

석회석 혼합 시멘트로 제조된 콘크리트의 기초 물성

Material Properties of Concrete Produced with Limestone Blended Cement

방진욱¹⁾ 권성준²⁾ 신경준³⁾ 정우정⁴⁾ 김윤용^{5)*}
Jin-Wook Bang Seung-Jun Kwon Kyung-Joon Shin Woo-Jung Chung Yun-Yong Kim

Abstract

This paper presents an experimental investigation in order to evaluate fresh and hardened properties of LP (Limestone Powder) blended cement concrete. The cement contents of the mixtures are replaced by LP in the range of 10%, 15%, 25%, and 35%, while a control mixture is prepared with only OPC (Ordinary Portland Cement). The fresh concrete properties like slump and air content are similar to those of control mixture up to 35% of replacement ratio of LP, however a delay in setting time is evaluated. The hardened properties including compressive strength, flexural strength, and rapid freezing and thawing resistance shows similar results of control mixture up to 15% of replacement. Relatively lower strength development is evaluated over 25% replacement of LP. For accelerated carbonation test, resistance to carbonation rapidly decreases with increasing LP replacement ratio due to the limited amount of Ca(OH)₂. From the study, LP replacement under 15% can be adopted considering reduction of strength and resistance to carbonation.

Keywords : Limestone powder, Cement content, Ordinary portland cement, Fresh concrete, Hardened concrete

1. 서론

시멘트 산업은 지구 온실가스 발생량의 약 5%를 차지하고 제조시 소모되는 에너지량은 약 4600 MJ/ton으로 이를 저감시키기 위해 많은 연구들이 수행되고 있다 (Hendriks et al., 2002; Government of Canada NRC, 2009). 시멘트기반 재료의 환경 친화적이고 지속가능한 요구가 증가됨에 따라 플라이애시, 고로슬래그, 석회석 등 시멘트를 대체할 수 있는 무기계 건설재료에 대한 요구가 증가되고 있다. 그중 석회석의 경우 풍부한 자원량, 재료공급의 안정성, 상대적으로 저렴함 등으로 비용절감의 측면 뿐 만 아니라 콘크리트에 혼합될 경우 굳지 않은 및 굳은 콘크리트 기초물성 및 역학적 특성에 긍정적으로 작용할 수 있으므로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Vance et al., 2013; Lothenbach et al., 2008; Dhir et al., 2007). 국내의 경우 아직까지 콘크리트에

적용하기 위한 품질규격이 마련되어 있지 않지만 외국에서는 탄소저감 방안에 있어 중요한 재료로 고려되고 있어 관련 규격의 제정 및 확립이 활발히 추진되고 있는 실정이다. 석회석의 적용범위에 있어 대부분 포트랜드 시멘트 (OPC)의 1~5%까지 첨가할 수 있도록 허용하고 있었지만 (De Weerd et al., 2011), 최근 미국 (Tennis et al., 2011)의 경우 ASTM C 595-12에서 시멘트의 15%까지 첨가한 Type II 시멘트를 규정하였고, 중국, 일본 캐나다, 호주 등 석회석을 시멘트 재료로 사용하고 있는 나라에서는 그 사용량을 최대 15%까지 확대하고 있는 실정/계획이므로 석회석 시멘트에 대한 연구가 활발히 진행될 것으로 예상된다. 석회석에 대한 국제적인 관심과 필요성을 고려해 볼 때 국내에서도 이에 대한 규격화, 다양한 분야의 심도 있는 연구가 시급히 진행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 석회석 미분말 (LP: Limestone Powder)을

1) 정회원, 충남대학교 토목공학과 박사후 연구원
2) 정회원, 한남대학교 건설시스템공학과 교수
3) 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수
4) 정회원, (주)태영건설 기술연구소
5) 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수, 교신저자

* Corresponding author : yunkim@cnu.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2015년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2015년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Physical properties of OPC and LC

Cement types	Limestone contents (%)	Blain (cm ² /g)	Density (g/cm ³)	Compressive strength (MPa)		
				3 days	7 days	28 days
OPC	0	3,640	3.15	35.4	47.3	54.8
LC-10	10	4879	3.12	39.1	50.4	56.7
LC-15	15	5677	3.12	34.9	47.8	50.8
LC-25	25	4857	3.09	26.8	39.8	47.4
LC-35	35	5640	2.99	23.4	32.0	36.2

Table 2 Properties of used LP

Item Type	Density (g/cm ³)	Ig.loss (%)	Chemical composition (%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
LP	2.70	41.19	7.94	2.35	0.67	46.02	1.99

혼합하여 제조한 석회석 혼합 시멘트 (LC: Limestone Cement) 콘크리트의 기초물성 특성을 평가하였다. 석회석 혼입량에 따라 제조된 석회석 혼합 시멘트와 OPC만을 사용한 콘크리트를 제조하였고, 굳지 않은 및 굳은 콘크리트의 특성을 실험을 통해 평가하였다. 실험결과와 분석을 통해 적정 석회석 혼입범위와 콘크리트 재료로 활용하기 위한 요구사항들이 고찰될 것이다.

2. 석회석 혼합 시멘트 콘크리트 실험의 개요

2.1 석회석 혼합 시멘트 제조

본 연구에서 사용된 LC는 석회석 미분말의 혼입량에 따라 총 4종류이다. LC는 시멘트 제조용 석회석과 시멘트 클링커를 혼합하여 ball mill 장치로 직접 미분쇄 제조하였다. 본 연구의 LC에 따른 물리적 특성을 Table 1에 나타내었는데, 각 물성치에 대한 연구는 기존문헌에 상세히 소개되어 있다 (Park et al., 2014). 사용된 LP의 특성을 Table 2에 나타내었다.

2.2 사용재료 및 배합

콘크리트 제조를 위해 사용된 결합재로 OPC와 LC를 사용하였다. 잔골재는 표건밀도 2.59 g/cm³, 흡수율 1.57%의 5 mm 이하 강사를 사용하였고, 굵은골재는 표건밀도 2.67 g/cm³, 흡수율 0.78%인 최대치수 25 mm의 부순자갈을 사용하였다. 고성능 감수제는 밀도 1.1 g/cm³의 나프탈렌계를 사용하였다. OPC를 사용한 콘크리트에 대하여 목표 설계기준강도 24 MPa, 목표 슬럼프 120±20 mm, 목표 공기량이 4.5±1.5%을

Table 3 Mix proportions for concrete

Mix.	W/B	S/a	Unit weight (kg/m ³)				
			W	C	S	G	SP
OPC	53	43	180	340	746	1,000	1.7
LC-10				340	745	999	
LC-15				340	745	999	
LC-25				340	744	997	
LC-35				340	739	991	

- W: Water, C: Cement, S: Sand, G: Gravel, SP: Super-plasticizer

만족하도록 배합설계를 수행하였다. 고성능 감수제는 OPC 콘크리트 사용량과 동일하게 혼입하였다. Table 3은 본 연구의 콘크리트 배합을 나타낸다. 콘크리트 비빔을 위해 옴니믹서에 골재와 시멘트를 투입하여 1분 30초의 건비빔을 수행하였고, 물과 고성능 감수제를 혼입하여 2분 동안 습비빔을 실시하였다. 습비빔 후 콘크리트를 배출하여 굳지 않은 콘크리트 시험을 수행하였고, 시험 목적에 부합하는 공시체를 제작하여 재령에 따른 굳은 콘크리트의 역학적 시험을 수행하였다. 제조된 콘크리트에 대한 굳지 않은 및 굳은 시험 방법은 2.3절 및 2.4절에 각각 기술되어 있다.

2.3 굳지 않은 콘크리트 시험

OPC와 LC를 사용한 콘크리트의 굳지 않은 특성을 평가하기 위해 슬럼프 시험과 공기량 시험을 수행하였고, 시간 경과에 따른 유동특성 및 공기량 저하 정도를 평가하였다. 콘크리트 배출시간을 기준으로 30분, 60분 후 총 3회 실시하였다.

콘크리트의 응결특성을 평가하기 위해 응결시간 시험 시험을 수행하였다. 관입 저항성침을 이용하는 방법으로 콘크리트의 응결 시간을 측정하였다. 시료는 제조한 콘크리트를 4.75 mm 체를 사용하여 모르타르만을 분리하였고, ϕ150 × 150 mm 실린더 몰드에 채운 후 시간경과에 따른 관입시험을 수행하였다. 초결시간은 3.5 MPa에 도달하는 시간, 28.0



(a) Setting time test (b) Bleeding test

Photo 1 Test view of fresh concrete

Table 4 Tests and related standards for fresh concrete

Test	Referred Korean Standards
Slump	KS F 2402
Air contents	KS F 2421
Bleeding	KS F 2414
Setting time	KS F 2436

MPa 이상이 될 때의 시간을 종결로 하였다. 또한 블리딩 시험을 위해 Photo 1과 같이 지름 250 mm, 높이 285 mm의 실린더 용기에 각 배합별 동일량의 콘크리트를 충전한 후 처음 60분 동안 10분 간격으로 그 후 블리딩이 멈출 때 까지 30분 간격으로 물을 빨아내어 시간에 따른 블리딩으로 발생하는 물의 양을 측정하였다. Photo 1은 응결시간 측정 및 블리딩 시험 전경을 나타내며 굳지 않은 콘크리트 시험은 온도 20±1℃, 습도 60%로 조절되는 항온·항습실에서 수행되었다. 본 연구의 굳지 않은 콘크리트 시험을 위해 인용된 관련 KS 규격을 Table 4에 나타내었다.

2.4 굳은 콘크리트 시험

OPC와 LC로 제조한 콘크리트의 압축강도 및 휨강도 시험을 수행하여 시멘트 종류에 따른 기초 역학적 특성을 파악하였다. 압축강도 시험을 위해 $\phi 100 \times 200$ mm의 실린더형 공시체를 제작하였고, KS F 2405의 방법으로 시험을 수행하였다. 또한 $100 \times 100 \times 400$ mm의 각주형 공시체를 제작하였고, KS F 2408 기준에 따라 3등분점 재하방법으로 휨시험을 수행하였다. 압축강도와 휨강도 시험은 콘크리트 배합별 채령 3일, 7일, 28일 및 56일에 수행되었다.

2.5 축진 내구성 시험

2.5.1 동결융해시험

급속 동결융해시험은 KS F 2456에 준하여 수행하였고,

76 mm × 76 mm × 356 mm의 각주형 공시체를 제작하였다. 탈형 후 온도 20±1℃의 조건에서 채령 14일간 수중양생 후 시험을 실시하였다. 측정 cycle은 공시체의 중심 온도가 4℃에서 -18℃로 떨어지고, -18℃에서 4℃로 상승한 것을 1 cycle로 하여 300 cycle까지 동결융해를 반복하였으며 30 cycle마다 공시체의 상대 동탄성계수와 질량감소율을 측정하였다.

2.5.2 축진 탄산화 시험

축진 탄산화 시험은 KS F 2584 콘크리트의 축진 탄산화 시험 방법에 준하여 수행하였으며 100 mm × 100 mm × 400 mm의 각주형 공시체를 각 배합별로 3개씩 제작하였다. 몰드 탈형 후 온도 20±1℃의 수중에서 28일간 양생 후 온도 20±1℃, 상대습도 60±1℃의 항온 항습기에 채령 8주까지 정치하였으며 공시체의 타설면, 저면, 양단면을 에폭시도 도포하였다. 실험조건은 온도 20℃, 상대습도 60%로 설정하였고, 시험 후 탄산화 깊이의 측정은 1% 페놀프탈레인 용액을 분무하여 축진 개시부터 7, 28, 56일에 3개의 공시체에 대하여 6면 30개소의 평균 탄산화 깊이를 측정하였다.

3. 석회석 미분말 결합재 콘크리트의 특성 평가

3.1 굳지 않은 콘크리트 특성 평가

3.1.1 슬럼프 및 공기량

OPC와 LC로 제조한 각각의 콘크리트의 슬럼프 경시변화는 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 초기 슬럼프 측정결과 OPC를 사용한 콘크리트의 슬럼프가 가장 크게 측정되었지만 LC를 사용한 콘크리트가 OPC 콘크리트의 약 92%~96% 수준

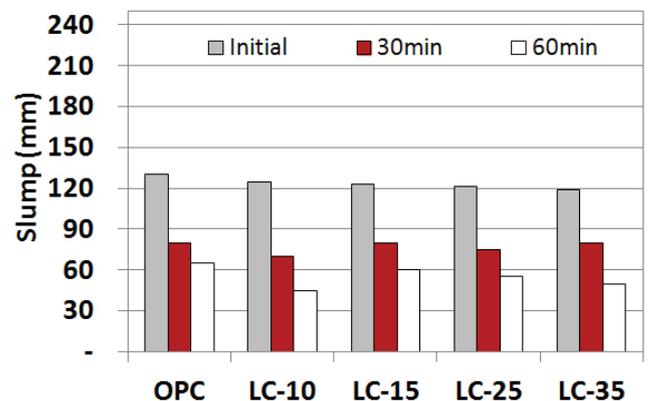


Fig. 2 Slump variation of concrete against elapsed time

의 슬럼프를 나타내어 슬럼프 저하는 미미한 것으로 나타났다. 대부분 목표 오차범위 ± 20 mm를 만족하므로 시멘트 종류에 관계없이 동등수준의 슬럼프를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 분말도가 높은 석회석 입자의 사용은 다량의 추가 단위수량이 필요로 하지 않기 때문이다 (Bonavetti et al., 1996; Bonavetti et al., 2000). Fig. 3에 콘크리트 배합의 시간경과에 따른 슬럼프 손실 속도를 나타내었다. 각 시간에 해당되는 슬럼프를 초기 슬럼프로 나누어 무차원화 하였다 (Sim et al., 2010). 모든 배합은 시간의 경과에 따라 슬럼프는 감소하는 경향을 나타내었는데 타설 후 30분까지 거의 선형적으로 급하게 감소하였지만 30분에서 60분까지는 슬럼프 감소 기울기가 완만하였다. Fig. 4는 시간의 경과에 따른 공기량 측정 결과를 나타내고 있다. 모든 콘크리트의 초기 공기량은 목표 공기량 $4.5 \pm 1.5\%$ 를 만족하는 것으로 나타났으나 시간의 경과에 따라 석회석 혼입률이 증가할수록 공기량 감소율이 증가되었다. OPC의 경우 60분

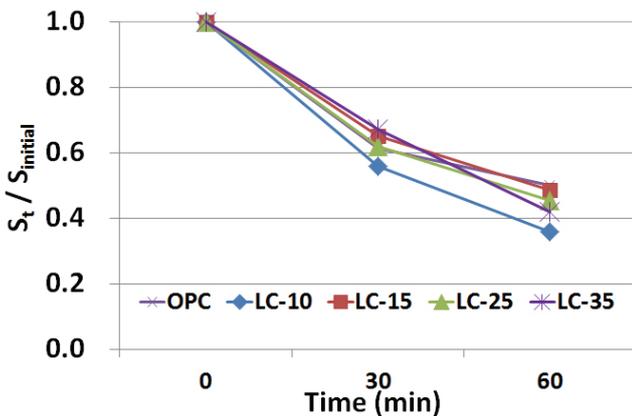


Fig. 3 Relative slump loss of concrete against elapsed time

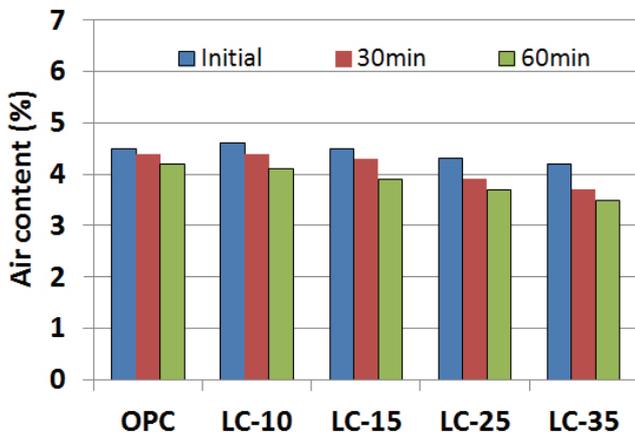


Fig. 4 Air content variation of concrete against elapsed time

후 6.7% 감소율을 나타낸 것에 비해 석회석을 혼입한 배합은 10.9%~16.7% 정도의 감소율을 보였다.

3.1.2 응결시간

응결시간 경과에 따른 관입저항과의 관계곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 단위 시멘트량이 가장 많은 OPC 배합이 초결 (3.5 MPa) 및 종결 (28 MPa)에 도달하는 시간이 약 610분과 840분으로 가장 짧게 나타났으며, LC의 경우 석회석의 혼입률이 증가할수록 응결시간이 지연되었다. 석회석 미분말의 혼입률이 증가할수록 초결시간 및 종결시간이 지연되는 것으로 평가되었다. 특히 LC-35 배합에서 초결이 최대 24.7%, 종결시간이 최대 21.5% 지연되었다. 이러한 결과는 석회석 혼입률 증가에 따른 수화반응에 기여하는 단위 시멘트량 감소가 가장 큰 원인이며, 기존연구에서도 이러한 원인이 응결시간 지연의 가장 큰 원인이라 보고하고 있다 (Heikal et al., 2000).

3.1.3 블리딩

타설후 시간의 경과에 따른 콘크리트 배합의 블리딩으로 측정된 물의 양을 Fig. 6에 단위 표면적의 총 누적 블리딩량을 Fig. 7에 나타내었다. OPC 배합의 경우 240분까지 블리딩으로 발생하는 물의 양이 증가하다가 300분부터 급속히 저하되는 경향을 나타내었고, 420분에 블리딩 측정 시험을 종료하였다. 석회석 혼입 콘크리트의 경우 OPC 배합에 비해 240분까지 발생하는 물의 양이 적었지만 300분부터 시험 중

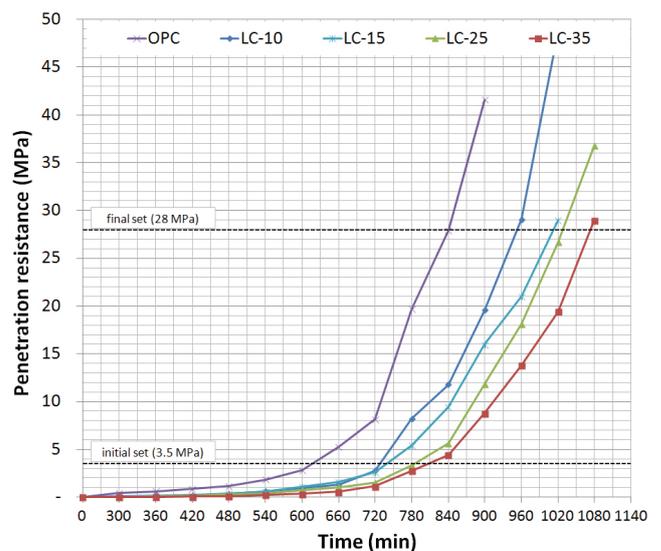


Fig. 5 Relation curve between penetration resistance and elapsed time

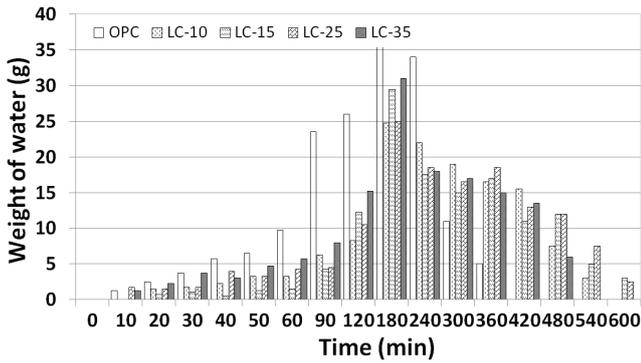


Fig. 6 Weight variation of water against elapsed time

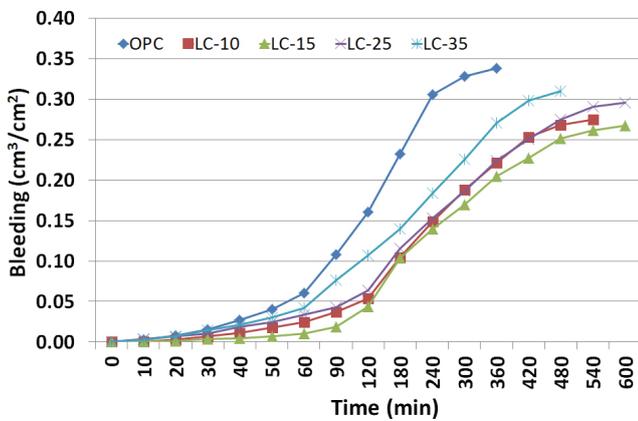


Fig. 7 Bleeding variation of concrete against elapsed time

료시까지 더 많은 물의 양이 발생되는 것을 확인할 수 있다. 타설후 약 180분 정도에서 모든 콘크리트 배합에서 블리딩으로 발생하는 물의 양이 가장 크게 큰 것으로 나타났으며, 그 후 감소되는 경향을 보이고 있다.

석회석 혼합 콘크리트 배합에서는 석회석 혼입이 증가할수록 블리딩이 증가되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 굳지 않은 콘크리트에서 일반적으로 약 10~20%의 잉여수가 발생되는데 (Jeon et al., 2013) OPC를 석회석으로 대체함으로써 수화에 요구되는 배합수량이 감소되어 잉여수 발생이 더욱 높아졌기 때문으로 판단된다. 그러나 석회석의 혼입은 OPC만을 사용한 배합에 비해 총 블리딩을 약 8%~21%까지 저감시킬 수 있어 블리딩 제어에 효과적인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 비표면적이 OPC 보다 큰 LC를 사용함으로써 공극의 모세관 현상으로 콘크리트 내부 물의 이동을 방해한 결과로 판단된다 (Bonavetti et al., 2000).

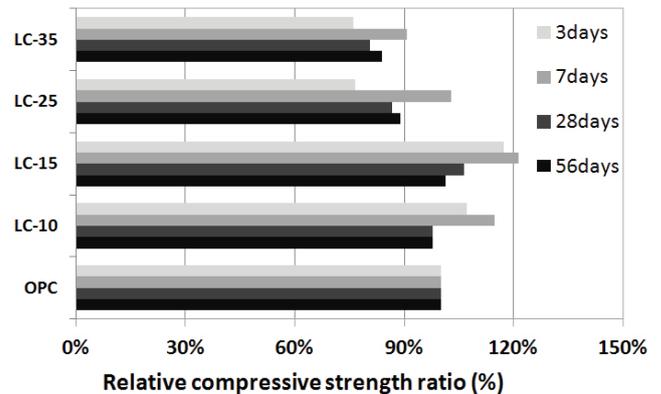
3.2 굳은 콘크리트 특성 평가

3.2.1 압축강도 및 휨강도

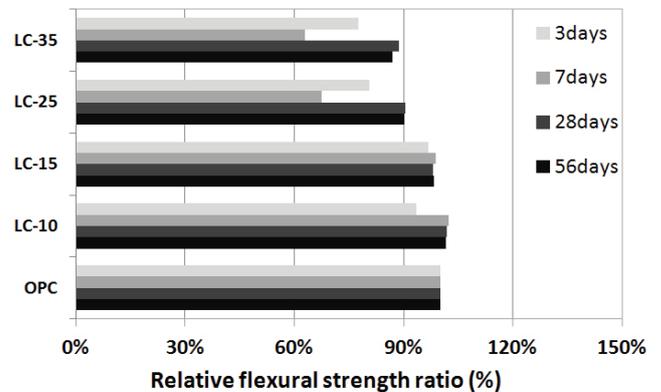
OPC 배합 및 LC를 이용하여 제조한 콘크리트의 강도평가를 수행하였다. 실험결과를 Table 5에 정리하였고, OPC 배합을 기준으로 각 재령에 따른 LC 혼합 콘크리트의 상대 강도 변화비 Fig. 8에 나타내었다. 모든 배합은 재령 28일의 목표 설계기준 압축강도 24 MPa를 상회하는 것으로 나타났다. LC-10과 LC-15 배합의 경우 3일, 7일의 초기 압축강도

Table 5 Compressive and flexural test results of each concrete

Mix.	Compressive strength (MPa)				Flexural strength (MPa)			
	3 days	7 days	28 days	56 days	3 days	7 days	28 days	56 days
OPC	20.8	24.4	32.4	35.1	3.1	4.3	5.3	6.1
LC-10	22.3	28.0	31.7	34.3	2.9	4.4	5.4	6.2
LC-15	24.4	29.6	34.5	35.6	3.0	4.3	5.2	6.0
LC-25	15.9	25.1	28.1	31.2	2.5	2.9	4.8	5.5
LC-35	15.8	22.1	26.1	29.4	2.4	2.7	4.7	5.3



(a) Compressive strength



(b) Flexural strength

Fig. 8 Relative strength ratio compared to OPC concrete

의 증가율은 OPC 배합에 비해 큰 경향을 나타내었지만 28일 및 56일에서는 비슷한 수준으로 평가되어 초기강도 증진에는 효과가 있지만 28일 이후의 재령의 강도증가 효과는 OPC 배합과 동등수준으로 평가되었다. 이러한 결과는 석회석의 혼입으로 시멘트 구성광물 중 알라이트 수화반응을 촉진시켜 초기강도 증진에 기여했기 때문이다 (Lee et al., 1999; Oh et al., 2002). 한편, LC-25와 LC-35 배합의 경우 대부분의 재령에서 OPC 배합의 압축강도 보다 낮게 측정되었고 재령에 따른 강도 증가율도 낮게 평가되었다. 강도 증가율이 가장 낮은 LC-35 배합의 경우 재령 3일, 7일, 28일 및 56일에 76%, 90%, 80% 및 84% 수준을 나타내고 있다. OPC를 대체하여 사용하는 석회석이 증가할수록 강도저하가 뚜렷이 발생하는 기존의 연구들과 유사한 결과를 얻을 수 있는데 이는 클링커 감소가 원인이다 (Ramezani-pour et al., 2013; De Weerd et al., 2011). 휨강도 역시 압축강도와 유사한 경향을 나타내었다.

3.2.2 급속 동결융해

동결융해 cycle이 반복됨에 따라 모든 배합의 상대동탄성계수는 감소하는 경향을 나타내었다 (Fig. 9). 시험종료 300 cycle에서 OPC 배합의 상대동탄성계수는 약 83%를 나타내었고 LC-10, LC-15, LC-25, LC-35 배합은 OPC 배합 대비 84%, 81%, 72%, 68% 수준으로 평가되었다. 또한 질량감소율은 모든 배합에서 급속하게 저하되는 경향을 나타내지 않았지만 석회석 혼입률이 증가할수록 질량감소율이 증가하는 것으로 나타났고 4.2%~13.2% 범위의 질량감소율을 보였다 (Fig. 10). 대체로 석회석 혼입률이 증가할수록 동결융해 저

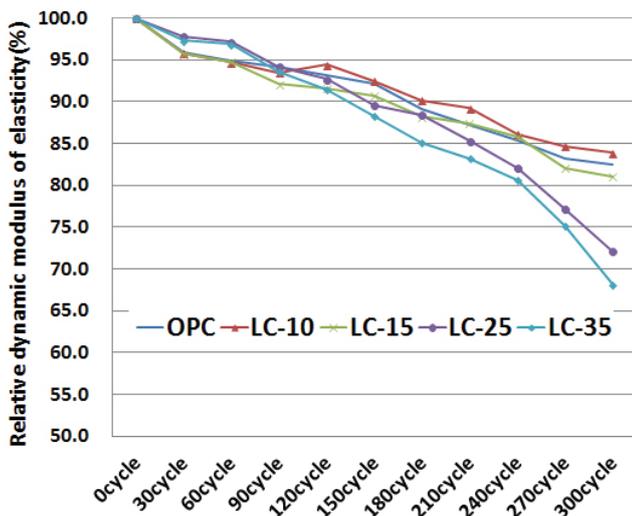


Fig. 9 Relative dynamic modulus of elasticity of concrete

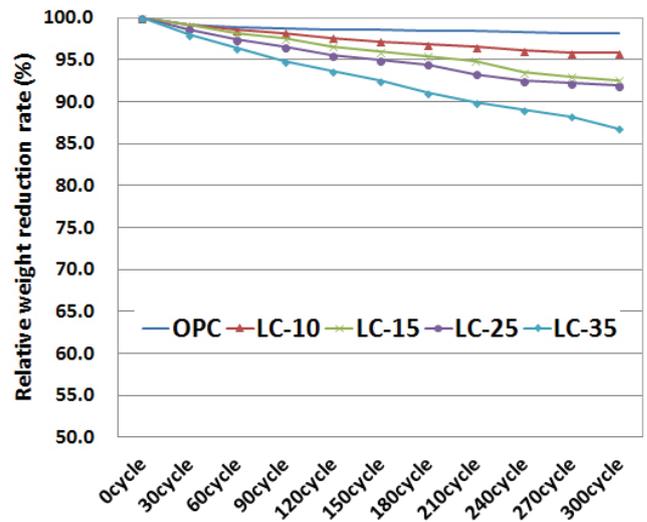


Fig. 10 Relative weight reduction rate of concrete

항에 대하여 불리한 경향을 나타내었는데 이러한 결과는 강도저하가 가장 큰 원인이다. LC-10 및 LC-15 배합의 경우 OPC와 유사한 수준으로 동결융해 저항성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났지만, 상대적으로 강도가 낮은 LC-25, LC-35 배합은 약 13%, 18% 저하된 상대동탄성계수값을 나타내어 혼입율 25%와 35%의 LC를 사용할 경우 동결융해 개선을 위한 배합설계가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3.2.3 축진 탄산화

재령에 따른 축진 탄산화 침투깊이를 Photo 2에 나타내었다. Table 6에 나타난 바와 같이 OPC를 사용한 배합이 모든 재령에서 탄산화 침투깊이가 가장 작게 나타났고 석회석 혼입률의 증가에 따라 침투깊이가 증가되었다. LC-10~LC-35 배합은 2.9배에서 8.6배까지 증가하였는데 강도가 낮은 배합의 경우 탄산화 영향이 더욱 큰 것으로 나타났다. 이러한 원인은 석회석 혼입량 증가에 따른 사용 OPC 저감으로 수화시 수산화칼슘 생성량이 감소되었기 때문이다.

또한 석회석 함량과 가스 투과성 및 압축강도와의 관계를 고찰한 기존연구 (Tsvilisa et al., 2003)에 따르면 혼입률이 증가할수록 즉, 강도가 저하될수록 가스 투과성 저항성이 감소되었다. 따라서 석회석 혼입이 증가할수록 탄산화가 일어날 수 있는 유리한 조건이 발생하게 된다. 재령 56일에 OPC 배합이 1.2 mm인 것에 비해 석회석의 경우 포졸란 반응, 잠재수경성 반응 등에 의한 장기적인 강도증가를 확보할 수 없기 때문에 석회석 혼입률 및 재령이 증가할수록 탄산화에 대한 영향이 큰 것으로 판단된다. 따라서 장기적인 탄산화 저

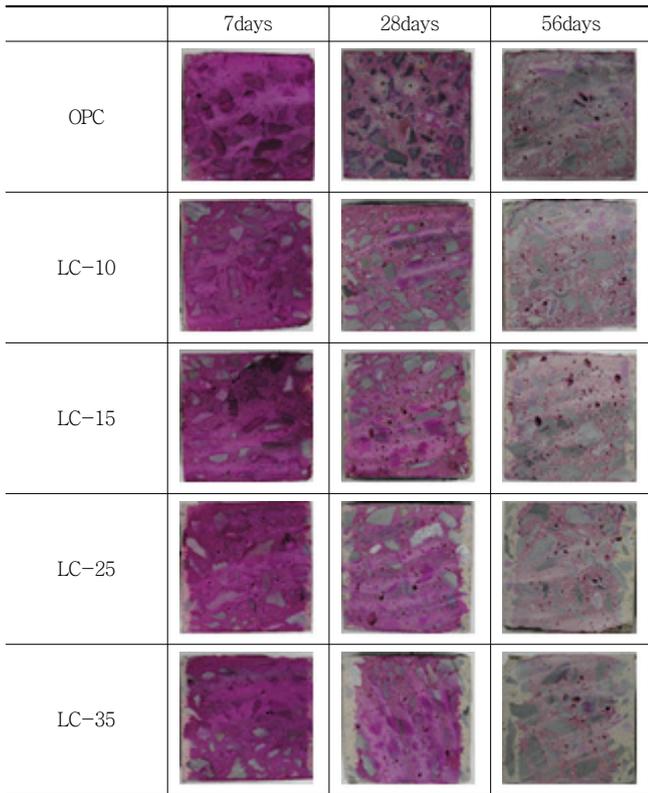


Photo 2 Carbonation depth images of concrete

Table 6 Accelerated carbonation test results of each concrete

	OPC	LC-10	LC-15	LC-25	LC-35
7 days	0	0.5	1.1	4.0	4.7
28 days	0.6	2.9	4.9	7.5	9.7
56 days	1.2	3.5	7.6	10.3	14.8

항상 향상을 위해 고로슬래그 등의 혼화재료를 적용하여 장기강도 증진을 위한 배합설계가 함께 수행되어야 할 것으로 보인다.

이상의 연구에서 LC를 사용한 굳지 않은 및 굳은 콘크리트의 기초물성을 기준 OPC 콘크리트와 비교 평가하였다. 혼입률 10%, 15%의 LC를 사용한 콘크리트는 기준 콘크리트에 비해 크게 저하되지 않고 동등수준의 특성을 나타내므로 OPC 사용량의 15%까지 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 한편, 석회석 혼입률이 25%, 35%로 증가할 경우 유동성은 크게 저하되지 않았다. 그러나 이를 제외한 강도, 내구성 등의 평가항목에서 기준 콘크리트에 비해 저하되는 것으로 나타나 OPC 시멘트를 단기간에 대체하기에는 어려움이 있을 것으로 판단된다. 추후 저강도 시멘트와의 비교연구를 통해 LC의 적용가능성을 평가하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다. 본 연구의 강도시험 및 내구성시험 결과는 장

기강도 측면에서 LC의 사용이 기준 OPC 배합에 비해 불리한 것으로 평가되어 혼화재료 사용 등을 통해 장기강도 및 내구특성을 향상시킬 수 있는 배합설계에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

4. 결론

이 연구에서는 OPC 및 LC를 이용하여 제조한 콘크리트의 굳지 않은/굳은 특징을 실험적으로 평가하였고 다음의 결론을 얻었다.

- (1) LC를 이용하여 제조한 콘크리트의 슬럼프, 공기량 시험 결과는 다음과 같다. 초기 슬럼프의 경우 OPC 배합에 비해 약 92%~96% 수준의 슬럼프를 나타내었고, 대부분 목표 오차범위 ± 20 mm를 만족하며, 시간의 경과에 따른 슬럼프 손실 속도도 모든 배합이 유사한 경향을 나타내었다. LC 혼입 콘크리트의 초기 공기량은 시간의 경과에 따라 석회석 혼입률이 증가할수록 공기량 감소율이 증가되었지만 목표 공기량 $4.5 \pm 1.5\%$ 를 만족하는 것으로 나타났다.
- (2) LC 혼입 콘크리트의 응결시간, 블리딩 시험을 수행한 결과 석회석 혼입이 증가할수록 초결과 종결 시간이 지연되었다. LC 혼입 콘크리트 배합에서는 석회석 혼입의 증가는 총 블리딩량을 증가시키는 것으로 나타났다. 그러나 석회석의 혼입은 OPC만을 사용한 배합의 총 블리딩량을 약 8%~21%까지 저감시킬 수 있어 블리딩 제어에 효과적으로 나타났다.
- (3) 굳은 콘크리트의 압축강도 시험결과 LC-10, LC-15배합은 석회석의 혼입으로 초기강도 증진되었지만 28일 이후의 재령의 강도증가 효과는 OPC 배합과 동등수준으로 평가되었다.
- (4) LC 혼입 콘크리트의 내구성 실험결과 LC-10 및 LC-15 배합의 경우 OPC와 유사한 수준으로 동결융해저항성을 확보할 수 있는 것으로 나타났지만 상대적으로 강도가 낮은 LC-25, LC-35 배합은 약 13%, 18% 저하된 상대동탄성계수값을 나타내었다. 또한 촉진 탄산화 실험결과 석회석의 혼입이 증가할수록 탄산화 깊이가 최대 8.6배까지 증가되는 것으로 나타나 혼화재료 사용 등의 장기강도를 증가시킬 수 있는 배합설계에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업의 연구비 지원(11기술혁신F04)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Bonavetti, V., Donza, H., Rahhal, V., and Irassar, E. (2000), Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement, *Cement and Concrete Research*, 30, 703-708.
2. Bonavetti, V., Rahhal, V. (1996), Mortars with limestone filler blended cement, *Hormigon*, Argentina, 30, 37-48.
3. De Weerd, K., Kjellsen, K. O., Sellevold, E., and Justnes, H. (2011), Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements, *Cement and Concrete Composites*, 33, 30-38.
4. Dhir, R. K., Limbachiya, M. C., McCarthy, M. J., Chaipanich, A. (2007), Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction, *Materials and Structures*, 40(5), 459-473.
5. Government of Canada NRC. (2009), Energy consumption benchmark guide, cement clinker production office of energy efficiency.
6. Heikal, M., El-Didamon, H., and Morsy, M. S. (2000), Limestone-filled pozzolanic cement, *Cement and Concrete Research*, 30, 1827-1834.
7. Jeon, K. N., An, G. H., and Lee, J. S. (2013), Characteristics of Excess Water Dewatered Concrete Using Permeable Liner, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 25(6), 675-682.
8. Lee, M. S., Yun, C. H., and Choi, H. K. (1999), Influence of Limestone Powder on the Hydration of slag cement, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 85-88.
9. Lee, S. H., Lim, D. S., Lim, Y. J., Lee, S. J. (2012), Development of Early Compressive Strength in Portland Cement by Lime Stone Powder, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 24(1), 197-198.
10. Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., and Scrivener, K. (2008), Influence of limestone on the hydration of Portland cements, *Cement and Concrete Research*, 38, 848-860.
11. Oh, B. H., Park, D. G., Park, J. M., and Lee, J. H. (2002), Mechanical and Durable Properties of Concrete Containing Slag and Limestone Powder, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 569-574.
12. Park, S. W., Lee, S. H., Yoo, D. W., Eom, T. H., and Oh, S. W. (2014), Possibility Development of Portland Limestone Cement Produced by Intergrinding, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 513-514.
13. Ramezani-pour, Ali A., Ghiasvand, E., Nickseresht, I., Mahdikhani, M., and Moodi, F. (2009), Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes, *Cement and Concrete Composites*, 31, 715-720.
14. Sim, J. I., Yang, K. H. (2010), Air Content, Workability and Bleeding Characteristics of Fresh Lightweight Aggregate Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(4), 559-566.
15. Tennis, P., Thomas, M. D. A., and Weiss, W. J. (2011), State-of-the-art report on use of limestone in cements at levels of up to 15%, SN3148, Skokie, Illinois, USA Portland Cement Association.
16. Tsvilisa, S., Tsantilasa, J., Kakalia, G., Chaniotakis, E., and Sakellariou, A. (2003), The permeability of Portland limestone cement concrete, *Cement and Concrete Research*, 33, 1465-1471.
17. Voglis, N., Kakali, G., Chaniotakis, E., and Tsvilisa, S. (2005), Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements, *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 191-196.

Received : 10/28/2014

Revised : 11/30/2014

Accepted : 12/15/2014

요 지

본 연구에서는 석회석 미분말을 이용하여 제조한 콘크리트의 굳지 않은 및 굳은 특성을 실험적으로 평가하였다. 석회석 시멘트 제조시 석회석 혼입률은 10%, 15%, 25% 및 35% 범위이며, 보통 포틀랜드 시멘트를 이용하여 제조한 기준 콘크리트 (OPC)와 비교하였다. 혼입률 35%까지 슬럼프, 공기량의 굳지 않은 특성은 기준 시험체와 유사한 특성을 나타내었지만 혼입률이 증가할수록 응결시간은 지연되었다. 석회석 혼입률 15%까지는 압축 및 휨강도, 급속 동결융해 저항성능의 경우 기준 OPC 콘크리트와 동등수준을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 탄산화 저항성능 향상을 위한 보완은 필요한 것으로 나타났다. 혼입률 25%, 35% 배합은 기준 콘크리트 성능에 비해 압축강도 및 휨강도의 저하가 발생되었다. 치환률이 증가할수록 제한된 수산화칼슘량으로 인해 탄산화 저항성능은 모든 배합에서 감소하였다. 강도감소 및 탄산화저항성능을 고려할 경우, 15% 수준의 석회석 미분말 치환은 가능할 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 석회석 미분말, 시멘트 혼입률, 보통 포틀랜드 시멘트, 굳지 않은 콘크리트, 굳은 콘크리트