

목표 탄소배출량 저감을 고려한 콘크리트 구조물의 설계 절차

Design Approach of Concrete Structures Considering the Targeted CO₂ Reduction

정연백^{1*} · 양근혁²Yeon-Back Jung^{1*} · Keun-Hyeok Yang²

(Received June 16, 2015 / Revised June 23, 2015 / Accepted June 26, 2015)

The objective of this study is to present the design approach of low CO₂ concrete structures for reduction of CO₂ emissions. The design approach was implemented considering the system boundary for each processing presented in the ISO 13315-2. As for life-cycle inventory(LCI) for CO₂ assessment of concrete structures, data provided from domestic LCI DB was used. Based on the process presented in this study, case studies on the life-cycle CO₂ assessment of shear wall concrete structure was conducted. As substitution level of GGBS is 25%, the amount of CO₂ emissions and CO₂ uptake by concrete carbonation was decreased in the material, demolition and crushing, and transport phase. The amount of CO₂ emissions of column and total member was decreased by 26% and 22% respectively, compared to that of OPC.

키워드 : 저탄소, 콘크리트 구조물, 설계 절차**Keywords** : Low CO₂, Concrete structures, Design approach

1. 서론

콘크리트의 주요 구성성분인 시멘트의 CO₂ 원단위는 우리나라의 경우 약 0.931 CO₂-kg/kg으로서 세계 평균인 0.81 CO₂-kg/kg에 비해 약 1.15배 높다. 국내 연간 시멘트 생산으로부터 배출되는 CO₂ 양은 약 4,500만 톤으로 평가되고 있으며, 이는 우리나라 전체 CO₂ 배출량의 약 6.5%에 해당한다(Lee and Kim 2011). 따라서 콘크리트 산업에서 CO₂ 배출 저감을 위한 대책은 매우 중요한 이슈임이 분명하다.

콘크리트에서 시멘트의 구성비율은 약 30% 이하이지만 시멘트에서 배출되는 CO₂ 양은 콘크리트 전과정 CO₂ 배출량의 약 85% 이상을 차지한다(Yang and Moon 2012). 이에 따라 저탄소 콘크리트 구조물의 설계 및 시공을 위하여 가장 보편적 접근방법인 고로 슬래그(GGBS)나 플라이애시(FA)와 같은 혼화재의 시멘트 치환은 2000년대 이후 더욱 주목을 받고 있다. 더군다나 GGBS나 FA의

시멘트 치환은 천연자원 보전 및 산업부산물의 재활용이라는 부가적인 효과도 기대할 수 있다. 따라서 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 배출에 대한 혼화재 치환의 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 자료의 제시는 환경경영 기반의 시방서 및 설계기준의 확립을 위하여 중요하게 이용될 수 있다.

최근 미국에서는 LEED라는 친환경건축물 인증제도와 더불어 자연환경과 건물 거주자를 위하여 건설되어지는 환경의 부정적인 영향을 최소화하고 긍정적인 영향을 최대화하여 환경을 지키면서 건강하고 안전하게 잘 살 수 있는 최소한의 요구사항을 제공하는 표준지침인 IgCC (international green construction code 2012)를 만들었다. IgCC (2012)에서는 건축물에서 전과정 평가에 의한 CO₂ 저감률을 동일 규모의 기존 건축물 대비 20% 이상을 요구하고 있다. 따라서 콘크리트 구조물 설계단계에서 전과정 CO₂ 배출량을 정량적으로 평가 파악하고 목표 CO₂ 배출 저감률을 만족할 수 있는 전과정 CO₂ 저감에 기반한 콘크리트 구조물 설계방법이

* Corresponding author E-mail: caujyb@naver.com¹경기대학교 일반대학원 건축공학과 (Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Kyonggi-do, 443-760, Korea)²경기대학교 플랜트·건축공학과 (Department of Plant·Architectural Engineering, Kyonggi University, Kyonggi-do, 443-760, Korea)

필요하다.

이에 본 연구에서는 콘크리트 구성요소들인 원재료들의 전과정(채취, 운반, 콘크리트 생산과 타설, 구조물 사용과 해체, 해체된 콘크리트의 파쇄 및 재활용 등)에 대한 CO₂ 배출 및 포집 등에 대한 정량적인 평가를 실시하고 이를 토대로 전과정 CO₂ 평가에 기반한 콘크리트 구조물 설계방법을 제시하고자 한다.

2. 저탄소 콘크리트 구조물 설계 절차

전과정 CO₂ 평가에 기반한 저탄소 콘크리트 구조물 설계 절차는 ISO 13315-2(2013)에서 요구하는 시스템 경계를 이용하여 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 콘크리트 구조물의 전과정 평가를 수행하기 위한 전과정 목록(life-cycle inventory, LCI)은 기본적으로 국가에서 구축한 LCI 데이터베이스 정보망을 이용하였다.

2.1 각 단계별 평가 절차

저탄소 콘크리트 구조물의 설계 절차는 다음과 같다.

2.1.1 재료선정 단계

이 단계에서는 사용자가 사용하는 콘크리트의 설계 압축강도 (f_{ck}) 및 목표 CO₂ 저감률을 설정한다. 목표 CO₂ 저감률을 만족하기 위한 콘크리트 배합설계(결합재 설계, W/B 결정, S/a 산정

등)는 Jung and Yang(2015) 이 제시한 모델식 및 설계차트를 이용한다(Process A).

2.1.2 구조 설계 단계

이 단계에서는 구조물의 역학적 특성을 고려하여 여러 가지 구조 시스템 및 공법을 적용하여 가장 적절한 시스템을 결정한다. 구조물에 작용하는 하중조건(중력하중, 활하중, 지진하중, 풍하중 등)을 적용하여 재료단계에서 결정된 콘크리트의 설계강도 및 철근의 항복강도를 고려하여 적절한 부재 단면 크기를 결정한다. 압축부재의 경우 콘크리트 압축강도를 증가시키고, 휨부재의 경우 콘크리트의 압축강도를 감소시키는 것이 일반적으로 CO₂ 저감에 효과적이다(Lee et al, 2013)(Process B).

2.1.3 콘크리트 구조물의 시공 단계

이 단계에서는 Yang et al.(2014) 이 제시한 CO₂ 평가절차를 이용하여 콘크리트 타설 단계에서의 CO₂ 배출량을 산정한다. 에너지원이 경유인 펌프차는 붐대 길이에 따라 CO₂ 원단위가 차이가 있는데, 붐대 길이가 28m인 경우 CO₂ 원단위는 3.06 CO₂-kg/m³이며, 붐대 길이가 52m인 경우 CO₂ 원단위는 6.2 CO₂-kg/m³이다 (Han 2011). 진동기는 에너지원이 전기로서 콘크리트 1m³의 진동을 위한 시간을 5분으로 가정하면, 진동기의 CO₂ 원단위는 0.18 CO₂-kg/m³이다.

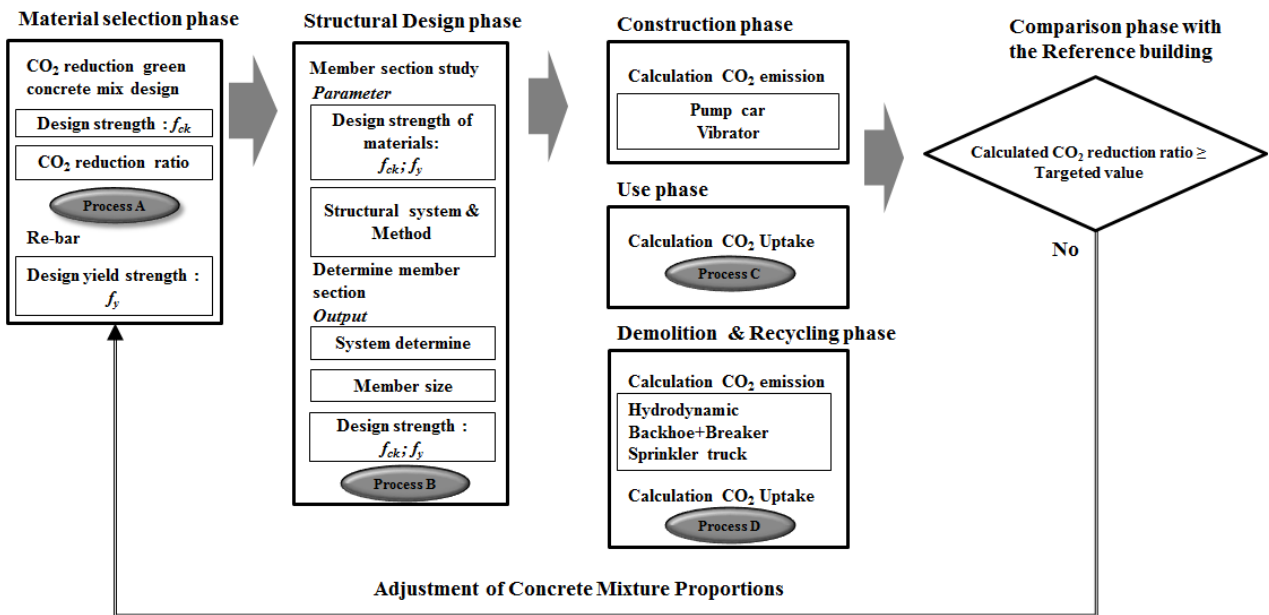


Fig. 1. Concrete structural design process for targeted CO₂ reduction

2.1.4 구조물 사용 단계

이 단계에서는 Yang et al.(2014)이 제시한 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집량 평가 방법을 이용하여 Process C와 같이 CO₂ 포집량을 산정한다.

2.1.5 해체 및 재활용 단계

이 단계에서는 Yang et al.(2014)이 제시한 CO₂ 평가절차 및 CO₂ 포집량 평가방법을 이용하여 Process D와 같이 구조물 해체,

폐콘크리트의 파쇄 및 재활용 단계에서의 CO₂ 배출량을 산정하여 환경영향을 평가한다. 구조물 해체단계에서의 CO₂ 배출량은 해체 방식(대형기계식, 발파식)에 따른 해체장비의 유류 및 전력소비량을 이용하여 산정될 수 있다. 해체장비는 압쇄기, 유압식 백호, 대형브레이크 및 살수차 등이 고려될 수 있다. 이들 장비들의 소비 에너지로부터 콘크리트 해체를 위한 CO₂ 원단위는 6.61 CO₂-kg/m³이다.

2.1.6 Reference Building과 비교 단계

산출된 콘크리트의 전과정 CO₂ 발생량을 Reference building

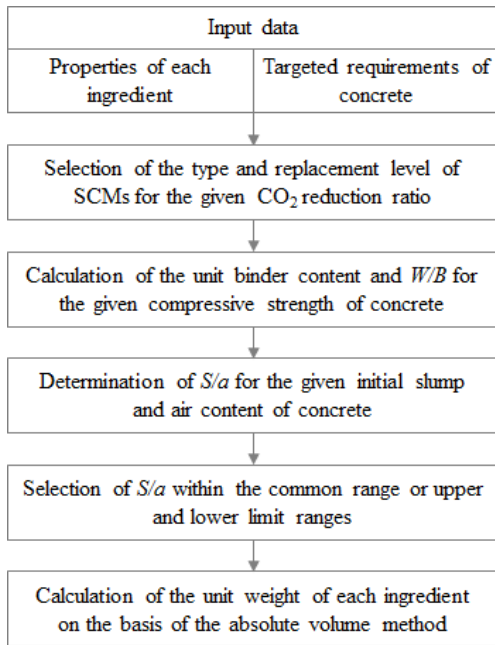


Fig. 2. Details of process A given in Fig. 1

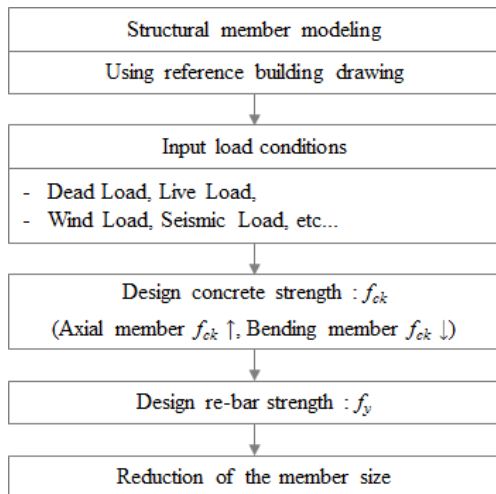


Fig. 3. Details of process B given in Fig. 1

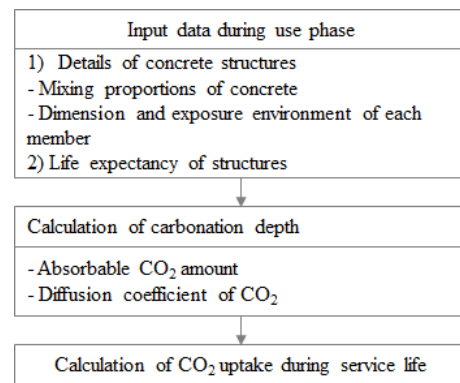


Fig. 4. Details of process C given in Fig. 1

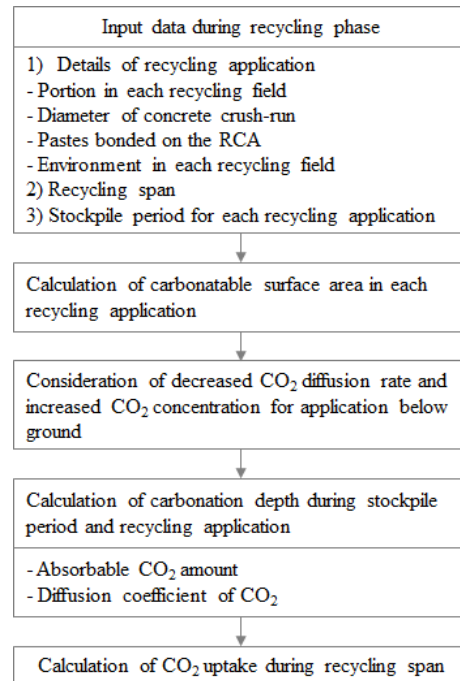


Fig. 5. Details of process D given in Fig. 1

과 비교하여 목표 CO₂ 저감률 및 산업부산물 재활용율에 만족하는지 검토한다. 만약 만족하지 않는 경우에는 1단계 재료 선정부터 재산정한다. IgCC에서는 IBC의 구조성능 요구조건과 IgCC의 최소 에너지 요구조건을 만족하는 프로젝트 Building과 비슷한 유효 바닥면적, 기능 및 배치를 갖는 Building을 Reference Building으로 간주한다. 국내에서는 국내 구조 기준 및 에너지 요구조건을 만족하는 프로젝트 Building을 Reference Building으로 비교하도록 한다.

3. Parametric Study

3.1 대상 건물 선정

앞에서 제시한 CO₂ 배출 저감을 위한 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 평가 방법에 기반하여 전단벽 콘크리트 구조물을 대상으로 전과정 CO₂ 평가에 대한 사례 분석을 하였다.

사례분석 대상은 서울에 위치한 지상 12층 규모의 철근 콘크리트 구조물로서 콘크리트 압축강도 및 배합조건에 따른 전과정 CO₂ 발생량 및 포집량을 비교·평가하였다.

사례연구를 위해 선택된 구조물의 부재별 콘크리트 설계강도는 Table 1에 나타내었으며, 배합표는 인천 남동구에 위치하는 R 레미콘사에서 제공하는 것을 이용하였다(Table 2). 하중 조건 및 검토 기준은 국토해양부 고시 건축구조설계기준(KBC2009)에 근거하여 풍하중과 지진하중을 고려하였다. 기준층의 평면 및 입면에 대한 정보는 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 나타내었으며 콘크리트 강도

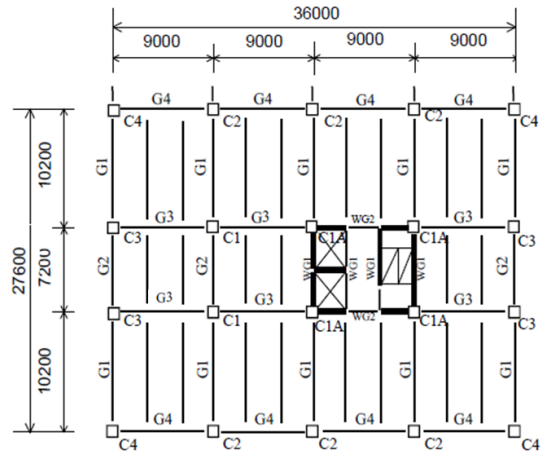


Fig. 6. Structural plan view of the concrete structure

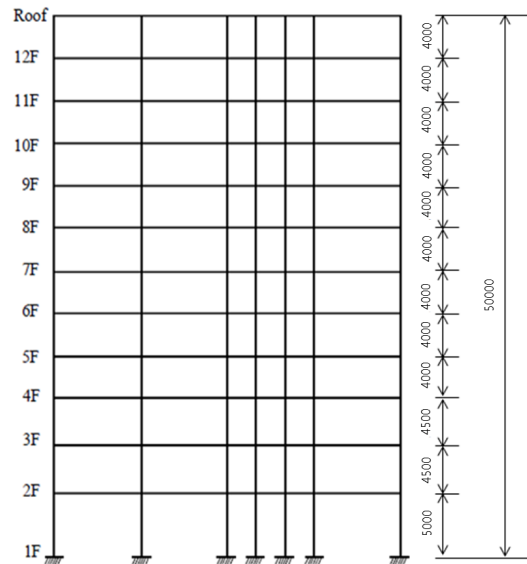


Fig. 7. Cross-sectional view of the concrete structure

Table 1. Material property

Type	Name	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)
CASE 1	beam	24	400
	slab		400
	column		400
	wall		400
CASE 2	beam	24	400
	slab	24	400
	column	40	400
	wall	40	400

Table 2. mixing conditions

Binder type	f_{ck}	Unit weight (kg/m ³)				
		Water	OPC	GGBS	Sand	Gravel
OPC	24 MPa	179	348	-	867	923
OPC+GGBS	24 MPa	179	261	87 (25%)	865	921
OPC	40 MPa	200	571	-	575	985

변화에 따른 단면 크기와 배근 상세는 설계강도와 소요강도의 비를 가능한 0.7~0.9 사이에 있도록 검토하였다. 압축강도 증가에 따른 콘크리트 물량 산출을 위해 기둥의 수직 철근량은 최소철근비 0.01로 동일하게 설정하였으며, 응력비도 가능한 유사하도록 설정하였다.

3.2 사례 분석

Lee et al.(2013)은 최적구조설계를 이용한 철근콘크리트 기둥의 CO₂ 배출량 평가에 관한 연구를 통해 축력이 증가할 때는 콘크리트 압축강도의 증가가 CO₂ 배출량을 줄이는데 효과가 있는 반면, 휨모멘트가 증가하는 경우에는 압축강도 증가가 오히려 CO₂

Table 3. CO₂ assessment procedure of RC structures ($f_{ck} = 24$ MPa, GGBS 25%)

Material phase													
Unit	Concrete constituent				Transportation(gate to ready-mixed concrete plant)								
	A	B	C	D = A·B·C	E	F	G = A·B·E·F						
	Volume (m ³)	kg/m ³	CO ₂ -kg/kg	CO ₂ -kg	Distance (km)	CO ₂ -kg/kg·km	CO ₂ -kg						
OPC	590	261	9.31E-01	143365	277	5.92E-07	25						
GGBS		87	2.65E-02	1360	339	5.92E-07	10						
Sand		865	2.34E-03	1194	47	1.14E-06	27						
Coarse		921	3.23E-03	1755	37.6	1.14E-06	23						
Water		179	1.12E-04	12	-	-	-						
Sum				147686	Sum		86						
Reinforcing bar													
Unit	Reinforcing bar			Transportation(gate to construction site)									
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E							
	Weight (kg)	CO ₂ -kg/kg	CO ₂ -kg	km	CO ₂ -kg/kg·km	CO ₂ -kg							
D22	114100	8.52E-02	9721	380	1.14E-06	49							
Production (Fresh concrete) phase													
Unit	Batching and mixing			Transportation (concrete plant to construction site)									
	A	B	C = A·B	D	E	F = A·D·E							
	Volume (m ³)	CO ₂ -kg/m ³	CO ₂ -kg	km	CO ₂ -kg/m ³ ·km	CO ₂ -kg							
Facilities	590	0.71	419	30	2.62E-03	46							
Casting phase													
Unit	A	B	C = A·B										
	Volume (m ³)	CO ₂ -kg/m ³	CO ₂ -kg										
	Pump car	590	6.2	3658	-								
Vibrator	0.18		106	-									
Sum			3764										
Use phase of structure													
A	B	C	D	E	F	G = D·E·F							
Service life	Type	Finishing material	Exposed surface area (m ²)	aCO ₂ (g/cm ³)	xc (cm)	CO ₂ uptake (kg)							
40 years	Indoor	Paint	3028	0.09	3.287	-9157							
Demolition and crushing phases													
Unit	Concrete			Transportation (building site to crushing plant)									
	A	B	C = A·B	D	E	F	G = A·D·E·F						
	Volume (m ³)	CO ₂ -kg/m ³	CO ₂ -kg	kg/m ³	km	CO ₂ -kg/kg·km	CO ₂ -kg						
Hydrodynamic Backhoe+Breaker	590	6.61	3900	2300	50	1.14E-06	77						
Sprinkler truck		11.41	6732	-									
Sum			10632	-									
Recycling phase													
A	B	C	D	E	F	G	H	I = C·F·G·H	Transportation (crushing plant to application site)				
Life	Activity	Volume (m ³)	Portion (%)	da (mm)	Exposed surface area(m ² /m ³)	aCO ₂ (g/cm ³)	xc (cm)	CO ₂ uptake (kg)	J	K	L	M = C·J·K·L	
20 years	Embankment	590	31	25	32.1	0.09	0.5	-8523	713	50	1.14E-06	24	
	Road base layer		10	20	12.9		0.25	-1712	230			8	
	Sub load base layer		33	25	34.2		0.5	-9080	759			26	
	Secondary product		5	2.5	51.8		0.087	-2393	115			4	
	New concrete		4	15	6.9		0.48	-1759	92			3	
	Back filler		17	25	17.6		0.5	-4673	391			13	
Sum									-28140		Sum		77
Total= 135263 CO₂-kg													
[= 162788 (Emission due to concrete) + 9771 (Emission due to re-bar) - 37296 (Uptake due to carboration)]													

배출량을 줄이는데 효과가 거의 없는 것으로 평가하였다. 따라서 본 사례분석에서는 축력이 지배적인 철근콘크리트 기둥 및 벽체의 콘크리트 압축강도를 24MPa에서 40MPa로 변경하여 압축강도 변화에 따른 CO₂ 배출량을 비교 분석하였다. 콘크리트 구조물에서 콘크리트의 압축강도 변화에 따른 철근 및 콘크리트 물량을 비교하기 위해 Midas Gen 프로그램을 이용하여 구조 해석을 수행하였으며, 콘크리트 및 철근 물량은 Midas Design+를 이용하여 산정하였다. 분석결과 기둥 및 벽체의 콘크리트 압축강도를 24MPa에서 40MPa로 증가하였을 때 오히려 CO₂ 발생량 약 14% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 목표 CO₂ 저감률 20%를 만족하기 위해 배합을 조절할 수 밖에 없으며 이때의 혼화재 치환율은 Jung and Yang(2015) 이 제시한 모델식 및 설계차트를 이용하여 GGBS 25%를 치환하는 것으로 결정하였다.

혼화재가 콘크리트 전과정 CO₂ 배출량에 미치는 영향을 파악하기 위하여 기둥부재의 콘크리트 압축강도 24MPa에서 GGBS가 25% 치환된 콘크리트를 사용하였을 경우 전과정 CO₂ 양을 Table 3에 예시로 나타내었다.

Table 3에서 기둥의 콘크리트 압축강도 24MPa에서 GGBS 25% 치환하여 적용한 콘크리트 구조물의 각 단계별 CO₂ 배출량은 재료단계에서 143365 CO₂-kg, 해체 및 파쇄단계에서 10632 CO₂-kg, 운송단계에서 287 CO₂-kg으로 산정되었다. 구조물 사용단계와 재활용단계에서 콘크리트 탄산화에 의한 CO₂ 포집량은 각각 -9157 CO₂-kg과 -28140 CO₂-kg으로 산정되었다. 결국, CO₂ 배출과 포집을 모두 고려하였을 때 GGBS 25% 치환하여 적용한 기둥의 전과정 CO₂ 양은 135263 CO₂-kg으로 OPC 대비 26% 감소하는 것으로 나타났다.

콘크리트 기둥의 전과정 CO₂ 평가에 대한 혼화재 GGBS의 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 혼화재 치환율이 증가함에 따라 재료단계,

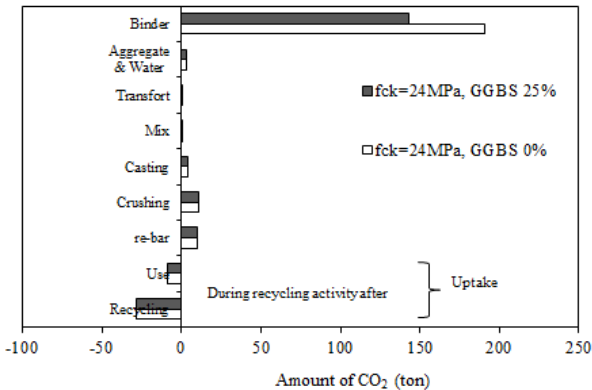


Fig. 8. Effect of SCMs on the LCCO₂ of column

Table 4. Comparison of CO₂ emissions of concrete structure

Member	24 MPa (GGBS 0%) (CO ₂ -kg)	24 MPa (GGBS 25%) (CO ₂ -kg)	Ratio
Column	182219	135263	0.74
Wall	118438	86930	0.73
Beam	428183	338229	0.79
Slab	611638	490227	0.80
Total	1340478	1050649	0.78

해체 및 파쇄단계, 운송단계에서는 CO₂ 발생량 및 탄산화에 의한 CO₂ 포집량은 모두 감소하는 것으로 나타났다.

콘크리트구조물에서 혼화재 치환에 따른 각 부재별 CO₂ 배출량에 대해 Table 4에 나타내었다. 기둥, 벽체, 보 및 슬래브 모두 혼화재 치환에 따라 CO₂ 발생량이 감소하는 것으로 나타났다. GGBS 25% 치환에 따라 전체 콘크리트 구조물의 CO₂ 발생량이 약 22% 저감하는 것으로 나타났다.

콘크리트 생산, 타설 및 해체단계에서의 공정과 그에 따른 사용 장비들의 에너지원에 의한 CO₂ 배출계수는 시대적, 지역적 상황에 따라 다를 수 있다. 이에 따라 이 연구의 사례분석 결과는 건축물 규모 및 위치에 따라 다소 변화될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 CO₂ 배출 저감을 위한 저탄소 콘크리트 구조물 설계 절차를 제시하였으며, 제시한 절차에 따라 전단벽 콘크리트 구조물을 대상으로 전과정 CO₂ 평가에 대한 사례분석을 수행하였다. 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 평가에 대한 사례분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 콘크리트 압축강도 증가 및 혼화재 치환에 따른 콘크리트 구조물의 전과정 CO₂ 배출량 및 탄산화에 의한 CO₂ 포집량을 정량적으로 평가하고 목표 CO₂ 배출량 저감률을 만족시키기 위한 콘크리트 구조물의 설계절차를 제시하였다.
2. 기둥 및 벽체의 콘크리트 압축강도를 24MPa에서 40MPa로 증가하였을 때 오히려 CO₂ 발생량 약 14%정도 증가하는 것으로 나타났다.
3. 기둥부재의 경우 GGBS 25% 치환 시 재료단계, 해체 및 파쇄단계, 운송단계에서 CO₂ 발생량 및 탄산화에 의한 CO₂ 포집량은 모두 감소하는 것으로 나타났으며 OPC 대비 약 26% 감소하는 것으로 나타났다.
4. 기둥, 벽체, 보 및 슬래브 전체의 경우 GGBS 25% 치환에 따라

전과정 CO₂ 발생량이 약 22% 저감하는 것으로 나타났다.

- 5. 콘크리트 생산, 타설 및 해체단계에서의 공정과 그에 따른 사용 장비들의 에너지원에 의한 CO₂ 배출계수는 시대적, 지역적 상황에 따라 다를 수 있다. 이에 따라 이 연구의 사례분석 결과는 건축물 규모 및 위치에 따라 다소 변화될 수 있다.

감사의 글

“이 논문은 국토교통과학기술진흥원 건설기술혁신사업(과제번호:12CCTI-C063722-01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.”

References

Han, S.W. (2011). A Study on Carbon Dioxide Emission of Input Resources according to Construction Method in Construction Phase, Master Dissertation, University of Seoul, 79 [in Korean].

IgCC Public Comment Hearing Committee. (2012). International Green Construction Code, International Code Council, INC, ISO/DIS 13315-2. (2013). Environmental Management for Concrete and Concrete Structures-Part 2: System Boundary and

Inventory Data, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Jung, Y.B., Yang, K.H. (2015). Mixture-proportioning model for low-CO₂ concrete considering the type and addition level of supplementary cementitious materials, Journal of the Korea Concrete Institute, Accepted [in Korean].

Lee, H.Y., Shin, Y.A., Choi, S.W., Park, H.S. (2013). Carbon Dioxide Emissions Evaluation for Reinforced Concrete Columns Based on the Optimal Structural Design, Journal of Architectural Institute of Korea, **29(8)**, 45-52 [in Korean].

Lee, S.H, Kim, S.K. (2011). CO₂ reduction in the Cement Industry, Concrete and Environment, Kimoondang, Seoul, 16-30 [in Korean].

Yang, K.H., Moon, J.H. (2012). Design of Supplementary Cementitious Materials and Unit Content of Binder for Reducing CO₂ Emission of Concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **24(5)**, 597-604 [in Korean].

Yang, K.H., Seo, E.A., Tae, S.H. (2014). Carbonation and CO₂ Uptake of Concrete, Environmental Impact Assessment Review, **46**, 43-52.

목표 탄소배출량 저감을 고려한 콘크리트 구조물의 설계 절차

본 연구에서는 CO₂ 배출 저감을 위한 저탄소 콘크리트 구조물 설계 절차를 제시하였다. 전과정 CO₂ 평가에 기반한 저탄소 콘크리트 구조물 설계 절차는 ISO 13315-2에서 요구하는 시스템 경계를 이용하였으며 구조물의 전과정 평가를 수행하기 위한 전과정 목록(life-cycle inventory, LCI)은 기본적으로 국가에서 구축한 LCI 데이터베이스 정보망을 이용하였다. 본 연구에서 제시한 절차에 따라 전단벽 콘크리트 구조물을 대상으로 전과정 CO₂ 평가에 대한 사례분석을 수행하였다. 기동부재의 경우 GGBS 25% 치환 시 재료단계, 해체 및 파쇄단계, 운송단계에서 CO₂ 발생량 및 탄산화에 의한 CO₂ 포집량은 모두 감소하는 것으로 나타났으며 OPC 대비 약 26% 감소하는 것으로 나타났다. 기동, 벽체, 보 및 슬래브 전체의 경우 GGBS 25% 치환에 따라 전과정 CO₂ 발생량이 약 22% 저감하는 것으로 나타났다.