

석회석미분말을 함유한 친환경 시멘트콘크리트의 도로포장 적용을 위한 기초 연구

Fundamental Properties of Limestone Powder Added Cement Environment-friendly Concrete for Concrete Pavement

<p>최우현 Choi, Woo Hyeon 박철우 Park, Cheol Woo 정원경 Jung, Won Kyong 김기헌 Kim, Ki-Heon</p>	<p>강원대학교 대학원 토목건설공학과 (E-mail : cwh2337@naver.com) 정회원 · 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : tigerpark@kangwon.ac.kr) 정회원 · (주)삼우아이엠씨 기술연구소 책임연구원 (E-mail : wonkyong@hanmail.net) 정회원 · (주)삼우아이엠씨 대표이사 (E-mail : kiheun@empal.com)</p>
---	--

ABSTRACT

PURPOSES : This study is to investigate the fundamental properties of limestone added cement concrete for application of pavement.

METHODS : As the production of Portland cement causes environmental problems, engineers have sought more environment-friendly concrete construction materials. Limestone powder can be used for concrete as a partial replacement of Portland cement. One of the great applications of limestone powder added cement concrete might be a cement concrete pavement since the concrete pavement consumes massive quantity of Portland cement. Experimental variables were different replacement level of limestone powder by 0% to 25% with 5% increment. Before hardening of fresh concrete, setting time and plastic shrinkage characteristics were investigated in addition to other basic properties. Properties of hardened concrete included compressive, tensile and flexural strength as well as drying shrinkage.

RESULTS : The addition of limestone powder did not significantly affect the properties of fresh concrete. Strength decreased as the replacement ratio increased and when the replacement ratio was greater than 10% decrease rate increased.

CONCLUSIONS : It was found that the partial replacement of the limestone powder to cement in pavement materials can be positively considered as its mechanical properties show comparable performance to those normal concrete.

Keywords

limestone powder, environment-friendly concrete, pavement, compressive strength, tensile strength, flexural strength

Main Author : Park, Cheolwoo, Associate Professor
Department of Civil Engineering, Kangwon National University,
346 Choongang-Ro, Samcheok-Si, Kangwon-Do, 245-711, Korea
Tel : +82.33.570.6515 Fax : +82.33.570.6517
E-mail : tigerpark@kangwon.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
<http://www.ksre.or.kr/>
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)

1. 연구배경 및 목적

1.1. 연구배경

국가 인프라 구조물 중 중요한 위치를 차지하는 국내 도로의 총 연장은 105,565km(국토해양부 도로현황 조

서, 2010기준)로 이는 도로법에 따라 노선이 지정된 연장으로 개통되어 이용 중인 도로와 노선은 지정되었으나 공사 중 등 아직 개설되지 않은 도로를 포함한 연장에 해당하며 지구둘레의 2.6배에 달하는 수치이다. 국

토해양부는 이와 같은 내용이 담긴 2010년말 기준 전국의 고속국도, 일반국도, 특별·광역시도, 지방도, 시·군도의 도로현황을 공표하였는데, 이중 고속국도는 3,860km, 일반국도는 13,812km, 특별·광역시도는 18,879km, 지방도는 18,180km, 시도는 27,005km, 군도는 23,829km로 나타났다(Fig. 1). 또한, 전체도로(105,565km)중 포장도로는 84,196km(79.8%)이며, 나머지 21,369km(20.2%)는 미포장(10,034km) 및 미개통(11,335km)된 도로이다.

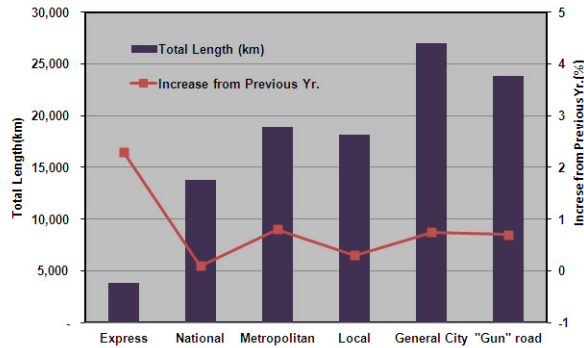


Fig. 1 Roads in Korea with respect to Management Agent(Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, 2010)

2009년 국토해양부 도로현황 조서에 따르면 우리나라의 국내 도로의 총 연장(104,236km)중 약 11%가 콘크리트 포장으로 나타났으며 2011년 현재에는 2009년과 대비하여 약간의 증가 또는 동등한 수준을 유지할 것으로 추정되어 진다. 국내 콘크리트 포장도로의 건설은 1980년대부터 본격적으로 시작되어 지속적으로 건설이 증가하여 왔으며, 국가기반시설은 지속적으로 증가할 것이다. 이에 따라 콘크리트 포장도로의 건설 역시 지속적으로 증가할 것으로 사료된다.

또한 최근 친환경 시멘트콘크리트 기술 개발의 일환으로, 자원고갈과 환경오염에 대한 인식이 집중되면서 산업폐기물이나 산업부산물을 건설재료로 재활용하는 방안이 다각적으로 검토되고 있다. 건설기술의 고도화, 다양화에 대응하고, 지구환경을 고려한 건설재료의 순환시스템 확립을 위해 시멘트재료 화학의 기초적인 연구가 더욱 중요해지고 있다. 특히 최근에 건설기술이 비친환경적 부정적인 인식이 팽배해 있는 즘음에 저탄소 친환경적인 건설기술의 개발은 추후 건설시장에서의 향후 발전을 결정할 수 있는 매우 중요한 사안이라 할 수 있다(최우현 외, 2011).

따라서 이산화탄소 발생을 저감하고 친환경적인 시멘

트콘크리트 포장기술의 개발이 시급하며 이러한 기술개발을 통하여 전 세계적인 개발 방향에 적합한 시장의 선점이 필요할 것으로 판단되어진다.

1.2. 연구목적

시멘트의 재료 중 하나인 석회석미분말(Limestone Powder, LSP)은 과거에는 시멘트의 원료 또는 콘크리트용의 굵은·잔골재 등으로 사용되고 있는 것이 일반적이었으나 최근에는 고강도·고유동 콘크리트의 이용이나 CO₂ 발생량이 적은 필러시멘트로서 사용되어 지고 있다. 또한, 석회석미분말은 국내 각지에 풍부하게 존재하는 석회석을 비교적 용이하게 분쇄함으로써 얻을 수 있으므로 비교적 입수가 쉬운 건설재료라고 할 수 있다. 국내에서 연간 생산되는 비금속광물의 총 매장량은 122억톤으로 그 중 석회석은 84.6%인 103억톤을 차지하고 있으며 연간 생산량은 8600만톤에 육박하고 있다(Fig. 2).

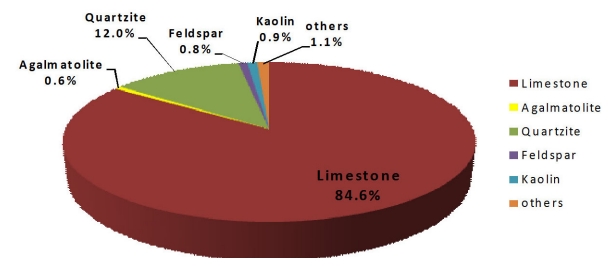


Fig. 2 Nonmetal Resources (Korea Resources Corporation, 2008)

석회석미분말은 시멘트 페이스트 중에서 거의 화학반응이 발생하지 않아 강도발현에 기여하지 않으므로 지금까지는 적극적으로 이용되지 않았다. 그러나 석회석미분말을 최적화된 치환율로 콘크리트에 혼입할 경우, 레올로지 특성이 개선될 뿐만 아니라 블리딩의 저감, 수화열 억제, 초기강도의 증가 및 강도발현이 우수한 것으로 보고되고 있다(한라ENCOM, 2003) 국외 여러 나라에서는 석회석미분말을 다량으로 함유한 복합포틀랜드시멘트를 사용하고 있고, 최근 들어 석회석미분말에 대한 규격을 제정하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며 특히 일본에서는 『석회석미분말 품질규격(안)』을 제정함과 동시에 사장교 형식의 明石海峡대교의 앵커로 적용된 이래로 LNG탱크 저장시설 등에 자기충전형 콘크리트와 매스콘크리트에 사용하는 사례가 증가하는 추세에 있다(고경택 외, 2004). 국내의 문헌을 참고하면 구봉근(2002, 2003)등은 석회석미분말을 시

멘트 대체로 혼입하였을 때 기준 콘크리트에 비해 초기 강도는 낮으나 장기강도는 거의 비슷한 것으로 나타났고 염소이온 침투 저항성 또한 약간의 감소가 있었음을 보고하였으며 동결융해저항성은 기준 이상의 값을 나타낸 것으로 보고되고 있다. 그러나 한상묵(2008) 등은 석회석미분말의 치환율이 증가할수록 강도는 저하된다고 나타내었다. 이는 석회석미분말이 치환됨에 따라 상대적으로 강도를 발휘할 수 있는 시멘트량이 감소된 결과로 사료된다고 보고되었다.

이와 같이 국내외에서는 아직 석회석미분말의 확실한 기술적 정립이 되어있지 않아 기초연구에 머무는 수준이므로 본 연구에서는 “석회석미분말 치환 도로포장용 친환경 시멘트콘크리트 기술 개발”을 위하여 석회석미분말을 혼입한 도로포장용 시멘트콘크리트의 역학적 특성을 분석하고자 한다.

2. 국내·외 석회석미분말의 활용사례

2.1. 국내 석회석미분말의 품질규격 및 활용사례

현재 국내에서 콘크리트에 적용하기 위한 석회석미분말의 품질규격은 한국기술표준원(KS)에는 아직 명시되어 있지 않은 상태이며 도로포장에 적용한 사례는 없는 것으로 보고되고 있다. 통상적으로 생산되는 석회석미분말의 비중이 2.7 이상인 것으로 보고되고 있으며 분말도 $3,000\text{cm}^2/\text{g}$ 이상의 석회석미분말을 주로 사용하고 있다. 석회석미분말이 결합재로서 취급되지 않기 때문에 콘크리트에 유해한 영향을 미치지 않는 품질규격의 범위에 한정될 필요는 없다. 그러나 콘크리트의 작업성을 개선하기 위해 이용되는 경우 석회석미분말은 시멘트 등의 결합재와 비슷한 수준의 분말도를 만족해야 하고, 특히 수화열을 상승시키지 않는 분체로서 사용되는 경우나 잔골재의 대체로써 사용되는 경우에는 보통포틀랜드 시멘트와 똑같은 분말도 하한치를 규정하는 것으로 나타났다. 일본에서는 분쇄해서 제조 가능한 분말도로 약 $20,000\text{cm}^2/\text{g}$ 정도까지의 미세한 석회석미분말을 사용한 사례도 있으므로 분말도의 상한치는 규정하고 있지 않으며 콘크리트의 성능 향상 대비 경제성 분석 및 환경성 평가분석을 실시하여야 할 필요성이 있다고 보고하였다(한라ENCOM, 2003).

국내에서 콘크리트에 석회석미분말을 혼합하는 방법은 석회석미분말을 시멘트 중량대비 일부로 치환하는 경우(내할 치환), 결합재량을 변함없이 석회석미분말을 골재치환한 콘크리트의 경우(외할 치환), 석회석미분말

을 고로슬래그 및 플라이애시등과 병용하여 혼입한 3성 분계의 경우로 크게 3가지로 구분되었다.

첫째, 석회석미분말을 시멘트의 일부로 치환하는 경우(내할 치환), W/B 비 0.5 및 0.35에 대하여 실험을 수행한 결과 석회석미분말을 10% 이상 혼입하였을 경우 석회석미분말을 사용하지 않은 경우의 Plain 콘크리트보다 압축강도는 감소하는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 W/B 비 0.5 및 0.35의 경우 모두에서 나타났다. 탄성계수의 경우 석회석미분말 혼입 콘크리트의 탄성계수는 치환율에 관계없이 거의 비슷한 값을 나타내었고 염소이온 투과성 실험에서는 석회석미분말을 혼입한 콘크리트가 보통포틀랜드시멘트 콘크리트보다 염소이온 투과 저항성이 낮은 것으로 보고되었다. 축진 중성화 실험결과, 석회석미분말을 혼입한 콘크리트는 Plain 콘크리트보다 중성화 깊이가 큰 것으로 나타났다. 그러나 치환율의 차이에 따른 변화는 크지 않은 것으로 나타났고 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 중성화 깊이가 가장 컸으며 고로슬래그를 혼입한 경우와 석회석미분말을 혼입한 경우의 중성화 깊이는 거의 같은 값을 나타낸 것으로 보고하였다. 동결융해저항성 분석에서는 석회석미분말을 혼입한 콘크리트는 Plain 콘크리트보다 동등 및 이상의 결과를 나타낸 것으로 분석하였다(한라ENCOM, 2003).

둘째, 결합재량을 변함없이 석회석미분말을 골재치환한 콘크리트의 경우(외할 치환)의 경우, 석회석미분말을 혼입한 콘크리트의 압축강도가 Plain 콘크리트보다 상당히 증가하는 결과값을 나타내었고 석회석미분말의 혼입율이 증가함에 따라 강도가 증가하는 경향을 나타내는 것으로 보고되었다. 탄성계수의 경우 석회석미분말 혼입율 20%까지는 증가하지만 혼입율 30%일 때는 오히려 감소하는 것으로 나타내었으며 염소이온 투과성 실험에서는 석회석미분말을 혼입한 콘크리트가 Plain 콘크리트보다 낮은 것으로 나타내었다. 또한 석회석미분말의 혼입율이 증가함에 따라 염소이온 투과성이 감소하는 것으로 나타났다. 축진 중성화 실험에서는 석회석미분말의 혼입율이 증가함에 따른 경향을 분석하기에는 다소 어려움이 있는 것으로 나타내었다(한라ENCOM, 2003).

조중동(1999)등은 석회석미분말의 종류 및 함유율 변화에 따른 고유동 콘크리트의 특성에 관하여 석회석미분말의 혼입율이 어느정도 범위 이내에서는 혼입율이 증가할수록 슬럼프 플로우, L플로우 등의 유동성과 충전성은 양호해지고 압축강도 또한 증가하나 공기량은 감소한 것으로 보고하였다. 이는 석회석미분말에 의한 점성증가와 공극충전효과에 기인한 것으로 판단하

였다.

셋째, 석회석미분말을 고로슬래그 및 플라이애시등과 병용하여 혼입한 3성분계의 경우, 오병환(2002)등은 고로슬래그 30%로 고정하고 석회석미분말을 15%, 20%, 25%로 변환하여 혼입하였을때 Plain 콘크리트의 압축강도보다 비슷하거나 약간 높은 경향을 나타내었으나 초기재령에서는 석회석미분말을 혼입하지 않은 콘크리트의 압축강도가 석회석미분말을 혼입한 경우보다 높게 나타났다. 그러나 재령 28일 이후에서는 석회석미분말을 혼입한 콘크리트의 압축강도가 석회석미분말을 사용하지 않은 콘크리트보다 높은 강도값을 나타낸 것으로 보고하였다. 또한 석회석미분말 대신 플라이애시를 혼입한 콘크리트보다는 강도값이 떨어진다고 보고되었다. 염소이온 투과성 시험에서는 석회석미분말은 혼입한 3성분계 콘크리트는 통과전하량이 Plain 콘크리트의 1/3가량의 값을 나타낸 것으로 보고하였다.

조일호(2006)등은 석회석미분말과 플라이애시를 혼용한 3성분계 콘크리트의 유동특성에 대해 충전효과와 보완효과로 일정량의 치환에 따라 유동성이 개선된다고 보고하였다.

2.2. 국외 석회석미분말의 품질규격 및 활용사례

세계의 대부분의 나라들에서는 시멘트 및 그 나라에서 사용한 각종 재료의 규격을 제정하고 있고, 다른 나라의 선형규격을 이용하고 있는 나라도 있다. 이러한 규격에는 각 국의 원료 사정이나 건축 양식 등 사회적, 문화적 양상의 차이가 반영되고 있으며 보편적으로 사용되고 있는 다종다양한 품종, 성능의 시멘트가 규격화되고 있다. 유럽을 중심으로 한 많은 나라에서는 석회석미분말을 다량으로 함유한 복합포틀랜드시멘트를 규격화하고 있다. 또한, 일본과 같이 포틀랜드 시멘트용 혼합재로서의 소량 사용을 인정하고 있는 나라도 있다. 이러한 석회석의 활용을 명기한 규격은 점차 늘어나고 있고, 특히 프랑스에서는 전체의 약 30%가 석회석을 20~35%까지 포함한 복합포틀랜드시멘트로서 생산되고 있다.

일본의 경우에는, 콘크리트의 유동성 개선을 주된 목적으로 석회석미분말이 많이 사용되게 되었다. 그렇지만, 이와 관련된 규격은 아직 정비되어 있지 않고, 단지 석회석의 순도를 규정한 숏크리트용 석회석미분말의 지침이 제출되고 있는데 머무르고 있다. Table 1은 일본 콘크리트 공업협회에서 제안한 콘크리트용 석회석미분말의 규격이다. 일본에서는 비중에 별다른 규격을 두지 않고 있으며, 유럽의 규격에서는 CaCO₃의 함유량을

75% 이상으로 규정하는데 비해 일본규격에서의 90% 이상으로 규정하고 있다. 또한, 메틸렌 블루 흡착량도 두 규격이 약간의 차이를 보이고 있다.

유럽 경제 공동체(ECC) 가맹국에서는 국제적인 거래를 더욱 원활하고 합리적으로 도모하기 위하여 석회석미분말에 대한 통일규격을 제정하는 활동을 개시했다. 유럽 표준화위원회(CEM)의 최종안(ENV-1)에 의하면, 프랑스의 규격을 거의 답습한 포틀랜드 석회석 시멘트가 정해져 있는 콘크리트 충전재로서의 요건, 즉 기초적인 콘크리트의 특성에 악영향을 미치지 않도록 하는 요건을 만족하도록 하고 있다. Table 2는 ENV 197에서 규정하고 있는 콘크리트용 석회석미분말의 규격을 나타낸 것이다.

Table 1. Specifications for LSP in Japan Concrete Industry Association

Item	Specification
Specific Gravity (S.G.)	-
Specific surface area (Blaine) (cm ² /g)	≥ 2,500
Comp. Str Ratio (%)	at 7days
	at 28days
	≥ 100
CaCO ₃ (%)	≥ 90
MgO (%)	≤ 5
SO ₃ (%)	≤ 0.5
Al ₂ O ₃ (%)	≤ 1.0
Moisture (%)	≤ 1.0
Methylene blue Absorption (mg/g)	≤ 1.0

Table 2. Specifications for LSP in Europe Standard (ENV197)

Item	Specification
Content of CaCO ₃	≥ 75%
Methylene blue Absorption	≤ 1.2g/100g
Total Organic Content	≤ 0.2%

캐나다의 경우, 탄소발생 저감을 위해 Canadian Standards Association(CSA) A3001-08에서는 석회석미분말 함유시멘트의 생산을 내황산염시멘트를 제외한 시멘트에 있어 최대 15%까지 사용을 허용하고 있으며 Quebec, Alberta 및 Nova Scotia 주에서는 석회석미분말시멘트 사용 콘크리트 포장의 적용이 시도된 바 있는 것으로 나타났다.

미국의 경우, ASTM(ASTM C 150) 및 AASHTO에서는 최대 5%까지 석회석미분말을 시멘트 치환하여 사용할 수 있도록 허용하고 있으며, 미국 캘리포니아주 도로교통국에서는 석회석미분말의 집중연구를 시도(강도 발현, 건조수축 및 투수성, 2008년도 보고서 발간)한

사례도 분석되었다. 실제 허용량은 3.5~2.5% 정도로 제한할 것을 권장하고 있지만 이에 대한 구체적인 연구결과 없는 실정으로 나타났으며 현장 적용 시, Paving and approach slab concrete 와 Bridge deck concrete의 경우 건조수축이 각각 0.05% 및 0.045% 이하로(재령 28일 건조수축기준) 제한하고 있다.



Fig. 3 Pavement Construction using LSP(Canada)

3. 사용재료 및 실험

이 연구에서는 석회석미분말 치환 도로포장용 친환경 시멘트콘크리트의 기술 개발의 일환으로서 석회석미분말을 혼입한 시멘트콘크리트의 역학적 특성을 분석하고자 하였다.

3.1. 시멘트 및 골재

시멘트는 강원도 삼척 지역에서 생산되는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며(Table 3과 Table 4), 콘크리트 배합에 사용된 골재의 비중은 KS F 2504, KS F 2505를 통하여 결정하였으며, 굵은·잔골재의 물리적 특성 및 입도 분포도는 아래의 Table 5와 Fig. 4, 5에 각각 나타내었다.

Table 3. Physical Properties of Used Cement

S. G.	Blaine stability (cm ² /g)	stability (%)	Setting time (min)		Comp. Str. (MPa)		
			Initial	Final	3days	7days	28days
3.15	3,400	0.1	230	410	23	31	40

Table 4. Chemical Compositions of Used Cement

SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	lg-loss (%)
21.95	2.81	60.12	3.32	2.11	6.59	2.58

Table 5. Physical Properties of Coarse and Fine Aggregate

C. A.	G _{max}	S.G.	Absorption(%)	Fineness M.
		25mm	2.76	0.45
F. A.	-	2.52	1.45	2.62

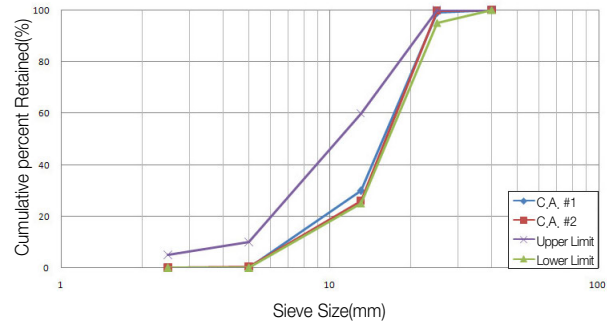


Fig. 4 Particle Size Distribution of Coarse Aggregate(G_{max} 25mm)

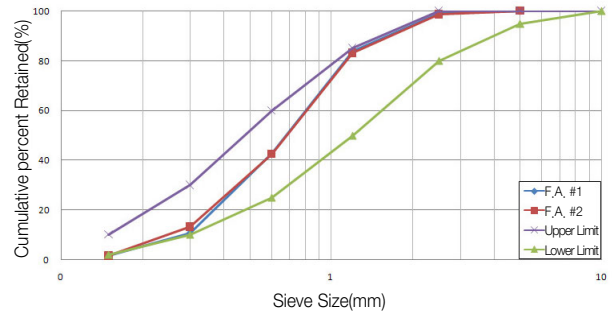


Fig. 5 Particle Size Distribution of Fine Aggregate

3.2. 석회석미분말

석회석미분말의 기본적인 특성은 현재 국내에서는 콘크리트에 석회석미분말을 혼화재료로 적용하기 위한 KS의 규격을 따로 규정하고 있지는 않다. 따라서 플라스틱, 도로, 고무, 건축자재에 활용되어지는 R사의 석회석미분말 제품(Fig. 6, Fig. 7)을 활용하였으며 화학적·물리적 특성을 Table 6에 나타내었다.



Fig. 6 Shape of Limestone Powder

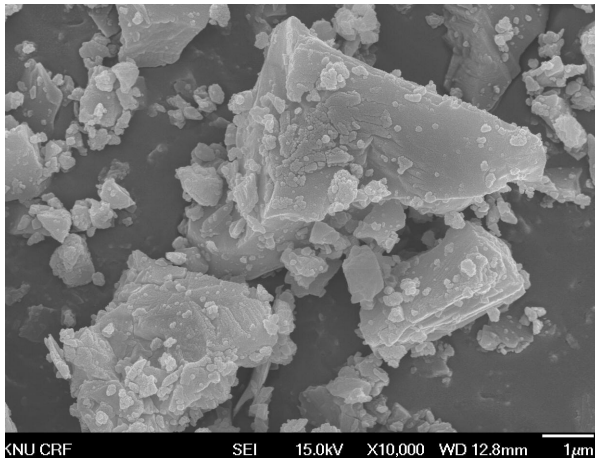


Fig. 7 SEM Picture of Limestone Powder

Table 6. Physical Properties and Chemical Compositions of Limestone Powder

Chemical Compositions	
Constituent	Weight Percent
CaO	93.10
SiO ₂	2.74
Al ₂ O ₃	1.71
Fe ₂ O ₃	0.866
MgO	0.728
K ₂ O	0.376
F	0.160
TiO ₂	0.138
SrO	0.054
MnO	0.0539
SO ₃	0.0519
P ₂ O ₅	0.0135
Na ₂ O	0.0113
NiO	0.0095
Physical Property	
Specific Gravity	2.69
Specific Surface Area(cm ² /g)	5109
Average Particle Size(µm)	18.8
Color	백색
Moisture(%)	0.04
DOP Absorption(%)	20.4

본 연구에서 사용한 공기연행제의 주성분은 VINSOL 계로 콘크리트도로 및 활주로, 동해를 쉽게 받는 구조물, 입도가 불량한 골재 사용 시 레미콘 및 일반 건설현장에 사용되는 제품을 사용하였다. 공기연행제의 특성으로는 콘크리트의 내구성 증진과 단위수량 감소 및 워커빌리티 증대, 재료분리 및 건조수축 감소의 효과를 발휘하는 것으로 알려져 있다.

3.3. 실험 배합표

본 연구에서 고려한 각 실험변수는 석회석미분말을 혼입하지 않은 Plain 변수를 포함하여 총 6가지이며 각 실험변수에 대한 배합은 다음과 같다(Table 7). 고속도로 공사 전문 시방서(2009)에 의거하여 목표 슬럼프는 40mm 이하, 공기량은 5~7%로 설정하였다.

Table 7. Mix Proportions Used for Experiments

Specimen	W/B	S/a (%)	Unit Content (kg/m ³)					
			W	C	F.A	C.A	LSP	AEA (%)
Plain	0.45	38	147	326	661	1181	-	0.027
Plain-LSP(5%)			147	301	660	1179	16	0.027
Plain-LSP(10%)			147	293	659	1177	33	0.027
Plain-LSP(15%)			147	277	658	1171	49	0.027
Plain-LSP(20%)			147	261	657	1174	65	0.027
Plain-LSP(25%)			147	245	656	1172	82	0.027

* AEA : cement weight percent(%)

3.4. 경화 전 특성 실험 방법

본 연구에서는 “석회석미분말 치환 도로포장용 친환경 시멘트콘크리트 기술 개발”의 최적배합을 도출하기 위하여 경화 전과 경화 후의 특성에 대하여 분석하였다. 배합 시 잔골재, 굵은 골재, 시멘트 및 석회석미분말을 순서대로 투입하였으며, 강제식 펜타입 믹서를 활용하여 약 10초 동안 건배합 비빔을 실시 후 배합수를 첨가하여 1분 50초 동안 믹싱하여 배합을 완성하였다.

경화 전의 특성인 워커빌리티를 측정하기 위해 KS F 2402에 의거하여 슬럼프 값을 측정하였다. 본 연구에서 개발하고자 하는 배합은 포장의 표층으로 활용하기 위한 것으로서 직접적으로 외부에 노출된다. 따라서 동결융해에 대한 저항성이 요구되므로 공기연행제를 첨가하였으며 석회석미분말의 혼입에 따른 공기량 특성의 변화를 검증하기 위하여 KS F 2421에 의거하여 공기량을 측정하였다. 단위용적질량시험은 KS F 2409의 실험법에 의하여 측정하였으며, 아래의 Eq. (1)을 사용하여 그 값을 계산하였다.

$$\text{단위용적질량(kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{용기안의 시료질량(kg)}}{\text{측정용기의 용량(m}^3\text{)}} \quad (1)$$

시멘트의 중량 대비 석회석미분말의 첨가율에 따른

각 변수별 시험체의 응결시간 측정을 위하여 KS L 5108의 시험법에 의거하여 실험을 수행하였으며 각 변수별로 2개의 시험체를 제작하였다. 응결시간의 결정은 초결(Initial)은 Vicat 침이 25mm 침입하였을 때의 시간으로 하였으며 종결(Final)은 Vicat 침의 흔적이 시험체에 나타나지 않을 시의 시간으로 결정하였다.

시멘트-페이스트는 경화할 때 절대체적의 1%정도가 감소하게 된다. 이에 따라 소성상태에 있는 콘크리트의 체적이 감소하게 되는데, 이를 소성수축이라고 하며 콘크리트에 부분적으로 인장력을 유발시키는 원인이 된다. 특히, 타설 후 외기에 접하는 콘크리트 표면으로부터 수분증발과 거푸집 틈사이의 수분손실로 소성수축을 촉진시켜 표면균열을 일으키게 된다. 소성수축에 의한 표면균열은 대기온도, 상대습도, 콘크리트 온도 및 풍속의 영향을 많이 받는다. 즉, 노출된 콘크리트의 표면에 바람이 강할수록, 상대습도가 낮을수록, 대기온도 또는 콘크리트 온도가 높을수록 소성수축 균열이 발생할 확률이 증대된다.

따라서, 본 실험에서는 ASTM C 1581 “Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage”의 규정을 응용하여 시험편을 제작하여 실험을 수행하였다(Fig. 8). 시험체는 50×50×5cm의 사각형 거푸집에 내부를 스틸링(Steel Ring)을 고정하고 거푸집 내부에 비닐을 깔고 거푸집과 스틸링 사이에 콘크리트를 타설하였다. 스틸링의 외경은 21.7cm, 높이가 6cm이며, 0.5cm 두께의 얇은 스틸링을 사용하였으며 각 변수별로 2개의 시험체를 제작 후 24시간 뒤에 시험편의 측면에 위치한 거푸집만 제거하였다. 변형률계이지 부착위치는 나란히 등간격으로 2개소에 걸쳐 스틸링의 내벽에 부착하였으며 데이터로거(Data Logger)에 연결하여 매 10분마다 측정하였다. 시험체의 양생은 본 연구실에 내부사정상 실험실 내부에 소성수축 길이변화 시험편 전체를 비닐막으로 덮어 온도와 습도를 유지하

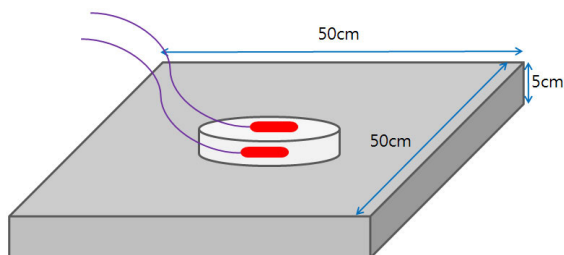


Fig. 8 Diagram of Plastic Shrinkage Specimen with Gages

고자 하였다. 시험편 제작 후 하루 동안은 수시로 균열 발생의 유무를 육안관찰 하였으며 3일 동안은 1시간 간격으로, 비교적 변화가 없으리라 예상되는 나머지 기간 동안은 4시간에 한번씩 육안관찰 하였다. 아래의 Fig. 9는 소성수축 길이변화 실험전경을 나타내고 있다.



Fig. 9 Test Setup for Plastic Shrinkage Measurement

3.5. 경화 후 특성 실험 방법

역학적 특성의 가장 기초적인 특성인 압축강도를 측정하기 위하여 KS F 2403의 시험법에 따라 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 원주형 시험체를 제작하였다. 제작된 시험체는 재령 3일 및 28일, 재령 56일에 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법에 의거하여 변수별로 각각 3개씩의 압축강도 값의 평균값을 측정하여 나타내었다. 이때, 시험체의 양생은 강도 측정 재령까지 비닐덮개를 이용하여 습윤양생을 실시하였다. 또한 아래의 Fig. 10과 같이 압축강도를 측정할 때 원주형 공시체의 양쪽에 LVDT를 부착하여 응력-변형률 선도를 구하였다. KS F 2438에 의거 응력-변형률 선도의 응력의 30~50%의 직선 구간의 기울기를 계산하여 각 시험체의 탄성계



Fig. 10 Test of Elastic Modulus of Concrete Specimen

수를 계산하였다. 각 실험 변수별로 3개씩의 시험체를 제작하여 재령 28일 및 56일에 대해서 탄성계수를 측정하였다.

인장강도 실험은 KS F 2423 콘크리트의 쪼갬 인장강도 시험 방법에 의거하여 수행하였으며, 재령 28일에서만 수행하였다. 이때 시험체는 압축강도 시험체와 마찬가지로 제작하였으며 각 변수별로 2개의 시험체의 인장강도 평균값으로 나타내었다. 또한, 양생방법은 압축강도 시험체의 양생과 동일한 방법으로 양생하였다.

콘크리트의 휨강도를 측정하기 위하여 KS F 2408에 따라 실험을 실시하였으며, 시험체는 KS F 2403에 따라 표준시험체인 10×10×40cm의 각주형 시험체를 제작하였다. 시험체의 양생은 강도 측정 재령까지 비닐덮개를 이용하여 습윤양생을 실시하였으며 인장강도와 마찬가지로 재령 28일에서 각 변수별로 2개의 시험체의 휨강도 평균값을 측정하였다.

각 실험변수별 건조수축 길이변화를 측정하기 위하여 변수별로 1개의 10×10×40cm 시험체를 제작하였다. 제작 후 약 24시간 이후 거푸집을 탈형하였다. 제작된 시험체의 양생은 온도 24±1℃ 상대습도 50%로 조정되는 실내양생실 내부에서 보관하였으며 시험체 길이변화의 값의 정확도를 높이기 위하여 최초 3일 간은 매 6시간 마다, 이후 재령 14일까지는 매 12시간 마다, 그 이후에는 매 24시간 마다 길이변화를 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1. 경화 전 콘크리트 특성 분석

4.1.1. 워커빌리티 특성

다음의 Fig. 11은 석회석미분말을 함유한 콘크리트의 워커빌리티 특성분석을 위하여 실시한 슬럼프 실험결과를 나타내고 있다. 실험계획에서는 도로포장에 적용하기 위한 배합을 기준으로 하여 슬럼프 값 40mm를 목표값으로 설정하였으나, Fig. 11에 나타난 바와 같이 석회석미분말의 치환율의 증가에 따라 슬럼프 값도 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 Plain 시험체와 석회석미분말을 5%로 치환한 경우에는 각각 약 38mm로 비슷한 수준의 슬럼프 값을 나타내었으나 석회석미분말을 10%로 치환한 경우에는 다소 증가한 45mm의 값을 나타내었다. 석회석미분말을 15%로 치환한 경우에는 69mm로 슬럼프 값이 현저하게 증가하였고 석회석미분말을 각각 20%, 25% 치환 시에는 슬럼프가 83mm, 75mm로 증

가하였다.

이는 각 변수별로 공기연행제의 혼입량이 일정함에 따라 공기연행제의 영향보다는 석회석미분말이 화학적으로 활성적이지 않고 입도분포가 다양하며, 플라이애시 등의 다른 혼화재료와 비교하여 조립분을 많이 포함하고 있기 때문에 석회석미분말의 구속수비가 작아지는 요인에 크게 기인하는 것으로 판단되어 진다. 따라서 플라이애시, 고로슬래그 미분말 등의 혼화재와 달리 배합시 입자간의 유동에 기여하지 않는 수량을 감소할 수 있을 것으로 판단된다.

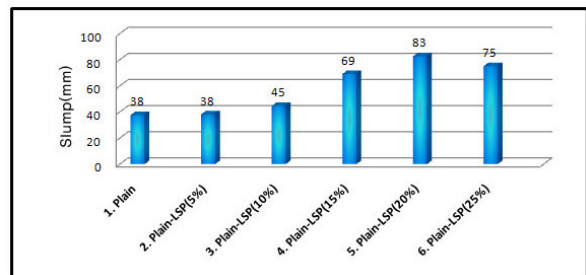


Fig. 11 Measured Slump Test Results

4.1.2 공기량

Fig. 12에 나타난 결과와 같이 공기량 실험결과 6개의 변수 모두 목표 설정값인 5~7%에 만족하는 것으로 나타났고, 석회석미분말 혼입 15%까지는 변수별로 공기량의 약간의 증가가 나타나는 반면에 석회석미분말을 각각 20%, 25%를 혼입하였을 경우, 오히려 공기량이 다시 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 석회석미분말의 혼입률의 증가에 따른 공기량의 변화는 미미한 것으로 분석되었다.

이러한 결과로부터, 석회석미분말의 혼입이 플라이애시 등에서 나타나는 미연소 탄소분에 의한 공기연행제의 흡착현상이 나타나지는 않은 것으로 분석되며 석회석미분말의 첨가율에 관계없이 동일한 수준의 공기연행제를 사용할 수 있을 것으로 판단되어진다.

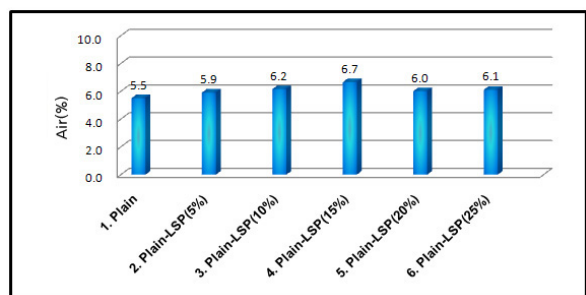


Fig. 12 Measured Air Content Results

4.1.3. 단위용적질량

단위용적질량 측정결과(Fig. 13), 각 시험체별 모두 일반적인 무근콘크리트 단위용적질량 2,300kg/m³보다 낮은 수준을 나타내었다. Plain-LSP(10%) 시험체는 다소 실험오차로 판단되어지며, Plain-LSP(10%) 시험체를 제외하고는 석회석미분말의 첨가율이 증가할수록 단위용적질량은 낮아지는 경향을 나타내었다. 이는 석회석미분말을 사용할 경우, 사용한 석회석미분말의 비중이 시멘트비중보다 낮으며 또한 중량비율에 따른 치환으로 인하여 골재의 사용량 또한 석회석미분말의 증가에 따라 감소한 것에 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 또한 석회석미분말을 사용한 경우 플라이애시 등의 함유로 인한 시멘트와 골재들 간의 점착력 증가 및 내부간극의 감소효과는 나타나지 않는 것으로 판단된다. 이는 석회석미분말의 혼입량의 증가에 따라 슬럼프가 증가하는 현상과도 부합하는 결과이다.

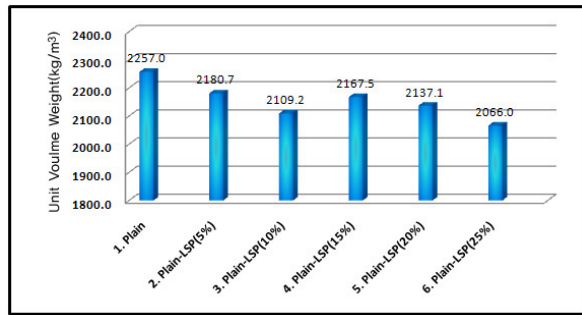


Fig. 13 Measured Unit Volume Weight

4.1.4. 응결시간 측정(Vicat 침)

응결시간 측정결과(Fig. 14), 석회석미분말의 첨가율이 증가할수록 응결시간은 단축되는 경향을 나타내었다. 이와 같은 결과는 석회석미분말의 혼입률 증대에 따른 블리딩의 감소로 사료되며 참고문헌 분석 결과, 석회석미분말의 분말도가 클수록 블리딩은 감소하는 것으로 나타났다. 그 메커니즘으로는 시멘트 입자로부터 입경이 작은 석회석미분말이 증가하는 것에 의해 블리딩 수의 이동유로가 길어지는 것과 시멘트로부터 석회석미분말의 비중이 가볍기 때문에 석회석미분말의 침강속도가 늦어지고 블리딩 발생속도가 늦어지는 등의 물리적인 영향이 크다고 나타내었다. 이와 같은 결과는 석회석미분말의 혼입률 증대에 따른 블리딩의 감소 등의 물리적인 영향이 큰 것으로 판단된다. 그러나 석회석미분말을 15% 치환 시, 초결시간이 빨라진 원인은 각 변수별로 2개의 시험편의 평균값 사용으로 인한 실험오차로 판단된다.

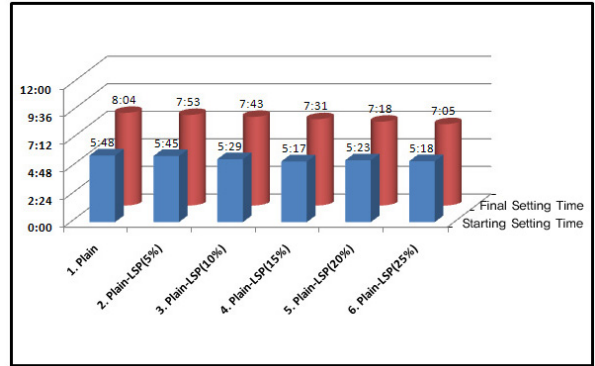


Fig. 14 Measured Setting Time Results

4.1.5. 소성수축 길이변화

Fig. 8의 시험체를 통한 소성수축 실험결과, 모든 시험체에서 육안으로 확인될 수 있는 균열이 나타나지 않았으며 이는 도로포장용 콘크리트의 배합자재가 단위수량이 낮고 W/B 비 또한 높은 배합이 아니므로 표면 수분증발에 의한 균열이 발생하지 않은 것으로 판단된다. 그러나 이것은 콘크리트 표면의 육안조사로 나타난 결과이므로 내부적으로 미세한 마이크로 크랙이 발생하였을 가능성도 배제할 수는 없다. 따라서, 향후 소성수축 길이변화 실험방법 및 실험환경 조건을 다시 산정할 필요성이 있는 것으로 분석되었다. Fig. 15는 각 변수별 스틸링에 부착된 변형률 게이지를 데이터로거로 측정한 결과 값의 평균값을 나타내었다.

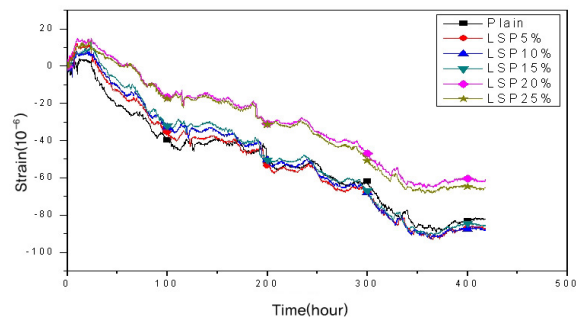


Fig. 15 Measured Plastic Shrinkage Results

4.2. 경화 후 콘크리트 특성 분석

4.2.1. 압축강도

Fig. 16에서는 각 변수별 측정된 압축강도를 비교하고 있다. 전반적으로 석회석미분말의 혼입률의 증가에 따른 압축강도는 감소하는 것으로 분석되었다. 재령 3일 압축강도의 경우, Plain 시험체는 21.4MPa를 나타내었고 석회석미분말의 혼입률이 5%씩 증가함에 따라

Plain 시험체의 압축강도 값의 약 87%, 73%, 65%, 44%, 40% 수준의 강도값을 나타내었다.

재령 28일의 압축강도의 경우, 재령 3일에서와 비슷한 경향을 나타내었는데, Plain 시험체의 강도값은 26.2MPa로 나타났으며 석회석미분말의 혼입률이 5%씩 증가함에 따라 Plain 시험체의 압축강도의 약 91%, 88%, 77%, 55%, 49% 수준의 강도값을 나타내었다. 재령 56일 압축강도의 경우, Plain 시험체의 압축강도는 29.5MPa를 나타내었고 석회석미분말의 혼입률이 5%씩 증가함에 따라 Plain 시험체의 압축강도값의 89%, 91%, 78%, 56%, 51% 수준의 강도값을 나타내었다.

이러한 분석결과, 석회석미분말의 치환율이 증가할수록 압축강도가 저하되는 것으로 나타났는데, 이것은 석회석미분말의 치환율이 증가함에 따라 단위시멘트량이 감소되었고 강도의 경우 단위시멘트량에 거의 좌우되며, 석회석미분말은 시멘트 수화반응에 거의 기여하지 못하므로 강도 발현에 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

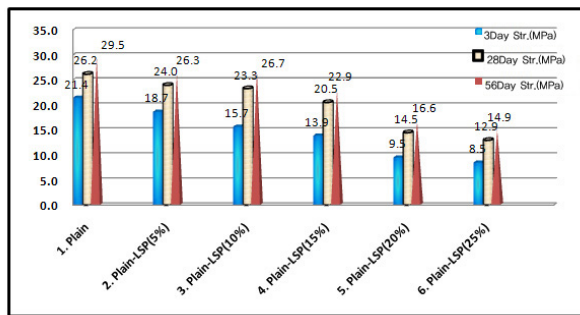


Fig. 16 Measured Compressive Strength Comparison

4.2.2. 인장강도

Fig. 17에서는 재령 28일에서의 각 변수별 측정된 인장강도를 비교하여 나타내고 있으며 석회석미분말의 혼입률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. Plain 시험체에서의 인장강도값이 2.5MPa로 가장 높게 나타났으며 석회석미분말의 혼입률이 5%씩 증가함에 따라 Plain 시험체의 인장강도 측정값을 나타내었다. 그러나 석회석미분말을 각각 20%, 25% 혼입한 경우의 인장강도 값은 동등한 수준의 값을 나타내었다. 압축강도결과와 마찬가지로 화학적으로 비활성적인 석회석미분말의 혼입률이 증가할수록 인장강도의 발현도 낮아지는 것으로 나타났다.

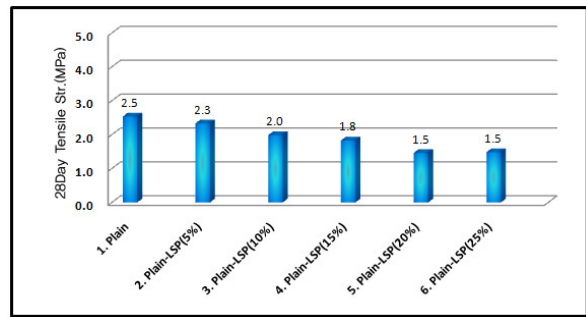


Fig. 17 Measured Tensile Strength Comparison

4.2.3. 휨강도

Fig. 18은 휨강도 실험결과를 나타내고 있다. Plain 시험체의 휨강도 값이 5.6MPa로 가장 높게 나타났으며 석회석미분말의 치환율이 5%씩 증가함에 따라 Plain 시험체의 휨강도 값의 약 61%, 68%, 55%, 48%, 41% 수준의 값을 나타내었다(Fig. 26). 그러나 석회석미분말의 치환율이 5%에서는 압축강도 실험결과와는 달리 석회석미분말 10%를 치환한 시험체가 3.8MPa로, 석회석미분말 5%를 치환한 시험체 3.4MPa보다 약간 증가한 결과값을 나타내었는데 이는 다소 실험 오차로 판단되어지며, 그 외에는 압축강도 결과와 마찬가지로 전반적으로 석회석미분말의 치환율의 증가에 따른 휨강도는 감소하는 것으로 분석되었다.

참고문헌 분석결과 또한 석회석미분말을 5~10% 치환했을 경우, Plain 시험체와 비교하여 약 10%이내의 강도값이 감소하는 것으로 알려져 있다. 따라서 휨강도 특성 분석은 재실험을 할 필요가 있을 것으로 판단되어지며 추후 이러한 실험적 오차가 없다면 석회석미분말을 약 5% 치환했을 경우에는 “고속도로 공사 전문 시방서(2009)”의 기준인 재령 28일에서의 휨강도 4.5MPa를 만족할 수 있을 것으로 기대된다.

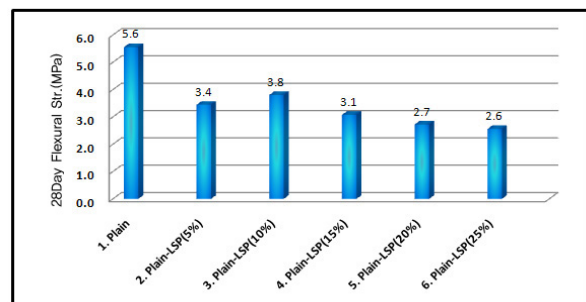


Fig. 18 Measured Flexural Strength Comparison

4.2.4. 탄성계수

탄성계수는 각 실험변수별로 3개씩 시험체를 제작하

여 측정하였으며, 콘크리트의 탄성계수로 단위용적질량 m_c 의 값이 1,450~2,500kg/m³인 경우 Eq. (2)에 따라 계산할 수도 있다. 여기서 f_{cu} 는 파괴 시의 압축강도이다. Fig. 19와 Fig. 20에서는 측정된 탄성계수의 평균값과 계산식에 의한 탄성계수 평균값을 각 변수별로 비교하여 나타내고 있다.

$$E_c = 0.077m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}} \text{ (GPa)} \quad (2)$$

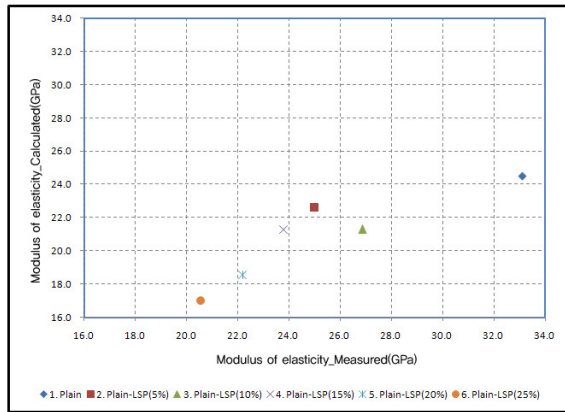


Fig. 19 Comparison of Measured and Predicted E at 28days

재령 28일의 경우, 실험에 의하여 탄성계수를 측정하였을 때 모든 변수가 약 20GPa 이상의 값을 나타내고 있으며 석회석미분말이 혼입되지 않은 Plain 시험체가 33.1GPa로 가장 높게 나타났다. 석회석미분말의 치환율이 5%씩 증가함에 따라 Plain 시험체의 탄성계수 값의 약 76%, 81%, 72%, 67%, 62% 수준의 탄성계수 값을 나타내었다. 하지만 설계기준에 제시된 식과 실측된 단위용적질량을 이용하여 계산한 결과는 Plain 시험체가 24.5GPa로 가장 높게 나타났으며 석회석미분말의

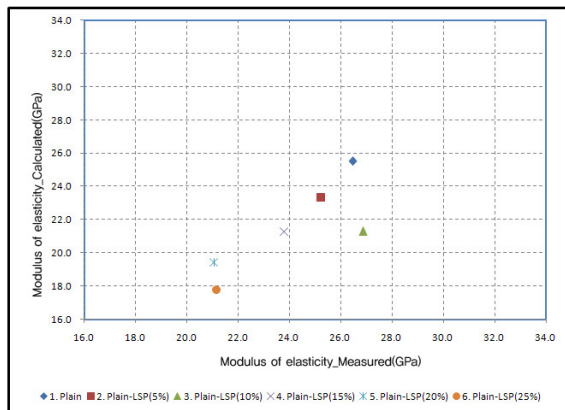


Fig. 20 Comparison of Measured and Predicted E at 56days

치환율이 5%씩 증가함에 따라 Plain 시험체의 탄성계수 값의 약 92%, 87%, 87%, 76%, 69% 수준의 탄성계수 값을 나타내었다. Plain 시험체를 제외하고는 실험 측정값과 계산값의 차이가 크지 않은 반면 계산된 탄성계수의 상대적 변화가 다소 적은 것을 알 수 있다.

재령 56일의 경우, 실험에 의하여 탄성계수를 측정하였을 때 재령 28일에서와 마찬가지로 6개의 변수 모두 20GPa 이상의 값을 나타내고 있으며 석회석미분말의 치환율이 5%씩 증가함에 따라 Plain 시험체의 탄성계수 값의 약 95%, 97%, 100%, 80%, 80% 수준의 탄성계수 값을 나타내었다. 설계기준에 제시된 식과 실측된 단위용적질량을 이용하여 계산한 결과는 Plain 시험체가 25.5GPa로 가장 높게 나타났으며 석회석미분말의 치환율이 5%씩 증가함에 따라 Plain 시험체의 탄성계수 값의 약 91%, 87%, 87%, 76%, 70% 수준의 탄성계수 값을 나타내었다. 이는 실험 측정값과 계산값의 차이가 1~4.5GPa로 크지 않은 반면 계산된 탄성계수의 상대적 변화가 다소 적은 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 결과와 같이 실측값이 없는 경우에 충분히 계산식을 활용하여 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

4.2.5. 건조수축 길이변화

각 변수별 시험체 길이 변화를 측정한 결과를 Fig. 21에 나타내었다. 본 연구에서는 각 변수별로 1개씩의 시험체를 활용하여 건조수축 길이변화를 측정하였으므로 실험변수별 건조수축 길이변화 특성을 분석하기에는 어려운 측면이 있는 것으로 나타났다. 하지만 수축특성이 일반적인 콘크리트에 비교하여 비슷한 수준으로 판단되며, 추후 재실험의 필요성이 있을 것으로 판단되어 진다. 향후 건조수축 길이변화 실험을 실시할 경우에는 실험변수별 시편의 갯수를 증가시키고 현재의 시험체의

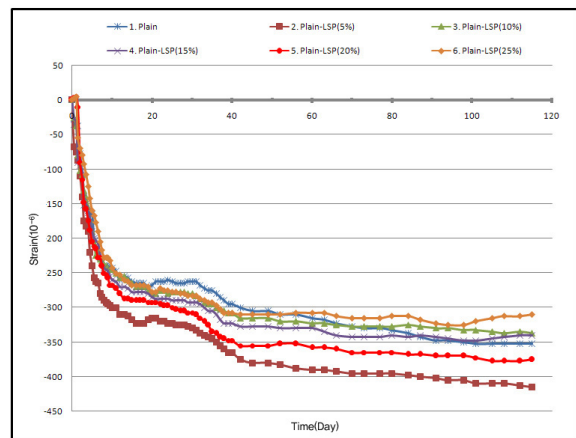


Fig. 21 Measured Drying Shrinkage Results

탈부착형 다이얼게이지 길이변화 측정장치 보다 정밀한 변형을 게이지 부착에 의한 측정 및 고정형 길이변화 측정장치를 활용해야 할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 “석회석미분말 치환 도로포장용 친환경 시멘트콘크리트 기술 개발”을 위한 기초연구로서 석회석미분말을 혼입한 시멘트콘크리트의 역학적 특성을 분석하고자 하였으며 실험적 연구를 통하여 도출되어진 결론은 다음과 같다.

1. 슬럼프 실험결과, 석회석미분말의 혼입량이 증가할수록 슬럼프 값도 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 석회석미분말이 화학적으로 활성적이지 않고 입도분포가 다양하며, 플라이애시 등의 다른 혼화재료와 비교하여 미립분을 많이 포함하고 있기 때문에 석회석미분말의 구속수비가 작아지는 요인에 기인하는 것으로 판단되어진다.
2. 공기량 실험결과, 6개의 변수 모두 목표 설정값인 5~7%에 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 석회석미분말의 혼입이 기존의 공기연행제를 동일한 수준으로 사용하여도 동결융해저항성 증대를 위한 연행공기의 확보는 문제가 없을 것으로 판단된다.
3. 단위용적질량 실험결과, 석회석미분말의 혼입량이 증가할수록 단위용적질량이 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 석회석미분말의 비중이 시멘트보다 낮으며 중량비율에 따라 치환한 결과로 판단된다.
4. 응결시간 측정결과, 석회석미분말의 혼입률이 증가할수록 응결시간은 단축되는 경향을 나타내었다. 이와 같은 결과는 석회석미분말의 혼입률 증대에 따른 블리딩의 감소 등의 물리적인 영향이 큰 것으로 판단된다.
5. 소성수축 길이변화 실험결과, 각 변수별 소성수축 길이변화 시험체 모두 육안으로 확인될 수 있는 균열이 나타나지 않았는데 이는 도로포장용 콘크리트의 배합자체가 단위수량이 낮고 W/B 비 또한 높은 배합이 아니므로 표면 수분증발에 의한 균열이 발생하지 않은 것으로 판단된다.
6. 압축강도 실험결과, 석회석미분말의 치환율이 증가할수록 압축강도가 저하되는 것으로 나타났는데, 이것은 석회석미분말의 치환율이 증가함에 따라 단위

시멘트량이 감소되었고 강도의 경우 단위시멘트량에 거의 좌우되며, 석회석미분말은 시멘트 수화반응에 거의 기여하지 못하므로 강도 발현에 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

7. 재령 28일에서의 각 변수별 측정된 인장강도는 석회석미분말의 혼입률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.
8. 휨강도 실험결과, 석회석미분말의 치환율이 증가할수록 휨강도가 저하되는 것으로 나타났으며 이는 압축강도와 마찬가지로 단위시멘트량이 감소했기 때문으로 판단되어진다. 치환율이 5%이상인 경우, 기준인 4.5MPa를 만족하지 못하는 것으로 분석되어 이에 대한 추가적인 실험적 검증이 필요할 것으로 판단된다.
9. 탄성계수의 경우, 실험측정값과 계산에 의한 값을 비교하였을 경우에 실측값과 계산값의 차이가 1~4.5GPa로 크지 않은 반면 계산된 탄성계수의 상대적 변화가 다소 적은 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구의 결과와 같이 실측값이 없는 경우에 충분히 계산식을 활용하여 얻을 수 있을 것으로 사료된다.
10. 건조수축 길이변화 측정결과, 수축특성이 일반적인 콘크리트에 비교하여 비슷한 수준으로 판단되며, 실험변수별 건조수축길이 변화를 분석하기에는 어려운 측면이 있는 것으로 사료되어 추후 추가적인 실험의 필요성이 있을 것으로 판단되어진다.
11. 위의 실험적 연구를 통하여 석회석미분말을 시멘트에 대해 치환하는 경우, 유동성 및 재료분리 저항성 확보를 위한 고유동콘크리트와 콘크리트의 수화열 저감에 유용할 것으로 판단되며 압축 및 휨강도 등의 목표강도를 높게 설정하고자 할 경우, 단위시멘트량을 늘리고 W/B비를 낮추어 활용할 필요성도 있을 것으로 판단되어진다.

감사의 글

본 연구는 (주)삼우IMC의 연구지원 및 국토해양부 저탄소 녹색 공향 포장 시공 및 유지관리 기법 개발 연구사업의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

References

- Cho, Ilho, Sung, C., 2006. Flowability of High Flowable Concrete with Fly Ash and Lime Powder, *Journal of the Korean Society of Agriculture Engineers*, Vol. 48. No. 4. 23-30.
- Cho, Joongdong, Jun, C., Cho, B., Jang, G., Han, C., 1999. The

- Properties of High Flowing Cement Mortar with the Content of Limestone Grain, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 11. No. 1. 605-608.
- Cho, Joongdong, Hong, S., Cho, B., Jang, G., Han, C., 1999. The Properties of High Flowing Concrete with the Kind and Content of Limestone Powder, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 11. No. 2. 267-270.
- Choi, Woohyeon, Park, C., Kim, S., Jung, W., Chon, B., 2011. Strength Characteristics of Limestone Powder Added Cement Concrete, *Proceeding of Korean Society of Civil Engineering*, 1384-1387.
- Choi, Woohyeon, Park, C., Kim, S., Jung, W., Kang, J., 2011. Mechanical Characteristics of Limestone Powder Added Concrete for Environmental-Friendly Pavement, *Proceedings of Korean Society of Road Engineers*, 33-38.
- Choi, Woohyeon, Park, C., Kim, S., Jung, W., Chon, B., Kim, Y., 2011. Freeze-Thaw Resistance of Limestone Powder Added Cement Concrete, *Proceedings of Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 190-193.
- Han, Sangmook, Wu, X., 2008. Properties of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites Mixed with Limestone Powder, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 8. No. 2. 23-30.
- Halla ENCOM, 2003. *Quality of Limestone Powder*, Mechanical Properties of Limestone Added Cement Concrete and Construction Guide.
- Koh, Kyungtaek, Yoo W., Han S., 2004. A Study on Strength Development and Resistance to Sulfate Attack of Mortar Incorporating Limestone Powder, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16. No. 3. 303-310.
- Koo, Bongkuen, Ra, J., Ryu, T., Lee, J., Lee, H., Lee, K., 2002. Characteristic on the Resistance of Chloride Infiltration in Concrete Containing Limestone Powder, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 14. No. 2. 75-80.
- Koo, Bongkuen, Lee, J., Lee, H., Park, C., 2003. Durability in Concrete Containing Limestone Powder and Slag Powder, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 15. No. 2. 82-85.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010. *Road Statistics Report*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009. *Road Statistics Report*.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009. *Highway Construction Provisions*.
- Oh, ByungHwan, Park, D., Park, J., Lee, J., 2002. Mechanical and Durable Properties of Concrete Containing Slag and Limestone Powder, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 14. No. 1. 569-574
- Sidney Mindess, J. Francis Young., David Darwin., 2008. *Concrete-Second Edition*.
- (접수일 : 2012. 3. 19 / 심사일 : 2012. 3. 22 / 심사완료일 : 2012. 5. 17)