

순환잔골재 혼입 콘크리트의 강도 특성 및 전과정 환경영향 평가 연구

A Study on the Strength Properties and Life Cycle Assessment of Recycled Fine Aggregate Concrete

최원영¹ · 김상헌^{2*} · 이세현³ · 전찬수¹

Won-Young Choi¹ · Sang-Heon Kim^{2*} · Sea-Hyun Lee³ · Chan-Soo Jeon¹

(Received April 18, 2019 / Revised June 11, 2019 / Accepted June 11, 2019)

The purpose of this study is to confirm the strength characteristics of concrete according to the mixing ratio of recycled fine aggregates and to use it as basic data for the use of recycled fine aggregates in concrete.

For this purpose, the target design compression strength was set at 27MPa. Considering practical use of recycled aggregate, the mixing ratio of recycled fine aggregate was set at 0, 30, 60, and 100%, and the unconfined concrete and hardened concrete were tested. The LCA method was used to evaluate the environmental impact of recycled fine aggregate concrete, and the effectiveness of recycled fine aggregate in the production of concrete was verified.

키워드 : 순환잔골재, 콘크리트, 전과정평가, 환경영향

Keywords : Recycled fine aggregate, Concrete, Life cycle assessment, Environmental effect

1. 서론

콘크리트를 구성하는 기본 재료인 모래, 자갈 등 골재는 콘크리트의 지속적인 사용으로 인해 점차 부족해지는 현실이다. 1990년대 초반 이미 공급이 부족했던 강모래와 강자갈 등은 바다모래, 쇠석 등으로 대체 사용되었으며, 잔골재로 주로 사용되던 바다모래 또한 수산자원의 감소 및 연안 침식 등 환경문제와 직결된 사유로 인해 근거리 해안에서의 채취가 어려운 상황이다(Kim et al. 2018).

이러한 현실과 맞물려 국내 건설폐기물은 꾸준히 증가하여 전체 폐기물 발생량의 50% 이상을 점유하며, 그중 폐콘크리트는 60% 이상의 발생량을 보이며 엄청난 비중을 차지하여 순환골재 사용에 대한 중요성은 날이 증가하고 있는 추세이다(Choi and Yang 2012).

위 상황을 반영하여 순환골재는 천연골재의 대체 재료로 꾸준히 고려되고 있는 실정이나, 폐콘크리트를 원료로 하는 순환골재

를 활용한 콘크리트의 강도, 내구성 등 안전에 대한 국내 소비자들의 우려는 저조한 콘크리트용 순환골재의 활용률로 뚜렷하게 확인할 수 있다.

이러한 인식을 개선하고 순환골재의 사용을 확대하기 위해서는 순환골재를 활용한 콘크리트의 특성을 비롯하여 학계에서 널리 사용되는 전과정 평가(LCA, Life Cycle Assessment)를 활용한 환경영향 평가에 대한 연구결과가 필요하다.

이에 본 연구에서는 순환잔골재의 혼입률에 따른 콘크리트의 강도 특성을 실험을 통해 확인하고, 전과정 평가(LCA, Life Cycle Assessment) 기법을 이용하여 순환잔골재의 전과정 환경영향을 평가하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해, 설계기준압축강도를 27MPa로 하고, 순환잔골재의 혼입률을 0, 30, 60, 100%로 설정한 뒤 굳지 않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트에 대한 실험하고, 순환잔골재의 전과정 환경영향을 평가하여 콘크리트를 제조함에 있어서 순환잔골재 사용의 유효성을 확인하였다.

* Corresponding author E-mail: sangheonkim@kict.re.kr

¹한국건설기술연구원 국민생활연구본부 전임연구원 (Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

²한국건설기술연구원 국민생활연구본부 수석연구원 (Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

³한국건설기술연구원 국민생활연구본부 선임연구위원 (Korea Institute of Civil engineering and Building Technology, Kyonggi-do, 10223, Korea)

2. 순환잔골재 콘크리트의 강도 특성 실험

2.1 실험개요

2.1.1 실험계획

본 연구에서는 순환잔골재를 활용한 콘크리트의 특성을 평가하기 위하여 목표 압축강도를 27MPa로 설정하고, 순환굵은골재 0, 30%에 따라 순환잔골재 혼입률을 0, 30, 60, 100% 수준으로 하였다.

실험 항목으로는 굳지 않은 순환잔골재 콘크리트의 유동 특성 파악을 위하여 공기량, 슬럼프, 경시변화 실험을 실시하였으며, 경화된 콘크리트의 특성을 파악하기 위해 순환잔골재 콘크리트의 재령 3, 7, 28(일)의 압축강도 시험을 진행하였다. 실험계획은 Table 1과 같다.

Table 1. Design of experiment

	Experimental factor	Experimental level
	Formulation	W/B(%)
S/A(%)		48.5
Slump(mm)		190 ± 25
Air content(%)		4.5 ± 1.5
Compressive strength(day)		3, 7, 28
Experiment	Fresh concrete	<ul style="list-style-type: none"> Slump Air content Elapsed time
	Hardened concrete	<ul style="list-style-type: none"> Compressive strength (3, 7, 28days)

2.1.2 사용재료

본 연구에서 순환잔골재를 사용한 콘크리트 시험체 제작을 위해 KS L 5201 포틀랜드시멘트에서 규정하고 있는 밀도 3.15g/cm³, 분말도 3,602cm³/g인 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 물리적, 화학적 특성은 Table 2, 3과 같다.

Table 2. Physical properties of cement

Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Setting time(hour)		Compressive strength(MPa)		
		Initial	Final	3days	7days	28days
3.15	3,602	4.5	7.15	23.0	29.3	43.8

Table 3. Chemical properties of cement

CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Ig. loss	etc. (%)	Total (%)
62.44	21.12	4.40	3.19	3.10	3.36	2.39	100

본 연구에서 실험을 위한 콘크리트 제조에 사용된 천연 잔골재는 일반 세척사를 사용하였으며, 천연굵은골재는 20mm 부순 자갈을 사용하였다. 또한, 순환골재의 경우 KS F 2573 콘크리트용 순환골재에서 규정한 기준에 적합한 국내 A사의 순환골재를 고도의 처리 방식에 의해 생산하여 사용하였다.

본 실험에 사용된 천연 굵은골재와 천연 잔골재의 물리적 특성은 Table 4와 같으며, 순환굵은골재와 순환잔골재의 물리적 특성은 Table 5와 같다. 순환잔골재와 순환 굵은골재의 표준입도 곡선은 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다(KS F 2573, 2014).

Table 4. Physical properties of aggregate

Type	Material	Density (g/cm ³)	Unit weight(kg/l)	Absorption (%)
Fine aggregate	Washed sand	2.56	1.64	0.74
Coarse aggregate	Crushed gravel	2.6	1.52	0.67

Table 5. Physical properties of recycled aggregate

Type	Unit	Fine aggregate	Coarse aggregate
Density	g/cm ³	2.33	2.51
Absorption	%	4.83	2.68
Inorganic matter	%	0.04	0.03
Inorganic matter	%	0.62	0.32
Stability	%	7.4	7.8
Amount of clay mass	%	0.5	0.1
Alkali aggregate reaction	-	Innocuous	Innocuous

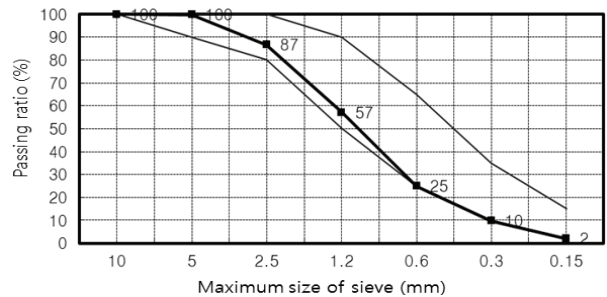


Fig. 1. Grain size distribution ratio of recycled sand

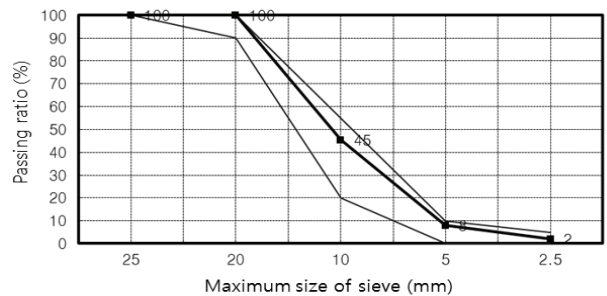


Fig. 2. Grain size distribution ratio of recycled coarse aggregate

Table 6. Mixing properties

Division (27MPa)	Recycled aggregate replacement ratio G:S(%)	W/C (%)	S/A (%)	Dosage (%)	Unit contents(kg/m ³)					
					Cement	Crushed gravel (G)	Sand (S)	Recycled coarse aggregate(RG)	Recycled fine aggregate(RS)	Water
1	0:0	49.5	48.5	0.64	315.0	907.8	955.5	0.0	0.0	156.0
2	0:30	49.5	48.5	0.64	315.0	907.8	668.8	0.0	272.3	156.0
3	0:60	49.5	48.5	0.29	315.0	907.8	382.2	0.0	544.6	156.0
4	0:100	49.5	48.5	0.37	315.0	907.8	0.0	0.0	907.7	156.0
5	30:0	49.5	48.5	0.64	315.0	635.4	955.5	245.3	0.0	156.0
6	30:30	49.5	48.5	0.58	315.0	635.4	668.8	245.3	272.3	156.0
7	30:60	49.5	48.5	0.29	315.0	635.4	382.2	245.3	544.6	156.0
8	30:100	49.5	48.5	0.37	315.0	635.4	0.0	245.3	907.7	156.0

Table 7. Properties of superplasticizer

Type	Shape	Color	pH	Specific gravity	Solid content(%)
Polycarboxylate	Liquid	Dark brown	4.6	1.105	20

콘크리트 배합비는 Table 6과 같다. 순환골재 품질기준에서 규정하고 있는 단위시멘트량 280kg/m³ 이상, 단위수량 185kg/m³ 이하의 조건을 만족하는 27MPa 콘크리트의 배합으로 물시멘트비 49.5%, 잔골재율 48.5%로 설정하였다. 본 실험의 단위수량은 고정하였으며, 혼화제 투입량 조절을 통해 슬럼프 기준에 맞추어 실시하였다. 혼화제로는 표준형 AE 감수제를 사용하였으며 혼화제의 특성은 Table 7과 같다.

2.1.3 실험방법

굳지 않은 콘크리트에 대한 실험으로 슬럼프와 공기량 시험을 실시하였다. <KS F 4009 레디믹스트 콘크리트>에 의거하여 슬럼프 시험은 기준치(190±15)mm로 설정 후 실시하였으며, 추가적으로 30, 60분 경시변화를 측정하였으며, 공기량은 <KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험 방법>에 준하여 실시하였으며, 이를 기준으로 순환골재 사용에 따라 4.5±1.5%로 설정하였다. 또한 30, 60분 경시변화를 측정하였다.

굳은 콘크리트의 실험항목으로는 Ø100×200mm 원주형 공시체를 제작하여 양생을 실시한 후 <KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험 방법>에 의거하여 3, 7, 28일 압축강도를 골재의 혼입률별로 측정하였다(KS F 2405, 2017).

2.2 실험결과 및 분석

2.2.1 슬럼프

슬럼프 시험결과는 Fig. 3을 통해 확인할 수 있다. 초기 슬럼프 값은 모두 190~200mm로 설정한 기준인 190±15mm에 만족하는 것으로 나타났다.

경시변화에 따른 콘크리트의 슬럼프 저감률을 확인한 결과, RG0, RS0에서 RG0, RS100까지 120~140mm의 슬럼프 값을 보이고 있으며, RG30, RS0에서 RG30, RS100까지 115~150mm의 슬럼프 값을 보였다. 이는 KS F 4009 레디믹스트 콘크리트에서 규정하고 있는 콘크리트의 최저 슬럼프 값인 80mm 이상의 기준에 만족하는 것으로 현장시공성에 대한 문제는 없을 것으로 사료된다.

다만, 순환잔골재 혼입량이 많아짐에 따라 콘크리트의 슬럼프 저감률이 증가하는 경향은 순환잔골재 표면 미분에 의한 높은 흡수율로 입자 사이의 수분이 저감되어 유동성이 저하되는 현상에 의한 것으로 사료되며, 양질의 혼화제 사용 등 슬럼프 저감률에 대한 대비책이 필요할 것으로 판단된다.

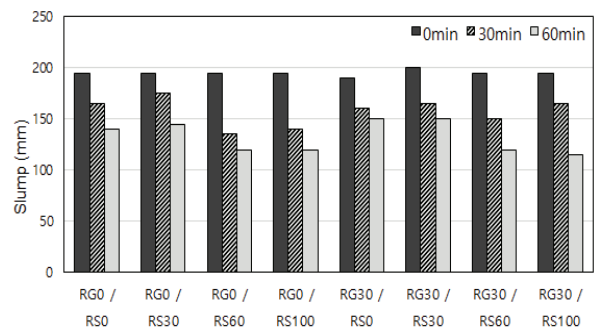


Fig. 3. Result of slump

2.2.2 공기량

순환잔골재 혼입률에 따른 공기량 특성은 Fig. 4와 같다.

순환잔골재 혼입에 따른 초기 공기량을 살펴보면 순환굵은골재 0%에서 순환잔골재 혼입률이 0, 30, 60, 100%로 증가할수록 공기량은 3.9, 3.7, 4.4, 4.5%로, 순환잔골재가 30%일 때 소폭 감소한 후 혼입률 증가에 따라 공기량도 증가하였다. 순환굵은골재 30%에서도 공기량은 4.3, 4.0, 4.4, 5.4%로 비슷한 경향을 나타내었다.

경시변화에 따른 공기량 값도 순환굵은골재 0%에서 순환잔골재가 0, 30, 60, 100%로 증가할수록 공기량은 2.8, 2.3, 2.6, 3.4%로 잔골재가 30%일 때 소폭 감소한 후 혼입률 증가에 따라 공기량도 증가하였고, 순환굵은골재 30%에서도 2.8, 2.5, 2.8, 3.0%로 비슷한 경향을 나타내었다.

이는 순환골재의 특성상 파쇄에 의한 생산으로 인해 입형이 불규칙하고 내부공극이 많은 모르타르의 성분에 의해 갇힌 공기가 증가한 것에 기인한 것으로 판단된다.

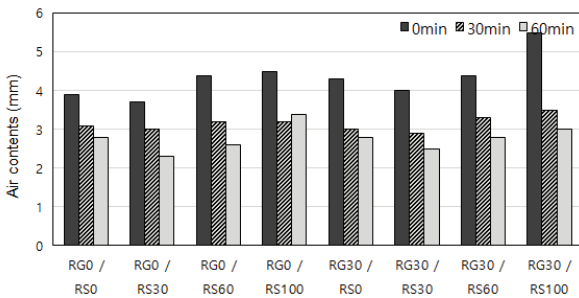


Fig. 4. Result of air contents

2.2.3 압축강도

Table 8과 Fig. 5는 순환잔골재가 0%, 30%일 때 순환잔골재의 혼입률에 따라 3, 7, 28일 강도를 나타낸 것이다.

순환굵은골재가 0%일 때 순환잔골재 혼입률이 0, 30, 60, 100%로 증가함에 따라 콘크리트 압축강도는 각각 29.1, 28.2, 28.1, 25.2MPa로 감소하였다.

순환굵은골재가 30%일 때 역시 순환잔골재 혼입률이 0, 30, 60, 100%로 증가함에 따라 압축강도는 각각 28.9, 27.5, 27.7, 24.8MPa로 순환잔골재가 0%일 때와 동일하게 압축강도가 감소하는 경향을 나타내었다.

위와 같이, 순환잔골재의 혼입률이 증가할수록 압축강도가 감소하는 현상은 앞서 언급한 공기량 증가와도 관련성이 있는 것으로 사료된다. 이는 파쇄에 의해 생산된 순환잔골재의 갈라짐 등 불규칙한 입형을 비롯하여 표면에 부착된 시멘트 페이스트의 다량의 공극

이 콘크리트의 압축강도를 저하시켜 발생하는 것으로 사료된다.

본 실험 결과에서 순환굵은골재의 혼입률과는 상관없이 순환잔골재의 혼입률이 0~60%인 범위의 콘크리트에서는 모두 설계기준강도인 27MPa를 만족하는 것으로 나타났으며 순환잔골재의 혼입률이 100%일 때만 27MPa에 못 미치는 것으로 확인된다.

이를 통해, 순환잔골재의 혼입률이 0~60%인 범위 내에서의 강도 확보를 위한 측면에서 감수 효과를 위해 혼화제를 사용하여 압축강도를 확보하는 데는 문제가 없을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 순환잔골재 혼입률에 따른 압축강도의 저하가 적절한 배합과 관리가 이루어질 경우 동일한 물-시멘트비에서 일정수준의 강도발현이 가능하다는 기존 연구결과와 부합하는 내용으로 미루어 볼 수 있다(Kim 2010).

다만, 앞서 언급된 바와 같이 순환잔골재 생산 과정에서 시멘트 페이스트가 완전히 제거되지 않고 순환잔골재에 입자형으로 남아 수분을 흡수하여 골재의 유동성을 저하시키고, 순환잔골재 자체의 갈라짐 등 불규칙한 입형이 공기량을 증가시키는 현상 등으로 인해 순환잔골재를 혼입한 콘크리트의 압축강도 추이에 대한 예측이 쉽지 않으며, 현장에서 순환잔골재 실용화를 위해서는 장기적으로 내구성 시험 등 추가적인 검증이 필요할 것으로 사료된다.

Table 8. Compressive strength

Division	3days	7days	28days
Plain	14.5	22.6	29.1
G0-S30	14.4	20.8	28.2
G0-S60	13.6	21.1	28.1
G0-S100	12.7	20.2	25.2
G30-S0	13.8	21.2	28.9
G30-S30	14.7	21.8	27.5
G30-S60	11.7	20.2	27.7
G30-S100	11.7	18.1	24.8

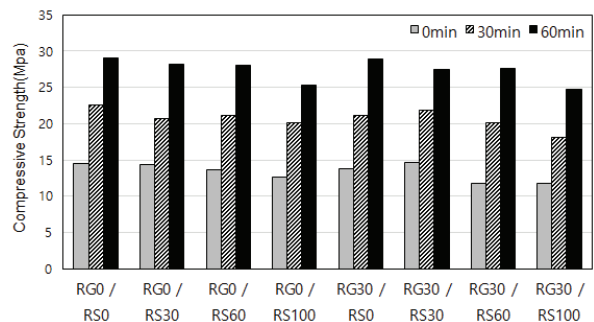


Fig. 5. Result of compressive strength

3. 전과정 환경영향 평가 및 비교·분석

3.1 개요

순환잔골재의 전과정 환경영향 평가는 ISO 기준의 전과정평가(LCA)기법을 준수하여 앞서 강도특성을 규명하기 위해 사용한 국내 A사의 순환잔골재를 생산하는 과정에서 발생하는 6가지 영향에 대하여 실시하였다. 순환잔골재의 환경영향 평가결과는 기존의 연구에서 건축용 골재의 LCI DB로 검토된 산림모래, 바다모래 및 하천모래의 환경영향과 비교·분석하였다(KICT 2017).

3.2 순환잔골재의 전과정 환경영향 평가방법

순환잔골재를 생산하는 과정에서 발생하는 물질은 대기 및 수질 등 생태계에 영향을 미친다. 기준물질 및 영향지수는 환경성적표지제도에서 6가지로 제시하고 있다. 지구온난화(GWP), 자원고갈(ADP), 오존층영향(ODP), 산성화(AP), 부영양화(EP), 광화학적 산화물생성(POCP) 등이며 보호 대상 관점에서 정량화 가능한 모델로, 본 연구에서도 순환잔골재의 전과정 환경영향 평가를 위한 범주로 선정하였다.

환경영향평가 과정은 크게 분류화(Classification), 특성화(Characterization), 정규화(Normalization), 가중화(Weighting) 등으로 구분된다. 분류화는 목록분석에서 도출된 물질을 해당 환경영향범주로 취합하며, 특성화는 환경영향범주로 분류된 항목들이 미치는 영향을 정량화하고, 정규화는 환경영향범주에 미치는 영향을 일정지역, 기간의 영향으로 나누는 역할, 가중화는 각 영향 범주 간 상대적 우위를 결정한다.

본 연구에서는 순환잔골재 특성을 규명하기 위해 국내 현 실정에 맞는 정규화, 가중화 인자가 개발되어 있지 않은 상태로 특성화까지만을 평가하였다. Fig. 6을 통해 앞서 언급한 환경영향평가의 각 과정과 6대 환경영향 범주가 어떠한 연관성을 지니는지를 설명하였다. 이와 함께 순환잔골재 전과정 환경영향평가를 위해 고려된 범위를 보여주하고자 하였다.

전과정 환경영향 평가의 기능단위는 1kg로 하였으며, 시스템 경계는 순환잔골재의 생산단계(Cradle to Gate)로 하였다.

폐콘크리트는 건설구조물 철거/해체 시 발생한다. 순환잔골재는 현장에서 폐콘크리트를 잘게 부수어 분리한 골재만을 모아서 재사용한다. 나머지 물질은 타 제품으로 활용되지 않을 경우에는 건설폐기물로 분류된다. 이처럼 건설구조물 해체과정에서 해체 장비 운용에 따른 다량의 에너지가 사용되고 이에 따른 환경영향 물질이 배출된다. 그러나 환경영향 평가 시 폐콘크리트는 부산물

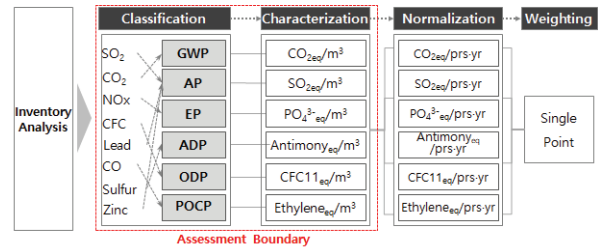


Fig. 6. Process of environmental impact assessment

Table 9. LCI database

Division		Reference	Nation
Raw material	Waste concrete	National LCI	Korea
Energy	Electric	National LCI	Korea
	Diesel	National LCI	Korea
	Kerosene	National LCI	Korea
Transportation	Truck	National LCI	Korea

의 형태로 구분하며 이전의 산업공정은 환경영향 평가범위에 포함되지 않는다. 따라서 건설구조물 해체 시 폐콘크리트가 배출되는 과정은 환경영향 평가범위에서 제외하고 운송, 제조단계를 순환잔골재의 생산단계로 구분하였으며, 1년 동안 각 단계별로 투입(Input)/배출(Output) 물질이 대기 및 수계에 미치는 환경영향을 평가하였다. 이를 위해 Table 9와 같이 환경부에서 구축한 LCI DB(Life Cycle Index DataBase)를 적용하였다.

3.3 순환잔골재의 전과정 환경영향 평가

3.3.1 운송 단계의 환경영향 평가

1년 동안 철거/해체 현장에서 수집된 폐콘크리트는 국내 A사의 순환골재 생산공장으로 트럭 운송되며, 거리는 평균 39km이다. 이때의 물량과 트럭 1대당 적재량으로 장비 대수를 산출하고, 거리를 적용하여 환경영향을 평가하였다.

$$\text{Transportation } E_i = \sum \{ (M(i) / Wt) \times d \times D \} \quad (1)$$

Table 10. Environmental impact of transportation

Equipment	GWP (kg-CO ₂ /kg)	ADP (kg-Antimony _{eq} /kg)	ODP (kg-CFC11 _{eq} /kg)	AP (kg-SO ₂ _{eq} /kg)	EP (kg-PO ₄ ³⁻ -eq/kg)	POCP (kg-Ethylene _{eq} /kg)
Transport	4.52E-05	3.05E-07	1.67E-11	3.42E-07	6.08E-08	1.01E-07

Transportation E_i 는 운송단계 환경영향[kg-unit/kg], $M_{(i)}$ 은 페 콘크리트[ton], W_t 는 (i)운송장비 적재량[ton], d 는 운송거리[km], D 는 경유의 영향범주별 특성화 값[kg-unit/L]이다.

3.3.2 제조 단계의 환경영향 평가

제조단계는 페콘크리트를 선별, 파쇄하여 순환잔골재를 제조하는 과정이다. 본 연구에서는 국내 A사의 생산방식에 대한 환경영향을 평가하기 위해 1년간 생산설비에서 사용된 전력 및 에너지원 사용량을 적용하여 평가하였다.

$$\text{Manufacture } E_i = \sum[(E(i)/W_a) \times C] \quad (2)$$

여기서 i 는 전력, Manufacture E_i 는 제조단계 환경영향[kg-unit/kg], W_a 는 순환잔골재 생산량[kg], $E_{(i)}$ 는 에너지원 사용량[kwh], C 는 환경영향 범주별 특성화 값[kg-unit/kwh] 이다. 순환잔골재 생산 과정에서 소요되는 전력 및 에너지원 사용량 등을 구분하여 Table 11과 같이 나타내고, 순환잔골재 생산 과정에서 각 소요장비별 전력사용량에 의한 환경영향 배출량을 Table 12와 같이 산출하였다.

Table 11. Energy source & usage of manufacture

Process		Usage
Crusher(jaw&con)		1,203,100kw
Sand		601,555kw
Feeders		200,518kw
Separating & classifier		401,037kw
Screen		601,555kw
Diesel	Loader	165,119L
	Excavator	122,632L

Table 12. Environmental impact of manufacture

Energy	GWP (kg-CO ₂ /kg)	ADP (kg-Antimony _{eq} /kg)	ODP (kg-CFC11 _{eq} /kg)	AP (kg-SO ₂ _{eq} /kg)	EP (kg-PO ₄ ³⁻ -eq/kg)	POCP (kg-Ethylene _{eq} /kg)
Manufacture	2.87E-03	1.12E-05	4.50E-10	6.80E-06	1.17E-06	3.88E-06

3.3.3 순환잔골재의 전과정 환경영향 평가결과

운송 및 제조 단계에 의해 발생된 순환잔골재의 전과정 환경영향 평가결과는 Table 13과 같다.

Table 13. Environmental impact of recycled aggregate

Division	GWP (kg-CO ₂ /kg)	ADP (kg-Antimony _{eq} /kg)	ODP (kg-CFC11 _{eq} /kg)	AP (kg-SO ₂ _{eq} /kg)	EP (kg-PO ₄ ³⁻ -eq/kg)	POCP (kg-Ethylene _{eq} /kg)
Transport	4.52E-05	3.05E-07	1.67E-11	3.42E-07	6.08E-08	1.01E-07
Manufacture	2.87E-03	1.12E-05	4.50E-10	6.80E-06	1.17E-06	3.88E-06
Total	2.91E-03	1.15E-05	4.66E-10	7.14E-06	1.23E-06	3.98E-06

3.4 환경영향 결과 비교 · 분석

순환잔골재의 환경영향을 건축용 골재의 산림모래, 바다모래 및 하천모래의 환경영향(KICT 2017)과 비교 · 분석한 결과는 Table 14 및 Fig. 7과 같다.

순환잔골재 생산과정에서 배출되는 환경영향 중 주로 이야기 되는 CO₂와 직접적인 연관성을 지닌 지구온난화 지수(GWP)는 바다모래와 하천모래에 비해 높게 나타났으나, 산림모래에 비해 약간 적은 것으로 나타났다. 이는 산림모래를 골재로 이용하기 위한 채취 과정에서 전기, LNG, 석탄 등의 에너지사용량이 순환잔골재를 생산하는 과정의 에너지사용량에 비해 높아 지구온난화에 미치는 주요 요소인 CO₂, CH₄, N₂O배출량이 크기 때문으로 사료된다.

자원고갈(ADP) 영향은 물리적인 자원의 소모 · 고갈뿐만 아니라 자원의 안정적인 공급과 채굴 시 자연환경 파괴 등의 인체 및 생태계에 주는 영향을 고려한 요소이다. 이를 통해 순환잔골재 생산으로 인한 주요 영향물질인 Iron(Fe), Natural gas, Hard coal, Lead(Pb), Uranium(U) 등의 영향에 비해 바다와 하천에서의 모래 채취로 인한 자원소모, 자연환경 파괴 등에 끼치는 영향이 비교적 적은 반면, 산림에서의 모래 채취로 인한 자원 소모의 우려를 비롯해 안정적으로 공급이 가능한 산림자원의 부족과 자연환경을 파괴하는 영향이 큰 것으로 판단된다.

산성화(AP) 영향은 주로 원인물질을 일으키는 채취 장비 등에 의해 대기 중 산성화 물질 농도가 증가되고, 이러한 물질은 토양으로 침강하여 토양 산성화를 일으키며, 다음으로 강우 등에 의한

Table 14. Environmental impact comparison of aggregate

Division	GWP (kg-CO ₂ /kg)	ADP (kg-Antimony _{eq} /kg)	ODP (kg-CFC11 _{eq} /kg)	AP (kg-SO ₂ _{eq} /kg)	EP (kg-PO ₄ ³⁻ -eq/kg)	POCP (kg-Ethylene _{eq} /kg)
R.F.A	2.91E-03	1.15E-05	4.66E-10	7.14E-06	1.23E-06	3.98E-06
Sea sand	2.61E-03	7.81E-06	4.26E-10	1.15E-05	2.07E-06	1.32E-06
River sand	9.58E-04	6.39E-06	3.48E-10	9.28E-06	1.46E-06	1.59E-06
Land sand	3.02E-03	1.96E-05	8.16E-12	5.27E-06	9.76E-07	2.35E-06

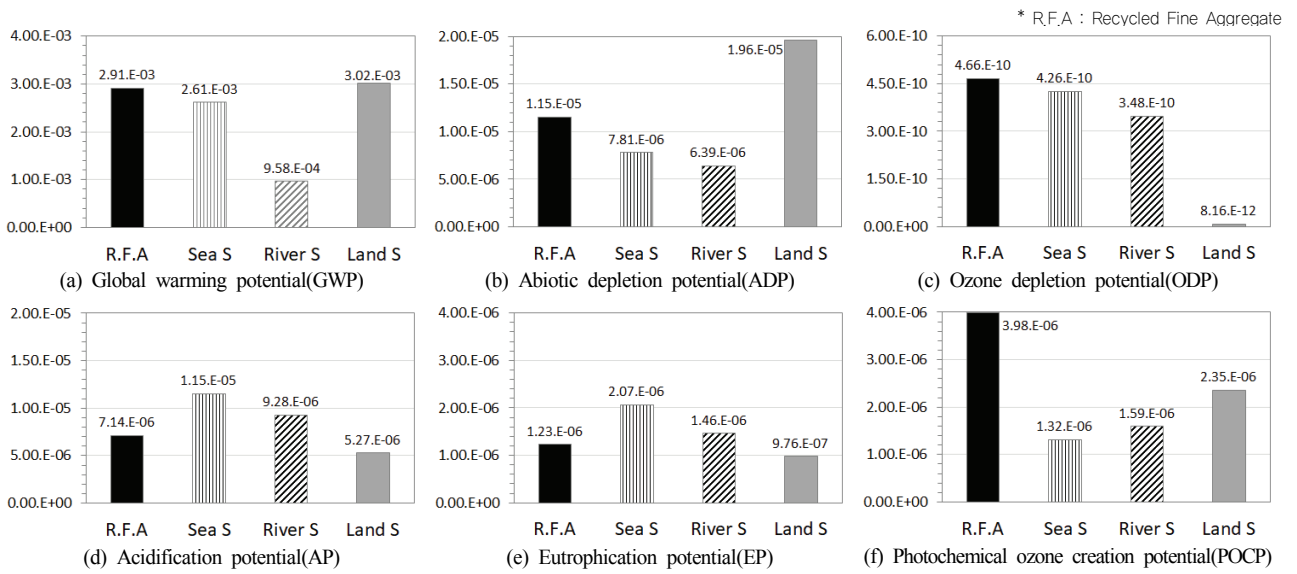


Fig. 7. Environmental impact comparison of aggregate

산성화 원인물질의 용출을 통해 수계 산성화를 야기하는 현상에 의해 나타난다.

부영양화(EP) 영향은 토양과 수중에서 영양상의 균형이 깨져 물의 이용에 방해 될 정도의 부착성, 부유성 수중식물이 성장하는 현상을 말한다. 이는 대기 중으로 배출된 질소화합물, 수중으로 배출된 질소, 인 및 유기물질 등으로 인해 일어나는 현상으로 주로 수중에서 많이 일어난다.

이처럼 산성화와 부영양화는 수계·수중에 주로 영향을 미치며 이는 바다모래와 하천모래에 의한 영향이 순환골재의 영향에 비해 크게 나타나는데 기여한 것으로 사료된다. 산림모래에 대한 영향은 이보다 적은 것으로 미루어 볼 수 있다.

오존층(ODP) 영향은 바다모래와 하천모래에 비해 조금 상회고, 산림모래 영향에 비해 현저히 크게 나타났다. 오존층파괴에 대한 인자는 오존층을 파괴하는 특정물질의 정도를 CFC-11에 의한 오존감소 정도를 기준으로 나타내는 것으로 이러한 물질이 순환골재를 생산함에 있어 다른 골재 생산에 비해 소량 더 발생하여 일어난 것으로 사료된다.

광화학산화물생성(POCP)에 의한 영향은 바다모래, 하천모래, 산림모래 등에 비해 약 2~3배 정도 큰 것으로 나타났다. 광화학 산화물을 생성하는 오염물질로는 휘발성 유기화합물(VOCs, Volatile Organic Compounds), CO, NO₂, 알데히드, PAN 등이 있으며 순환골재의 생산 과정에서 이러한 물질이 다량 배출되어 일어나는 현상으로 순환골재 생산 과정에서의 광화학 산화물 생성은 줄이기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

상기 언급한 바와 같이 광화학산화물생성에 의한 영향을 제외한 산성화, 자원고갈, 오존층파괴, 산성화, 부영양화 등 5가지 요인을 고려할 시, 순환골재 생산에 의한 영향이 타 골재에 비해 적거나 크게 상회하지 않는 것으로 미루어 볼 때, 전과정 환경영향 평가 관점에서 순환골재의 사용이 타 골재를 대체하기 위한 재료로 유효할 것으로 판단된다. 다만, 6대 환경영향 범주 간 상대적 우위를 결정할 수 있는 지표를 통한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 순환골재의 혼입률에 따른 콘크리트의 강도 특성을 실험을 통해 확인하고, 전과정 평가 기법을 이용하여 순환골재의 전과정 환경영향을 평가하는 것을 목적으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 슬럼프는 모두 190±15mm 기준에 만족하고, 순환골재 혼입률 증가에 따라 슬럼프 값은 소량 감소하였으며, KS F 4009 레디믹스트 콘크리트에서 규정하고 있는 콘크리트의 최저 슬럼프 값인 80mm 이상의 기준에 만족하는 것으로 현장시공성에 대한 문제는 없을 것으로 사료된다.
- 2) 압축강도는 순환골재 혼입률 증가에 따라 점차 감소하였으나, 순환골재 혼입률이 0~60%일 때 설계기준강도를 만족하였으며 100%일 때 설계기준강도에 비해 적은 것으로 나타났다.
- 3) 순환골재의 전과정 환경영향은 지구온난화 2.91E-03

CO_{2eq}/kg, 자원고갈 1.15E-05 Antimony_{eq}/kg, 오존층파괴 4.66E-10 CFC_{11eq}/kg, 산성화 7.14E-06 SO_{2eq}/kg, 부영양화 1.23E-06 PO₄^{3eq}/kg, 광화학적 산화물 3.98E-06 kg-Ethylene_{eq}/kg로 바다모래, 하천모래, 산림모래보다 지구온난화, 자원고갈, 오존층파괴, 산성화, 부영양화 측면에서 적거나 크게 상회하지 않는 것으로 나타났다.

- 4) 다만, 광화학적산화물생성에 대한 환경영향은 타 골재에 비해 2~3배 많은 것으로 나타나 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구 결과로 순환잔골재 콘크리트의 슬럼프, 공기량, 압축강도 등의 성능 저하는 크게 나타나지 않았으며, 환경영향도 바다모래, 하천모래, 산림모래에 비해 적거나 크게 상회하지 않는 것으로 확인되어 콘크리트를 제조함에 있어서 순환잔골재 사용이 유효할 것으로 사료된다.

다만, 도출된 결과는 모든 순환잔골재의 특성 및 환경영향을 대표하는 값은 아니며, 본 연구를 기반으로 콘크리트의 강도 및 환경영향 지수의 범위설정을 하고, 순환잔골재 사용 활성화를 위해 어떠한 노력이 추가적으로 필요할지 정량적인 표현이 가능할 것으로 사료된다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(19SCIP-C120606-04)에 의해 수행되었습니다.

References

Choi, W.Y., Lee, S.H., Kim, S.H. (2017). A comparative study on the quality of recycled aggregate for concrete by crushing method, Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute, **5(2)**, 121-129 [in Korean].
Kim, H.J. (2010). Compressive Strength of Concrete with Different Substitution Ratio of Recycled Fine Aggregates, Jeju National University [in Korean].
Kim, S.C., Park, D.K., Yoog, Y.C. (2016). Characteristic of cementitious mortar using high volume of recycled fine aggregate, Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute, **4(3)**, 235-242 [in Korean].
Kim, S.H., Jeon, C.S., Lee, S.H. (2018). An experimental study on the estimation of compressive strength and the physical properties of recycled aggregate concrete of fixed slump, Journal of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **22(2)**, 51-58 [in Korean].
Korea Institute of Civil engineering and Buiding Technology. (2017). Final Report of Integrated Development of CO₂ Management Technology for Construction Materials, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
KS F 2405. (2017). Standard test Method for Compressive Strength of Concrete.
KS F 2573. (2014). Recycled Aggregate for Concrete.
KS F 4009. (2016). Ready-Mixed Concrete.
Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2017). Recycled Aggregate Quality Standard, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2017-1711.

순환잔골재 혼입 콘크리트의 강도 특성 및 전과정 환경영향 평가 연구

본 연구에서는 순환잔골재의 혼입률에 따른 콘크리트의 강도 특성을 실험을 통해 확인하고, 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessmet) 기법을 이용하여 순환잔골재의 전과정 환경영향을 평가하여, 콘크리트를 제조함에 있어서 순환잔골재 사용의 유효성을 확인하여 순환골재 콘크리트 활용을 위한 기초적 자료로 사용하는 것을 목적으로 한다.

이를 위해, 목표설계기준압축강도는 27MPa로 하였으며, 순환골재 실용화를 고려하여 순환잔골재의 혼입률을 0, 30, 60, 100%로 설정하여 굳지 않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트에 대한 실험을 통해 슬럼프, 공기량, 압축강도 등을 확인하였고, 순환잔골재의 전과정 환경영향을 평가하고 타 골재와 환경영향을 비교·분석 하였다.