

온돌바닥 모르타의 건조수축 보상을 위한 팽창재의 품질특성에 관한 실험연구

이종열^{1)*} · 이웅종¹⁾ · 정성철²⁾

¹⁾쌍용양회공업(주) 중앙연구소 콘크리트연구소 ²⁾(주)대우건설 건축기술팀

(2001년 1월 9일 원고접수, 2001년 5월 28일 심사완료)

An Experimental Study on the Quality Properties of the Expansive for Dry-Shrinkage Compensation of the On-Dol Floor Mortar

Jong-Ryul Lee^{1)*}, Woong-Jong Lee¹⁾, and Sung-Cheol Jung²⁾

¹⁾ SsangYong Cement Industrial Co., Ltd., Research Center, Daejeon, 305-345, Korea

²⁾ DaeWoo Co., Engineering & Construction, Seoul, 100-095, Korea

(Received on January 9, 2001, Revised on May 28, 2001)

ABSTRACT

In this paper, the properties of an expansive agent (CaO-CaSO₄) for dry shrinkage compensation were investigated by a series of experimental program, which might be used at On-Dol heating system as mortar type. The expansion principle of the CaO-CaSO₄ was mainly verified. As a result of this study, the correlation between the content of the expansive agent and the compressive strength was obtained in the form of exponential function($Y = Ae^{-x}$), showing that as the content of expansive agent increased as the expansion performance with the compressive strength increased by only a certain amount. Also, as a results of the analysis of a correlation between the expansive performance and the chemical properties which generally accompanied a part of quality management in manufacturing the expansive cement, the expansive performance was relative to only the contents of the F-CaO among chemical properties(Blaine, +44 μ mR, F-CaO, SO₃, L.O.I). And it was clarified that the results were relative to the second order function, showing that if the contents of the F-CaO increased the expansive performance increased.

Keyword : On-Dol floor mortar, crack, dry-shrinkage, expansive(CaO-CaSO₄)

1. 서 론

우리 나라의 공동주택 난방방식은 온돌난방 시스템으로 온돌난방 구조는 하중을 지탱하는 슬래브층, 축열성 및 차음성을 부여하기 위한 기포 콘크리트층, 온수파이프를 고정·보호시키고 상부(실내)로 열기를 방출하는 온돌바닥 모르타층으로 구성되어 있다¹⁾. 따라서 온돌바닥 모르타층은 궁극적으로 온수파이프의 위치를 고정·보호하고, 사용하중을 기포층과 슬래브층에 전달하는 역할을 하지만, 균열이 쉽게 발생하여 이로부터 각종 문제점(균열보수 비용증가, 바닥마감재의 변색과 파손 등)들이 나타난다.

거시적인 입장에서 온돌바닥 모르타의 균열발생 원인을 분석하면 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째로, 정부의 대량주택공급정책과 더불어 시공규모가 점차 대형화, 고층화로 바뀌면서, 종래부터 사용해오던 건비빔 모르타 시공방법에

서 펌프카를 이용한 기계화 시공방법이 도입됨에 따라 물-시멘트비가 크게 증가하여 균열 발생량이 커지게 됨을 들 수 있다^{2,3)}. 두 번째로, 온돌바닥 모르타는 그 구조특성상 모르타의 타설 및 양생기간동안에 노출면적이 커서 외기환경(온도, 습도 및 바람)의 영향에 민감하게 반응하여 균열이 쉽게 발생하는 특성이 있다⁴⁾.

한편 온돌바닥 모르타의 균열저감을 위해 현재까지 사용된 재료적인 측면에서 적용된 방법은 메탈라스 또는 섬유보강재 등을 시멘트와 혼합 타설하여 인장강도를 증진 시킴으로써 건조수축에 의한 균열을 구속시키는 물리적인 재료와 CaSO₄계, CaO-CaSO₄계(석회-석고계라 명명함), CSA계 및 수축저감제 등을 시멘트와 혼합하여 적절한 팽창을 유도하고 궁극적으로 건조수축을 보상하는 화학적인 재료로 구분하여 볼 수 있다.

특히, 화학적인 재료 중에서 균열저감을 위해 사용하는 팽창성 물질은 적정하게 사용하지 않으면 온돌바닥 모르타의 최종품질이 균열발생 과다 혹은 과팽창 현상이 발생할 수 있는 문제점이 존재한다.

* Corresponding author

Tel : 042-865-1760 Fax : 042-865-1768

Email : jrlee@ssrc.ssy.co.kr

따라서 본 연구에서는 온돌바닥 모르터의 건조수축을 보상하기 위해 사용되는 화학적인 재료 중 석회-석고계 팽창재를 중심으로 팽창재의 함량에 따른 물리적 성분 및 화학적 성분을 분석하여, 최종적으로 팽창성능에 영향을 미치는 화학성분 인자를 분석하고, 팽창성능의 증가에 따른 압축강도의 변화를 실험적으로 구명하고자 한다.

2. 수축변형요인 및 팽창메커니즘 분석

2.1 온돌바닥 모르터의 수축변형요인 분석

Aitcin 등⁵⁾은 콘크리트의 수축변형을 일으키는 요인을 건조수축, 소성수축, 자기수축, 열수축 및 중성화 수축 등 5가지 형태로 분류하고 있다. 온돌바닥 모르터 측면에서 수축변형요인을 분석하여 보면 다음과 같다.

- 1) 건조수축균열(drying shrinkage) : 바닥 모르터의 구속 면적 대비 노출면적이 커서 건조수축이 크게 발생하며, 온돌바닥 모르터의 균열발생 영향정도는 크다.
- 2) 소성수축균열(plastic shrinkage) : 건조수축과는 달리 모르터의 경화전에 수분증발에 의해 발생하는 현상으로 바닥 모르터층 하부에 있는 기포콘크리트층의 흡수와 대기중으로 급격한 수분증발이 발생시 소성수축이 크게 발생하며, 온돌바닥 모르터의 균열발생 영향정도는 크다.
- 3) 자기수축(autogenous shrinkage) : 시멘트 수화반응의 결과로서 주변 매개체 접촉(외기와외의 수분교환, 온도변화, 하중영향)없이 발생하는 현상으로 바닥모르터에 사용되는 단위시멘트량이 m³당 500 kg인 점을 감안하면 온돌바닥 모르터의 균열발생에 어느정도 영향을 준다고 볼 수 있다.
- 4) 열 수축(thermal contraction) : 매스콘크리트에서 쉽게 발생할 수 있는 현상으로 수화열에 의한 내외·부 온도차에 의해 발생하며 온돌바닥모르터의 균열발생 영향정도는 작다.
- 5) 중성화수축(carbonation shrinkage) : 습기의 존재하에 공기중의 이산화탄소와 수화시멘트 페이스트의 반응에 의해 수축하는 것으로 온돌바닥 모르터의 균열발생 영향정도는 작다.

분석결과에 의하면 온돌바닥 모르터의 균열발생 주요인은 건조수축, 소성수축인 것으로 분석되었으며, 자기수축

은 어느 정도 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 건조수축 특성을 대상으로 연구를 수행하였다.

2.2 석회-석고계 팽창재의 팽창원리

석고-석회계 팽창재의 팽창원리는 CaO자체가 활성도가 높기 때문에 CaSO₄를 이용하여 모르터의 경화체 조직이 형성되는 시기(유효팽창 시기)를 조절하고, 수화물인 Ca(OH)₂의 결정 생성압이 팽창을 유도하는 것으로 보는 것이 가장 일반적인 학설이다^{6,7)}.

2.3 건조수축보상메커니즘

팽창성 시멘트 콘크리트는 팽창량의 크기에 따라 수축보상(shrinkage-compensation)용과 자기응력(self-stress)용으로 구분된다고 Polivka⁸⁾는 분류하였으며, Fig. 1과 같다. 수축보상용 시멘트는 원리상 건조수축에 기인한 균열발생을 최소화하기 위해 사용된다.

3. 실험내용

3.1 실험개요

본 연구에서는 온돌바닥 모르터의 건조수축 보상용으로 사용되는 석회-석고계 팽창시멘트의 팽창특성을 분석하기 위해 선정된 팽창시멘트의 배합조건은 Table 1과 같다.

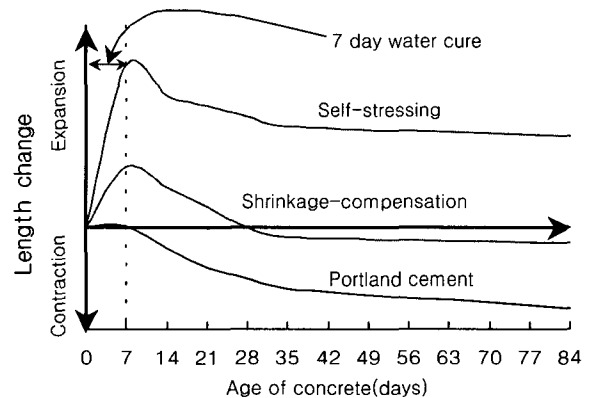


Fig. 1 Length change history of shrinkage-compensating, self-stressing and portland cement

Table 1 Mix proportions of the expansive cements

Component (%)	Symbol of the expansive cement															
	B01	B02	B03	B04	B05	B06	B07	B08	B09	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16
CaO	5	4	3	5	4	3	5	4	3	5	4	3	0	0	0	0
CaSO ₄	7	7	7	6	6	6	5	5	5	4	4	4	6	12	18	0
OPC	88	89	90	89	90	91	90	91	92	91	92	93	94	88	82	100

참고로 배합조건은 팽창재의 함량에 따른 팽창성능을 분석하기 위해 석회(CaO) 함량 3~5%와 석고(CaSO₄) 함량 4~7%의 범위에서 혼합한 팽창재와 석회없이 석고만을 6~18%범위의 팽창재를 보통 포틀랜드 시멘트(이하 OPC)와 혼합하여 팽창시멘트를 각각 제조하였다.

한편 온돌바닥 모르타의 품질특성 중에서 가장 중요한 인자는 균열발생 정도로, 실험적으로 평가할 수 있는 항목은 길이변화율이다. 따라서 본 연구에서는 길이변화율을 중심으로 기타 물성(물리화학 특성치)과의 상관관계를 분석하고자 하며, Table 2이 같이 시험분석 항목을 설정하였다. 한편, 모르타의 혼합방법은 KS L 5109에 따라 실험을 수행하였다. 길이변화율 시험방법은 기본적으로 KS F 2424에 의거 실험을 수행하였으나, 차이점은 양생조건이다. 즉, KS 규격에는 시험체 제작후 1주일간 수중양생을 실시하게 되어있으나, 본 실험방법은 현장에 타설된 온돌바닥모르타의 양생조건이 상당기간 동안 기건양생 조건으로 노출되는 것을 감안하여 시험체 제작 후부터 기건양생으로 실험을 실시하였다.

3.2 사용재료

CaO는 석회석(CaCO₃)원석을 출발원료로 하여 1,000 °C에서 1시간 소성하고, +88 μ 잔분이 10~15%되도록 분쇄했다. CaSO₄는 천연 무수석고를 분쇄하여 비표면적이 3,500 cm²/g인 재료를 사용하였고, OPC는 국내 S사 1종 시멘트이었다. 각각의 원료에 대한 화학성분은 다음 Table 3와 같다.

4. 결과 및 분석

4.1 물리화학특성치 분석

팽창시멘트의 물리·화학 특성치들의 분석결과는 Table 4와 같다. 물리특성 실험결과는 CaO를 첨가하지 않고 CaSO₄만 사용한 경우(B13, B14, B15인 경우), CaSO₄의 함량이 증가할수록 응결시간이 지연되고, 압축강도는 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 동일한 CaSO₄함량에서는 CaO의 사용량이 증가할수록 응결시간이 짧아질 것으로 예상된 것과는 달리 나타났는데, 이는 석회와 석고의 교호작용의 영향인 것으로 판단된다.

한편 팽창재를 사용한 경우는 OPC 단독(B16)만을 사용한 경우보다 압축강도가 저하됨을 확인할 수 있었으며, 팽

Table 2 Item of the test analysis, and the experimental conditions

Item	Contents
Chemical compositions	Blaine, +44 μ mR, F-CaO, SO ₃ , L.O.I
Physical property	Comp. strength, Setting time, Length change
Mix. ratio (C:S)	1 : 3, (Standard sand)
W/C(%)	70
Curing condition	Setting time : KS L 5103 Comp. strength : KS L 5105 Length change : Ambient curing [Temp. : 20 \pm 1 °C, R.H. : 60 \pm 5%]

Table 3 Chemical composition of the sample

Component	Chemical composition(%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	L.O.I
CaO	5.72	0.99	0.46	89.03	0.93	-	2.66
CaSO ₄	2.80	0.22	0.02	37.05	-	57.6	1.44
OPC	21.22	5.73	3.07	61.29	2.76	2.57	2.02

Table 4 Results of the physical and chemical test

Symbol	Chemical composition(%)			Blaine (cm ² /g)	Residue 44 μ mR(%)	Comp. strength(kgf/cm ²)			Setting time(hr : min)	
	SO ₃	F-CaO	L.O.I			3d	7d	28d	Ini.	Fin.
B01	5.9	4.98	2.14	3730	9.3	36	51	115	2:50	6:25
B02	6.0	4.31	2.13	3840	9.0	43	61	137	3:15	7:15
B03	6.0	3.60	1.97	3700	9.6	50	63	148	3:30	7:10
B04	5.2	5.14	2.14	3740	10.3	42	61	135	3:20	6:55
B05	5.5	4.23	2.02	3980	10.5	44	62	137	3:30	7:40
B06	5.3	3.56	2.09	3830	9.9	52	94	158	3:15	7:30
B07	4.5	5.09	2.11	3790	10.6	45	77	146	3:30	6:35
B08	4.9	4.48	2.06	3630	10.0	56	97	164	3:25	6:45
B09	4.7	3.84	2.22	4050	9.1	57	97	176	3:25	6:45
B10	4.3	5.03	2.16	3880	9.0	66	105	171	3:40	6:40
B11	4.2	4.30	2.15	3840	8.8	71	110	179	3:25	6:15
B12	4.2	3.85	2.12	3860	7.9	75	115	202	3:25	6:55
B13	5.7	1.36	2.02	3840	7.6	67	76	215	3:50	7:40
B14	8.9	1.12	2.07	3790	9.4	48	73	114	3:55	7:55
B15	12.5	1.15	2.02	4090	8.3	45	112	122	4:10	8:05
B16	2.57	1.16	2.02	3420	9.6	99	160	227	3:25	5:35

창재의 사용량이 증가하면 저하정도가 크게 나타났다.

4.2 길이변화를 실험결과

팽창시멘트의 길이변화를 실험결과는 Fig. 2~Fig. 9과 같다. 분석결과에 의하면, 모르타의 팽창성능(Fig. 2~Fig. 5)은 석회(CaO)의 함량에 의해 지배되는 것을 확인할 수가 있었으며, 동일 석고수준에서 석회가 1%씩 증가함에 따라 선형적인 증가가 아닌 비선형 증가형태로 나타났다.

한편 동일 석회수준(Fig. 7~Fig. 9)에서 석고 양이 1%씩 증가함에 따라 팽창량도 증가하는 경향을 나타냈으며, 특이한 사항은 석고 사용량이 5~7%수준에서는 팽창 정도가 거의 유사한 값들을 나타내지만, 석고 4% 사용은 5~7%보다 현격히 낮은 팽창량을 나타냈다. 그리고 석회 없이 석고만을 단독으로 사용시(Fig. 6) 석고의 사용량이 증가함에 따라 7일 재령에서는 수축에서 팽창으로 나타났으며, 재령 5주에서는 석고의 양에 관계없이 수축으로 나타났다. 또한 팽창재를 사용하지 않은 OPC 단독은 초기부터 수축을 일으키고, 장기적으로 수축량이 증가하는 것을 확인할 수가 있었다(Fig. 6).

결론적으로 팽창성능은 석회가 주요 지배인자로 작용하고, 석고가 보조적으로 작용하는 것을 본 실험을 통해서 확인할 수 있었으며, 석회-석고계의 팽창원리와 맥락을 같이하는 것으로 볼 수 있다.

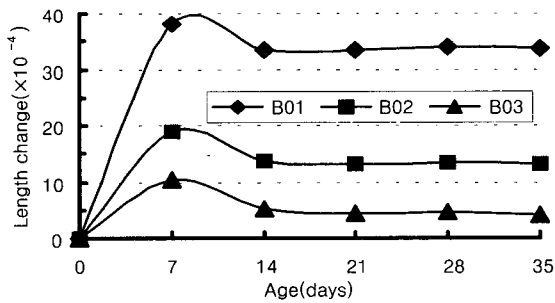


Fig. 2 CaSO₄[7%] fixed - CaO var.[3, 4, 5%]

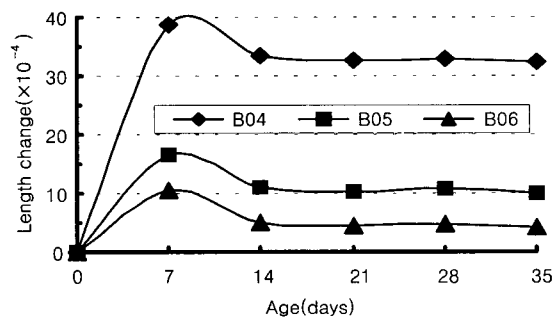


Fig. 3 CaSO₄[6%] fixed - CaO var.[3, 4, 5%]

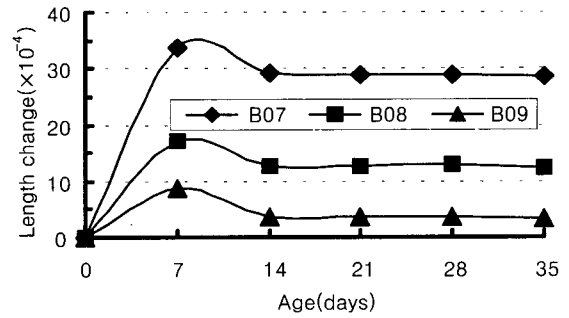


Fig. 4 CaSO₄[5%] fixed - CaO var.[3, 4, 5%]

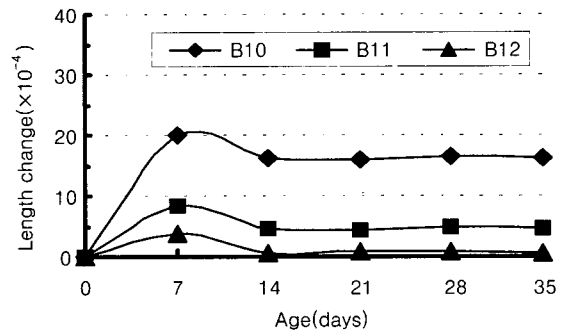


Fig. 5 CaSO₄[4%] fixed - CaO var.[3, 4, 5%]

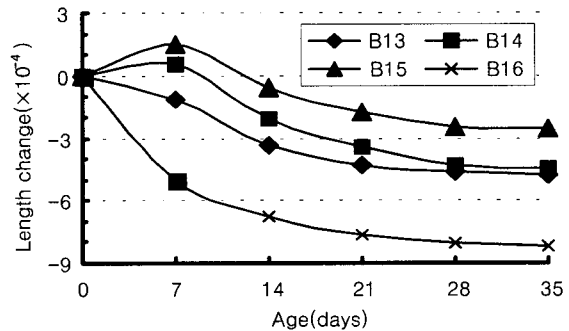


Fig. 6 CaO[0%] fixed - CaSO₄ var.[0, 6, 12, 18%]

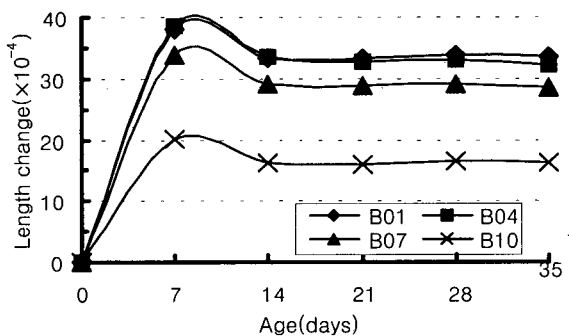


Fig. 7 CaO[5%] fixed - CaSO₄ var.[4, 5, 6, 7%]

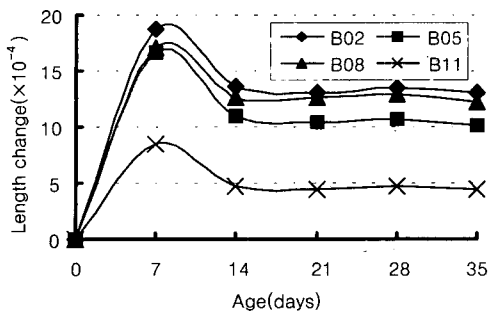


Fig. 8 CaO[4%] fixed - CaSO₄ var.[4, 5, 6, 7%]

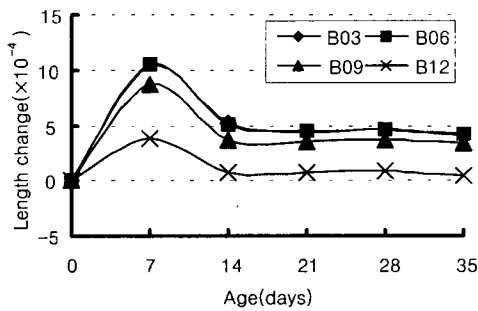


Fig. 9 CaO[3%] fixed - CaSO₄ var.[4, 5, 6, 7%]

4.3 길이변화율과 물리화학 특성치와의 관계

4.3.1 길이변화율과 압축강도와의 회귀분석

길이변화율과 재령별 압축강도와의 회귀 분석을 실시한 결과는 Fig. 10~Fig. 13와 같으며, 회귀식과 결정계수 분석결과는 Table 5와 같다. Table 5의 분석결과에 의하면 길이변화율과 압축강도와의 회귀곡선은 어느 정도 신뢰도를 갖고 있는 것으로 분석되었다. 특히 28일 재령의 압축강도와 7일 길이변화율 사이의 결정계수가 가장 높게 나타났다(즉, 총변동 중에서 68%는 회귀에 의하여 설명되는 변동이고, 나머지 32%는 잔차변동이다).

전체적으로 팽창성의 증가는 압축강도의 저하로 나타났고, 이의 경향은 지수함수($Y = Ae^{-x}$)적으로 감소함을 확인할 수 있었다.

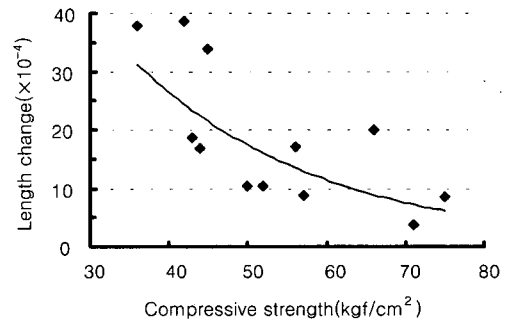


Fig. 10 Relation between comp. strength(3d) and length change(7d)

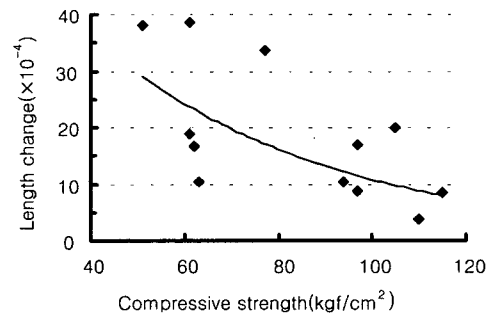


Fig. 11 Relation between comp. strength(7d) and length change(7d)

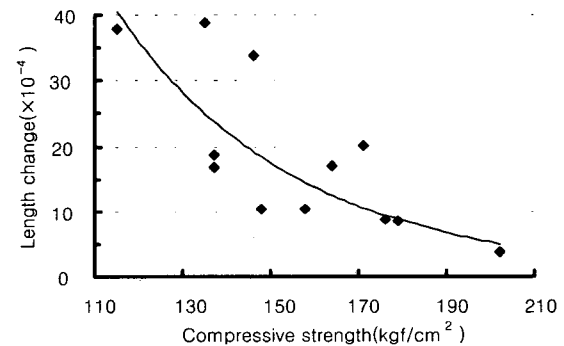


Fig. 12 Relation between comp. strength(28d) and length change(7d)

Table 5 Results of regression analysis between compressive strength and length change

Relation	Regression expression	Coefficient of determination(R^2)	n	Remark
Length change(7d)-Comp. strength(3d)	$y = 140.97e^{-0.012x}$	0.5461	12	
Length change(7d)-Comp. strength(7d)	$y = 81.78e^{-0.023x}$	0.4315	12	
Length change(7d)-Comp. strength(28d)	$y = 633.96e^{-0.024x}$	0.6795	12	
Length change(28d)-Comp. strength(28d)	$y = 2397.80e^{-0.038x}$	0.6304	12	

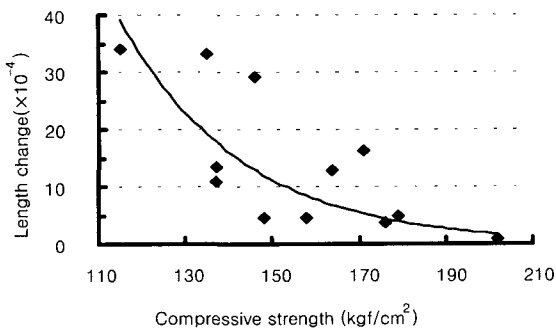


Fig. 13 Relation between comp. strength(28d) and length change(28d)

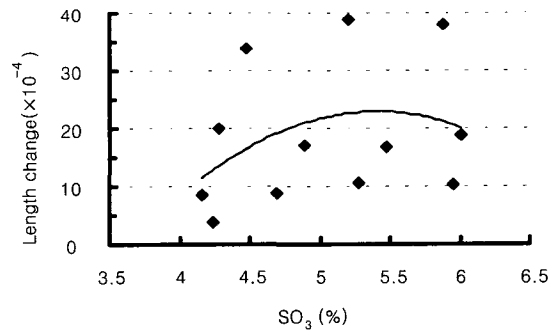


Fig. 15 Relation between length change(7d) and SO₃

4.3.2 길이변화율과 화학성분치와의 회귀분석

길이변화율과 화학성분 특성치들 중에서 F-CaO, SO₃, 강열감량(L.O.I), Blaine, +44 μ m 사이의 회귀분석 결과는 Fig. 14~Fig. 18에 제시하였다. 회귀곡선 식과 결정계수의 분석결과는 Table 6에 제시하였다. 분석결과에 의하면, 화학성분 특성치 중에서 F-CaO 함량과 길이변화율과의 신뢰도(결정계수 0.8028)가 가장 높게 나타났으며, 그 외의 특성치는 신뢰도가 낮은 것으로 분석되었다. 한편 F-CaO 함량이 증가함에 따라 팽창성능도 증가하는 것으로 나타났고, 증기율은 2차 함수관계를 갖는 것으로 분석되었다.

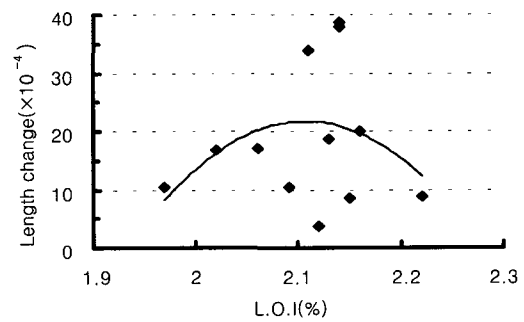


Fig. 16 Relation between length change(7d) and L.O.I

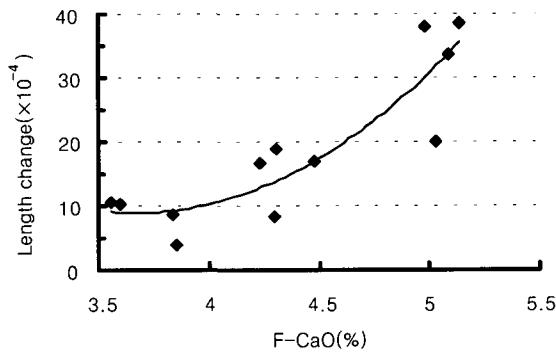


Fig. 14 Relation between length change(7d) and F-CaO

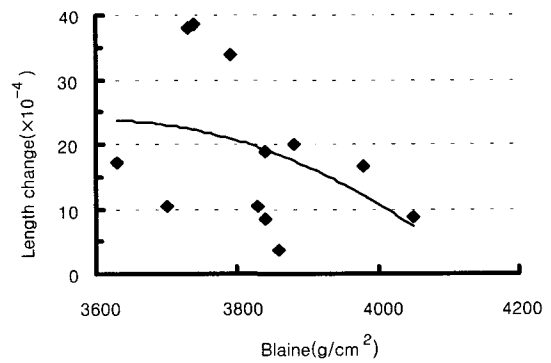


Fig. 17 Relation between length change(7d) and blaine

Table 6 Results of regression analysis between chemical composition and length change

Relation	Regression expression	Coefficient of determination(R ²)	n	Remark
Length change - F-CaO	$y = 12.41x^2 - 91.17x + 176.39$	0.8028	12	
Length change - SO ₃	$y = -7.42x^2 + 80.11x - 193.38$	0.1159	12	
Length change - L.O.T	$y = -724.7x^2 + 3053x - 3194.1$	0.1259	12	
Length change - Blaine	$y = -8 \times 10^{-3}x^2 + 0.598x - 1054.3$	0.1595	12	
Length change - +44 μ mR	$y = -0.5409x^2 + 18.127x - 104.33$	0.2859	12	

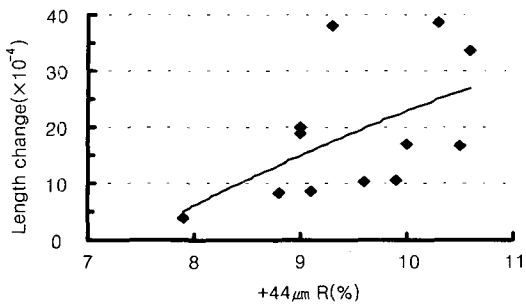


Fig. 18 Relation between length change(7d) and +44µmR(%)

5. 결 론

본 연구에서는 온돌바닥 모르타의 균열저감을 위해 사용되는 석회-석고계 팽창재의 품질특성을 분석하기 위해 팽창재 함량별 배합조건을 선정하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 팽창재 함량별 물리적특성 분석결과 석고함량의 증가에 따라 응결시간이 지연되고, 압축강도는 저하되었으며, 석고를 고정시켰을 때, 석회 함량의 증가는 응결시간이 짧아질 것으로 예상하였으나, 석회와 석고의 교호작용으로 확인되지는 않았다.

2) 팽창재의 함량별 길이변화율 특성 분석결과에 의하면 팽창성능은 석회함량에 의해 지배받으며, 석고는 보조적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

3) 압축강도와 길이변화율과의 회귀분석 결과 어느 정도 신뢰도를 확보하고 있는 것으로 분석되었으며, 특히 재령 7일 길이변화율과 재령 28일 압축강도와의 신뢰도가 가장 높게 것으로 나타났고, 팽창성능이 증가하면 압축강도가 저하되었는데, 이의 관계는 지수함수관계($Y = Ae^{-x}$)를 갖는 것으로 분석되었다.

4) 길이변화율과 화학성분 특성치와의 회귀분석 결과에 의하면, 화학성분치 중에서 F-CaO함량이 팽창성능에 미치는 주요한 인자이고, F-CaO 함량이 증가하면 팽창성능

도 증가하며, 2차 함수관계를 갖는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 건설교통부 국책과제인 “공동주택 온돌구조의 바닥 모르타 균열방지 및 내구성 연구”의 일부로 수행되었음을 밝히며, 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- 고성석, 이재룡, “온수온돌 바닥구조체의 마감모르타의 균열방지에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집, 구조계, 제14권 4호, 통권 114호 1998. 4, pp.369~377.
- 김기동, 정성철, 송명신, “공동주택 바닥 모르타의 균열방지를 위한 무수축 혼화재의 개발 및 적용에 관한 실험연구,” 대한건축학회논문집, 제12권 8호, 통권 94호, 1996. 8, pp.231~241.
- 정성철, 김기동, 신동우, “액상 균열방지제에 의한 공동주택 바닥 모르타의 균열저감에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집, 구조계 제15권 1호, 1999. 1. pp.109~118.
- 이종열, 이용중, 채재홍, 박경상, 김기수, “균열저감형 바닥마감 전용 모르타의 건조수축 특성연구,” 한국콘크리트학회, 1999년도 봄 학술발표회 논문집, 제11권 1호, pp.175~180.
- Aitcin, P. C., Neville, A. M. and Acker, P., “In-tegrated View of Shrinkage Deformation,” *ACI, Concrete International*, Sept. 1997, pp.35~41.
- 山崎之典, 上赤日出人, 小林三郎, 廣瀬哲, “膨脹セメントの水和および膨脹機構,” *セメント・コンクリート*, No. 404, Oct. 1980, pp.26~31.
- 山崎之典, “膨脹性混和材を用いたコンクリートの膨脹機構,” *セメント・コンクリート*, No. 352, Jun. 1976, pp. 10~18.
- Polivka, M., “Factors Influencing Expansion of Expansive Cement Concretes,” *ACI SP 38-11*, 1972, pp.239~250.

요 약

본 연구에서는 온돌바닥 모르타에서 쉽게 발생하는 균열을 저감시키기 위해 사용되는 팽창재 중에서 석회-석고계 팽창재의 품질 특성에 대한 연구결과이다. 본 연구는 팽창재 함량별 배합조건을 설정하여, 석회-석고계의 팽창원리를 실험적으로 검증하여 보았고, 배합조건에 따른 팽창성능을 길이변화율 실험결과로부터 분석하였다. 실험결과 팽창성능을 증가시키면 압축강도는 지수함수적($Y = Ae^{-x}$)으로 감소함을 확인하였다. 또한 팽창시멘트 제조시 품질관리의 일환으로 실시하는 화학성분치와 팽창성능과의 회귀 분석 결과, 화학성분치(분말도, +44µmR, F-CaO, SO₃, L.O.I) 중에서 F-CaO 함량이 팽창성능에 영향을 미치는 주요인자인 것으로 분석되었고, F-CaO 함량이 증가하면 팽창성능도 증가하며 2차 함수 관계를 갖는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 온돌바닥 모르타, 균열, 건조수축, 팽창재(CaO-CaSO₄)