

석회석 혼입량에 따른 콘크리트의 역학적 및 내구특성

오성우¹, 신동철^{2*}

Mechanical Properties and Durability of Concrete in Relation to the Amount of Limestone Use

Sungwoo Oh¹, Dongcheol Shin^{2*}

Abstract: In order to reduce carbon dioxide emission in construction industry, less amount of cement use can be one of the alternatives to manufacture concrete. One of the non-sintered construction materials are limestone, which is the raw material to manufacture ordinary Portland cement(OPC). A large amount of limestone have already been used as binders such as blended cement in Europe and US. Even European countries were already established the standard of blended cement, where the limestone can be used up to 35 percent. In this study, experimental researches were conducted to investigate the effects of limestone replacement on the mechanical properties and durability of concrete with 15%, 25% and 35% of limestone substitution to use limestone in blended cement. 15 percent use of limestone in blended cement developed equivalent or even higher compressive strengths compared to Plain mixture. Porosity of limestone cement with 15 percent substitution was much lower than Plain mixture. Most durability tests such as concrete carbonation, freeze-thaw cycle and drying shrinkage strains were conducted to evaluate long-term performance, and the test results indicated that 15 percent of limestone use did not significantly influence on the concrete durability compared with plain concrete.

Keywords: Limestone, Porosity, Carbonation, Drying shrinkage

1. 서 론

시멘트 산업은 에너지 다소비 업종으로서, 공정의 특성상 지구온난화의 주요 요인인 다량의 이산화탄소를 많이 배출하는 산업이다. 온실가스 배출량에 있어 발전, 철강, 석유화학에 이어 4번째로 배출량이 많은 업종으로 국내외적으로 이를 극복하기 위하여 다양한 노력이 수행되고 있다. 또한 위축된 시멘트 업계의 활성화를 위해서 국내 시멘트 업체들은 온실가스 감축을 위한 다양한 전략을 마련하고 있다. 시멘트 공장에서의 이산화탄소 저감 방안은 크게 1) 시멘트 원료 및 연료의 폐기물 활용방안, 2) 에너지 저소비형 클링커 제조, 3) 에너지 효율향상을 위한 고효율 설비로의 개조 및 설치, 4) 첨가제 및 혼합재 사용량의 증대, 5) 발생 이산화탄소 가스의 처리(분리, 회수, 흡착 등) 기술 등으로 구분할 수 있다. 이중 국내 실정을 고려하여 시멘트 제조 공정의 신규 설비투자가 크게 이루어

지지 않고도 가정 효율적으로 사용될 수 있는 방법은 혼합재의 사용량을 증대하는 것이다. 그러나 이러한 방법도 공정 적용의 기술적 어려움, 최종 제품인 시멘트의 물리특성 저하 및 한국산업규격(KS) 기준 등의 제약으로 이산화탄소 저감을 위한 방법으로 한계가 있다. 현재, KS에서는, 포틀랜드 시멘트 클링커에 혼합재를 시멘트의 5% 이내로, 석회석을 시멘트의 5% 이내로 첨가하여 혼합분쇄 또는 단독 분쇄 후 혼합할 수 있다.

시멘트 생산 시 배출하는 이산화탄소의 대부분은 소성 공정에서 발생하기 때문에 클링커의 생산량을 줄일 수 있는 혼합재의 이용은 이산화탄소 배출량 저감에 특히 장점이 있다. 혼합재로는 선철 제조 시에 부생하는 고로 슬래그나 화력발전소에서 발생하는 플라이애시 등이 쓰이고 있다. 유럽 및 미국 등에서는 석회석 미분말 등이 사용되고 있으나, 국내에서는 2013년에 KS L 5201을 개정하여 석회석을 보통 포틀랜드 시멘트에 5%까지 사용할 수 있도록 하였다.

현재 국내 혼합시멘트에 대한 표준은 KS L 5210 고로슬래그 시멘트, KS L 5211 플라이 애시 시멘트, KS L 5401 포틀랜드 포졸란 시멘트 3종이 있다. 그러나 실질적으로 생산하고 사용되는 혼합시멘트는 고로슬래그 시멘트 1종류만 유통이 되고 있는 실정이다.

¹정희원, (재)한국건설생활환경시험연구원 선임연구원

²정희원, 가천대학교 건축공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: sdc@gachon.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Gachon University, Seongnam, Gyeonggi-do

•본 논문에 대한 토의를 2017년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 비소성 결합재인 석회석을 활용하여, 석회석 혼입량에 따른 콘크리트의 역학적 특성 및 내구특성에 대한 영향을 살펴보고자 한다. 이를 위해 국내 시멘트사의 킬른(kiln)에서 생산된 클링커를 석회석과 혼합하여 시멘트 분쇄기에서 분쇄(OPC 대비 석회석 혼입량 15%, 25%, 35%)하여 석회석 혼입 시멘트를 제조하였으며, 이에 대한 기초특성 및 압축강도를 살펴보았다. 그리고, 석회석 혼입량에 따른 미세 공극구조를 분석하였으며, 이를 압축강도 특성과 비교분석하였다. 또한 탄산화, 동결융해 및 건조수축 등 내구성능을 확인하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 재료

콘크리트 배합에 사용된 시멘트는 KSL 5201에 적합한 1종 보통 포틀랜드 시멘트(국내 A사 시판)를 사용하였으며, 분말도와 밀도는 각각 $3,950 \text{ cm}^2/\text{g}$, 3.14 g/cm^3 이었다. 석회석혼입 시멘트를 제조하는 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 클링커 분쇄 시 석회석을 함께 혼합하여 분쇄하는 방법으로 이는 석회석이 클링커보다 경도가 낮아 분쇄효율이 향상되는 장점이 있다. 두 번째는 클링커와 석회석을 별도로 분쇄하여 혼합하는 방법이다. 본 연구에서는 공장에서 시멘트 제조 시에 석회석을 첨가하는 첫 번째 방법을 사용하였다. 전체 바인더 중 석회석 혼입량을 0%, 15%, 25%, 35%를 목표로 제조하였으며, 각각을 Plain, L15, L25 및 L35로 표현하였다. 본 연구에서 사용된 바인더의 밀도와 분말도는 Table 1과 같다.

사용된 잔골재는 표준밀도 2.59 g/cm^3 , 흡수율 1.55%의 5 mm 이하의 강사를 사용하였으며, 굵은 골재는 2.67 g/cm^3 및 0.69%의 최대치수 20 mm의 부순골재를 사용하였으며, 입도분포는 KS F 2725에 맞는 체를 사용하여 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 측정되었다.

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 바인더 및 석회석에 대한 열분석 결과를 나타내고 있다. 온도 범위 $600 \sim 800^\circ\text{C}$ 의 질량감소를 이용하여 CaCO_3 함량을 산정한 결과 사용된 석회석은 국

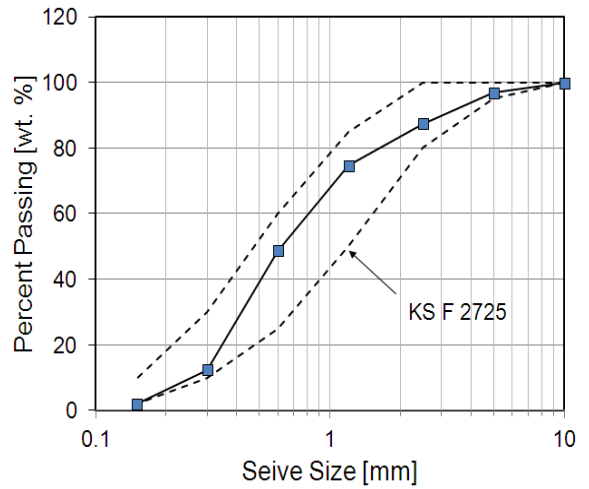


Fig. 1 Particle size distribution of fine aggregates

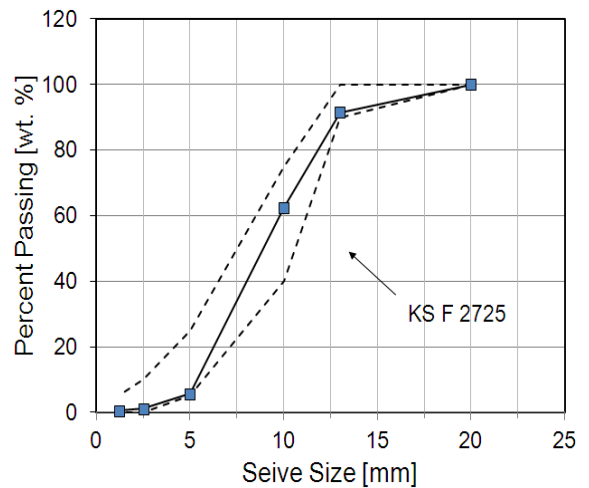


Fig. 2 Particle size distribution of coarse aggregates

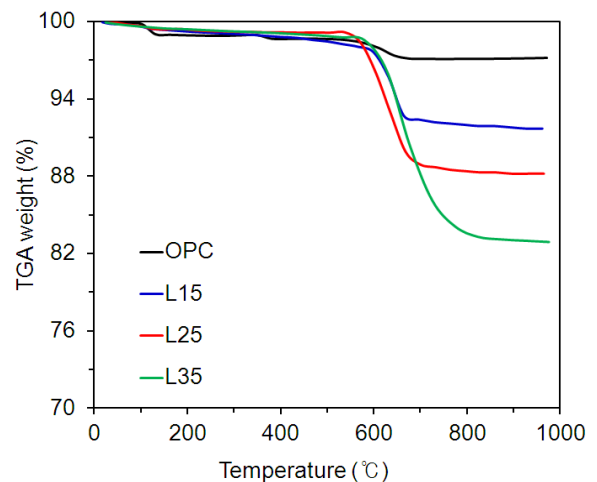


Fig. 3 TGA results for OPC and limestone cement

Table 1 Density and fineness of OPC and limestone cement

Item	OPC	L15	L25	L35
Density (g/cm^3)	3.14	3.10	3.07	3.06
Blain (cm^2/g)	3,950	5,330	6,130	6,190

내에서 생산되는 품위 82.3%급을 사용하였다. 동일한 방법으로 L15, L25, L35 바인더의 CaCO₃ 함량을 산정한 결과 각각 14.1%, 24.0%, 35.2%로 나타났으며, 이를 석회석 함량으로 표현하면 약 11.5%, 19.7%, 29.0% 수준으로 나타났다.

2.2 배합 및 양생

석회석을 혼입한 콘크리트의 기초물성 및 역학적 특성평가를 위해 사용한 콘크리트의 배합표는 Table 2와 같다. 콘크리트 시편 제작을 위하여, Plain 콘크리트의 목표 압축강도를 27 MPa로 설정하여 배합설계를 수행하였으며, 목표 공기량은 5% 수준으로 설정하였다. 콘크리트 압축강도 측정을 위하여 직경 100 mm, 높이 200 mm 원주형 공시체를 재령에 따라 3개씩 제작하였다. 24시간 동안 (22±2)°C 및 (90±10)% R.H 조건 습기함에서 양생 후 탈형하여 시편을 항온수조로 옮긴 뒤 압축강도 측정 시까지 양생하였다.

석회석시멘트의 수은압입법에 의한 총 공극률 및 공극분포를 분석하기 위하여, 재령별로 압축강도를 실시한 뒤 남은 시편에서 굵은 골재를 제거하고 0.5 cm³ 크기의 구형 시편을 제작하였다.

콘크리트 촉진탄산화는 압축강도 공시체와 동일하게 제작하였으며, 28일 항온항습 양생 이후 높이 100 mm의 시편으로 절단하여 탄산화 챔버에서 양생시켰다. 동결융해 저항성 시험을 위하여 100 mm × 100 mm × 400 mm 각주형 공시체로 제작하여, 28일 동안 수중양생 후 28일 동안 (22±2)°C 및 (60±10)% R.H.의 항온항습실 양생을 실시 한 뒤 촉진탄산화 챔버(5%의 CO₂ 환경)에서 양생시켰다.

긴조수축에 의한 길이변화율 측정을 위해 100 mm × 100 mm × 400 mm 크기의 각주형 모르타르 시험체를 제작하였다. 모르타르 배합표는 굵은 골재를 제외한 Table 2의 배합표와 동일하다.

2.3 실험 방법

굳지 않은 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 시험은 각각 KS F

2402(콘크리트의 슬럼프 시험 방법) 및 KS F 2421(압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험 방법)에 따라 수행하였으며, 콘크리트 응결시간 측정은 KS F 2436(관입 저항침에 의한 콘크리트의 응결 시간 시험방법)에 따라 실시하였다.

OPC와 석회석시멘트를 바인더로 한 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라 0.6 ± 0.4 MPa/s의 하중속도로 가력하여 재령 3일, 7일 및 28일에 걸쳐 평가하였다.

콘크리트로부터 굵은 골재가 걸러진 모르타르 길이변화는 KS F 2424(모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험 방법)에 따라 시편 양단에 설치된 스티드를 디지털다이얼게이지에 부착하여 재령에 따른 길이변화를 측정 한 뒤 아래 식 (1)에 따라 백분율(%)로 계산하여 나타냈다.

$$\text{길이 변화율 (\%)} = \frac{(x_{01} - x_{02}) - (x_{i1} - x_{i2})}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

여기서, L₀은 기준길이 (mm), x₀₁과 x₀₂는 각각 기준으로 한 시점에서의 측정치 (mm)이다. x_{i1}과 x_{i2}는 각각 시점 i에서의 측정치 (mm)이다.

촉진탄산화 시험은 KS F 2584에 따라 28일간 수중양생된 콘크리트 공시체를 28일간 추가로 항온항습양생을 실시한 뒤, 3면을 에폭시 실링하여 5%의 이산화탄소가 노출된 챔버에서 재령별로 양생한 뒤 쪼갠 뒤 페놀프탈레인 용액을 분사하여 그 깊이를 측정하도록 하였다.

동결융해 저항성 시험은 KS F 2456의 B법에 따라 각주형 공시체를 -18°C ~ 4°C에서 최종 300 cycle로 양생하여 상대동탄성계수를 측정하는 방법으로 실시하였다.

마지막으로, 석회석 혼입률에 따른 모르타르 시편의 압축강도 결과와 미세공극구조의 상관관계를 분석하기 위하여, Micromeritics사의 Autopore IV 9500 장비를 이용하여 공극분포 및 총 공극량을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 응결

Table 3에 시험체의 응결 실험 결과를 나타내었다. 일반 콘크리트 배합의 초결 및 종결시간은 246분 및 319분으로 나타

Table 3 Setting times of OPC and limestone cement concrete

Item	Plain	L15	L25	L35
Initial setting (min)	246	255	248	226
Final setting (min)	319	313	321	291

Table 2 Concrete mix proportions

Mix	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				S.P. (Cex%)	
			W	Binder				
				OPC	Limestone	FA		CA
Plain			168.4	358.3	-	839.4	1065.3	0.5
L15	47	45	168.7	305.1	53.8	838.9	1064.8	0.5
L25			168.8	269.4	89.8	838.5	1064.3	0.4
L35			168.9	233.6	125.8	838.4	1064.1	0.35

* W : water, B : binder, FA : fine aggregate, CA : coarse aggregate, S/a : FA/(FA+CA)

났다. 석회석 함유량이 35%의 경우 다소 감소하는 경향을 나타내고 있지만, 대부분 Plain과 유사한 결과를 나타내고 있다. 석회석이 다량 치환된 경우 넓은 비표면적으로 인한 수화생성체의 증가로 응결시간이 조금 감소하는 결과를 나타낼 수 있다. 감소된 응결시간은 결국, 석회석 치환율 증가로 인한 초기 C3S 및 C3A의 수화반응 촉진에 기인한 것으로 그 결과 C-S-H 및 Carboaluminate가 생성되었다.

3.2 공기량 및 슬럼프

굳지 않은 상태의 콘크리트 공기량과 슬럼프 측정값을 Table 4에 나타내었다. 석회석의 혼입량이 증가할수록 슬럼프 값이 다소 커지는 경향이 나타나고 있는데, 이는 분쇄된 석회석의 분말도가 시멘트보다 높고, 이로 인한 충전율이 향상되어 유동성이 증가되었기 때문에 나타나는 결과로 볼 수 있다. 사전 모르타르의 배합 시 결정된 혼화제량을 기반으로 콘크리트 배합설계에 반영하였으나, 실제 콘크리트 배합 결과 굵은 골재의 첨가 및 석회석의 함량차이로 인한 슬럼프 증가로 나타난 것으로 보인다. 공기량의 경우, Table 4에서 보듯이 석회석의 혼입량과 상관없이 모든 배합에서 유사한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.3 콘크리트 압축강도 및 미세공극구조

콘크리트 압축강도 결과는 위 Table 4와 같이, 석회석 치환율이 15%, 25%, 35%씩 치환됨에 따라 압축강도는 재령 28일에서 Plain 대비 102.0%, 92.3% 및 91.7% 수준으로, 석회석 치환율이 증가함에 따라 압축강도는 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 오히려, L15의 경우, 7일 재령 이후에서 Plain보다 약간 증가하는 경향도 보였다. 재령 3일에서의 OPC 콘크리트의 압축강도는 25 MPa로 가장 크게 나타났으며, 7일 재령에서의 압축강도는 석회석이 15% 치환된 배합에서 가장 크게 발현되었다. 이는 콘크리트 압축강도와 같이, 분쇄된 석회석의 넓은 비표면적으로 인한 초기 C3S 수화를 위한 다량의 핵생성체(nucleation site) 공급 및 충전효과(filler effect)에 기인한 것이며, 28일 재령에서의 콘크리트 압축강도는 Plain과 L15 배합이 동등한 수준으로 나타나는 것을 알 수 있다. 모르

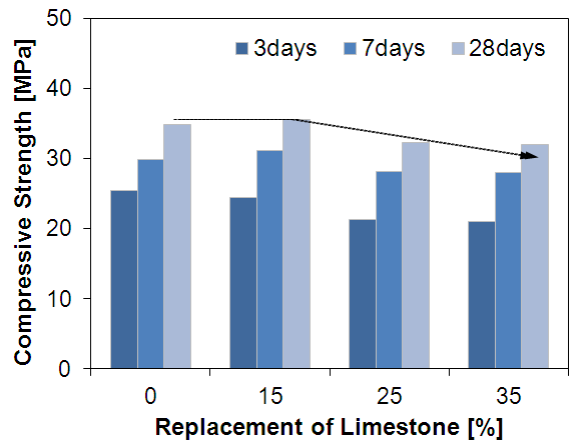


Fig. 4 Concrete compressive strengths with respect to the limestone replacement

타르 배합과 달리, 28일 재령에서의 콘크리트 압축강도의 편차는 Fig. 4와 같이 10% 내외로 나타나고 있다.

수은압입법(Mercury Intrusion Posorimetry, MIP)에 의한 콘크리트의 총 공극률은 Fig. 5와 Fig. 6에 나타냈다. 모든 시험편에서 재령이 증가함에 따라 공극률이 감소하고 있으며, 평균 공극직경도 작아지고 있다. 재령 3일에서 L15의 공극률이 23%로 가장 작게 나타나고 있으며, 28일 재령에서의 공극율도 16.9%로 가장 밀실한 구조를 가지고 있다. Plain 배합의 공극률은 3일 및 28일 재령에서 각각 25.7% 및 18.5%로 나타났으며, L15 다음으로 밀실한 공극구조를 가지고 있다고 볼 수 있다. 이후 L25 및 L35 순서로 총 공극률이 증가하였다. 이는 석회석이 15%까지 치환되었을 경우, 시멘트 수화가 가장 잘 되고 석회석의 충전율이 최적화 됨에 따라 내부 공극구조가 가장 치밀하게 된 것으로 판단되며, 25% 이상이 되었을 경우, 시멘트 량의 감소로 인한 약간의 강도저하 현상과 공극률이 다소 증가하는 것으로 보인다. Capillary Porosity는 MIP 분석 결과 5 nm에서 100 μm 사이의 공극직경을 갖는 공극의 총 누계를 의미한다.

이에, 석회석이 15%까지 혼합된 경우, 콘크리트의 내부공극구조 및 압축강도 모두 OPC와 동등 수준 이상의 결과를 나타내어 구조물로 적용이 가능할 것으로 보인다. 모든 배합 시험편의 변수와 재령에 따른 누적 공극부피는 Fig. 5와 같이 재령이 증가할수록 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 촉진탄산화

Plain 및 석회석시멘트 콘크리트의 2주, 4주, 6주 및 8주 재령에서의 촉진탄산화 결과, Plain의 경우 초기 및 8주 재령에서의 탄산화 깊이가 가장 적게 측정되었으며, L15 배합에서도 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 콘크리트 내부 공극구조가

Table 4 Compressive strengths and concrete properties for the mixtures

Item	Plain	L15	L25	L35	
Compressive strength (MPa)	3days	25.4	24.5	21.2	21.0
	7days	29.8	31.1	28.2	27.9
	28days	34.9	35.6	32.2	32.0
Air (%)	5.5	4.4	4.9	4.5	
Slump (mm)	130	140	160	155	

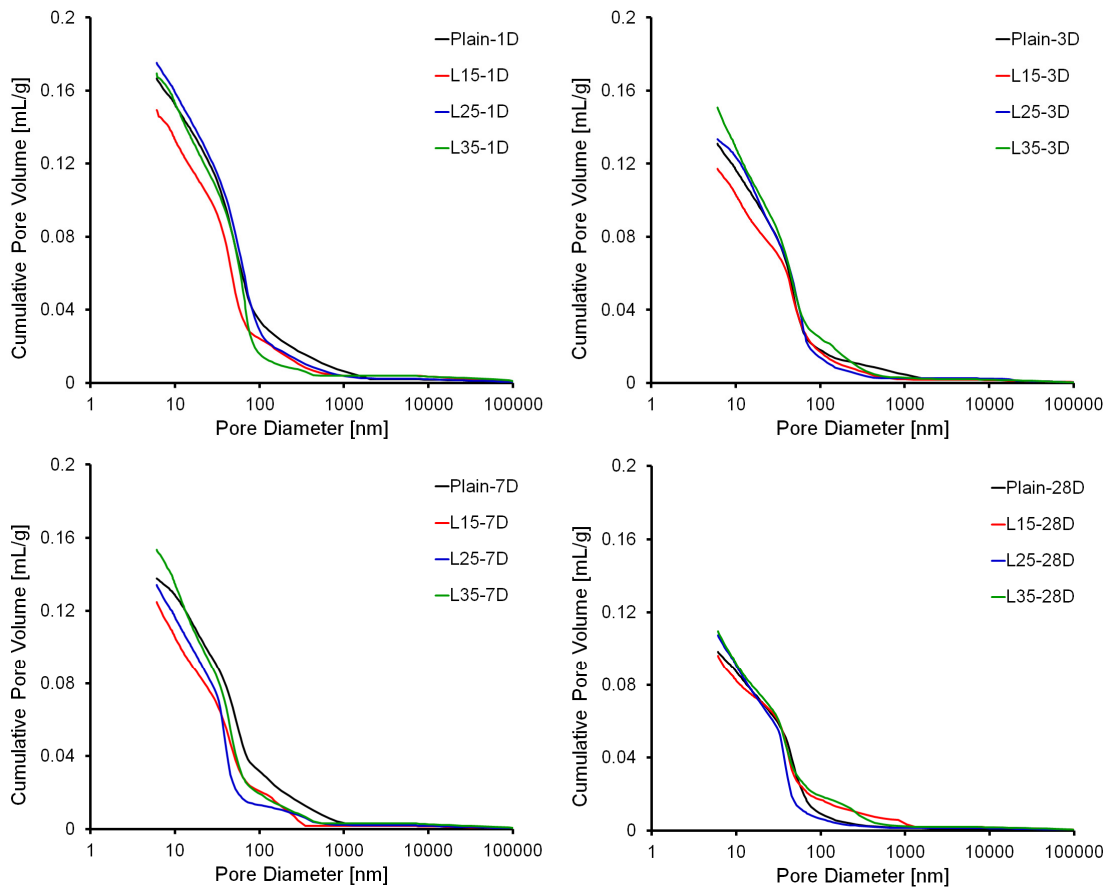


Fig. 5 Cumulative pore volumes for the mixtures at 1, 3, 7, 28 days

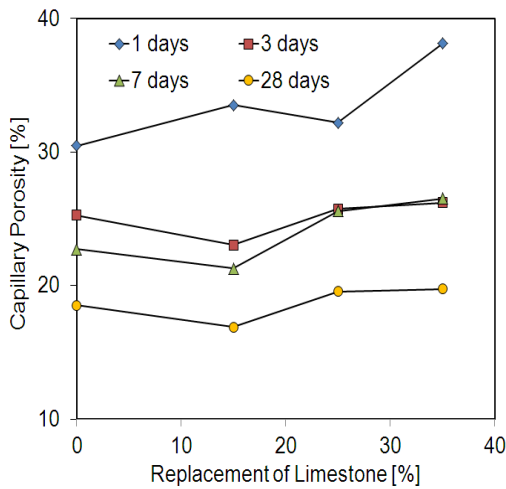


Fig. 6 Concrete porosities with respect to the limestone replacement

다른 배합(L25, L35)에 비하여 밀실하기 때문이며, 석회석의 15% 첨가는 콘크리트 탄산화에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다. L25 및 L35의 경우, 탄산화깊이가 Plain 및 L15에 비하여 약 2배 가까이 측정되었으며, 이는 압축강도 및 수

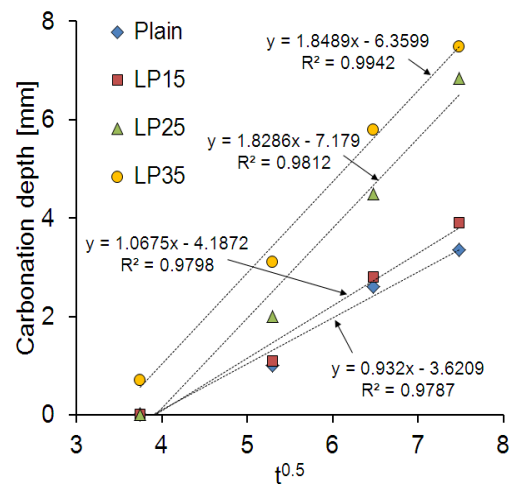


Fig. 7 Plots for Concrete carbonation rate

은압입법에 의한 공극률과 일치하는 결과를 나타내고 있다. 위 결과를 토대로 한 콘크리트 탄산화속도계수는 아래 Fig. 7에 나타내었다.

3.5 동결융해저항성

Fig. 8은 콘크리트 시험체의 동결융해 저항성 실험결과를 나타내고 있다. 동결융해 300cycle 환경에서의 콘크리트 동결융해 저항성은 상대동탄성계수를 측정하는 방법으로 평가되었다. 동결융해 싸이클에 따른 공명진동수(Hz)를 콘크리트 제작 후 14일 간 양생한 뒤 측정하였으며, 그 결과를 재령 0일로 결정한다. 이후, 50 cycle 간격으로 시편을 꺼내어 300 cycle 이 되는 시점까지의 공명진동수를 측정하여 그 결과를 기록하였다.

Fig. 8과 같이 Plain과 L15 콘크리트에서 가장 높은 상대동탄성계수가 측정되었으며, 이는 위의 촉진탄산화 시험결과와 일치하는 것으로 보인다. L35의 경우, 300 cycle 이후 90% 이하의 값이 계산되었다. 이는 촉진탄산화 시험결과와 같이, 15%의 석회석이 첨가된 시멘트 콘크리트의 내구성능은 OPC

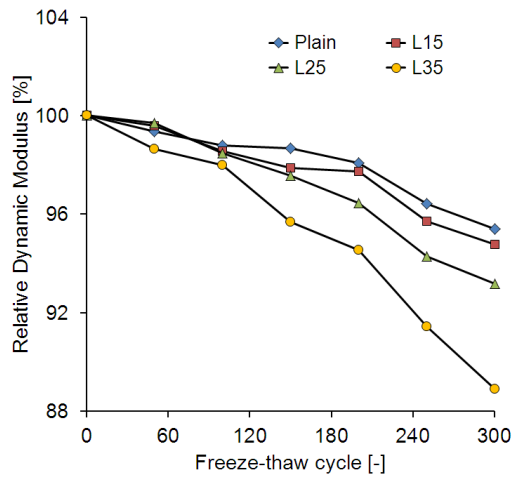


Fig. 8 Plots for relative dynamic modulus for the mixtures after 300 freeze-thaw cycle

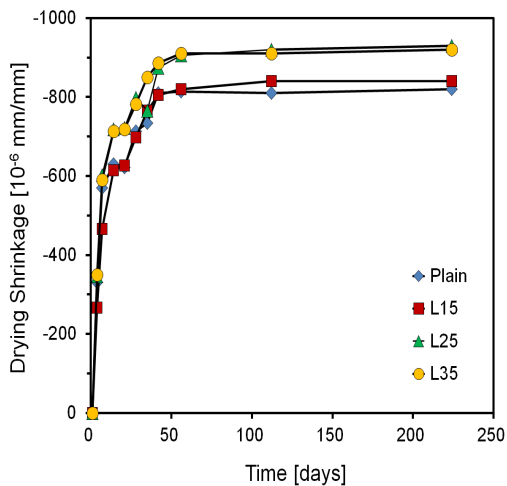


Fig. 9 Drying shrinkage strains of the mixtures for 32 weeks

와 큰 차이가 없으나, 25% 이상 혼입된 콘크리트에서는 그 성능이 다소 저하되는 것을 확인할 수 있었다.

3.6 건조수축

콘크리트로부터 걸러진 모르타르의 길이변화 측정 결과는 아래 Fig 9에 나타내었다. 7일간 양생된 시편을 항온항습실에 위치시킨 뒤, 재령 1일, 4일, 7일, 14일, 21일, 28일, 56일, 112일 및 224일에 각각 시편의 길이를 측정하였다. Plain과 L15에서는 건조 수축량의 차이가 거의 나타나지 않았으며, L25와 L35는 서로 동등수준의 성능을 보이고 있다. Plain 배합에 비하여 석회석이 첨가된 콘크리트의 건조수축이 큰 이유는, 석회석 첨가량이 증가할수록(L25 및 L35) 콘크리트의 내의 낮은 단위 시멘트량으로 인한 다량의 잉여수 발생하여, 재령 경과에 따른 콘크리트 내의 수분 증발로 이어지기 때문이다.

4. 결론

이 연구에서는 공장에서 직접 석회석과 클링커를 혼합하여 분쇄한 시료를 기반으로 콘크리트의 역학적 성능 및 내구성능을 평가하고자 하였으며, 특히 압축강도 측정 및 미세공극 구조분석을 통한 관계를 규명하고자 하였다. 다양한 기초물성 평가 및 내구성능 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 석회석시멘트 기초물성 평가 결과, 석회석 치환율이 증가할수록 응결시간은 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 반응을 위한 시멘트 입자의 감소에 따른 것으로 알 수 있다.
- 2) 콘크리트 배합 시, 슬럼프는 석회석이 증가함에 따라 증가하며, 이는 석회석미분말의 높은 비표면적에 의한 충전 효과가 개선되어 나타나는 결과로 볼 수 있으며, 공기량은 모든 배합에서 비슷한 수준을 나타내고 있다.
- 3) 석회석이 15%까지 혼입된 배합에서는 기존 콘크리트와 동등수준 이상의 압축강도 발현을 보이고 있으며, 25% 이상의 석회석시멘트 콘크리트의 압축강도는 석회석의 치환율이 증가할수록 저하되는 경향을 보였다.
- 4) 콘크리트 촉진탄산화 및 동결융해저항성 시험 결과, Plain과 L15는 동등수준의 결과가 나타났으며, L25 및 L35는 다소 내구성능이 저하되는 경향이 나타났다.
- 5) 석회석 첨가량 증가에 따라, 콘크리트의 단위 시멘트량은 감소하게 된다. 이는 곧, 콘크리트 내 잉여수의 증가를 의미하여, 재령이 경과함에 따라 잉여수의 증발로 인한 건조수축 증가로 이어져, 석회석 치환율의 증가는 곧 다량의 건조수축을 야기하게 된다.

따라서, 석회석이 15% 치환된 배합에서는 기존 OPC와 비교하였을 때 동등 수준 이상인 성능을 발현하고 있으며, 특히 공극구조가 더 밀실하여 압축강도 발현이 더 크게 나타나고 있다. 장기 내구성 부분에서는 OPC와 거의 유사한 경향을 나타내고 있다. 향후 석회석 혼합 시멘트의 활용이 국내에서 가능하게 된다면, 온실가스 저감이 가능하며 경제성 있는 배합을 통해 사회경제적인 긍정적인 영향을 끼칠 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부의 산업기술혁신사업 “셀프힐링 (자가치유)형 토목·건축용 하이브리드 초고강도 보수·보강 섬유제품 및 시공법 개발(10062951)”에서 지원받았습니다.

References

Bang, J. -W., Kwon, S. -J., Shin, K. -J., Chung, Kim, W. -J., and Y. -Y. (2015), Material Properties of Concrete Produced with Limestone Blended Cement, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(2), 125-132.

Choi, W. H., Park, C. W., Jung, W. K., Jeon, B. J., and Kim, G. S. (2012), Durability Characteristics of Limestone Powder added Concrete for Environment-Friendly Concrete, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(5), 59-67.

El-Didamony, H., and El-Alfi, E. (1999), Addition of limestone in the low heat portland cement. *Ceramics-Silikáty*, 44(4), 146-150.

Green technology in Cement Industry (2011), *Ceramist*, 14(2).

Heikal, M., El-Didamony, H., Morsy, M. S. (2000), Limestone-filled pozzolanic cement. *Cem. Concr. Res.*, 30, 1827-1834.

Hooton, R. D., Nkken, M., and Thomas, M. D. A. (2007), Portland-Limestone Cement: State of the Art Report and Gap Analysis for CSA A 3000, *Cement Assoc. Canada*, 3053 3-5.

K, D. W., Justnes, H., Lothenbach, B., and M, B. H. (2011), The effect of limestone powder additions on strength and microstructure of fly ash blended cements. *13th Int. Congr. Chem. Cem.* 1-7.

Kim, T., Jung, S., Choi, Y. C., and Song, H. (2009), An Experimental Study on Relation between Chloride Diffusivity and Microstructural Characteristics for GGBS Concrete, *Journal of Korea Concrete Institute*, 21(5), 639-647.

Lee, S. -H. (2011), Technology development and the future of

enhanced compatitiveness in Korean cement industry, *Ceramist*, 282.

Lee, S. H., Kim, H. J., Sakai, E., and Daimon, M. (2003), Effect of Particle Size Distribution of Fly Ash-Cement System on the Fluidity of Cement Pastes, *Cement Concrete Res.*, 33, 763-768.

Lee, S. -H., Lim, Y. -J., and Cho, J. -W. (2015), “Hydration Properties of Ordinary Portland Cement Using Mixture of Limestone and Blast Furnace Slag as Minor Inorganic Additives”, *Journal of Korea Concrete Institute*, 27(1), 3-9.

Lee, S. -H., Park, J. -S., Lee, J. -I., and Cho, J. -W. (2013), Effects of Limestone Powder on the Fluidity of Ordinary Portland Cement Paste, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 50(2), 149-156 (8 pages)

Lee, S. T., and Jung, H. S. (2011), A Study on the Resistance to Seawater Attack of Mortars and Concretes Incorporating Limestone Powder, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 15(1), 129-137.

Lothenbach, B., Saout, G. L., Gallucci, E., and Scrivener, K. (2008), Influence of Limestone on the Hydration of Portland Cements, *Cement Concrete Res.*, 38, 848-860.

Mehta, P. K., and Monteiro, P. J. M. (2006), *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, 3rd edition, Mc Graw Hill.

Palm, S., Proske, T., Rezvani, M., Hainer, S., Muller, C., and Graubner, C. A. (2016), Cements with a high limestone content - Mechanical properties, durability and ecological characteristics of the concrete. *Constr. Build. Mater.* 30, 308-318.

Sakai, E., Hoshino, S., Ohba, Y., and Daimon, M. (1997), Fluidity of Cement paste with various types of inorganic powders, *Proc. 10th Int'l Cong. Chem. Cement*, 2, 2-8.

Stark, J., Freyburg, E., and Lohmer, K. (1999), Investigations into the influence of limestone additions to Portland cement clinker phases on the early phase of hydration, *Modern Concrete Materials: Binders, Additions and Admixtures*; Thomas Telford.

Tsivilis, S., Batis, G., Chaniotakis, E., Grigoriadis, G., and Theodossis, D. (2000), Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. *Cem. Concr. Res.* 30, 1679-1683.

Zelic, J., Krstulovic, R., Tkalcec, E., and Krolo, P. (1999), Durability of the hydrated limestone-silica fume Portland cement mortars under sulphate attack. *Cem. Concr. Res.*, 29, 819-826.

Received : 03/27/2017

Revised : 04/13/2017

Accepted : 04/14/2017

요 지 : 전 세계적으로 이산화탄소 배출 저감을 위한 노력으로 시멘트 산업에서는 비소성 결합재인 석회석을 시멘트에 첨가하여 콘크리트를 제조하고 있다. 특히, 유럽에서는 석회석을 시멘트의 35%까지 치환하여 사용하기도 한다. 국내에서는 2013년에 KS L 5201을 개정하여 석회석을 보통 포틀랜드 시멘트에 5%까지 혼합하여 사용할 수 있도록 하였으며, 아직 석회석 혼합 시멘트에 대한 규격은 전무한 상태이다. 본 연구에서는 비소성 결합재인 석회석을 활용하여, 석회석 혼입량에 따른 콘크리트의 역학적 특성 및 내구특성에 대한 영향을 살펴보았다.

핵심용어 : 석회석미분말, 압축강도, 내구성, 공극률, 혼합시멘트