

## 석회석 포틀랜드 시멘트 콘크리트 포장의 동등한 성능 캐나다 현장적용 사례

Performance of Portland Limestone Cement Concrete Pavements  
Canadian Field Trials Show Equivalence



이 종 구<sup>1)\*</sup>

Yi, Chong Ku

이번 해외번역기사에서는 천연석회석과 클링커 함께 분쇄하여 생산한 시멘트의 내구성을 시험한 결과를 소개한다. 본 기사의 원문은 Concrete International 2014년 1월호에 게재된 것으로 뉴브런스윅 대학(University of New Brunswick)의 Ashlee Hossack, Michael D.A. Thomas 교수와 Lafarge 미국지사의 Bruce Blair, Laurent Barcelo, Anik Delagrave에 의해 작성되었다.

### 머리말

캐나다에서는 석회석 포틀랜드 시멘트 (Portland limestone cement, PLC)를 전면적으로 도입하기에 앞서 기존 포틀랜드 시멘트(PC)와 동등한 성능 확보 가능성을 검증하기 위해 포괄적인 실험실 수준의 연구와 현장 적용 시험을 수행하였다.

언급한 '동등한 성능'이란 PLC를 사용한 콘크리트 배합이 포틀랜드 시멘트를 사용한 배합과 같은 시공성, 강도, 내구성을 가짐을 의미하며, 본 기사에서는 동일한 클링커 (clinker)를 사용하여 생산한 PLC와 PC를 혼화재 (supplementary cementitious materials)와 함께 배합한 포장콘크리트의 현장적용 결과를 소개하고자 한다.

### 포장 - 세부사항

2008년 10월을 기점으로 12개월 동안 퀘벡(Quebec), 알버타(Alberta), 노바스코시아(Nova Scotia) 주에 위치한 3 곳에서 현장 적용이 다음과 같이 이루어 졌다:

- 레미콘 공장 부지 (Gatineau, Quebec, 2008년 10월): 배치 플랜트 주변의 믹서트럭 주차장 바닥을 8개의 콘크리트 배합을 사용하여 무근 슬래브(넓이 450 m<sup>2</sup>, 두께 150~170 mm) 형태로 타설. 레미콘 트럭에서 배출된 콘크리트를 진동다짐으로 마감한 후 보온 천막을 설치하여 양생함.
- 시멘트 공장 (Exshaw, Alberta, 2009년 9월): 8개의 콘크리트 배합을 사용하여 단층의 보강 매트 위에 300~450 mm 두께로 콘크리트 도로 타설. 바람과 같은 날씨의 영향을 고려하여 수분 증발 지연체를 첨가한 콘크리트는 펌프로 이송하여, 표면 마감 후 막양생제(curing membrane)를 살포하여 양생
- 시멘트 공장 (Brookfield, Nova Scotia, 2009년 9월): 6개의 콘크리트 배합을 사용하여 공장 입구 연결 도로를 300 mm 두께로 포장. 차선 사이는 철근으로 이음 하였으며, 신축줄눈(expansion joint)은 기계식 톱으로 절단하여 형성하였고, 길이방향 연결 철근은 설치하지 않았음. 콘크리트는 테크마감용 장비를 사용하여 다짐하였고, 표면은 흙손(bull float),

1) 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수

\* E-mail : chongku@korea.ac.kr

빗길로 마무리 한 후 막양생제를 살포하여 양생.

위 모든 콘크리트 포장은 양생 후 중장비 하중(시멘트 또는 콘크리트 트럭)과 제설재 등에 노출되었다.

**결합재**

알버타와 퀘백에서 사용한 8개 콘크리트 배합 중 4개는 PC를, 나머지 4개는 석회석 2%와 PC 원재료 98%를 분쇄하여 생산한 PLC를 사용하였다. 각각의 현장에 적용한 PC와 PLC는 동일한 클링커를 사용하여 생산되었다.

노바스코시아에서 사용한 6 개 콘크리트 배합 중 3개는 슬래그 15%를 포함한 슬래그 시멘트(PC-Slag)를, 나머지 3개는 석회석 12%, 슬래그 15%, PC 원재료 73%를 분쇄하여 생산한 석회석-슬래그-포틀랜드 시멘트(PLC-slag)를 사용하였다. 각각의 현장에서 사용한 결합재는 동일한 클링커를 사용하였으며, 유사한 강도발현을 위하여 분말도를 조절하였다. Table 1은 PLC의 분말도가 석회암의 치환률이 1% 증가할 때 약 10 m<sup>2</sup>/kg정도 커지는 것을 보여 준다.

3개의 현장에 적용한 콘크리트는 레미콘 공장에서 혼화

재를 첨가하여 생산되었다. 알버타와 노바스코시아의 경우 Class F 플라이애시, 퀘백의 경우 슬래그 시멘트와 class F 플라이애시를 2:1 비율로 사용하였다.

**콘크리트 배합**

Table 2는 콘크리트 배합 설계를 보여준다. 퀘백과 노바스코시아의 경우 결합재와 물의 양을 일정하게 하여 물-결합재 비(w/cm)를 동일하게 유지하였지만, 알버타의 경우 플라이애시 혼입으로 배합수량 조절이 가능하여 플라이애시 혼입량이 많은 배합일수록 낮은 물-결합재 비를 적용하였다. 슬럼프와 공기량은 혼화제를 사용하여 조절하였다. 각 현장에 사용한 콘크리트는 일관성있는 성질을 가지고 있었으며, 혼화재량이 유사한 배합의 경우 PC와 비교하여 PLC가 혼화제량, 공기량, 슬럼프에 미치는 영향은 눈에 띄지 않았다.

**품질 평가**

생산된 콘크리트로 시편을 제작하여 다음과 같은 시험방법으로 품질을 평가하였다:

Table 1 Composition and fineness of cementitious materials used in trial pavements

| Location    | Cement type | Approximate composition of cement, % |         |           |             | Blaine fineness<br>m <sup>2</sup> /kg |
|-------------|-------------|--------------------------------------|---------|-----------|-------------|---------------------------------------|
|             |             | Clinker                              | Gypsum* | Limestone | Slag cement |                                       |
| Quebec      | PC          | 91                                   | 5       | 4         | -           | 373                                   |
|             | PLC         | 83                                   | 5       | 12        | -           | 453                                   |
| Alberta     | PC          | 91                                   | 5       | 4         | -           | 399                                   |
|             | PLC         | 83                                   | 5       | 12        | -           | 510                                   |
| Nova scotia | PC-Slag     | 80                                   | 5       | -         | 15          | 453                                   |
|             | PLC-Slag    | 68                                   | 5       | 12        | 15          | 532                                   |

\*May include other forms of calcium sulfate (for example, anhydrite or hemihydrate)

Table 2 Cementitious materials (CM) contents and ranges for w/cm, slump, and air content for trial pavement concretes

| Location    | Cementitious materials                             | CM in mixture, <sup>†</sup><br>kg/m <sup>3</sup> (lb/yd <sup>3</sup> ) | w/cm         | slump,<br>mm(in.)           | Air<br>Conerent, % |
|-------------|--|--|--------------|-----------------------------|--------------------|
| Quebec      | PC or PLC +<br>0, 25, 40 or 50% SCM*               | 355<br>(598)   | 0.44 to 0.45 | 75 to 100<br>(3.0 to 4.0)   | 6.0 to 6.8         |
| Alberta     | PC or PLC +<br>0, 15, 25 or 30% Class F Fly Ash    | 410<br>(691)   | 0.37 to 0.42 | 95 to 135<br>(3.25 to 5.25) | 6.0 to 7.8         |
| Nova Scotia | PC-Slag or PLC-Slag +<br>0, 15, 20 Class F Fly Ash | 385<br>(649)   | 0.42 to 0.44 | 60 to 80<br>(2.25 to 3.75)  | 5.8 to 6.6         |

\*SCM is two parts slag cement and on part Class C fly ash

<sup>†</sup>CM is cementitious material content (including fly ash and slag cement)

- 압축강도 - ASTM C39/C39M, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens"
- 염소이온 투과성 - ASTM C1202, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration";
- 동결융해 저항성 - Procedure A of ASTM C666/C666M, "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing";
- 제설용 소금에 의한 스케일링 저항성 - the specified or a modified procedure per ASTM C672/672M, "Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals"; and
- 겔보기 염소이온 확장 계수 - ASTM C1556, "Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion," performed on cores cut from the pavement at 35 days.

위 시험의 상세한 결과는 이전 문헌을 참고하기 바라며, 본 기사에서는 시험결과를 다음과 같이 간결하게 정리하였다:

- 혼화재(플라이애시/슬래그) 치환률이 동일한 경우, 석회암-포틀랜드 시멘트의 1일 강도가 포틀랜드 시멘트 보다 높게 나타남.
- 혼화재(플라이애시/슬래그) 치환률이 동일한 경우, 1일 이후 PC, PCL 시편의 강도는 (56일까지) 모두 유사하게 나타남.
- 염소이온 투과 저항성은 혼화재의 치환률에 따라 크게 증가하였으나 PC와 PCL 사용에 따른 차이는 미비함.
- 제설재로 인한 스케일링 저항성은 혼화재 치환률이 높을 경우 약간 증가하나, 동일한 혼화재 치환률을 갖는 경우 PC 와 PLC 의 영향을 찾을 수 없음.
- 제설재를 배제한 동결융해 저항성 시험(ASTM C666/C666M)결과에 따르면, PC, PLC를 사용한 모든 콘크리트(물/결합재  $\leq 0.45$ , 공기량  $\geq 5\%$ )는 혼화재 치환률에 관계없이 동결융해 저항성 기준을 만족함.

시험결과를 통하여 PC와 유사한 강도를 발현하도록 생산된 PLC 경우, PLC 콘크리트 포장에서 PC 콘크리트 포장과 동등한 성능을 기대할 수 있다는 결론을 얻었다.

### 현장 적용 후 혹독한 환경에 노출된 콘크리트 성능

2012년에 콘크리트 시험 타설 현장을 방문하여 2008년과 2009년에 타설한 콘크리트 포장의 성능을 평가하였다. 캐나다 여러 지역에서 외부 콘크리트의 내구성엔 동결융해와 제설재로 인한 표면 스케일링의 위협을 받고 있으며, 특히, 클링커를 플라이애시와 슬래그로 다량 치환한 시멘트를 사용할 경우 스케일링이 악화하는 경향을 보이고 있다.

하지만, PLC 콘크리트에서는 혼화재 치환률 50%(즉, 전체 결합재에서 클링커의 질량비는 41~42%)를 사용하는 경우에도 콘크리트포장 표면의 스케일링을 확인 할 수 없었다.

퀘벡과 노바스코시아 시험 타설 현장의 콘크리트포장 면에서 약간의 손상을 찾을 수 있었으나 제설장비에 긁히거나 곡선부분에 작용한 장비의 하중에 의한 것으로 석회암-포틀랜드 시멘트(PLC)나 혼화재와는 무관하였으며, 가장 심한 손상은 혼화재를 사용하지 않은 포틀랜드 시멘트(PC) 콘크리트 포장에서 발생하였다.

콘크리트 시험 타설 현장에서 채취한 코어 시편을 다음과 같은 시험방법으로 성능을 평가하였다: 압축강도(ASTM C39/C39M), 탄산화 깊이 (코어 시편을 반으로 잘라 노출된 표면에 페놀프탈레인 시약을 분무하여 측정), 염소이온 투과성 (ASTM C1202), 겔보기 염소이온 확장 계수 (ASTM C1556).

Fig. 1은 코어시편의 압축강도 측정 결과를 보여준다. 알버타의 경우를 제외하면 강도와 콘크리트 배합에 사용한 석회암 또는 혼화재의 치환률, 혼화재 종류 사이에 뚜렷한 관계를 찾을 수 없었다. 알버타에서는 플라이애시를 혼입한 배합에서 석회암 혼입유무와 무관하게 장기 강도가 증가하였다. 석회석 12%를 혼입한 11개 배합(퀘벡-4개, 알버타-4개, 노바스코시아-3개)의 콘크리트의 압축강도는 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트 강도의 86%~113%에 해당하는 값을 보였다.

Fig. 2는 코어 시편의 탄산화 깊이를 보여준다. 탄산화 깊이는 6 mm를 넘지 않았으나, 알버타 시편에서 가장 큰 값이, 노바스코시아 시편에서 가장 작은 값이 나타났다. 이러한 차이는 이산화탄소의 투과율이 콘크리트의 함수율과 반비례 한다는 점을 고려하면 지역적 기후 차이(노바스코시아 - 비오는 날이 잦고 강우량이 많음, 알버타 - 상대적으로 비오는 날이 드물고 강우량이 적음)에 기인한 것으로 보인다. 알버타와 퀘벡의 시험 타설 현장에서는 석회암

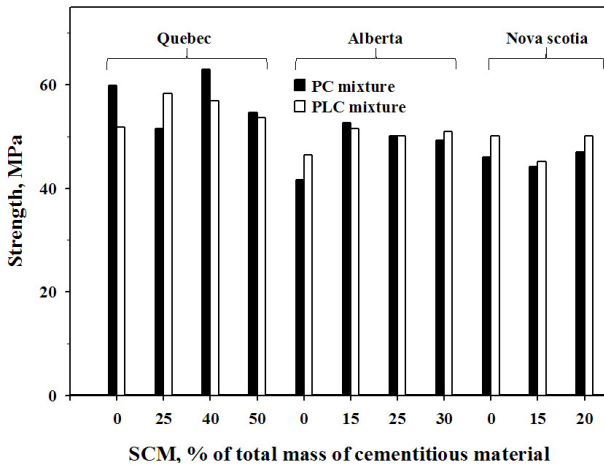


Fig. 1 Compressive strength of cores extracted from pavements after 3 years (Alberta and Nova Scotia) or 4 years (Quebec). In Alberta and Nova Scotia, the SCM comprised Class F fly ash; in Quebec, the SCM comprised two parts slag cement and one part Class C fly ash (Note: 1 MPa = 145 psi)

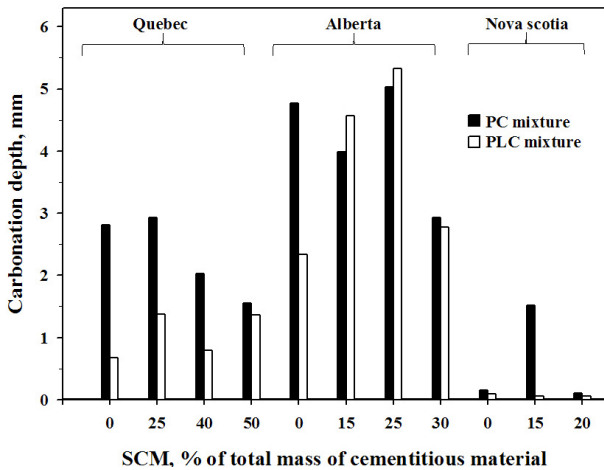


Fig. 2 Depth of carbonation in cores extracted from pavements after 3 years (Alberta and Nova Scotia) or 4 years (Quebec). In Alberta and Nova Scotia, the SCM comprised Class F fly ash; in Quebec, the SCM comprised two parts slag cement and one part Class C fly ash (Note: 1 mm = 0.04 in.)

또는 혼화제와 탄산화 사이에 의미있는 관계는 나타나지 않았다. 퀘벡의 경우 PLC가 PC 보다 작은 탄산화 깊이를 보이고 있으나, 전체적으로 탄산화 깊이가 작아 결합재의 영향을 확인하기 위해서는 추가적인 고찰이 요구된다.

Fig. 3은 염소이온 투과시험(ASTM C1202) 결과를 보여주고 있다. 혼화제(플라이애시, 슬래그) 혼입량이 증가할수록 염소이온 투과량이 뚜렷이 감소하고 있어 염소이온 투과특성은 혼화제 사용 여부와 사용량에 큰 영향을 받는 것

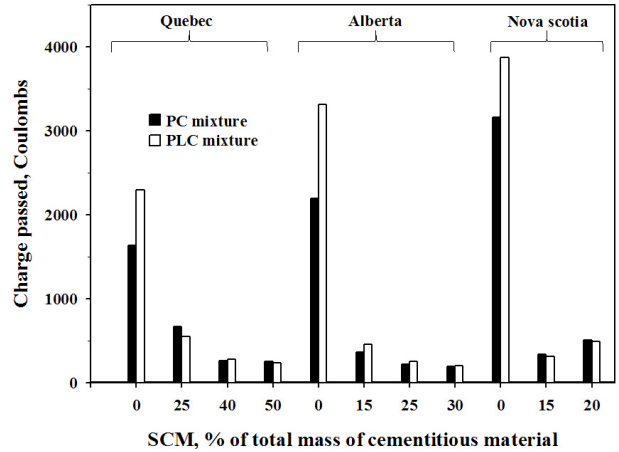


Fig. 3 Results of rapid chloride permeability test for cores extracted from pavements after 3 years (Alberta and Nova Scotia) or 4 years (Quebec). In Alberta and Nova Scotia, the SCM comprised Class F fly ash; in Quebec, the SCM comprised two parts slag cement and one part Class C fly ash

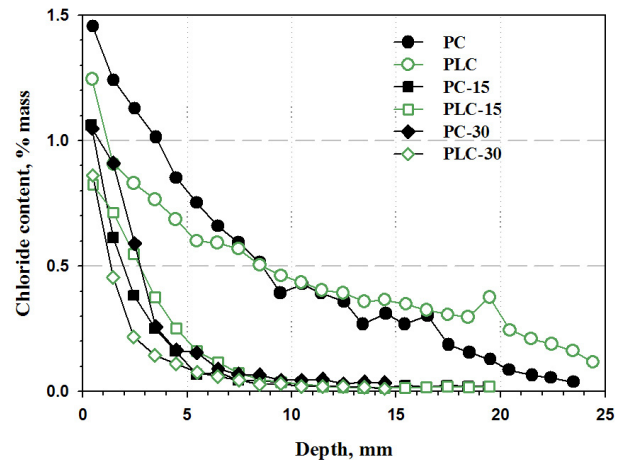


Fig. 4 Chloride profiles for cores taken from Alberta pavement, after 70 days of immersion in an NaCl solution per ASTM C1556. PC and PLC mixtures labeled with -15 and -30 suffixes had 15 and 30% cement replacement with Class F fly ash, respectively (Note: 1 mm = 0.04 in.)

을 알 수 있다. PLC가 염소이온 투과에 미치는 영향을 살펴 보면, 혼화제를 사용하지 않은 경우, PLC 또는 PLC-Slag 콘크리트의 염소이온 투과량은 PC 또는 PC-Slag 콘크리트에 비해 평균적으로 약 38% 정도 높게 나타났다. 그러나, 혼화제를 혼입한 경우 PLC와 PC 간의 차이는 현저히 줄어 PLC가 PC에 비하여 3% 정도 높게 나타났다.

Fig. 4는 알버타 시험 타설 현장에서 채취한 콘크리트 코어샘플을 염화나트륨 용액(165 g/L)에 70일 침지 후 측정된 염소이온량을 깊이에 따라 보여주고 있다. 결합재

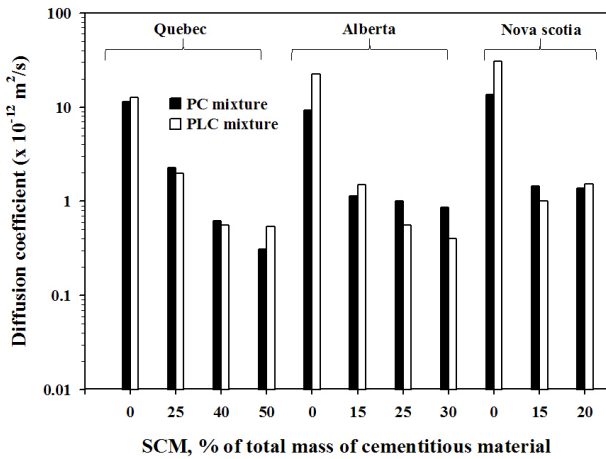


Fig. 5 Calculated apparent chloride diffusion coefficients for cores (ASTM C1556) (Note: SCM stands for two parts slag cement and one part Class C fly ash in Quebec, and Class F fly ash in Alberta and Nova Scotia; log-scale on y-axis)

의 종류와 상관없이 플라이애시 혼입(15% 또는 30%)은 효과적으로 염소이온 투과 깊이를 감소시켰다. 플라이애시를 사용하지 않는 경우, PLC 콘크리트가 PC 콘크리트 보다 다소 높은 침투 깊이를 보였다. 퀘벡과 노바스코시아 코어샘플에서도 플라이애시를 사용한 경우 알버타 코어 샘플과 유사한 결과를 확인하였다.

Fig. 5는 ASTM C1556에 따라 계산된 겉보기 염수이온 확산계수이며, 혼화재량이 증가 할수록 확산계수가 낮아짐을 쉽게 확인 할 수 있다. 혼화재를 혼입하지 않은 시편의 확산계수는 혼화재를 혼입한 시편 보다 5배에서 33배(평균 12.5 배)크다. 또한, 혼화재를 혼입하지 않은 경우 PLC 콘크리트의 확산계수가 PC 콘크리트보다 크게 나타났으나, 혼화재를 혼입한 경우 결합재(PC, PLC)가 확산계수에 미치는 영향은 확인할 수 없었다. 이러한 경향은 Fig. 3, Fig. 4가 보여주는 염소이온 투과 시험, 염소이온 프로파일과도 일치한다.

토의

앞서 살펴본 연구 결과는 PC와 동등한 강도발현이 가능토록 생산된 PLC의 경우, PC를 PLC로 치환하여도 성능에 큰 차이가 없음을 보여주고 있다. PLC 결합재는 3~4년 경과한 콘크리트 코어의 염소이온 투과를 악화시키는 것으로 보이나 이러한 부정적인 영향은 혼화재 사용으로 근절할 수 있었다. 하지만, 실험실 제작 시편과 현장 제작

시편 모두에서 양생초기에는 PLC가 콘크리트 염소이온 투과에 미치는 부정적인 영향을 보이지 않았다는 점은 흥미로웠다. 이는 PLC에 포함된 낮은 양의 클링커가 PC에 비하여 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H)을 장기적으로 적게 생성하지만, 초기에는 PLC의 작은 입자가 이를 보완하기 때문으로 사료된다. 그러나 이러한 설명도 PLC 콘크리트의 장기강도가 PC와 크게 다르지 않다는 것을 고려하면 단순히 C-S-H 생성물량으로 설명하기엔 무리가 있어 보였다. 또 다른 가능성은 석회암의 혼입으로 PLC의 알루미늄 성분(칼슘 알루미늄네이트 상(C<sub>3</sub>A), 페라이트상(C<sub>4</sub>AF))이 희석되어 흡착하는 염소이온량 감소; 그리고 석회암과 염소이온이 알루미늄과 경쟁적으로 반응하면서 발생할 수 있는 염소이온흡착 감소를 생각할 수 있다. 이러한 메커니즘은 알루미늄을 포함한 혼화재(플라이애시, 슬래그시멘트)의 사용이 어떻게 염소이온 투수와 관련한 PLC의 부정적인 영향을 완충하였는지 설명해 준다. 다만, 위의 논리로 혼화재를 넣지 않은 PCL 콘크리트 시편에서 나타나는 높은 전기전도도(chloride permeability)를 설명하기엔 부족하였다. 정확한 메커니즘 규명에는 추가적인 연구가 필요하겠으나, 분명한 것은 혼화재를 사용함으로써 혹독한 환경에서 요구되는 염소이온 침투 저항성을 기대할 수 있을 것이라는 점이다.

노바스코시아 현장시험을 위하여 슬래그 15%와 석회석 12%를 클링커 그리고 석고와 섞어 분쇄하여 결합재를 생산하였는데, 완성한 결합재가 가지는 클링커양은 4% 석회암과 5% 석고를 가진 보통 프틀랜드 시멘트 보다 23% 낮은 68% 였다. 퀘벡에서 사용하기 위하여 50%의 혼화재와 PLC를 섞어 생산한 결합재의 경우 클링커의 질량비율이 41~42% 정도에 머물렀다. 이는 콘크리트 생산 시 발생하는 이산화탄소량이 비교군(혼화재 없는 포틀랜드 시멘트 콘크리트)보다 176 kg/m<sup>3</sup>(293lb/yd<sup>3</sup>) 정도 낮아, 8m<sup>3</sup>용량의 트럭당 1.5톤의 이산화탄소를 감축할 수 있음을 의미한다.

참고문헌

1. Tennis, P. D., Thomas, M. D. A., and Weiss, W. J., "State-of-the-Art Report on Use of Limestone in Cements at Levels of up to 15%", SN3148, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2011, p.78.
2. Thomas, M. D. A., Barcelo, L., Blair, B., Cail, K., Delagrave, A., and Kazanis, K., "Lowering the Carbon Footprint of Concrete by Reducing Clinker Content of Cement", Transportation Research Record: Journal of the

Transportation Research Board, Vol. 2290, 2012, pp.99-104.

3. Thomas, M. D. A., Cail, K., Blair, B., Delagrave, A., Masson, P., and Kazanis, K., "Use of Low-CO<sub>2</sub> Portland Limestone Cement for Pavement Construction in Canada", International Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 3, No. 5, Sept. 2010, pp.228-233.
4. Thomas, M. D. A., Hooton, R. D., Cail, K., Smith, B. A., de Wal, J., and Kazanis, K. G., "Field Trials of Concretes

Produced with Portland Limestone Cement", Concrete International, Vol. 31, No. 1, Jan. 2010, pp.35-41.

담당 편집위원: 이종구  
(고려대학교 건축사회환경공학과 부교수)  
chongku@korea.ac.kr