

순환굵은골재를 활용한 콘크리트의 강도 특성 및 전과정 환경영향 평가에 관한 연구

A Study on the Strength Properties and Life Cycle Assessment of High Strength Concrete Using Recycled Coarse Aggregate

최원영^{1*} · 이세현¹ · 전찬수¹ · 김태형¹

Won-Young Choi^{1*} · Sae-Hyun Lee¹ · Chan-Soo Jun¹ · Tae-Hyoung Kim¹

(Received November 1, 2017 / Revised January 17, 2018 / Accepted February 19, 2018)

Waste concrete accounts for the largest portion of construction waste, and the supply of natural aggregate is unstable. Therefore, importance of using recycled aggregate is emphasized. The purpose of this study is to investigate the mechanical properties of high strength concrete according to the replacement rate of recycled coarse aggregate. For this purpose, the target design compressive strength was set to 40MPa, and the substitution rates of the recycled coarse aggregate were set to 0%, 30%, 60%, and 100%, respectively. Through experiments on the unreinforced concrete and hardened concrete, The validity of the use was confirmed. In addition, LCA method was used to evaluate the environmental impact of recycled aggregates and to compare and analyze the environmental impacts of the aggregates.

키워드 : 순환굵은골재, 콘크리트, 전과정평가

Keywords : Recycled coarse aggregate, Concrete, Life cycle assessment

1. 서론

국내 건설폐기물은 꾸준히 증가하여 최근 전체 폐기물 발생량의 50% 이상을 점유하고 있으며, 그중 폐콘크리트가 60% 이상으로 가장 큰 비중을 차지하고 있어 최근 천연골재의 공급 불안정이 제기됨에 따라 순환골재 사용에 대한 중요성이 부각되고 있다 (Choi and Yang 2012).

국내 순환골재는 대체로 표면에 부착되어 있는 시멘트 페이스트 등에 의해 흡수율이 높고, 밀도의 편차가 크며, 유·무기 이물질 등이 과다 포함되어 있는 등 품질편차가 많이 발생한다. 이로 인해 골재 자체 흡수율은 높아지며, 콘크리트 배합 시 강도와 탄성계수가 낮아지는 원인인 단위수량이 높아지는 문제를 초래한다. 이를 원인으로 순환골재가 건축용 콘크리트 골재로 사용되지 못하고 있는 실정이다(Xuan 2015).

현재 국내에서 사용되는 콘크리트 강도는 30MPa 이상이 많으

며, 40MPa 이상의 고강도 콘크리트의 사용 또한 증가되어 순환골재의 사용이 한정되면, 콘크리트용 골재 공급으로 인한 환경파괴 및 폐콘크리트 처리 문제가 해결되기 쉽지 않은 상황이다. 또한, 순환굵은골재를 사용한 콘크리트의 특성과 이를 활용한 환경영향 평가에 대한 연구는 미비하여, 순환골재 사용의 확대를 위해서 순환굵은골재 콘크리트에 대한 연구가 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 순환굵은골재의 혼입률에 따른 콘크리트의 강도 특성을 실험을 통해 확인하고, 전과정평가(LCA, Life Cycle Assessment) 기법을 이용하여 순환골재의 전과정 환경영향을 평가하는 것을 목적으로 한다.

이를 위해, 목표설계기준 압축강도는 30MPa로 하였으며, 순환골재의 실용화를 고려하여 순환잔골재의 혼입률을 0, 30%로 하고, 순환굵은골재의 혼입률은 0, 30, 60, 100%로 설정한 뒤 굳지 않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트에 대한 실험을 통해 콘크리트 제조함에 있어서 순환골재 사용의 유효성을 확인하였다.

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

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

2. 실험계획

본 연구에서 목적으로 하는 순환굵은골재 혼입률에 따른 콘크리트의 경화 전후 역학적 특성을 평가하기 위해서는 동일한 물시멘트비가 설정되어야 할 것으로 판단되어 33.9%로 설정하였으며, 순환잔골재의 혼입률을 0, 30(%), 순환굵은골재는 0, 30, 60, 100(%) 수준으로 하였다.

Table 1. Design of experiment

	Experimental factor	Experimental level
Formulation	W/B(%)	33.9
	Slump(mm)	190±25
	Air content(%)	4.5±1.5
	Compressive strength(day)	3, 7, 28
Experiment	Fresh concrete	· Slump · Air content · Elapsed time
	Hardened concrete	· Compressive strength (3, 7, 28 days)

Table 2. Physical properties of aggregate

Type	Density (g/cm ³)	Unit weight(kg/l)	Absorption (%)
Crushed sand	2.58	1.69	0.92
Wash sand	2.56	1.64	0.74
Aggregate	2.6	1.52	0.67

Table 3. Physical properties of recycled aggregate

Type	Unit	Coarse aggregate (KS)	Fine aggregate (KS)
Density	g/cm ³	2.51(2.5 ↑)	2.33(2.2 ↑)
Absorption	%	2.68(3.0 ↓)	4.83(5.0 ↓)
Impurity contents (organic matter)	%	0.03(1.0 ↓)	0.04(1.0 ↓)
Impurity contents (Inorganic matter)	%	0.32(1.0 ↓)	0.62(1.0 ↓)
Stability	%	7.8(12 ↓)	7.4(10 ↓)
Percentage of absolute volume	%	60.5(55 ↑)	62.9(53 ↓)
Amount of clay mass	%	0.1(1.0 ↓)	0.5(7.0 ↓)
Alkali aggregate reaction	-	Innocuous	Innocuous

* () 안의 수치는 순환굵은골재와 순환잔골재 KS 규격임.

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

순환골재 콘크리트 제작에 사용된 천연굵은골재는 20mm 부순 자갈을 사용하였으며, 순환골재 생산 인증을 받은 업체인 H사의 고도처리방식에 의해 생산된 KS F 2573(콘크리트용 순환골재)에 의거 이에 부합하는 순환잔골재 및 굵은골재를 사용하였다. 또한, 천연잔골재는 일산쇄사 및 세척사를 각각 50%씩 혼입하여 사용하여 실험을 진행하였다. 본 실험에 사용된 천연굵은골재와 천연잔골재의 물리적 특성은 Table 2에 나타냈으며, 순환굵은골재와 잔골재의 물리적 특성은 Table 3과 같다. 순환굵은골재와 순환잔골재의 표준입도 곡선은 각각 Fig. 1과 2에 나타내었다(KS F 2573).

본 연구에서 순환굵은골재를 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 Tables 4, 5와 같다. 또한, 본 실험에서 사용한 혼화제로는 표준형 AE 감수제를 사용하였으며, 사용된 혼화제의 특성은 Table 6과 같다. 콘크리트 배합비는 Table 7과 같으며 순환

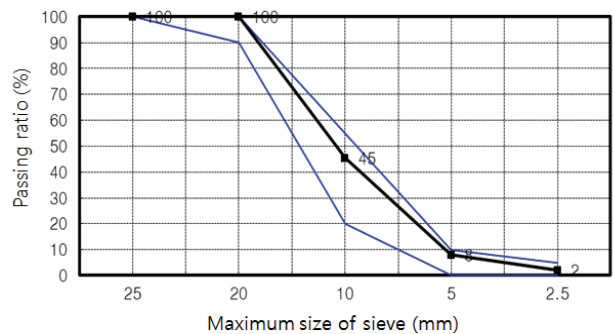


Fig. 1. Grain size distribution ratio of recycled coarse aggregate

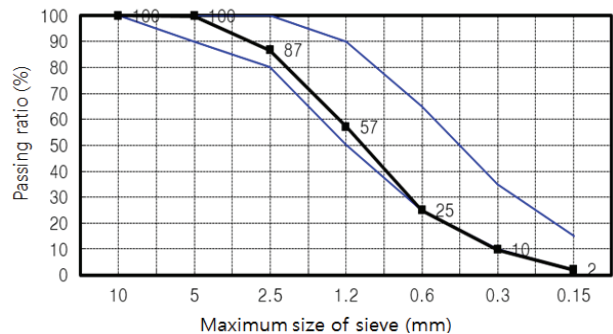


Fig. 2. Grain size distribution ratio of recycled sand

골재 품질기준에서 규정하고 있는 단위 시멘트양 280kg/m³ 이상, 단위수량 185kg/m³ 이하의 조건을 만족하는 40MPa 콘크리트의 배합으로 물시멘트비 33.9%, 잔골재율 49.0%로 설정하였다. 또한 배합표 내에 G는 천연굵은골재, S는 천연잔골재를 RG와 RS는 각각 순환굵은골재와 순환잔골재로 정의하였다.

굳지 않은 콘크리트에 대한 실험으로 슬럼프와 공기량 시험을 실시하였다. 슬럼프 시험은 <KS F 2402 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 슬럼프 시험방법>에 의거하여 기준치 190±15mm로 설정 후 실시하였으며, 추가적으로 30, 60분 경시변화를 측정하였다. 공기량은 <KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험 방법>

에 준하여 실시하였으며, 이를 기준으로 순환굵은골재 사용에 따라 5.5±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).

3. 순환골재 콘크리트 특성 실험결과 및 분석

3.1 슬럼프

본 연구에서 순환굵은골재 혼입에 따른 콘크리트의 유동특성을 평가하고자 슬럼프 기준을 190±15mm로 설정하였으며, 30, 60분 경시변화를 측정하여 슬럼프 유지성을 평가하였다.

슬럼프 시험 결과는 Fig. 3을 통해 확인할 수 있다. 초기 슬럼프 기준은 모두 190±15mm에 만족하는 것으로 나타났다. RS0, RG0에 비해 RS0, RG100으로 순환골재 혼입률이 증가할수록 슬럼프 값은 195~205mm로 증가하였으며, RS30, RG0에 비해 RS30, RG100에서도 이와 비슷한 경향을 나타내었다. 이는 일반적으로 천연골재는 입형이 대체로 거칠고 모난 형태이나, 순환골재의 경우 폐콘크리트의 파쇄 공정을 통해 생산되므로 잣은 마모 등에 의해 천연골재에 비해 둥근 형태를 띠게 되므로 순환굵은골재의 혼입률이 높아질수록 콘크리트 슬럼프 값이 증가하는 것으로 사료된다.

한편, 경시변화에 따른 콘크리트의 슬럼프 값을 확인하였을 때 RS0, RG0에서 RS0, RG100까지 130~150mm의 슬럼프 값을 보이고 있으며, RS30, RG0에서 RS30, RG100까지 110~130mm의 슬

Table 4. 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 5. 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

Table 6. Properties of superplasticizer

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

Table 7. Mixing properties

Division (40MPa)	Recycled aggregate replacement ratio S:G(%)	W/C (%)	S/A (%)	Dosage (%)	Unit contents(kg/m ³)						
					Cement	Sand		Coarse aggregate	Recycled sand	Recycled coarse aggregate	Water
						Crushed sand	Washed sand				
1	0:0	33.9	49.0	0.7	390.0	458.5	458.5	946.4	0	0.0	132.2
2	0:30	33.9	49.0	0.7	390.0	458.5	458.5	662.5	0	262.1	132.2
3	0:60	33.9	49.0	0.7	390.0	458.5	458.5	378.6	0	524.2	132.2
4	0:100	33.9	49.0	0.7	390.0	458.5	458.5	0.0	0	873.6	132.2
5	30:0	33.9	49.0	0.7	390.0	321.0	321.0	946.4	252.0	0.0	132.2
6	30:30	33.9	49.0	0.7	390.0	321.0	321.0	662.5	252.0	262.1	132.2
7	30:60	33.9	49.0	0.7	390.0	321.0	321.0	378.6	252.0	524.2	132.2
8	30:100	33.9	49.0	0.7	390.0	321.0	321.0	0.0	252.0	873.6	132.2

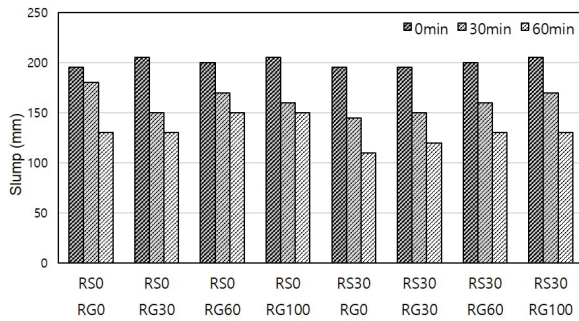


Fig. 3. Result of slump test

럼프 값을 보였다. 이는 KS F 4009 레디믹스트 콘크리트에서 규정하고 있는 보통콘크리트 최저 슬럼프 값인 80mm 이상의 기준을 만족하는 것으로 현장시공성에 대한 문제는 없을 것으로 사료된다. 오히려 순환잔골재의 혼입률이 0~30%로 증가할 때, 슬럼프의 평균값이 140~120mm으로 감소하는 경향을 나타냄에 따라 슬럼프 값은 순환굵은골재에 비해 순환잔골재의 영향이 더 큰 것으로 사료되어 이에 따른 특성 검토가 필요한 것으로 판단된다.

3.2 공기량

순환굵은골재 혼입률에 따른 공기량 특성 시험데이터는 Fig. 4와 같다. 순환굵은골재 혼입에 따른 초기 공기량을 살펴보면 순환잔골재 0%에서 순환굵은골재가 0, 30, 60, 100(%)로 증가할수록 공기량은 3.3, 3.2, 3.7, 3.8(%)로 굵은골재가 30%일 때 소폭 감소한 후 혼입률 증가에 따라 공기량도 증가하였다. 순환잔골재 30%에서도 3.9, 3.7, 4.7, 5.4(%)로 비슷한 경향을 나타내었다. 경시변화에 따른 공기량 값은 RS0, RG0~RS0, RG100에서 2.3~3.8mm 값을 보였으며, RS30, RG0~RS30, RG100에서는 2.9~5.4mm 값을 보였다.

순환굵은골재 50% 이내 혼입 시 콘크리트 내부 굵은골재간 연속입자 분포를 유지하고, 이로 인해 공극률이 감소하여 공기량이 감소하는 것으로 사료된다. 순환굵은골재 혼입률이 50% 이상으로 증가할 시 굵은골재 간 연속 입도량 증가와 순환골재 자체의 공극함유로 인해 공기량이 증가하는 것으로 사료된다. 일반적으로 공기량 1% 증가에 따라 콘크리트의 압축강도는 4~6% 감소가 나타나는 현상에 발생할 염려가 있으나 본 연구 결과 공기량은 3.2~5.4% 범위로 4.5±1.5% 기준에 비해 작아 압축강도에 큰 영향은 없을 것으로 판단된다.

일반적으로 순환골재 사용은 경시변화 영향이 큰 것으로 알려져 있으나 본 실험에서는 변화가 미미한 것으로 확인되며, 이는 순환골재가 포함하고 있는 미분말에 의한 분체량의 증가로 인해

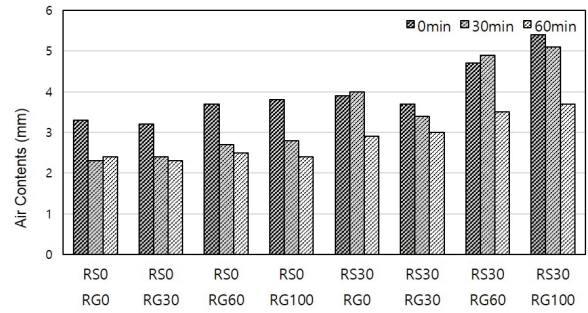


Fig. 4. Result of air content test

초기경화에 영향을 미치지 않기 때문에 사료된다.

3.3 압축강도

Table 8은 각각 순환잔골재가 0%, 30%일 때 순환굵은골재의 혼입률에 따라 3, 7, 28일 강도를 나타낸 것이다. 순환잔골재가 0%일 때 순환굵은골재의 혼입률이 0%에서 압축강도가 37.11MPa인 것에 반해, 30%일 때 39.97MPa로 더 높게 나타났으며, 60%, 100%로 증가함에 따라 점차 36.12, 35.88MPa로 감소하는 것으로 확인되었다. 순환잔골재가 30%일 때 역시 순환굵은골재 혼입률이 0, 30, 60, 100%로 증가함에 따라 압축강도는 각각 32.39, 34.48, 31.82, 31.92MPa로 순환잔골재가 0%일 때와 유사하게 순환골재 혼입률이 30%일 때 압축강도가 더 높아지는 경향을 나타내었다. 이는 당초, 순환굵은골재 자체의 낮은 품질로 인해 압축강도의 저하를 예상하였지만, 순환굵은골재가 치환됨에 따라 공기량의 감소와 굵은골재의 연속입자분포의 구성으로 인해 콘크리트 내부 공극을 밀실하게 채워 주는 것에 기인하여 순환굵은골재를 사용하는 것에도 불구하고 압축강도가 증가하는 것으로 판단된다.

기존 연구에 의하면 순환굵은골재의 혼입률이 약 50% 미만일 경우에는 압축강도 등 성능 저하가 크게 없는 것으로 보고되고 있으며, 순환골재의 혼입률이 30% 범위에서는 물-시멘트비의 감소효과로 인해 부분적으로 압축강도가 증가되며 내구성 또한 큰 문제가 없는 것으로 보고되고 있다. 이러한 추이에 의해 콘크리트용 순환골재 품질기준에서는 30% 범위 이내로 순환골재를 혼입하여 사용하는 것을 권장하고 있다(Yang 2016).

다만 본 실험을 통해 생산된 순환굵은골재 콘크리트가 설계기준강도인 40MPa에 미치지 못하는 것은 굵은골재 자체가 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향이 상대적으로 적으며, 단위 시멘트 양과 잔골재 품질 등의 요소에 의한 편차가 발생하였을 가능성이 있을 것으로 사료되어 시멘트 및 잔골재에 의한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Table 8. Compressive strength

Division	3days	7days	28days
Plain	22.63	30.64	37.11
S0G30	22.86	31.19	39.97
S0G60	22.64	30.04	36.12
S0G100	22.33	29.58	35.88
S30G0	18.62	27.52	32.39
S30G30	20.88	29.45	34.48
S30G60	18.93	26.97	31.82
S30G100	17.34	26.87	31.92

4. 전과정 환경영향 평가

4.1 개요

본 장에서는 ISO 기준의 전과정평가(LCA)기법을 준수하여 순환골재의 환경영향을 평가하고 인공경량골재와 슬래그 골재의 환경영향과 비교·분석하였다. 순환골재 전과정 영향평가를 위한 환경영향 범주는 지구온난화, 산성화, 부영양화, 오존층 파괴, 광화학적산화물생성, 자원고갈 등을 대상으로 선정하였다. 전과정 환경영향 평가 시 기능단위는 1kg로 하였으며, 시스템 경계는 콘크리트 생산단계(Cradle to Gate)로 하였다. 또한, 순환골재의 생산 단계(Product stage)를 원재료, 운송, 제조단계로 구분하였으며, 각 단계별로 투입(Input)/배출(Output) 물질이 대기 및 수계에 미치는 환경영향을 평가하였다. 이를 위해 한국의 LCI DB(Life Cycle Index DataBase)를 조사 및 적용하였다.

환경영향평가는 목록분석에서 도출된 물질을 해당 환경영향범주로 취합하는 분류화, 환경영향범주로 분류된 항목들이 미치는 영향을 정량화하는 특성화, 환경영향범주에 미치는 영향을 일정지역, 기간의 영향으로 나누는 정규화, 영향범주 간 상대적 우위를 결정하는 가중화로 구분된다. 현재 국내 실정에 맞춰 개발된 순환골재 정규화, 가중화 인자가 없어 특성화까지만을 평가하였다. 순환골재 생산과정에서 배출된 물질은 대기/수질 생태계에 영향을 미치며, 환경문제로는 지구온난화(GWP), 산성화(AP), 부영양화(EP), 오존층영향(ODP), 광화학적산화물생성(POCP), 자원고갈(ADP) 등이 있다.

$$C_i = \sum C_{i,j} = \sum (Load_j \cdot eqv_{i,j}) \quad (1)$$

여기서 C_i 는 영향범주 i 에 포함된 모든 목록항목(j)들이 소속된 영향범주에 미치는 영향의 크기이며, $C_{i,j}$ 는 목록항목 j 가 영향범주

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

Table 10. Environmental impact assessment of raw material

Material	GWP (kg-CO ₂ /kg)	AP (kg-SO ₂ eq/kg)	EP (kg-PO ₄ ³⁻ eq/kg)	ODP (kg-CFC11eq/kg)	POCP (kg-Ethylene _{eq} /kg)	ADP (kg-Antimony _{eq} /kg)
Waste concrete	3.10E-03	3.90E-06	7.90E-07	3.00E-11	8.30E-06	1.00E-06

i 에 미치는 영향의 크기이며, $Load_j$ 는 j 번째 목록항목의 환경부하량이며, $eqv_{i,j}$ 는 영향범주 i 에 속한 j 번째 목록항목의 특성화 계수 값이다.

4.2 원재료 단계

순환골재의 원재료인 폐콘크리트 생산 공정에 따른 환경영향을 Table 10과 같이 평가하였다. 순환골재는 건설폐기물 중 주로 폐콘크리트를 잘게 부수고 분리한 골재만을 모아 재사용한다. 폐콘크리트는 건설구조물 철거/해체 시 발생하며, 타 제품으로 활용되지 않을 경우에는 건설폐기물로 분류된다. 이와 같이 건설구조물 해체과정에서 다량의 에너지가 사용되고 이에 따른 환경영향 물질이 배출되었지만 폐콘크리트는 부산물 형태이므로 이전의 산업공정은 환경영향 평가범위에 포함되지 않는다. 따라서 건설구조물 해체 시 폐콘크리트가 배출되는 과정은 환경영향 평가범위에서 제외하였다.

$$Raw\ material\ e_{i,j} = \sum \{ (M_{(i)}/W_c) \times t \times D \} \quad (2)$$

여기서 i 는 폐콘크리트를 말하며, $Raw\ material\ e_{i,j}$ 는 원재료 단계 환경영향[kg-unit/kg], $M_{(i)}$ 은 폐콘크리트[ton], W_c 는 (i)폐콘크리트 수집장비의 용량[ton], T 는 작업시간[h], D 는 경유의 환경영향 범주별 특성화 값[kg-unit/L]이다.

4.3 운송 단계

구조물 철거/해체 현장에서 수집된 폐콘크리트는 순환골재 생산공장으로 트럭 운송되며, 거리는 평균 30km이다. 이때의 물량

과 운송수단 적재량으로 장비 대수를 산출하고, 운송거리를 적용하여 환경영향을 Table 11과 같이 평가하였다.

$$\text{Transportation } E_{ij} = \sum \{(M_{(i)}/Wt) \times d \times D\} \quad (3)$$

Transportation E_{ij} 는 운송단계 환경영향[kg-unit/kg], $M_{(i)}$ 는 폐콘크리트[ton], Wt 는 (i)운송장비 적재량[ton], d 는 운송거리[km], D 는 경유의 영향범주별 특성화 값[kg-unit/L]이다.

4.4 제조 단계

제조단계는 폐콘크리트를 선별·파쇄하여 순환골재를 제조하는 과정이다. 본 연구에서는 건식방식에 대한 환경영향을 평가하기 위해 제조설비에서 사용된 전력량을 조사하고, 에너지원 사용에 따른 환경영향을 평가하였다.

$$\text{Manufacture } E_{ij} = \sum \{(E_{(i)}/Wa) \times C\} \quad (4)$$

여기서 i 는 전력, Manufacture E_{ij} 는 제조단계 환경영향[kg-unit/kg], Wa 는 순환골재 생산량[kg], $E_{(i)}$ 는 에너지원 사용량[kwh], C 는 환경영향 범주별 특성화 값[kg-unit/kwh]이다. 건식 생산 방식 공정에서 소요되는 파쇄횟수와 분별작업 등을 장비별로 구분하여 Table 12와 같이 나타내고, 순환골재를 생산하는 과정에서 각 소요장비별 전력사용량에 의한 환경영향 배출량을 Table 13과 같이 산출하였다.

4.5 단계별 환경영향 결과 및 타골재 비교·분석

원재료, 운송, 제조 단계에 의해 발생된 순환골재의 전과정 환경영향은 Table 14와 같다.

순환골재의 환경영향을 인공경량골재 및 슬래그골재의 환경영향과 비교하여 Table 15와 같이 나타내었다.

순환골재 생산과정에서 배출되는 환경영향 중 지구온난화 지수(GWP)는 인공경량골재 대비 약 43% 적은 것으로 나타났으나, 슬래그골재에 비해서 약 30% 큰 것으로 나타났다. 이는 인공경량골재 생산 시 배합 및 성형, 소성공정에서 전기, LNG, 석탄 등의 에너지사용량이 순환골재의 에너지사용량에 비해 높았다. 따라서 지구온난화(GWP)에 미치는 주요 요소인 CO₂, CH₄, N₂O 배출량이 크기 때문이다. 하지만 순환골재 생산 시 분별 및 파쇄공정에서 사용된 에너지사용량은 슬래그 골재의 에너지사용량에 비해 높았다. 또한, 순환골재 생산과정의 배출물질에 따른 산성화(AP) 및 부영양화

Table 11. Environmental impact assessment of transportation

Equipment	GWP (kg-CO ₂ /kg)	AP (kg-SO ₂ eq/kg)	EP (kg-PO ₄ ³ -eq/kg)	ODP (kg-CFC11eq/kg)	POCP (kg-Ethyleneeq/kg)	ADP (kg-Antimonyeq/kg)
Truck	4.00E-03	7.50E-06	1.08E-06	7.00E-11	1.10E-06	1.30E-05

Table 12. Manufacturing facility of dry recycled aggregate

Dry system		Operation count	Total electricity usage
Feeders	Grizzly feeder	1time	183.33kw
Screen	Vibrating screen	4times	169.01kw
Crusher	Jaw Crusher	1time	593.75kw
	Cone Crusher	3times	529.41kw
Magnetic Separator		1time	250.00kw
Classifier		3times	289.47kw
Precipitator		1time	750.00kw

Table 13. Environmental impact assessment of manufacture

Energy	GWP (kg-CO ₂ /kg)	AP (kg-SO ₂ eq/kg)	EP (kg-PO ₄ ³ -eq/kg)	ODP (kg-CFC11eq/kg)	POCP (kg-Ethyleneeq/kg)	ADP (kg-Antimonyeq/kg)
Electric	2.23E-02	1.79E-05	3.57E-06	3.70E-10	3.10E-06	2.00E-06

Table 14. Environmental impact assessment of raw material

Division	GWP (kg-CO ₂ /kg)	AP (kg-SO ₂ eq/kg)	EP (kg-PO ₄ ³ -eq/kg)	ODP (kg-CFC11eq/kg)	POCP (kg-Ethyleneeq/kg)	ADP (kg-Antimonyeq/kg)
Raw material	3.10E-03	3.90E-06	7.90E-07	3.00E-11	8.30E-06	1.00E-06
Transportation	4.00E-03	7.50E-06	1.08E-06	7.00E-11	1.10E-06	1.30E-05
Manufacture	2.23E-02	1.79E-05	3.57E-06	3.70E-10	3.10E-06	2.00E-06
TOTAL	2.94E-02	2.93E-05	5.44E-06	4.70E-10	1.25E-05	1.60E-05

Table 15. Environmental impact comparison by aggregate

Division	GWP (kg-CO ₂ /kg)	AP (kg-SO ₂ eq/kg)	EP (kg-PO ₄ ³ -eq/kg)	ODP (kg-CFC11eq/kg)	POCP (kg-Ethyleneeq/kg)	ADP (kg-Antimonyeq/kg)
Recycled aggregate	2.94E-02	2.93E-05	5.44E-06	4.70E-10	1.25E-05	1.60E-05
Artificial light-weight aggregate	5.16E-02	1.73E-04	2.80E-05	4.01E-09	5.28E-05	1.94E-04
Slag aggregate	2.26E-02	1.61E-04	1.61E-04	6.49E-09	2.43E-05	9.08E-05

(EP), 오존층 파괴(ODP), 광화학적산화물생성(POCP), 자원고갈(ADP) 영향은 인공경량골재, 슬래그골재 대비 약 37%에서 최대 93%까지 적은 것으로 확인되었다. 이러한 현상은 순환골재 생산과정에서 산성화(AP) 및 부영양화(EP), 오존층 파괴(ODP), 광화학적산화물생성(POCP), 자원고갈(ADP)에 미치는 NO_x, NH₃, SO₂, NH₄, Halon, CFC, Softcoal, Hardcoal, Crudeoil이 인공경량골재 및 슬래그골재 생산과정보다 적게 배출되기 때문으로 사료된다.

인공경량골재 및 슬래그골재 제조 시 투입된 LNG 및 석탄에너지 사용으로 인해 이산화황(SO₂), 황산(H₂SO₄), 질산염(NO₃⁻) 등과 같이 산성화와 부영양화, 오존층 파괴에 영향을 미치는 물질이 배출된다. 또한, 전기에너지 사용에 따른 암모니아(NH₃), 암모늄(NH₄⁺), 인산염(PO₄³⁻), 질소산화물(NO_x) 등이 배출되었기 때문이다. 이는 전기에너지를 생산하기 위하여 화력발전소에서 투입된 석탄이 연소될 때 환경영향 물질이 배출되기 때문이다. 특히, 순환골재의 자원고갈(ADP)은 인공경량골재 및 슬래그골재 대비 약 77%에서 92%까지 적은 것으로 나타났다. 이는 순환골재가 산업부산물(Industrial by-product)을 원재료로 사용함에 따라 자원고갈(ADP)의 주요 영향물질인 Iron(Fe), Natural gas, Hard coal, Lead(Pb), Uranium(U) 등이 적게 배출되었기 때문으로 사료된다.

5. 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 증가하였으며, 공기량은 3.2~5.4% 범위로 5.5±1.5% 기준에 비해 적어 현장시공성 및 압축강도에 큰 영향은 없을 것으로 확인되었다.
2. 압축강도는 순환골재 혼입률이 0%일 때보다 30%일 때 더 높았으며, 60~100%로 증가함에 따라 점차 감소하여 30%일 때 압축강도가 가장 높은 것으로 나타났다.
3. 순환골재의 전과정 환경영향은 각각 2.94E-02kg-CO_{2eq}/kg, 2.93E-05kg-SO_{2eq}/kg, 5.44E-06kg-PO₄^{3eq}/kg, 4.70E-10kg-CFC_{11eq}/kg, 1.25E-05kg-Ethylene_{eq}/kg, 1.60E-05kg-Antimony_{eq}/kg로 나타났다.
4. 순환골재 환경영향은 지구온난화를 제외한 산성화, 부영양화, 오존층 파괴, 광화학적산화물, 자원고갈에서 인공경량골

재, 슬래그골재 대비 37~93%까지 적게 나타났다.

위 결과를 통해 순환골재 콘크리트의 압축강도 등 성능 저하가 크게 없으며, 인공경량골재 및 슬래그골재에 비해 환경영향도 낮은 것으로 확인되어 콘크리트를 제조함에 있어서 순환골재 사용이 유효할 것으로 사료된다. 다만, 도출된 결과는 모든 순환골재의 특성 및 환경영향 지수를 대표하는 값은 아니며, 향후 다양한 분석을 통해 콘크리트의 강도 특성 및 환경영향 지수의 범위 설정을 비롯해 순환골재의 사용이 지속가능한 건축에 어느 정도 이바지하고 있는지 정량적인 표현이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비지원(17SCIP-C120606-02)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.
- Han, M.C., Kang, B.H. (2015). Effect of the replacement of recycled coarse aggregates under 13mm on engineering properties of the concrete, *Korean Recycled Construction Resources Institute*, **3(1)**, 43-49.
- KS F 2573. (2014). *Recycled Aggregate for Concrete*.
- KS F 2405. (2017). *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete*.
- Lee, Y.W. (2011). *Epidemiological Characteristics of High-Strength Concrete Using Recycled Aggregates and Effects of Steel-Fiber Reinforcement*, Ph.D Thesis, Kwandong University.
- Xuan, D., Zhan, B., Poon, C.S. (2015). Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, **65**, 67-74.
- Yang, I.H., Jeong, J.Y. (2016). Effect of recycled coarse aggregate on compressive strength and mechanical properties of concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **28(1)**, 105-113.

순환굵은골재를 활용한 콘크리트의 강도 특성 및 전과정 환경영향 평가에 관한 연구

본 연구에서는 순환굵은골재의 혼입률에 따른 콘크리트의 강도 특성을 실험을 통해 확인하고, 다량의 순환골재를 콘크리트에 활용하기 위한 기초적 자료로 사용하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해, 목표설계기준 압축강도는 40MPa로 하였으며, 순환골재 실용화를 고려하여 순환잔골재의 혼입률을 0, 30%로 하고, 순환굵은골재의 혼입률은 0, 30, 60, 100%로 설정하여 굳지 않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트에 대한 실험을 통해 콘크리트 제조에 순환골재 사용의 유효성을 확인하였다. 또한, 전과정 평가(LCA, Life Cycle Assessmet) 기법을 이용하여 순환골재의 전과정 환경영향을 평가하여 콘크리트를 제조함에 있어서 순환골재 사용이 유효성을 확인하였다.