



## 괴재슬래그 골재를 적용한 농촌도로 포장 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 배출량 및 경제성 분석

### Analysis of CO<sub>2</sub> Emission and Economic of Rural Roads Concrete Pavement Using Air Cooled Slag Aggregate

안병환<sup>a</sup> · 김황희<sup>b</sup> · 이재영<sup>c</sup> · 차상선<sup>d</sup> · 이건희<sup>e</sup> · 박찬기<sup>ff</sup>

Ahn Byong Hwan · Kim Hwang-Hee · Lee Jae-Young · Cha Sang-Sun · Lee Goen Hee · Park Chan-Gi

#### ABSTRACT

Recently, as a study to air cooled slag, which is an industrial by-product, research is being proceed to use it as a material for concrete. In this study, the workability, air content, compressive strength, CO<sub>2</sub> emission and economic feasibility of concrete were analyzed when air cooled slag, an industrial by-product, was applied as aggregate for rural road pavement concrete. As a result of the analysis, both the slump and air contents test results of concrete using the air cooled slag aggregate satisfied the target values, and the compressive strength was increased when the air cooled slag aggregate was used compared to when the natural aggregate was applied. On the other hand, the largest amount of CO<sub>2</sub> emission by raw material was found in aggregate. The carbon emission of rural road pavement concrete using air cooled slag aggregate increased when the Korean LCI DB was applied compared to when natural and crushed aggregates were applied, and the emission decreased when the German LCI DB was applied. This results are due to differences in the viewpoints of industrial by-products. However, considering the recycling of waste from the environmental aspect, it is necessary to simultaneously review the CO<sub>2</sub> emission and recycling aspects in the future. Also, the application of air cooled slag aggregate had the effect of improving the economic efficiency of rural road pavement concrete about 18.75%.

**Keywords:** Air cooled aggregate; CO<sub>2</sub> emission; economic efficiency; rural road pavement concrete

#### 1. 서론

최근 콘크리트 산업에서는 양질의 천연골재 공급부족이 문제점으로 드러나고 있다. 환경부 자료에 의하면 매년 건설공사에 사용되는 골재량(연간 약 2억 6천만m<sup>3</sup>)과 천연 골재의 개발 가능량(약 55억m<sup>3</sup>)을 고려할 때 약 20년 뒤에는 골재자원의 고갈현상을 초래할 것으로 예측되었다(Lee et al., 2017; KSWM, 2011). 특히 골재 채취 관련하여 계속적으로 환경규

제가 강화되는 추세에서 이와 같은 천연 골재의 공급부족 문제는 더욱 심화될 것으로 예상되므로 건설공사용 천연골재를 대신할 수 있는 대체 골재의 개발이 절실한 실정이다(Lee et al., 2017; Lee and Park, 2010; Sung and Kim, 2010).

천연골재 고갈에 따른 콘크리트 제작에 어려움이 있으며 골재의 매장량의 한계가 나타나고 있어 해사, 쇄석, 쇄사 등의 사용량에 대한 비중이 점차 증대되고 있다(Ryu et al., 2010; Cho et al., 2012). 이러한 천연골재 채취 증가로 인해 산림훼손은 증가하고 있다(Lee et al., 2017; Min et al., 2014). 이에 따라 골재채취는 법률에 의해 제한이 되며 한계를 보이고 있어 대체자원의 충당이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 제철공정에서 발생하는 고로 슬래그를 콘크리트용 골재로 적용하고자 한다. 제철 공정에서 부산물로 발생하는 슬래그(Slag)는 고온으로 배출되어 냉각하는 과정에서 결정화된 것으로 물리, 화학적으로 안정되어 있어 환경적으로 무해한 재료로 알려져 있다(Lee et al., 2017; Choi et al., 2007; KSWM, 2011). 특히, 고로 공정에서 발생하는 슬래그는 천연골재와 비중이 유사하고 화학적으로 안전한 특성을 가지므로 콘크리트 골재 대체재로서 활용 가치가 높다(Lee et al., 2017; Choi et al., 2007). 그러나 고로슬래그 중 괴재슬래

<sup>a</sup> PhD, Department of Agricultural Engineering, Kongju National University

<sup>b</sup> Director of Research, Research Center, Contecheng Co., Ltd

<sup>c</sup> Researcher, Research Center, Contecheng Co., Ltd

<sup>d</sup> Research Professor, Industrial Development Institute, Kongju National University

<sup>e</sup> MS Course Student, Department of Agricultural Engineering, Kongju National University

<sup>f</sup> Professor, Department of Regional Construction Engineering, Kongju National University

† Corresponding author

Tel.: +82-41-330-1266, Fax: +82-41-330-1269

E-mail: [cgpark@kongju.ac.kr](mailto:cgpark@kongju.ac.kr)

Received: August 21, 2022

Revised: September 15, 2022

Accepted: September 15, 2022

그(수쇄한 괴재슬래그)의 경우 콘크리트용 골재로 활용하기 위한 연구는 비구조용 콘크리트 2차 제품에 일부 적용되고 있고 대부분은 성토 및 매립형 골재로 90% 이상 재활용 되고 있다 (Lee et al., 2017; Ryu et al., 2010). 또한 최근들어 괴재슬래그를 재활용하기 위한 연구가 활발하게 진행되어 콘크리트나 아스콘 골재와 같은 부가치 높은 재료로 활용되기 위한 연구가 진행되고 있다 (Ryu et al., 2010; Yoo et al., 2017).

괴재슬래그를 콘크리트용 골재로 활용하는 연구는 기존 천연골재를 대체하는 고품질의 친환경 건설 재료로 활용이 가능하다 (Ryu et al., 2010; KSWM, 2011). 또한 산업부산물인 괴재슬래그 골재를 기존 천연골재의 대체 재료로 적용하여 석산개발에 따른 환경 부하를 저감할 수 있으며, 천연골재를 대체함으로써 원가 절감이 가능하게 된다 (Lee et al., 2017). 한편 괴재슬래그 골재를 적용한 농촌도로포장 콘크리트의 물리·역학적 특성을 평가하여 적정배합비를 선정하는 연구가 실시되어 괴재슬래그 골재가 농촌도로포장에 적용이 가능한다는 것을 알 수 있었다(Ahn et al, 2021a). 또한 괴재슬래그 골재를 적용한 콘크리트의 내구성을 평가한 연구에서도 괴재슬래그 골재가 농촌도로포장 콘크리트에 부순골재 및 천연골재를 대체하여 충분한 성능을 발휘하는 결과를 나타내었다 (Ahn et al., 2021b). 농촌도로는 농어촌지역주민의 교통편의와 농수산물의 생산유통을 원활히 하는 동시에 농어촌지역의 생활환경개선과 경제의 활성화를 위하여 이용하는 도로이다. 농촌도로포장은 “KDS 67 35 00 농도”의 성능을 만족하는 도로로 “KDS 44 00 00 도로설계기준”을 만족하는 도로포장과는 차별성을 갖는다 (Ahn et al., 2021a). 한편 지구 온난화에 영향을 미치는 CO<sub>2</sub>에 대한 근본적인 대책을 요구하고 있다. 이에 따라 대기 중 CO<sub>2</sub>를 저감하기 위하여 콘크리트 산업에

서는 CO<sub>2</sub> 배출량을 줄이기 위한 방법을 찾고 있다 (Kim et al., 2017).

본 연구에서는 한국환경산업기술원에서 구축 및 관리하고 있는 국가 LCI DB (Korea Environmental Industry and Technology Institute, 2022)와 독일의 ÖKOBAUDAT (ÖKOBAUDAT, 2022)를 이용하여 괴재슬래그 골재를 적용한 농촌도로포장 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 배출량을 분석하고자 하였다. 또한 콘크리트에 적용하기 위해서는 경제적인 우수성을 확보하여야 한다. 콘크리트 분야에서 골재는 암석을 파쇄한 부순돌이 널리 적용되고 있다 (Roh et al., 2019). 그러나 쇄석의 경우 환경 및 자연보존이라는 측면에서 문제점을 가지고 있어 쇄석 대신 다른 대체 골재에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다(Mun et al., 1997). 괴재슬래그 골재는 철강산업의 부산물로 폐기물이다. 따라서, 암석을 파쇄하여 사용하는 부순돌을 괴재슬래그 골재로 대체할 수 있다면 환경보호 측면과 함께 자원 재활용 측면에서 매우 효과적이라 할 수 있다 (Ahn, 2018). 또한 경제적으로도 효과가 있다. 본 연구에서는 산업부산물인 괴재슬래그를 농촌도로포장 콘크리트용 골재로 적용하였을 때 콘크리트의 작업성, 압축강도 특성, CO<sub>2</sub> 배출량 및 경제성 분석을 실시하였다.

## II. 연구방법

### 1. 사용재료

본 연구에서는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 또한 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 시멘트의 대체재료로 적용하였으며 물리·화학적 특성은 각각 Table 1 및 2와 같다.

**Table 1** Physical and chemical properties of fly ash

Density (g/mm <sup>3</sup> )		Fineness(cm <sup>2</sup> /g)		Absorption (%)		L.O.I* (%)	
2.14		3,400		0.13		3.28	
Chemical compositions (%)							
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
58.12	23.56	7.69	2.59	1.12	0.31	1.42	1.05

\* L.O.I: Loss on ignition

**Table 2** Physical and chemical properties of blast furnace slag powder

Density (g/mm <sup>3</sup> )		Fineness (cm <sup>2</sup> /g)			L.O.I (%)		
2.8		4000~6000			3.0		
Chemical compositions (%)							
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	TiO	S
33.1	13.9	0.29	42.4	6.1	0.4	0.96	0.66

**Table 3** Properties of air cooled slag fine aggregate

Item	Component (%)				Fine aggregate		
	CaO	S	SO <sub>3</sub>	FeO	Absolute dry density (g/mm <sup>3</sup> )	Water absorption ratio (%)	Unit volume weight (ton/m <sup>3</sup> )
Mean	40.81	0.00	0.39	1.19	2.77	1.57	1.70

**Table 4** Properties of air cooled slag coarse aggregate

Item	Component (%)				Coarse aggregate		
	CaO	S	SO <sub>3</sub>	FeO	Absolute dry density (g/mm <sup>3</sup> )	Water absorption ratio (%)	Unit volume weight (ton/m <sup>3</sup> )
Mean	40.81	0.00	0.39	1.19	2.49	4.28	1.41

잔골재는 밀도 2.62 g/mm<sup>3</sup>인 바다모래와 부순잔골재를 적용하였다. 괴재슬래그 잔골재 및 괴재슬래그 굵은골재를 천연골재를 대체하여 적용하였으며, 특성은 각각 Table 3 및 4에 제시하였다. 또한 폴리카르복실계 고성능 감수제를 사용하였다.

## 2. 배합설계

본 연구에서는 괴재슬래그 골재를 이용한 농촌도로포장 콘크리트의 물리·역학적 특성 평가 (Ahn et al., 2012a)와 염소이온투과 및 내구성 평가 (Ahn et al., 2012b)를 통하여 현장에 적용하기 위한 배합비를 선정하였다. 선정된 배합비는 괴재슬래그 잔골재 50%, 괴재슬래그 굵은 골재 100% 치환한 배합비이며, 본 연구에서는 천연 골재만을 사용한 콘크리트(Plain)와 동시에 배합하여 탄소배출량 및 경제성을 비교하였다 (Table 5). 농촌도로포장 콘크리트의 목표 성능은 현장(충남 당진시 현장) 타설조건과 물리·역학적 특성 및 내구성 실험을 통하여 최종적으로 현장 조건에 적합한 성능을 농업생산기반설계기준의 “KDS 67 35 00 농도”를 참고하여 결정하였다 (Lee et al., 2017; Ahn et al., 2021a; Ahn et al., 2021b). 배합 시 목표슬럼프 값을 80 mm로 하여 목표 값을 만족하지 못할 경우 배합수를 조절하여 목표 값을 만족하도록 하였다. 따라서, 단위수량은 Plain, GS 50% + GG100% 배합에서 각각

199 kg/m<sup>3</sup> 및 159 kg/m<sup>3</sup>을 적용하였다. 또한 공기량은 4~7%를 목표하였으며, 압축강도는 21 MPa 이상으로 선정하였다. 또한 괴재슬래그 골재를 적용한 경우 시간에 따른 유동성의 저하가 발생하는 것을 고려하여 유동성 저하 개선을 위해 폴리카르복실계 감수제의 혼합 비율(분산제와 유지제의 비율)을 조정하여 적용하였다. 콘크리트에서 유동성 유지를 위해 투입하는 혼화제는 분산과 유지기능을 갖는 혼화제를 혼합하여 제조되며 일반적으로 사용되는 혼합 비율은 7:3(분산:유지) 정도이다. 따라서 본 연구에서는 괴재슬래그 골재를 적용한 콘크리트가 초기 유동성은 양호하나 시간에 따른 슬럼프 손실이 큰 특성을 고려하여 비율을 6:4로 조정한 폴리카르복실계 감수제를 괴재슬래그 골재를 적용한 배합에 사용하였다.

## 3. 시험방법

### 가. 슬럼프 및 공기량

괴재슬래그 골재의 적용에 따른 농촌도로포장 콘크리트의 굳지 않은 콘크리트 특성으로 슬럼프 및 공기량 시험을 실시하였다. 슬럼프 시험은 KS F 2402 「콘크리트의 슬럼프 시험 방법」에 준하여 실시하였으며, 공기량 시험은 KS F 2421 「압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험 방법」에 준하여 실시하였다.

**Table 5** Mix ratio of Air cooled slag aggregate pavement concrete

Item	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )								AD (B%)
			W	C	BFS	FA	SS	GS	G	GG	
Plain	68.6	49.8	199	173	73	44	910	-	942	-	0.7
GS 50% + GG 100%	54.8		159	173	73	44	482	484	-	926	0.7

※ W: Water, C: Cement, BFS: Blast Furnace Slag, FA: Fly ash, SS: Sea sand, GS: Air cooled slag fine aggregate, G: Natural coarse aggregate, GG: Air cooled slag coarse aggregate, AD: Polycarboxylic acid-based high-performance water-reducing agent.

나. 압축강도

괴재슬래그 골재 적용에 따른 압축강도 시험은 KS F 2405 「콘크리트 압축 강도 시험방법」에 따라 실시하였다. 직경 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 공시체를 제작하여 24시간 동안 23±2℃, 상대습도 58%에서 초기 양생을 실시하였으며, 1일 후 탈형하여 23±2℃의 수조에서 28일간 수중양생을 실시한 후 압축강도 시험을 실시하였다.

다. CO<sub>2</sub> 배출량 분석

본 연구에서는 괴재슬래그 골재를 사용한 농촌도로 포장콘크리트의 CO<sub>2</sub> 배출량을 분석하였다. 일반적으로 콘크리트의 생산과정 단계를 자재, 운송단계로 구분하여 단계별 CO<sub>2</sub> 배출량을 정량적 평가기법을 사용하여 분석한다. 우리나라의 LCI DB는 환경부 산하의 한국환경산업기술원에서 구축 및 관리하는 국가 LCI DB가 대표적이며, 해외의 대표적인 LCI DB는 독일의 ÖKOBAUDAT, 스위스의 Ecoinvent, 미국의 U.S. Life Cycle Inventory Database 등이 있다 (Roh, 2019). 본

연구에서는 괴재슬래그 골재 사용에 따른 배출량 분석시 환경부 산하의 한국환경산업기술원에서 구축 및 관리하는 국가 LCI DB와 해외의 경우 독일의 ÖKOBAUDAT을 기본으로 하여 배출량을 산출하여 비교하였다 (Table 6). 또한 한국환경산업기술원에서 구축 및 관리하고 있는 국가 LCI DB와 독일의 ÖKOBAUDAT에 제시하고 있지 않은 재료의 배출량은 건축 자재 국가 환경성 LCI DB (Roh, 2019; KICT, 2008)와 기존 논문 등의 자료를 참고하여 분석하였다. Table 7은 본 연구에서 사용한 재료의 배출량과 자료의 출처를 나타낸다. 국가 LCI DB의 경우 재활용 골재에 대한 탄소배출량은 순환골재로 제시하고 있다. 즉 폐자원(폐콘크리트, 순환자원, 산업부산물 등)의 탄소배출량은 없지만 콘크리트용 골재(순환골재, 고로슬래그 골재 등)로 가공하는 과정으로 조크리셔(Jaw Crusher) 등 장비를 사용하는 과정에서 사용되는 에너지원(전기, 경유, 윤활유) 등에 의하여 탄소가 배출된다. 본 연구에서는 적용한 괴재슬래그 골재는 순환골재 생산공정을 이용하여 생산하였다 (Ahn et al., 2021b). 따라서 순환골재의 탄소배출

**Table 6** CO<sub>2</sub> emission amounts of materials (ÖKOBAUDAT, 2022; Korea Environmental Industry and Technology Institute, 2022)

Material	CO <sub>2</sub> emission amounts (kg- CO <sub>2</sub> /kg)	
	Korea environmental industry and technology institute	ÖKOBAUDAT
Portland cement	0.9263	0.7952
Blast furnace slag powder	0.07049	-
Fly ash	-	-
Fine aggregate (Sea sand)	0.00543	0.0333
Coarse aggregate (Crushed aggregate)	-	0.00811
Slag fine aggregate (Recycled fine aggregate)	0.1016	0
Slag coarse aggregate (Recycled coarse aggregate)	0.03505	0
Water	-	-

**Table 7** CO<sub>2</sub> emission amounts of materials applied in this study

Material	CO <sub>2</sub> emission amounts (kg- CO <sub>2</sub> /kg)				
	Korea	Reference	Germany	Reference	
Portland cement	0.9263	KEIT*	0.7952	ÖKOBAUDAT	
Blast furnace slag powder	0.07049	KEIT	0	-	
Fly ash	0.0196	Hanyang University	0	-	
Fine aggregate	Sea sand	0.00543	KEIT	0.0333	ÖKOBAUDAT
	Slag aggregate	0.1016	KEIT	0	ÖKOBAUDAT
Coarse aggregate	Crushed aggregate	0.00777	BMNEA**	0.00811	ÖKOBAUDAT
	Slag aggregate	0.03505	KEIT	0	ÖKOBAUDAT

\* Korea Environmental Industry and Technology Institute (National LCI DB, 2022)

\*\* Building Materials National Environment Agency LCI DB (Roh, 2019; Korea Institute Of Construction Technology, 2008)

량을 적용하였다. 독일의 ÖKOBAUDAT의 경우 슬래그 골재는 탄소배출량을 “0”을 제시하고 있다. 즉 산업부산물물을 재활용한다는 측면에서 폐자원은 탄소배출량이 “0”임으로 이를 폐기하지 않고 재활용하여 적용하기 때문에 가공시 발생하는 탄소배출량을 고려하지 않고 있다. 또한 배합수의 경우 국내 및 외국의 경우 모두 자료가 없어 국내 자료를 국내 및 독일의 ÖKOBAUDAT에 동시에 적용하였다. 독일의 ÖKOBAUDAT의 경우 플라이애시와 고로슬래그 미분말에 대한 자료를 제시하지 않았다. 따라서 산업부산물 재활용 측면을 고려하여 독일의 ÖKOBAUDAT가 슬래그 골재에 대하여 탄소배출량을 “0”을 제시하고 있기 때문에 고로슬래그 미분말과 플라이애시도 “0”을 적용하였다. 국내의 경우 플라이애시에 대한 내용은 국토교통과학기술진흥원 연구과제로 진행된 “CO<sub>2</sub> 배출량 절감을 위한 콘크리트 배합설계 기술개발 최종보고서”의 내용을 이용하였다 (HanYang University, 2015; Roh, 2019). 또한 부순골재의 경우 한국환경산업기술원에서는 제시하고 있지 않지만 건축자재 환경성정보 국가 D/B (Roh, 2019; KICT, 2008)에는 포함되어 있어 이를 이용하였다.

본 연구에서는 괴재슬래그 골재를 사용한 농촌도로포장 콘크리트의 CO<sub>2</sub> 배출량은 콘크리트 1 m<sup>3</sup>을 기준으로 하여 분석하였다. 또한 골재를 제외한 다른 재료의 경우 동일한 배출량으로 고려하였다. 자재단계는 괴재슬래그 골재를 활용한 포장콘크리트를 제조하기 위한 원재료의 생산시 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 각 자재의 CO<sub>2</sub> 원단위에 근거하여 도출하였다. 자재단계의 CO<sub>2</sub> 배출량 산출식은 식 (1)과 같다 (Kim, 2016; Kim et al., 2010; Han et al., 2010).

$$E_m = T_{1m^3} \times \Sigma(EM \times a) \quad (1)$$

여기서, E<sub>m</sub>는 자재단계에서의 CO<sub>2</sub> 배출량(kg-CO<sub>2</sub>), T<sub>1m<sup>3</sup></sub>은 괴재슬래그 골재를 적용한 포장콘크리트의 1 m<sup>3</sup> 생산에 필요한 물량(batch), EM은 1 m<sup>3</sup>당 배합의 각 재료 양(kg)이며, a는 각 재료의 CO<sub>2</sub> 배출량 원단위(kg-CO<sub>2</sub>/kg)를 나타낸다.

운송단계는 괴재슬래그 골재를 활용한 포장콘크리트의 생산시 필요한 자재들을 생산 공장까지 운반하는 거리에 따라

요구되는 에너지 소비량으로 CO<sub>2</sub> 배출량을 분석할 수 있다 (Kim, 2016; Kim et al., 2010; Han et al., 2010). 본 연구에서는 괴재슬래그 골재에 적용에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량을 분석하기 위한 것으로 운송거리 등은 고려하지 않았다. 따라서 운송단계에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량은 제외하였다.

### 라. 자재단가 비교분석

본 연구에서는 괴재슬래그 골재를 적용한 포장 콘크리트의 자재단가 비교분석을 실시하였다. 현재 다양한 콘크리트가 개발되고 있지만 현장 적용시 가장 큰 문제점으로 나타나고 있는 것이 경제성에 대한 문제이다 (Ahn, 2018). 본 연구에서는 농촌도로 포장콘크리트 배합의 단가를 괴재슬래그 골재를 적용하지 않은 콘크리트(Plain 배합)와 비교 분석하였다. 괴재슬래그 골재를 적용한 포장콘크리트에 대한 자재단가 비교분석은 원재료 단가의 비교만을 통하여 실시하였다. 가격은 레미콘 공장에서 구입하는 가격을 기본으로 하였다 (Ahn, 2018). 본 연구에서 적용한 재료 단가는 Table 8과 같다. 천연 굵은 골재는 11,034원/톤, 해사는 12,000원/톤, 천연골재를 적용한 콘크리트에 적용한 폴리카르복실계 혼화제는 580,000원/톤이다. 괴재슬래그 골재 굵은 골재 및 괴재슬래그 잔골재의 가격은 6,200원/톤이며, 괴재슬래그 골재를 적용한 콘크리트 배합의 적용한 혼화제(분산 및 유지기능을 보완한 폴리카르복실계 감수제)는 900,000원/톤이다.

## III. 시험결과

### 1. 슬럼프 및 공기량

괴재슬래그 골재 적용에 따른 굳지 않은 콘크리트의 특성을 평가하기 위하여 슬럼프 및 공기량을 측정하였다. 시험결과는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. 슬럼프 값은 목표슬럼프 80 mm 이상을 만족하였다. 괴재슬래그 골재를 사용한 배합이 슬럼프의 경우 약 90 mm로 부순골재를 사용하였을 경우와 비교하여 약간 증가한 결과를 보여주었으나 큰 차이는 아니다. 이와 같은 결과는 슬럼프 값을 조절하기 위하여 폴리카르복실계

Table 8 Material cost (Ahn, 2018)

Item	Natural aggregate concrete	Air cooled slag aggregate concrete
	Material cost (won/ton)	
Aggregate	Coarse	6,200
	Fine	6,200
	Sea sand	13,333
Admixture	Superplasticizer	900,000



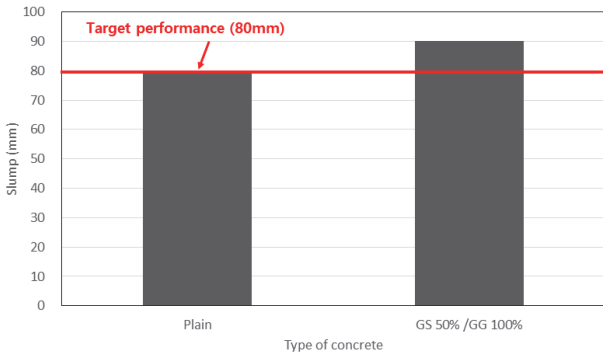


Fig. 1 Slump test results

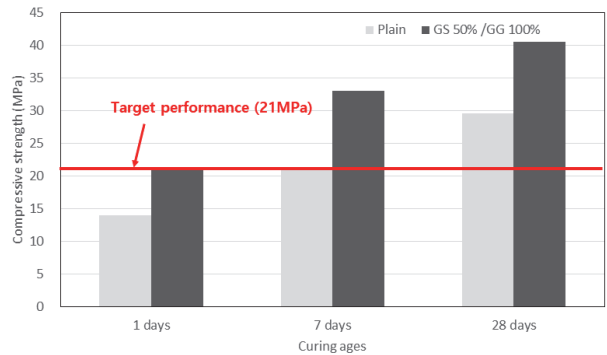


Fig. 3 Test results on compressive strength

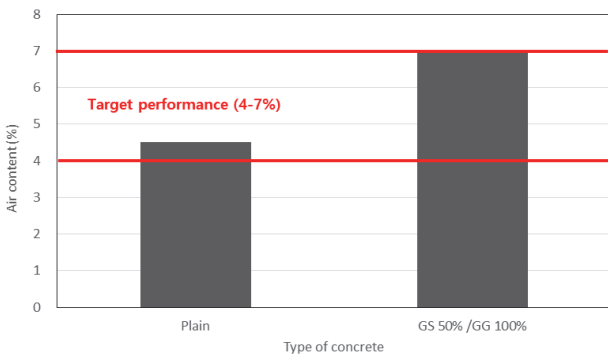


Fig. 2 Air contents test results

감수제를 사용하였으며, 목표슬럼프를 만족시키기 위하여 단위수량을 배합시 조절하였기 때문이다. 또한 공기량시험결과는 목표 공기량 값 4~7%를 모두 만족하는 결과를 보여주었다. 괴재슬래그 골재를 적용한 콘크리트의 공기량은 7%로 기존 배합의 4.5%로 보다 큰 결과 값을 보여주었다. 이와 같은 결과는 괴재슬래그 골재가 가지고 있는 공극률이 부순골재보다 크기 때문이다.

## 2. 압축강도

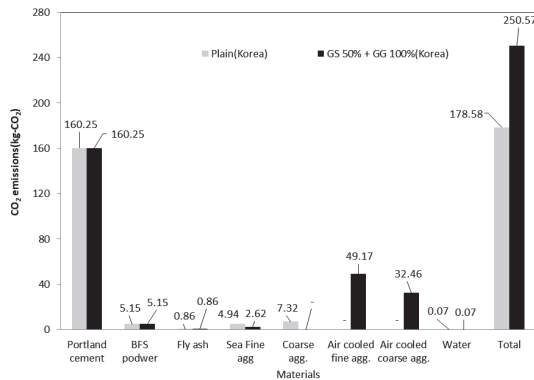
괴재슬래그 골재를 적용한 농촌도로 포장콘크리트의 재령 7, 14, 28일에 압축강도 특성을 평가하였다. Fig. 3은 괴재슬래그 골재의 적용시 일반 농촌도로 포장콘크리트와 비교하여 강도가 향상되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 배합시 목표슬럼프를 만족하는 범위에서 단위수량이 기준 콘크리트 배합보다 적게 사용되어 단위수량 감소에 따른 압축강도의 증가현상이 발생하였다. 따라서 괴재슬래그 골재를 적용할 경우 농촌도로포장 콘크리트의 압축강도에는 큰 문제가 없으며 오히려 강도증가 효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

## 3. CO<sub>2</sub> 배출량

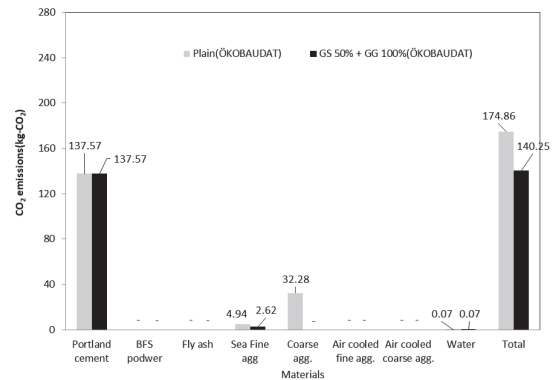
괴재슬래그 골재를 활용한 농촌도로포장 콘크리트의 원재료별 CO<sub>2</sub> 배출량 및 총 생산단계 배출량은 Table 9 및 Fig. 4, 5와 같다. 재료별 CO<sub>2</sub> 배출량은 시멘트가 71~94%로 가장 많은 비율을 차지하고 있었으며, 그 다음으로는 골재, 혼화제 순으로 나타났다. 배합별 및 생산단계별 총 배출량을 보면, 국내 기준의 경우 괴재슬래그 골재를 사용하지 않은 배합의 탄소배출량은 178.58 kg-CO<sub>2</sub>/kg이며, 괴재슬래그 골재를 사용한 배합의 탄소배출량은 250.57 kg-CO<sub>2</sub>/kg으로 괴재슬래그를 사용한 배합에서 탄소배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 독일 기준의 경우는 괴재슬래그 골재를 사용하지 않은 배합의 탄소배출량은 174.86 kg-CO<sub>2</sub>/kg이며, 괴재슬래그 골재를 사용한 배합의 탄소배출량은 140.25 kg-CO<sub>2</sub>/kg으로 괴재슬래그 골재를 사용한 배합에서 탄소배출량이 감소하는 것으로 나타났다. 국내의 기준을 적용한 경우 괴재슬래그 골재를 사용하면 CO<sub>2</sub> 배출량이 증가하지만 독일의 기준을 적용한 경우는 괴재슬래그 골재를 사용하면 CO<sub>2</sub> 배출량이 감소하는 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과는 CO<sub>2</sub> 배출량 산정시 산업부 산물을 재활용 한다는 측면을 고려하는지 여부에 달려 있다고 할 수 있다. 버려지는 괴재슬래그 골재를 재활용한다는 측면을 고려한 독일의 경우는 CO<sub>2</sub> 배출량이 없는 것으로 보지만 국내의 경우는 괴재슬래그 골재의 생산과정에서 발생하는 모든 CO<sub>2</sub> 배출량을 반영한다. 따라서 CO<sub>2</sub> 배출량 측면을 고려하면 산업부산물의 재활용이 상대적으로 단점으로 작용할 수 있다. 특히 골재 측면을 고려하면 독일 기준은 괴재슬래그 골재를 사용한 배합은 탄소배출량이 바다 모래에서만 발생하여 2.62 kg-CO<sub>2</sub>/kg이지만 국내 국가 LCI DB를 적용하면 84.25 kg-CO<sub>2</sub>/kg로 국가 LCI DB가 ÖKOBAUDAT에 비하여 32.16 배 증가하는 결과를 보여주고 있다. 상기와 같은 결과를 보면 현재 국가 LCI DB 등 국내 기준은 산업부산물(괴재슬래그 골재 등)을 재활용하는 측면에서는 재활용을 막는 단점으로

**Table 9** Amounts of CO<sub>2</sub> emission by mix proportion

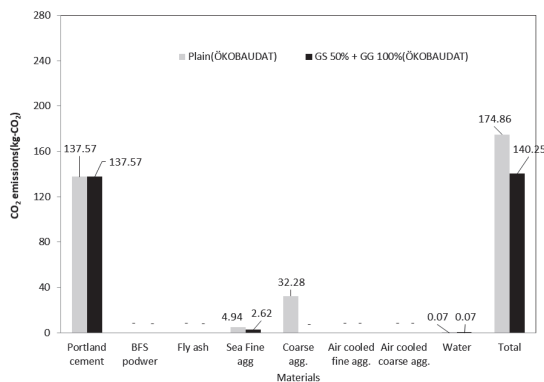
Material		Em (kg-CO <sub>2</sub> /kg)			
		Plain (Korea)	GS 50% + GG 100% (Korea)	Plain (ÖKOBAUDAT)	GS 50% + GG 100% (ÖKOBAUDAT)
Binder	Portland cement	160.25	160.25	137.57	137.57
	BFS powder	5.15	5.15	-	-
	Fly ash	0.86	0.86	-	-
Sea Fine agg.		4.94	2.62	4.94	2.62
Coarse agg.		7.32	-	32.28	-
Air cooled fine agg.		-	49.17	-	-
Air cooled coarse agg.		-	32.46	-	-
Water		0.07	0.07	0.07	0.07
Total		178.58	250.57	174.86	140.25



(a) Korea



(a) Plain



(b) Germany

(b) GS 50% + GG 100%

**Fig. 4** Comparison of CO<sub>2</sub> emission by mix proportion type

**Fig. 5** Comparison of CO<sub>2</sub> emission by LCI DB type

작용할 수 있다. 그러므로 환경적 측면에서 폐자원의 재활용을 활성화하기 위해서는 독일 등과 같이 산업부산물의 특성을 고려하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 결정할 필요가 있다. 향후 독일,

미국 등 다양한 국가의 CO<sub>2</sub> 배출량을 분석하여 재활용 측면(자원 재활용 등)을 고려한 국내 CO<sub>2</sub> 배출량 산정을 추가적인 연구도 필요하다.

#### 4. 자재단가 비교분석

콘크리트 1 m<sup>3</sup>당 괴재슬래그 골재를 적용한 콘크리트의 제조원가 산정 절차는 Table 10과 같다. 배합별 원재료 사용량에 대한 단가를 산정한 후 괴재슬래그 골재를 적용한 농촌도로 포장콘크리트를 생산하기 위하여 사용된 재료의 양에 따른 단가를 분석 및 비교하였다. 재료의 단가를 통한 경제성을 분석해 보면 괴재슬래그 골재를 적용한 콘크리트의 가격은 16,920원/m<sup>3</sup>으로 Plain 배합 (22,527원/m<sup>3</sup>)과 비교하여 약 24.89% 경제적이었다.

또한 사용된 모든 재료의 비용과 관리비용 등을 포함한 괴재슬래그 골재를 적용한 농촌 도로포장 콘크리트의 경제성 분석결과는 Table 11과 같다. 분석 결과 천연골재를 적용한 농촌도로 포장콘크리트의 비용은 약 40,087원/m<sup>3</sup>이며, 괴재슬래그 골재를 적용한 농촌도로 포장콘크리트의 비용은 33,351원/m<sup>3</sup>으로 약 18.75%의 경제성 향상 효과를 보여주었다. 따라서 경제성 측면에서 천연골재를 괴재슬래그 골재로 치환할 필요가 있다.

#### IV. 결론

본 연구는 괴재슬래그 골재를 적용한 농촌도로포장 콘크리트의 슬럼프, 공기량, 압축강도 및 CO<sub>2</sub> 배출량, 경제성을 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 괴재슬래그 골재를 사용한 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 시험결과 모두 목표 값을 만족하였다. 이와 같은 결과는 괴재슬래그 골재의 특성을 고려한 폴리카르복실계 혼화제의 사용과 배합시 목표 값을 만족하도록 단위수량을 조정하여 적용하였기 때문이다.
- 괴재슬래그 골재를 적용한 농촌도로포장 콘크리트의 압축강도는 배합시 단위수량이 천연 및 부순골재를 적용한 배합보다 적기 때문에 재령에 따라 단위수량 감소에 따른 압축강도가 증가하는 결과를 나타냈다. 또한 목표 압축강도를 만족하여 농촌도로포장에 적용이 가능하다는 것을 알 수 있었다.
- 원재료별 CO<sub>2</sub> 배출량은 시멘트에서 가장 많은 비중을 나타냈으며, 그 다음은 골재, 혼화제 순으로 나타났다. 괴재슬래그 굵은골재 및 잔골재를 적용하면 농촌도로 포

**Table 10** Calculation procedure of materials price analysis

Item	Natural aggregate concrete			Air cooled aggregate concrete			
	Aggregate		Admixture	Aggregate			Admixture
	Coarse	Sand	Superplasticizer	Coarse	Fine	Sand	Superplasticizer
Unit cost (won/ton)	11,034	13,333	580,000	6,200	6,200	13,333	900,000
Usage (ton)	0.942	0.910	0.001946	0.926	0.484	0.482	0.001946
Used cost (won)	10,394	12,133	1,129	5,741	3,001	6,427	1,751
Total cost (won)	22,527			16,920			

**Table 11** Economic evaluation

Item	Natural aggregate pavement concrete			Air cooled slag aggregate pavement concrete			Remark	
	Usage (ton)	Material cost (won/ton)	Sub total (won)	Usage (ton)	Material cost (won/ton)	Sub total (won)		
Binder	OPC	0.161	70,000	11,270	0.161	70,000	11,270	
	S/P	0.073	49,000	3,577	0.073	49,000	3,577	
	F/A	0.044	36,000	1,584	0.044	36,000	1,584	
Aggregate	Coarse	0.942	11,034	10,394	0.926	6,200	5,741	
	Fine	-	-	-	0.484	6,200	3,001	
	Sand	0.910	13,333	12,133	0.482	13,333	6,427	
Admixture (Superplasticizer)	1.946	580	1,129	1.946	900	1,751	Unit: kg	
Total cost (won/m <sup>3</sup> )			40,087			33,351		



장 콘크리트의 탄소배출량은 한국환경사업기술원의 국가 LCI DB를 적용하면 천연골재 및 부순골재를 적용할 때와 비교하여 증가하지만, 독일의 기준을 적용하면 CO<sub>2</sub> 배출량이 감소하는 결과를 나타냈다. 이와 같은 결과는 국가별로 산업부산물을 보는 관점의 차이가 발생하기 때문이다. 그러나 환경성 측면에서 폐기물을 재활용한다는 것을 고려하여 독일의 경우와 같이 국가 LCI DB도 재활용재료의 CO<sub>2</sub> 배출량을 결정할 필요성이 있다.

- 괴재슬래그 골재를 적용하면 농촌도포장 콘크리트의 경제성을 향상시키는 결과를 나타냈다. 괴재슬래그 골재를 사용하면 괴재슬래그 골재를 사용하지 않은 배합과 비교하여 약 18.75%의 경제성 향상 효과가 있었다.

## 감사의 글

본 연구의 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가연구원(IPET)의 농업기반 및 재해방지기술개발사업 (과제번호: 320047-05) 및 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술연구개발사업(과제번호: 2021332B10-2123A01)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

## REFERENCES

1. Choi, H. G., Y. M. Kim, J. M. Lee, and T. J. Yoo, 2017. Establishment of Resource Circulation Network Using Ready-Mixed Concrete Aggregate in Furnace Slag. EIP Report. Daegu: Korea Industrial Complex Corporation. (in Korean).
2. Korea Waste Association, 2011. A Study on the Improvement of Steel Slag Recycling System. Report. Seoul: Ministry of Environment. (in Korean).
3. Lee, J. H., and C. G. Park, 2010. Effect of blast furnace slag, hwang-toh and reinforcing fibers on the physical and mechanical properties of porous concrete using blast furnace slag coarse aggregate. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 52(5): 53-60. (in Korean).
4. Sung, C. Y., and T. H. Kim, 2011. Engineering properties of permeable polymer concrete for pavement using powdered waste glass and recycled coarse aggregate. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 53(6): 59-65. (in Korean).
5. Choi, S. W., and D. H. Ryu, 2010. Application of furnace slag as aggregate resources for concrete. *Journal of Korea Construction Circulation Resource Association* 5(1): 24-32. (in Korean).
6. Ahn, J. C., B. S. Cho, and D. C. Park, 2016. Leological properties of blast furnace slag mixed cement paste with condensation time. *Journal of the Korean Society of Architectural Engineering* 16(6): 505-512. (in Korean).
7. Jung, K. Y., H. W. Kim, J. H. Lee, K. S. Min, and Y. K. Park, 2014. A study on the application of thick aggregate as an aggregate for PHC file in the blast furnace. *Proceedings of Korea Concrete Institute Spring Conference*: 341-342. (in Korean).
8. Choi, S. W., W. S. Jang, E. Y. Kim, and V. Kim, 2007. The present situation of production and utilization of steel slag in Korea and other countries. *Journal of the Korea Concrete Institute* 19(6): 28-33. (in Korean).
9. Bang, J. H., S. C. Chae, H. B. Choi, J. H. Kim, J. M. Kim, S. W. Lee, Y. S. Yoo, 2017. CO<sub>2</sub> reduction and utilization of slag after extraction of calcium by means of a gangrene and converter slag. *Industrial Chemistry* 28(1): 101-111. (in Korean).
10. Ahn, B. H., S. J. Lee, and C. G. Park, 2021a. Physical and mechanical properties of rural-road pavement concrete in South Korea containing air-cooled blast-furnace slag aggregate. *Applied Science* 11(12): 1-16.
11. Ahn, B. H., S. J. Lee, and C. G. Park, 2021b. Chloride ion diffusion and durability characteristics of rural-road concrete pavement of South Korea using air-cooled slag aggregates. *Applied Science* 11(17): 1-18.
12. Kim, H. H., S. K. Lee, and C. G. Park, 2017. Carbon dioxide emission evaluation of porous vegetation concrete blocks for ecological restoration projects. *Sustainability* 9(2): 1-13.
13. Korea Environmental Industry and Technology Institute, National LCI DB. <http://www.epd.or.kr/lci/lciDb.do>. Accessed 01 July, 2022.
14. ÖKOBAUDAT, <https://www.oekobaudat.de/en.html>. Accessed 01 July, 2022.
15. Roh, S. J., 2019. Aggregates and environmental impacts. *Magazine of the Korean Recycled Construction Resources Institute* 14(3): 61-63. (in Korean).
16. Mun, H. Y., 1997. Blast furnace slag aggregate. *Journal of the Korea Concrete Institute* 9(6): 18-22. (in Korean).
17. Ahn, B. H., 2018. Performance and field application of rural road concrete pavement using air cooled blast furnace slag aggregates. PhD thesis. Konju: Kongju National

- University. (in Korean).
18. Korea Institute of Construction Technology, 2008. National D/B for Environmental Information of Building Products. Final report. Seoul: Korea Institute of Construction & Transportation Technology Evaluation and Planning. (in Korean).
  19. Hanyang University, 2015. Concrete mixing design technology development to reduce CO<sub>2</sub> emission. Final report. Seoul: Korea Institute of Construction & Transportation Technology Evaluation and Planning. (in Korean).
  20. Kim, H. H., 2016. Design and performance evaluation of porous vegetable concrete using industrial by-products. PhD thesis, Kongju: Kongju National University. (in Korean).
  21. Kim, T. H., and S. H. Tae, 2010. A study on the development of CO<sub>2</sub> emission evaluation system by concrete production. *Journal of the Korea Concrete Institute* 22(6): 787-796. (in Korean).
  22. Han, S. L., 2010. A study on the evaluation of CO<sub>2</sub> emissions in concrete production by type and region of reinforced concrete buildings. MS thesis, Seoul: Hanyang University. (in Korean).