The Proceedings of 48th Cement Symposium
pp. 37~42, Nov. 9. 2021
Homepage : www.cement.or.kr

PLC (Portland limestone cement)에 관한 문헌연구

신상철* · 강인규 · 김진만

<공주대학교>

1. 서 론

2021년 8월, “탄소중립 기본법”이 국회 본회의를 통과하게 되면서 우리나라는 전세계 14번째로 2050 탄소중립 비전과 이행체계를 법제화하였다. 법안의 핵심내용은 2050년 실질적인 탄소중립을 지향하는 중간단계 목표값으로 2030년 온실가스 감축목표를 2018년 대비 35% 이상(기존 26.3%)의 범위로 설정한 것이다. 하지만 이 목표치는 2018년부터 2050년까지의 선형감축을 가정한 배경에서 설정된 목표치이고, 탄소중립의 핵심기술인 CCUS 기술이 단기간에 개발되기 어려운 점을 고려하면 매우 달성하기 어려운 목표라고 해석할 수 있다. 결국, 탄소중립을 위한 국가정책의 노선은 더욱 뚜렷해졌으며 모든 산업부문에서의 공동노력이 매우 필요한 상황이 되었다.

철강, 발전과 더불어 온실가스 다배출 업종인 시멘트 산업에서는 이미 시멘트 그린뉴딜 위원회를 출범하여 탄소중립 공동선언문을 발표하는 등 탄소중립에 대한 적극적인 동참 의지를 적극 표명하였다. 시멘트 산업에서 온실가스를 줄일 수 있는 대표적인 기술로는 클링커 대체재료의 사용확대, 소성 단계에서 대체에너지의 활용, 배출된 CO_2의 포집 및 활용기술 등이 과거부터 수차례 논의되어 왔지만 실질적인 기술개발을 위한 움직임은 아직 미비한 실정이다.

시멘트 산업 온실가스 배출의 주범은 클링커 소성공정에 있으며, 클링커의 생산량과 사용량을 줄이는 것은 현 시점에서 가장 효과적이고 신속하게 대응할 수 있는 기술이다. 탄소중립에 대해 주도적인 역할을 하고 있는 유럽이나 북미의 경우, 1990년대부터 CO_2 배출량을 줄이기 위해 혼합시멘트의 사용을 확대시키는 정책을 일관되게 추진해 왔으며, 우리나라도 이를 벤치마킹하여 클링커계수가 낮은 저탄소 혼합시멘트 시장을 활성화시킬 필요가 있다. 국내 KS에 규정되어 있는 시멘트 혼합재는 고로슬래그, 플라이애시, 포졸란, 실리카흄 등이 있지만, 실상은 고로슬래그 시멘트만이 전체 시멘트 생산량의 약 19%를 점유하고 있을 뿐이다. 이는 유럽의 혼합시멘트 생산량이 전체 시멘트 생산량의 70% 정도를 차지하는 것과 비교하면 매우 낮은 수준이다. 특히 유럽 등 해외 선진국에서 보편화되어 있는 석회석 미분말 혼합시멘트의 경우 관련된 국내 표준은 전혀 없는 실정이다.

석회석 미분말을 사용한 혼합시멘트의 국제적인 명칭은 PLC (Portland limestone Cement)이며, 시멘트 중량의 15%까지 사용하여도 PC (Portland Cement)와 동등한 성능을 발휘한다는 연구가 다수 보고되었다. 유럽의 보고서[1]에 의하면, 유럽에서 판매 중인 시멘트는 PLC의 비율이 PC보다 훨씬 높고, 프랑스, 이탈리아, 스위스 등에서는 시장점유율이 60% 이상을 차지하고 있다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는, 이미 여러 국가 및 지역에서 제품화, 상용화되고 있는 PLC의 특성 및 연구

Table 1. Classification of portland cement and limestone blended cements according to EN 197-1

Cement code	Cement types incorporating limestone		Ingredients (% by mass)				
			Clinker	Blast furnace slag, silica fume, natural pozzolan, fly ash, burnt schist	Limestone		Minor addition
					L	LL	
CEM I	Portland cement		95-100	-	-	-	0-5
CEM II	Portland limestone cement	CEM II/A-L	80-94	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	21-35	0-5
	Portland blended cement	CEM II/A-M	80-94	6-20			0-5
		CEM II/B-L	65-79	21-35			0-5

동향, 관련 규격의 비교, 국내 도입 가능성 등에 대해 알아보고자 문헌 고찰을 수행하였다.

2. 각국의 PLC관련 표준 비교

Fig. 1은 각국의 다양한 시멘트 표준에서 허용하고 있는 석회석 미분말의 사용량을 나타낸 것으로 적게는 5%에서 많게는 35%까지 다양하게 사용되고 있다.[2] 또한, Table 2에 유럽과 미국의 표준 및 일본의 표준(안)에서 요구되는 PLC의 품질을 비교하여 나타내었다.

유럽의 PLC는 전세계에서 역사가 가장 오래되었고 다른 나라의 표준 제정에 참고자료로 오랫동안 활용되어 왔다. Table 1에 EN197-1[3]에서 규정하고 있는 PC와 PLC의 구성재료에 대해 나타내었다. 이 규격에서는 총 유기탄소량(TOC)에 따라 L 및 LL로 구분하여, 시멘트 클링커를 최대 35%까지 사용 가능하도록 규정하고 있다. 또한, 최근 제정된 EN 197-5:2020[4]에서는 추가적으로 혼합재(고로슬래그, 플라이애시, 천연포졸란)를 혼입하여 클링커 계수를 최대 0.35까지 낮춘 다양한 혼합시멘트의 상용화가 시도되고 있다.

미국의 ASTM C150-Standard Specification for Portland Cement[5]에서는 석회석 미분말을 혼합재로 사용할 경우, $CaCO_3$ 함량이 70% 이상인 것을 최대 5%까지 사용할 수 있고 여기에 한 종류의 무기 혼합재에 대해서만 5% 이하로 추가할 수 있도록 규정하고 있다. 하지만 석회석 미분말을 사용한 시멘트의 경우 강열감량을 3.5%로 엄격하게 관리하고 있기 때문에 PC에 사용되는 석회석 미분말 사용량은 약 3%에 그친다고 알려져 있다. ASTM C595-Standard Specification for Blended Hydraulic Cements[6]에서는 2012년 개정을 통해 석회석 미분말 단독으로 사용되는 혼합시멘트 및 3성분계 혼합시멘트에 대해서 석회석 미분말을 최대 15%까지 사용할 수 있다고 규정하고 있다.

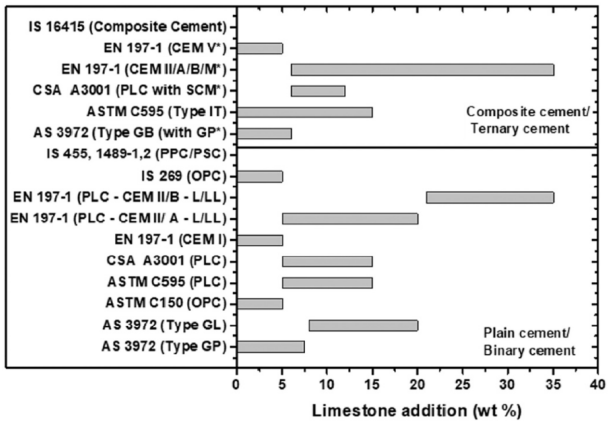

Fig. 1. Allowable limit for limestone addition in different standards[2]

Table 2. Requirements of different standards for PLC

Standards		EN 197-1:2011						ASTM C595	Proposal of Japan			
Strength type		32.5N	32.5R	42.5N	42.5R	52.5N	52.5R	-	32.5N	32.5R	4.25N	42.5R
Density (g/cm^3)		-						Report the amount retained when wet-sieved on 45 μm (No. 325)	-			
Fineness (cm^2/g)		-							Min. 2500			
Setting	Initial (M)	Min. 75		Min. 60		Min. 45		Min. 45	Min. 60			
	final (H)							Max. 7	Max. 10			
Autoclaved expansion (%)		-						Max. 0.80	-			
Autoclaved contraction (%)		-						Max. 0.20	-			
Air content of mortar (%)		-						Max. 12	-			
Soundness by Le chatelier (mm)		Max. 10						-	Max. 10			
Comp. strength (MPa)	2d	-	≥10	≥10	≥20	≥20	≥30		-	≥10	≥10	≥20
	3d	-	-	-	-	-	-	≥13	-	-	-	-
	7d	≥16	-	-	-	-	-	≥20	≥16	-	-	-
	28d	≥32.5 ≤52.5		≥42.5 ≤62.5		≥52.5		≥25	≥32.5 ≤52.5		≥42.5 ≤62.5	
MgO (%)		-						-	Max. 5.0			
SO_3 (%)		Max. 3.5			Max. 4.0			Max. 3.0	Max. 3.0			
Total alkali (%)		-						-	Max. 0.75			
Chloride content (%)		Max. 0.1						-	Max. 0.02			
Loss on ignition (%)		-						Max. 10	-			

캐나다에서는 1983년 CSA A5를 통해 10종류의 시멘트에 최대 5%의 석회석 미분말의 사용을 규정하였다. 또한, 2008년 CSA A3000 -Cementitious Materials Compendium[7]을 제정하면서 5~15%의 석회석 미분말의 사용을 허용하도록 하였고 이 규정은 미국의 ASTM C595 개정의 참고가 되었다.

일본의 경우, 2009년 개정된 JIS R 5210 -Portland Cement[8]에서 시멘트의 소량혼합성분으로 석회석을 5%까지 허용하고 강열감량을 3%에서 5%로 변경하였다. 이때 사용되는 석회석미분말은 $CaCO_3$ 함량이 90% 이상이고 Al_2O_3 함량 1% 이하의 품질을 만족해야 한다. 한편, 2001년 일본 시멘트 협회 석회석 미분말 전문위원회에서 석회석 필러 시멘트의 표준정보(TR)안을 작성하여 표준을 제정하려 하였으나, 심의과정에서 기각됨에 따라, PLC에 대한 규정은 아직 제정되어 있지 않은 상황이다.

추가적으로, 멕시코 표준 NMX C-414도 석회석을 최대 35%까지 허용하고 있으며, 뉴질랜드의 PLC는 최대 15%의 석회석으로 생산되고 브라질에서는 최대 10% 석회석이 허용되고 있다.[9]

한편 국내에서는, 2013년 개정된 KS L 5201-Portland Cement[10]에서 시멘트의 혼합재를 석회석 미분말 5%, 고로슬래그, 포졸란, 플라이 애시 중 한 종류 5%로 혼합할 수 있도록 하였다. 하지만 이 개정은 포틀랜드 시멘트의 성능을 고려하지 않은 채 혼합재량을 단순 증대시키는 방향으로 개정된 것으로, 미국이나 유럽과 같이 PC와 PLC의 석회석 미분말 사용량을 구분하는 방식의 제·개정이 필요할 것으로 생각된다. 또한, 일부 연구자들에 의해 PLC에 대한 연구가 진행되어 그 가능성을 보고하면서 관련 표준 정비를 위한 움직임이 있었지만, 아직까지 제정된 규격은 없는 실정이다.

3. PLC의 특성 및 해외 연구동향

3.1 PLC를 사용한 굳지 않은 콘크리트의 특성

시멘트 입자는 표면의 물을 흡수하여 수화하므로 타설된 콘크리트의 블리딩은 시멘트 입자의 표면적에 크게 의존한다. 일반적으로 PLC는 PC보다 비표면적이 크기 때문에 수분 흡수량이 증가하고 결과적으로 블리딩이 감소하게 된다. Barcelo[11]는 시멘트에 석회석을 사용하면 블리딩이 약간 감소할 수 있지만, 작업성은 PC와 비교하여 유사한 수준이라고 보고하였다. Barrett[12]과 Cost[13]의 연구에 따르면 PLC는 응결 시간에 약간의 영향을 미칠 수 있지만 15% 이하의 첨가율 범위에서는 유사하거나 약간 빠른 것으로 확인되었다. 응결시간에 미치는 석회석 미분말의 영향은 분말도와 밀접한 관련이 있다고 보고되어 왔으며 미세한 분말을 사용할수록 응결시간은 단축된다.

굳지 않은 콘크리트에서 석회석 미분말 입자는 시멘트 수화 생성물의 핵(Nucleation sites)으로 작용할 수 있다.[14] 미세한 석회석 미분말을 사용하면 표면적의 증가에 의해, 수산화칼슘의 침전을 위한 부가적인 장소를 제공하여 수화반응의 가속을 유도하게 된다. Sun H.F.[15]는 석회석 미분말의 고유한 계면 특성 때문에 시멘트 수화생성물의 불균일한 핵이 형성되고 그 결과, 석회석 미분말은 다른 SCM(Supplementary Cementitious Material)보다 초기 재령에서 시멘트 클링커의 수화를 촉진시킬 수 있다고 설명한다.

또한, 시멘트의 수화반응에 있어 시멘트 경화체에는 미처 수화가 진행되지 않은 미수화 시멘트들이 다량 존재하게 된다. 이것은 단지 필러로서 콘크리트 내부에 존재하는데, 매우 비싼 필러인 셈이다. 미수화 시멘트의 필러 부분을 석회석 미분말로 채운다면 비용 절감을 기대할 수 있다.

3.2 PLC를 사용한 경화 콘크리트의 특성

과거의 연구논문에 따르면, 대부분의 연구자들은 석회석 미분말의 반응성이 매우 낮고 단지 필러 역할만 한다고 믿었다. 하지만 최근의 연구결과에서는 석회석 미분말 입자가 미세해질수록 완전히 반응하여 다양한 카보알루미네이트 상을 형성한다고 보고되고 있다[16]. 석회석 미분말을 최대 15% 사용한 경우, 칼슘카보알루미네이트 생성, 시멘트 수화의 가속화, 입자 팩킹 효과 등에 의해 초기강도는 실제로 증가하게 된다. 다만, 석회석의 사용량을 늘리는데는 한계가 있는데, 15% 이상 사용하면 페이스트가 희석되어 강도가 떨어지게 된다[17].

Barcelo[18]는 클링커와 석회석 미분말을 혼합 분쇄하여 제조한 PLC(라임스톤 13.5% 사용)가 PC와 유사한 강도를 얻을 수 있다고 보고하였다. 이 연구에서 PLC는 PC보다 약 10% 더 많은 석회석 미분말을 사용하였는데, 제조된 시멘트의 Blaine Fineness는 PLC가 800 cm^2/g 정도 높은 값을 나타내었다. PLC가 PC와 동등한 강도를 갖게 되는 메커니즘은 아래와 같이 설명된다.

· PLC의 고분말화에 의한 수화반응의 가속화
· 미세하게 분쇄된 석회석 미분말의 핵종 효과
· Carboaluminate 형성과 Filler effect

결과적으로 PC보다 클링커 사용량이 10% 적었음에도 불구하고 모르타르 및 콘크리트 시험체의 강도가 유사한 것으로 나타났고(Fig. 2참조), 이를 위해서는 석회석 미분말이 1% 추가될 때마다 80~100 cm^2/g 정도의 분말도 증가가 필요하다고 보고하였다.

PLC를 사용한 콘크리트는 공극의 연결성이 감소하여 투과성이 감소하게 된다.[19] 이는 향상된 입자 충전 효과 및 페이스트 밀도와 같은 물리적 메커니즘과 핵 생성 사이트 현상에 의한 결과라고 설명할 수 있다. 또한, 석회석 미분말은 시멘트 및 SCM의 알루미네이트 화합물과 반응하여 내구성 있는 카보알루미네이트 결정을 생성함

에 따라 낮은 투과성을 갖게 된다. 게다가 에트린자이트 안정화 및 수화 생성물의 부피 증가에 의해 다공성을 줄이고 강도 및 내구성을 향상시키게 된다.[20]

3.3 다른 SCM과의 상호작용

PLC를 사용하면 플라이애시, 슬래그와 같은 SCM의 효율성을 높일 수 있다. 관련연구[21]에 따르면 PLC는 C급 플라이애시와 특별한 시너지 효과를 일으켜 더 높은 압축강도를 나타내기 때문에 SCM의 강도발현 지연현상을 상쇄시킬 수 있다.

3.4 PLC의 CO_2 배출 저감 효과

시멘트 제조에 있어서 CO_2 배출의 주요 원인은 석회석의 소성 공정과 원료를 가열하기 위한 화석 연료의 소비이다. 석회석 미분말을 5~15% 수준으로 사용하면, 동일한 양의 시멘트에 대해 더 적은 클링커를 사용하기 때문에 에너지 소비와 CO_2 배출량을 저감시킬 수 있다. Fig. 3은 PC와 PLC의 CO_2 배출량을 나타낸 것으로 PLC의 경우 PC 대비 CO_2 배출량을 약 10% 줄일 수 있는 것을 보여준다.[17]

3.5 PLC 적용 사례

PLC를 현장에 접목한 사례로는, Colorado State Highway 470이 있으며 PLC를 250 마일에 걸쳐 약 277,000 톤 이상 사용하여 탄소 배출량을 기존 OPC 사용 대비 약 10% 저감한 것으로 알려져 있다.[22] 또한, Hooton[23]은 도로포장과 장벽에 PLC를 성공적으로 사용한 사례를 소개하였다. Thomas[24]은 캐나다 퀘벡주 가티노의 대형 주차장 공사에 PC와 동등한 성능을 갖는 PLC를 사용하였고, 품질에 어떠한 문제도 발견되지 않았다고 보고하였다. PLC의 실제 현장 적용 및 사용 허가 사례는 도로 포장용을 중심으로 점차 늘어나는 상황이며, 이에 따라 품질 기준 및 다양한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 한편, Fig. 4는 2018년과 2021년을 기준으로 미국 각 주의 PLC 수용 상황을 나타낸 것이다.[25] 2018년과 비교하여 2021년에는 더 많은 지역에서 PLC를 수용하였고, 아직 수용하

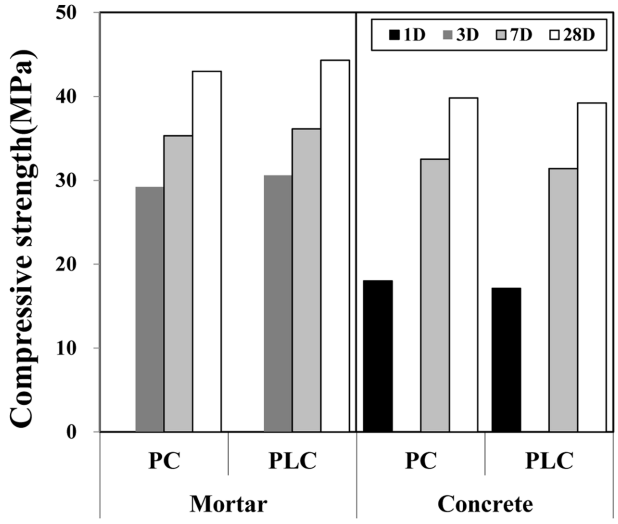

Fig. 2. Compressive strength test results in Laurent's study[18]

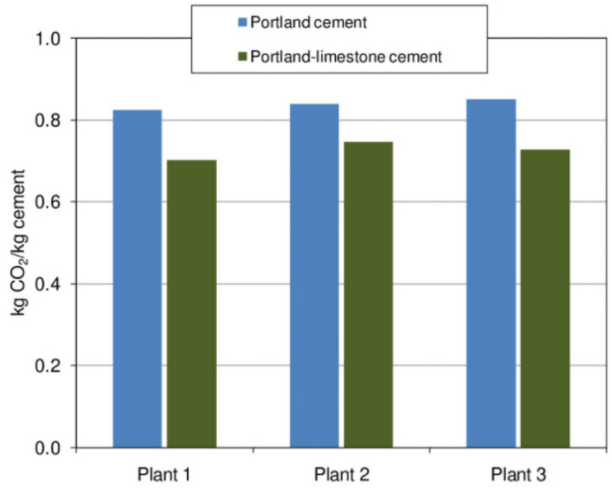

Fig. 3. CO_2 emissions of PC and PLC[17]

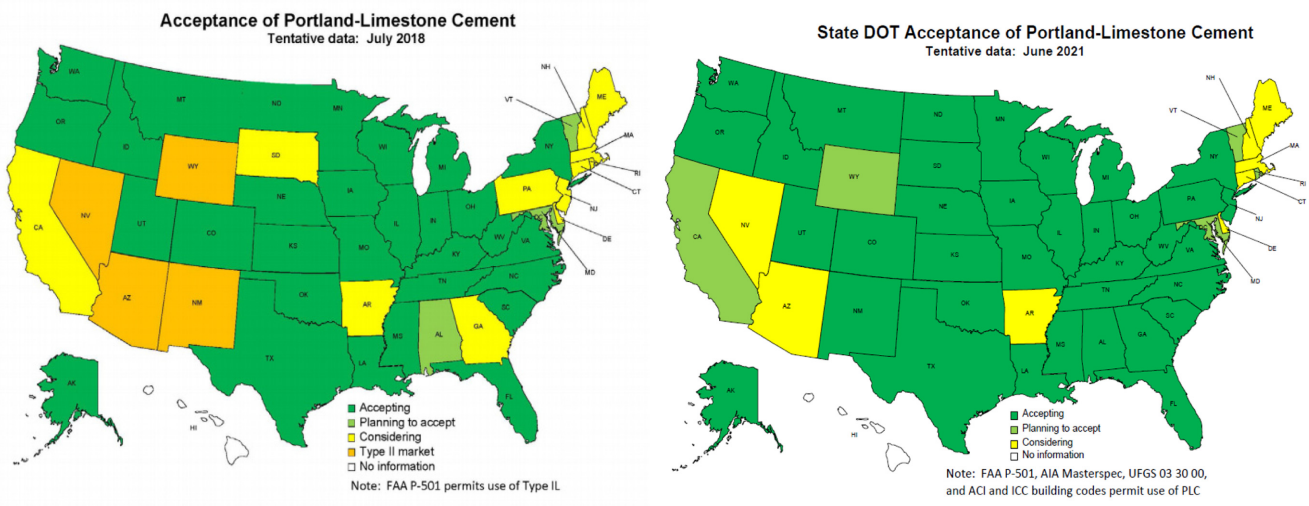

Fig. 4. Acceptance situation of PLC in United States (L : 2018, R : 2021)[25]

지 않은 일부 지역에서도 PLC의 도입을 고려 중인 것으로 나타나 미국 전역으로 PLC의 사용이 확대된 것을 확인할 수 있다.

4. PLC 관련 국내 연구동향

석회석 미분말과 관련된 기존의 국내 연구 사례를 살펴보면 석회석 미분말의 경우 반응성이 없으며 대부분 필러효과에 의해 초기강도를 증진시키는 효과를 나타내는 것이라는 견해가 지배적이었다. 하지만 최근의 일부 연구논문에서는 시멘트의 수화반응을 촉진시키는 촉매작용이외에도 C3A와 결합하여 카보알루미네이트 형태의 수화물을 생성하는 수화반응을 한다는 것을 규명하면서 PLC의 사용 가능성에 대해 검토하였다.

백춘기[26]는 시멘트 클링커와 석회석을 볼밀로 직접 혼합 분쇄한 PLC를 사용하여 제조한 콘크리트의 물성을 평가하여 석회석 미분말 혼입율 15% 이내의 시험체에서는 PC를 사용한 콘크리트와 비교하여 동등 수준의 강도 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 김동진[27]은 5,000 cm^2/g 이상의 고분말도를 갖는 석회석 미분말의 강도증진 메커니즘에 대해 설명하며 단순한 필러가 아닌 시멘트 결합재의 일종으로 재정의할 필요가 있다고 보고하였다. 방진욱[28]은 시멘트 클링커와 석회석 미분말을 혼합 분쇄한 PLC를 대상으로 연구를 수행하여, 혼입율 10%와 15%의 콘크리트 시험체에서 28일강도와 동결융해 저항성이 PC 배합과 동등수준을 나타내는 것을 확인하였다. 최우현[29]은 PLC의 내구성에 대한 연구에서 석회석 미분말의 사용으로 인한 동결융해 저항성, 제설제염 저항성 등의 영향은 거의 없으며, ASR에 대해서도 긍정적으로 검토될 수 있음을 보고하였다. 한편, 방미진[30]은 20,000 cm^2/g 수준의 초미세 분말도를 갖는 석회석 미분말로 제조한 PLC의 특성을 페이스트 레벨에서 검토하였고, 석회석 미분말 치환율 5% 이상에서 압축강도가 감소하는 경향을 보고하였다.

이상의 연구 결과를 통해, 국내에서도 PC와 유사한 성능을 갖는 PLC에 대한 연구 사례를 확인할 수 있었다. 국내외 연구 사례 및 관련 표준을 참고하여 한국형 PLC의 개발 및 실용화에 대한 다각적인 논의 및 연구가 시급하게 이루어져야 할 것으로 생각된다.

5. 결 론

석회석 미분말은 기존 OPC 대비 탄소 배출량이 극히 적기 때문에 저탄소 혼합시멘트의 대표적인 혼합재로 발전되어 왔으며, 석회석 미분말을 시멘트 클링커의 15%까지 혼입한 PLC는 PC와 동등한 강도와 내구성을 갖는다고 다수의 연구논문에서 보고하고 있다. 전 세계의 공동과제인 탄소중립을 달성하기 위한 시멘트 분야에서의 노력의 일환으로 낮은 클링커계수를 갖는 PLC의 실용화 및 표준화는 거스를 수 없는 시대적, 환경적 요구이다. 다수의 연구 결과 및 이를 바탕으로 이미 정립되어 있는 표준을 참고하여, 국내 실정에 맞는 PLC 표준 제정을 위한 노력을 해야 할 것이다.

<참고문헌>

1. Favier, A., De Wolf, C., Scrivener, K., Habert, G., A sustainable future for the European Cement and Concrete Industry_Technology assessment for full decarbonisation of the industry by 2050, 2018, p. 25-27
2. Dhandapani, Y., Santhanama, M., Kaladharan, G., Ramanathan, S., Towards ternary binders involving limestone additions—A review, Cement and Concrete Research, Vol. 134, 2021, p. 3
3. BS EN 197-1:2011, Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements
4. BS EN 197-5:2021, Cement - Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI
5. ASTM C 150/C150M-20, Standard Specification for Portland Cement
6. ASTM C 595/C595M-20, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements
7. CSA A3000, Cementitious Materials Compendium
8. JIS R 5210:2009, ポルトランドセメント
9. Gouen, C., Portland limestone cement, National Precast Concrete Association Precast Inc. Magazine, 2014
10. KS L 5201:2017, 포틀랜드 시멘트
11. Barcelo, L., Blair, B., Delagrave, A., Innis, A., Knight, G., Thomas, M.D.A., Weiss, W.J., The Five Ws and One H of Portland Limestone Cement, Concrete International, V. 35, No. 11, 2013, pp. 37-40.
12. Barrett, T.J., Sun, H., Weiss, W.J., Performance of More Sustainable Cements that Include Interground Limestone Additions of up to 15%, Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, IN, 2013.
13. Cost, V.T., Knight, G., Wilson, W., Shannon, J., Howard, I.L., Performance of Typical Concrete Mixtures for Transportation Structures as Influenced by Portland Limestone Cement from Five Sources, International Concrete Sustainability Conference, San Francisco, CA, 2013.
14. Lawrence, P., Cyr, M., Ringot, E., Mineral admixtures in mortars - Effect of inert materials on short-term hydration, Cement and Concrete Research, Vol. 33, 2003, pp. 1939-1947.
15. Sun, H., Hohl, B., Cao, Y., Handwerker, C., Rushing, T.S., Cummins T.K., Weiss, J., Jet mill grinding of portland cement, limestone, and fly ash: Impact on particle size, hydration rate, and strength", Cement & Concrete Composites, Vol 44, 2013, pp. 41-49.
16. Hooton, D., Nokken, M., Thomas, M.D.A, Portland-Limestone Cements : State-of-the-Art Report and Gap Analysis for CSA A3000, 2007.
17. Tennis, P.D., Thomas, M.D.A, Weiss, W.J., State-of-the-Art

Report on Use of Limestone in Cements at Levels of up to 15%, PCA R&D SN3148, Portland Cement Association, 2011.
18. Barcelo, L., Thomas, M.D.A., Cail, K., Delagrave, A., Blair, B., Portland Limestone Cement Equivalent Strength Explained, Concrete International, Vol. 35, No. 11, Nov. 2013, pp. 41-47.
19. Thomas, M.D.A., Hooton, D., The Durability of Concrete Produced with Portland- Limestone Cement: Canadian Studies, SN3142, Portland Cement Association, 2010.
20. Ramezanianpour A.A., Ghiasvand E., Nickseresht I., Mahdikhani M., Moodi F., Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes, Cement & Concrete Composites, Vol. 31, 2009, pp. 715-720.
21. Sharma, A., Sirotiak, T., Wang, X., Taylor, P., Angadi, P., Payne, S., Portland limestone cement for reduced shrinkage and enhanced durability of concrete, Magazine of Concrete Research, Vol 73, 2021, pp.147-162.
22. Smartz, B.W., Laker, T.S., Evaluation of Portland Limestone Cements in Colorado and Utah Transportation Projects: 2007 to Present," TRB 2012 Annual Meeting.
23. Hooton, R., Field Trials of Concretes Made with Portland-Limestone Cements, TRB 2012 Annual Meeting, Paper No. P12-6482.
24. Thomas, M.D.A., Hooton, D., Cail, K., Smith, B.A., de Wal, J., Kazanis, K.G., Field Trials of Concrete Produced with Portland Limestone Cement, Concrete International, Vol. 32, 2010, pp. 35-41.
25. FAA P-501, AIA Masterspec, UFUG 03 30 00, and ACI and ICC building codes permit use of PLC
26. 백춘기, 석회석 혼합 시멘트를 사용한 콘크리트 경화 전·후의 특성 평가, 충남대학교 석사학위논문, 2017, pp. 33-36.
27. 김동진, 석회석 미분말의 재료적 특성 및 콘크리트 압축강도 증진에 관한 연구, 중앙대학교 석사학위논문, pp. 59-61.
28. 방진욱, 권성준, 신경준, 정우정, 김윤용, 석회석 혼합 시멘트로 제조된 콘크리트의 기초 물성, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집 제19권 제2호, 2015, pp.125-132.
29. 최우현, 박철우, 정원경, 전범준, 김규선, 석회석 미분말을 첨가한 친환경 시멘트 콘크리트의 내구 특성, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집 제16권 제5호, 2012, pp.59-67.
30. 방미진, 포틀랜드 석회석 시멘트 페이스트의 역학적 성능 및수화반응 특성에 관한 연구, 강원대학교 석사학위논문, 2019, pp. 37-50.