 있다. 건설 분야에서 적용할 수 있는 태양광 패널의 재활용 기술 중 하나로, 사용수명이 종료된 태양광 패널에서 분리한 강화유리를 건설재료로 적용하는 것이 있다. 따라서 본 연구에서는 사용수명이 종료된 태양광 패널의 분리 기술을 정리하고 추출된 강화유리를 잔골재로 사용하여 모르타르의 역학적 성능을 평가하였다. 그 결과, 강화유리를 모르타르의 잔골재로 사용할 경우, 사용수명이 종료된 태양광 패널의 분리 기술과 관계없이 압축강도, 휨강도 및 1~3 μm, 200~300 μm 범위의 거시공극이 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 화학 처리된 강화유리를 사용한 모르타르는 화학반응으로 인해 소산된 K₂O와 CuO로 인해 주목할 만한 역학적 성능의 저하가 발생하는 것으로 나타났다. 한편, 플라이애시를 결합재로 사용할 경우, 모르타르의 역학적 성능 저하를 완화할 수 있는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 사용수명이 종료된 태양광 패널, 역학적 성능, 공극 분포, 태양광 패널 분리 기술, 강화유리