

# 高強度 Self-Leveling材의 최적 결합재비

## The Optimum Binder Ratio for High-Strength Self-Leveling Material

김진만\*

Kim, Jin-Man

### Abstract

Self-leveling material(SLM) is one of the floor finishing materials which make flat surface like as water level by itself in a short time. So it is possible to increase construction speed and enhance economical efficiency. In this study, author intended to develop SLM for the industrial warehouse and factory loading heavy weight machinery and vehicles. The demanded properties for this type of SLM are above 200mm of flow value and above 300kgf/cm<sup>2</sup> of 28-days compressive strength. To possess demanded strength and fluidity, SLM have to be composed of many types of binders and chemical additives. So it is difficult to decide suitable mixing proportion of composition materials.

In this study, author investigated the weight percentage effect of main composition materials for high-strength self-leveling material, by experimental design such as tables of orthogonal arrays and simplex design, and by statistical analysis such as analysis of variance and analysis of response surface. Variables of experiments were ordinary portland cement(OPC), alumina cement(AC), anhydrous gypsum(AG), lime stone(LS) and sand, and properties of tests were fluidity of fresh state and strength of hardened state.

Results of this study are showed that suitable mix proportions of binders for the high strength self-leveling materials are two groups. One is 78~85.5% OPC, 7.5~9.5% AC, 9~12.5% AG and the other is 72.5~78% OPC, 9~12.5% AC, 13~15% AG.

키 워 드 : SL재, 실험계획법, 결합재, 배합비, 플로우, 압축강도, 통계적 분석

key words : Self-leveling materials, Experimental design, Binder, Mixing proportion, Flow, Compressive strength, Statistical analysis

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경

최근 건설시공 분야에서는 소비자 욕구의 향상과 고도의 기능인력의 부족에 의해 공업화 생산, 건식화 및 기계화 시공의 필요성이 급속히 진행되고 있다. 이러한 시공의 변화는 부분적으로 재료 개발에서 나타나고 있다.

건축공사에 있어 전통적으로 시공된 시멘트계 재료를 이용한 습식 바닥 마감 공법은 시공시 인력의 수요가 많고 경화 시까지의 소요시간이 길며, 또한 시공관리가 약간만 부실하여도 최종 품질의 변화가 크게 발생하는 공정이다. 건식공법은 이러한 문제점을 개선한 것이지만 바닥의 수평 정밀도의 확보가 미흡할 뿐만 아니라 중량물의 적재에 부적합한 문제점이 있다.

수평정밀도를 확보하기 위하여 사용되는 바닥재로는 자기수평재(SL재)가 있다. SL재는 결합재, 모래, 기능성첨가제를 적절히 배합하여 비빔수와 함께 비벼 슬러리 상으로 만든 것으로 유동성이 뛰어나 자연적으로 평탄·평활한 수평면을 얻을 수 있도록 한 새로운 습식형 바닥 마감재이다.

SL재는 바탕면의 개선뿐만 아니라 기계화 시공이 가능하여 기존 공법에 투입되는 인력의 1/2~1/3 정도만으로 타설이

가능할 뿐만 아니라 속경성에 의해 공기 단축도 가능하다.

SL재는 혼합되는 결합재 및 기능성 첨가제의 종류가 매우 다양하며, 적게는 7가지, 많으면 14가지 이상의 혼합물이 필요하다. 따라서, 이들 재료들이 SL재의 유동성 및 공학적 특성에 미치는 영향에 대하여 분석하기는 매우 어렵고, 적절한 배합비를 찾는 것 또한 많은 시행착오를 필요로 한다.

한편 현재 유통되고 있는 SL재는 보통강도 범위의 것이기 때문에 고강도가 요구되는 산업용 바닥이나 공장등에는 부적합하다. 이를 해결하기 위한 방안으로는 고강도의 모르터로 시공한 후 박막 SL재를 사용하여 표면을 코팅하는 것을 고려할 수 있으나, 이 경우 2회 타설하여야 하는 문제점이 있어 SL재가 갖는 본래의 장점이 손상될 수 있다. 그러므로 이러한 경우에는 고강도의 특성을 가지는 SL재의 사용이 요구된다.

### 1.2 연구목적

본 연구에서는 고강도 SL재를 개발하기 위한 실험적 연구의 일환으로 SL재를 구성하는 주재료인 결합재와 모래 등이 SL재의 유동성 및 강도 특성에 미치는 영향에 관하여 실험계획법에 따라 실험하고, 그 결과를 통계적으로 분석하여 고강도 SL재의 제조에 적합한 각 구성재료의 적정 배합비 범위를 제안하기 위한 것이다.

\* 정회원, 공주대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

이 연구는 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

과제번호 : 98-2-14-01-01-2

## 2. 연구계획 및 방법

### 2.1 연구계획

본 연구는 그림 1과 같이 주요 구성재료의 배합비 결정을 위한 실험을 행하고 그 결과를 후속실험에 반영하여 주결합재의 적정 배합비를 결정하고 이에 대한 확인실험을 통하여 적정 배합비를 확정하는 프로세스를 채용하였다.

주요 구성재료의 배합비 결정을 위한 실험은 모래와 결합재의 비(Sand/Binder), 알루미늄 시멘트와 보통 포틀랜드 시멘트의 비(AC/OPC), 무수석고와 알루미늄 시멘트의 비(AG/AC) 및 석회석 미분말(LS)의 대체율(%)을 결정하기 위한 것으로, 2수준계의 직교배열표(Tables of orthogonal arrays)에 따라 실험하고 그 결과를 분산분석하여 각 배합비를 결정하였다.

결합재의 배합비 결정을 위한 실험은 보통 포틀랜드 시멘트(OPC), 알루미늄 시멘트(AC), 무수석고(AG)의 조합비율을 결정하기 위한 것으로 심플렉스법(Simplex design)에 따라 실험을 계획하고 그 결과를 반응표면분석(Analysis of response surface)하여 결합재의 적정 배합비 영역을 결정하였다.

배합비 확인 실험에서는 선행 실험결과 결정된 결합재의 적정 배합비 영역에 대한 경계치를 대상으로 8개의 실험조건을 선정하여 검토하였다.

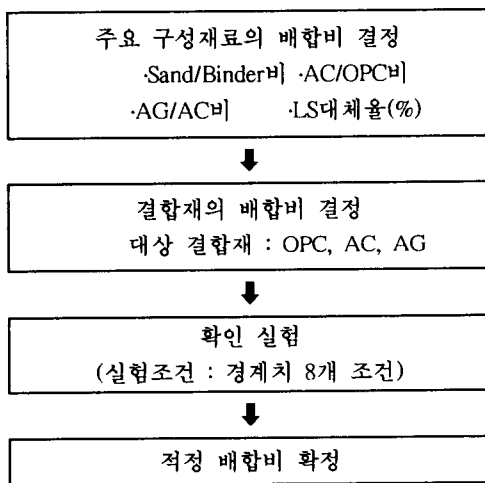


그림 1. 연구 Process

### 2.2 사용재료 및 실험방법

본 실험에서 사용된 보통포틀랜드 시멘트(OPC), 알루미늄 시멘트(AC), 무수석고(AG), 모래(S), 석회석 미분말(LS) 및 기능성 첨가제인 유동화제, 분말수지, 증점제, 소포제의 물리적 특성은 표1과 같다.

SL재의 실험방법은 JASS 15 M-103에 준하여 실시하였고, Flow 시험은  $\phi 50 \times 51$  mm PVC관을 사용하여 측정하였으며, 측정시간은 직후, 15분, 30분으로 하였다.

SL재의 강도시험용 공시체는 JIS R 5201의 규정에 준하여

40×40×160mm의 몰드를 사용하여 제작한 후, 섭씨 20±2℃의 공기중에서 소정의 재령까지 기건양생을 실시하여 재령 3일, 7일, 28일에 압축강도 및 휨강도를 측정하였다.

표 1. 사용재료

종 류		물리적 특성
결합재 (Binder)	보통포틀랜드 시멘트(OPC)	비중 : 3.15, 분말도 : 3,260cm <sup>2</sup> /g
	알루미나 시멘트(AC)	비중 2.99, 분말도 : 3,850cm <sup>2</sup> /g
	무수석고(AG)	비중 2.95, 분말도 : 3,100cm <sup>2</sup> /g
필러 (Filler)	석회석 미분말(LS)	비중 2.98, 분말도 : 3,000cm <sup>2</sup> /g
골재	규사(Sand)	최대입경:0.6mm, 비중:2.65
고유동화제(SP)		멜라민계, 분말형
분말수지		비닐아세테이트 폴리머계
증점제		HEC계
소포제		실리콘계

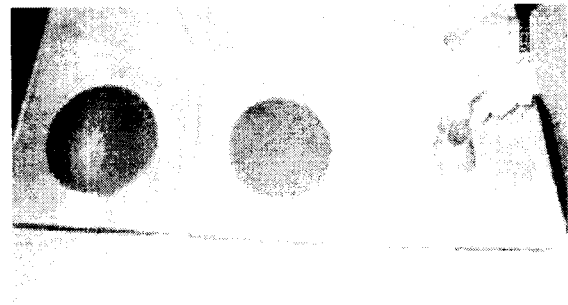


사진 1. SL재의 플로우 시험

## 3. 주요 구성재료의 배합비율 결정을 위한 실험

### 3.1 실험계획

본 실험은 직교배열표(Tables of orthogonal arrays)에 의해 계획하고 실험결과를 분산분석(Analysis of variances)에 의한 F검정으로 해석하였다.

일반적으로 고려하여야 할 인자가 너무 많은 경우 2인자간에 교호작용 및 고차의 교호작용에 관한 정보를 희생하여 실험횟수를 적게 할 수 있도록 만들어 놓은 표가 직교배열표이다. 직교배열표를 사용한 실험방법은 국내에서도 제조업체의 공장 실험실을 통하여 급속히 보급되고 있으며, 그 장점으로 실험 데이터로부터 요인 변동의 계산이 용이하고 따라서 분산분석표의 작성이 수월하다는 점과 실험의 크기를 확대시키지 않고도 실험에 많은 인자를 고려할 수 있어 실험의 실시가 용이하다는 점이다. 그러므로 SL재와 같이 고려할 인자가 많은 경우에 적합한 실험계획법이라고 할 수 있다.

직교배열표에는 2, 3, 4, 5수준계 및 혼합수준계가 있으나

본 연구에서는 2수준계를 채용하였다. 2수준계의 직교배열표는 일반적으로

$$L_{2^m}(2^{2^m-1}) \text{ (1)}$$

로 나타낸다. 여기서 m은 2 이상의 정수(Integer)이고, 2m은 실험의 크기이며, 2는 2수준계를 나타내는 숫자이고, 2m-1은 열의 수를 나타낸다.

2수준의 실험에서는 각 요인의 자유도는 1이고, 직교배열표에서 각 열의 자유도도 1이다. 따라서 모든 교호작용이 무시되고 오차를 구하지 않아도 되는 경우에는 열의 수에 해당하는 인자를 배치할 수 있다. 즉, m이 2인 L4(23)형에서는 3인자, m이 3인 L8(27)형에서는 7인자, m이 4인 L16(215)형에서는 15인자까지 배치가 가능하다.

본 연구에서는 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 실험인자가 Sand/Binder비, AC/OPC비, AC/AG비 및 필러(Filler)인 LS의 대체율로 4개이고 실험인자별 수준은 2이다. 이러한 경우 일원배치법을 사용하게 되면, 24회(16회)의 실험을 하여야 하지만, 본 연구와 같이 직교배열표를 사용하게 되면, 표 3에서와 같이 8회의 시험으로도 통계적 분석을 통하여 각 인자의 유의성을 검증할 수 있다. 본 실험에서 사용한 직교배열표는 L8(27)형이다.

표 2. 실험인자 및 수준

인 자		수 준		측정항목
		0	1	
A	Sand/Binder	1.00	1.25	·플로우 ·압축강도 ·취함강도
B	AC/OPC	0.10	0.15	
C	AG/AC	1.00	1.50	
D	LS (%)	10	15	

### 3.2 실험조건 및 배합

실험조건 선정은 표 3에서 알 수 있는 바와 같이 교호작용이 없는 것으로 고려하여 실험인자 A, B, C, D를 열번호 1, 2, 4, 6번에 순차적으로 할당하고, 3, 5, 7열은 오차항(e)으로 고려하였다. 또한 각 실험조건별 배합은 표 4와 같다.

표 3. L8(2<sup>7</sup>)형 직교배열표와 선정된 실험조건

No.	열번호							실험조건
	1	2	3	4	5	6	7	
1	0	0	0	0	0	0	0	A0B0C0D0
2	0	0	0	1	1	1	1	A0B0C1D1
3	0	1	1	0	0	1	1	A0B1C0D1
4	0	1	1	1	1	0	0	A0B1C1D0
5	1	0	1	0	1	0	1	A1B0C0D0
6	1	0	1	1	0	1	0	A1B0C1D1
7	1	1	0	0	1	1	0	A1B1C0D1
8	1	1	0	1	0	0	1	A1B1C1D0
기본 표시	a	b	a b	c	a c	b c	a b c	
배치	A	B	e C	C	e D	D	e	

주) 실험인자 A, B, C, D에 대응되는 열번호는 실험에 채용한 것을 의미하고, e에 대응되는 열번호는 실험에서 배제하고 오차항으로 고려하였음을 의미함.

### 3.3 실험결과의 고찰

#### 1) 실험결과의 분석

실험결과는 각 측정치를 대상으로 분산분석한 후, 그 결과를 F점정에 의해 유의수준을 검토하여 각 인자의 영향을 알아보았다.

분산분석은 특성치의 산포를 제곱합(sum of squares)으로 나타내고, 이 제곱합을 실험과 관련된 요인마다의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인이 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다.

예를 들어 어떤 요인 A에 의하여 제품의 성능이 변화한다고 하면, 제품의 성능은 특성치가 된다. 그러면 제품의 특성치의 산포를 나타내는 제곱합(Total sum of squares)은 요인 A에 의해 일어나는 제곱합(SA)과 오차라는 요인의 제곱합(SE)으로 분해할 수 있다.

이 제곱합들과 관련된 자유도를 각각 φA, φE로 나타내면, 요인 A의 분산(VA)은 SA/φA가 되고, 오차의 분산(VE)은 SE/φE가 된다.

표 4. 실험조건 및 배합비

No.	실험조건				배 합 비					배 합 비 율 (%)						총계	
	A	B	C	D	결 합 재				Sand	결 합 재				Sand	결합재 +Sand		LS
					OPC	AC	AG	소계		OPC	AC	AG	소계				
1	A0	B0	C0	D0	1	0.10	0.10	1.200	1.200	37.50	3.75	3.75	45.00	45.00	90	10	100
2	A0	B0	C1	D1	1	0.10	0.15	1.250	1.250	34.00	3.40	5.10	42.50	42.50	85	15	100
3	A0	B1	C0	D1	1	0.15	0.15	1.300	1.300	32.69	4.90	4.90	42.50	42.50	85	15	100
4	A0	B1	C1	D0	1	0.15	0.225	1.375	1.375	32.73	4.91	7.36	45.00	45.00	90	10	100
5	A1	B0	C0	D0	1	0.10	0.10	1.200	1.375	33.33	3.33	3.33	40.00	50.00	90	10	100
6	A1	B0	C1	D1	1	0.10	0.15	1.250	1.500	30.22	3.02	4.53	37.78	47.22	85	15	100
7	A1	B1	C0	D1	1	0.15	0.15	1.300	1.563	29.06	4.36	4.36	37.78	47.22	85	15	100
8	A1	B1	C1	D0	1	0.15	0.225	1.375	1.625	29.09	4.36	6.55	40.00	50.00	90	10	100

※ 배합조건 : 1) 물비 : 22%, 2) 고유동화제 : 0.5%, 3) 중점제 : 0.1%, 4) 소포제 : 0.2%, 5) 분말수지 : 1%

요인 A와 오차요인은 각각 정규분포하고 상호 독립적이므로 VA/VE는 F분포하게 되므로, F분포에 따라 확률론적 유의성을 검증할 수 있게 된다.  $F_0=VA/VE$ 라고 할 때  $F_0$ 의 값이 크면 요인 A가 오차요인에 비해 통계적으로 유의한 영향을 준다고 할 수 있으며, 그 유의 수준은 일반적으로 99%, 97.5%, 95% 및 90%의 확률로 검토된다.

2) 유동성에 미치는 영향 검토

표 5에 시험조건에 따른 SL재의 플로우의 시험결과를 나타내었다. 플로우치는 실측정치와 함께 경시 15분 및 30분 측정치를 직후치에 대한 백분율로 나타내었다.

표 5. 실험결과

No.	플로우					
	실측정치(mm)			직후값에 대한비율(%)		
	직후	15분	30분	직후	15분	30분
1	210	160	153	100	76	73
2	207	181	147	100	88	71
3	199	155	103	100	78	52
4	205	178	144	100	86	70
5	210	183	184	100	87	87
6	209	188	175	100	90	84
7	215	211	201	100	97	93
8	205	210	187	100	102	91

각 실험인자(A, B, C, D)가 특성치인 플로우치에 미치는 영향을 검토하기 위하여 분산분석을 통하여 F 검정 한 결과를 표 6에 나타내었다. F 검정 결과 직후 플로우의 경우에는 실험인자의 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 경시 측정치의 경우에는 A인자(Sand/Binder)가 95% 이상 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났으나, B, C, D 인자의 경우에는 유의한 영향이 없는 것으로 나타나고 있다.

표 6. 플로우치의 F 검정 결과

특성치	F0				F(0.05)	F(0.10)	F검정 결과				
	A	B	C	D			A	B	C	D	
플로우	직후	1.36	0.60	0.27	0	7.71	4.54	-	-	-	-
	15분	13.80	2.89	4.69	0.02	7.71	4.54	*	-	○	-
	30분	11.71	0.34	1.87	0.45	7.71	4.54	*	-	-	-

주1) \*는 95%이상 유의함, ○는 90%이상 유의함,  
-는 90% 이상 유의하지 않음.  
주2) A, B, C, D는 실험인자를 나타냄.

그림 2는 플로우치의 실험 수준별 모평균치의 변화를 직후 및 경시에 따라 나타낸 것이다. 직후 측정치를 살펴보면 직후 플로우치의 모평균치는 모두 205mm 이상을 보이고 있어 JASS 15 M-103 SL재의 품질기준(플로우 190mm이상)을 만족하고 있으나, 경시에 따른 플로우의 유지율에서는 A인자 0수준의 경우 경시 30분에 플로우 유지율이 70% 이하를 보이고 있다.

실험 수준별로 고찰하여 보면 A인자의 경우 직후 및 경시 측정치 모두 0수준(Sand/Binder=1:1) 보다 1수준(Sand/Binder=1:1.25)에서 높은 플로우치를 보이고 있으나 B, C, D 인자의 경우에는 실험 수준에 따른 차이가 명확히 나타나지 않고 있다.

이상의 고찰을 종합하면, 4가지 요인 중 A인자만이 SL재의 유동성에 영향을 크게 미치고 있으나, 기타 인자는 영향이 뚜렷하지 않으며, A인자의 경우 수준 1이 수준 0보다 유동성에 유리한 영향을 주는 것으로 나타났다.

3) 강도에 미치는 영향 검토

SL재의 경화상태의 측정항목인 압축강도 및 휨강도의 시험결과를 표7에 나타내었다. 재령 3일의 8번 실험조건만을 제외하고 모두 200kgf/cm<sup>2</sup> 이상, 재령 28일에는 300kgf/cm<sup>2</sup> 이상의 높은 압축강도를 보이고 있으며, 휨강도에 있어서도 재령 3일에 30kgf/cm<sup>2</sup> 이상, 재령 28일에 73kgf/cm<sup>2</sup> 이상을 보이고 있어 고강도 SL재로서의 성능을 보유하고 있는 것으로

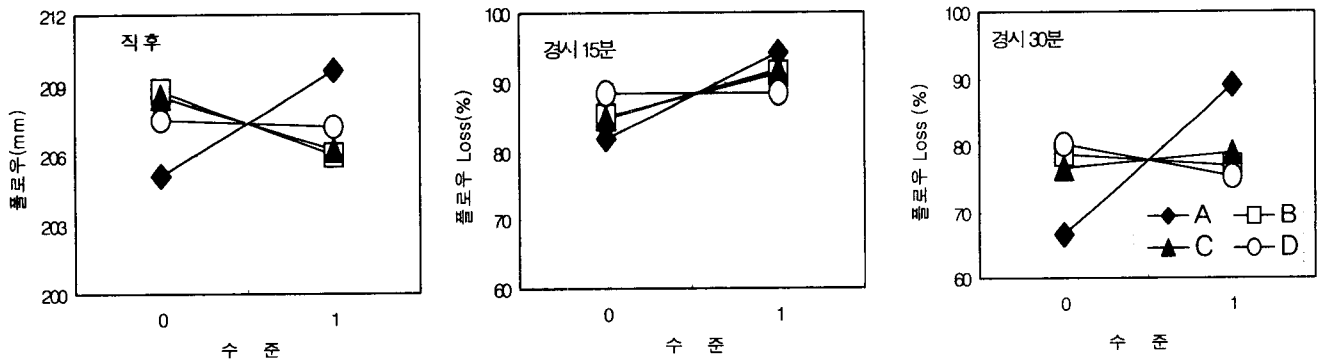


그림 2. 플로우치의 실험 수준별 모평균치의 변화(A, B, C, D는 실험인자) 나타나고 있다.

표 7. 강도 실험결과

No.	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )			휨 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	3일	7일	28일	3일	7일	28일
1	285	328	590	60	66	84.0
2	313	390	468	44	77	91.3
3	208	295	438	45	58	66.5
4	320	353	403	50	71	81.6
5	295	343	370	69	75	95.4
6	283	285	505	42	55	73.2
7	200	258	383	50	56	62.8
8	183	260	375	60	39	87.1

각 실험인자의 영향을 알아보기 위한 F 검정의 결과를 살펴보면, 표 8에서 알 수 있는 바와 같이 C 및 D 인자는 전혀 유의한 영향이 없는 것으로 나타났고, A 및 B인자에서는 압축강도 및 휨강도 각각 1곳에서 90% 이상 유의한 영향을 주는 것으로 나타나고 있으나, 전반적으로는 영향을 크지 않음을 알 수 있다.

표 8. 강도측정치의 F 검정 결과

특성치	F0				F(0.05)	F(0.10)	F검정 결과				
	A	B	C	D			A	B	C	D	
압축강도	3일	2.20	4.18	0.002	0.01	7.71	4.54	-	○	-	-
	7일	5.51	3.68	0.34	0.26	7.71	4.54	○	-	-	-
	28일	2.40	3.78	0.02	0.07	7.71	4.54	-	-	-	-
휨강도	3일	0.37	2.33	4.07	0.01	7.71	4.54	-	-	-	-
	7일	5.01	5.27	0.15	0.82	7.71	4.54	○	○	-	-
	28일	0.52	0.87	0.82	1.49	7.71	4.54	-	-	-	-

주1) ○는 90%이상 유의함, -는 90% 이상 유의하지 않음.  
주2) A, B, C, D는 실험인자를 나타냄.

그림 3은 압축강도 실험 수준별 모평균치의 변화를 나타낸 것이다. C 인자와 D 인자의 경우에는 실험 수준에 따른 강도 차이가 거의 발생하지 않고 있으나 A 인자 및 B 인자의 경우에는 실험수준 0이 1에 비하여 약 50kgf/cm<sup>2</sup> 이상 높은 압축강도를 발현하고 있고, 이 경향은 B인자의 경우가 보다 현저하다.

그림 4는 휨강도의 실험 수준별 모평균치의 변화를 나타낸 것으로, 재령 3일 C 인자와 재령 7일의 C 및 D인자가 실험

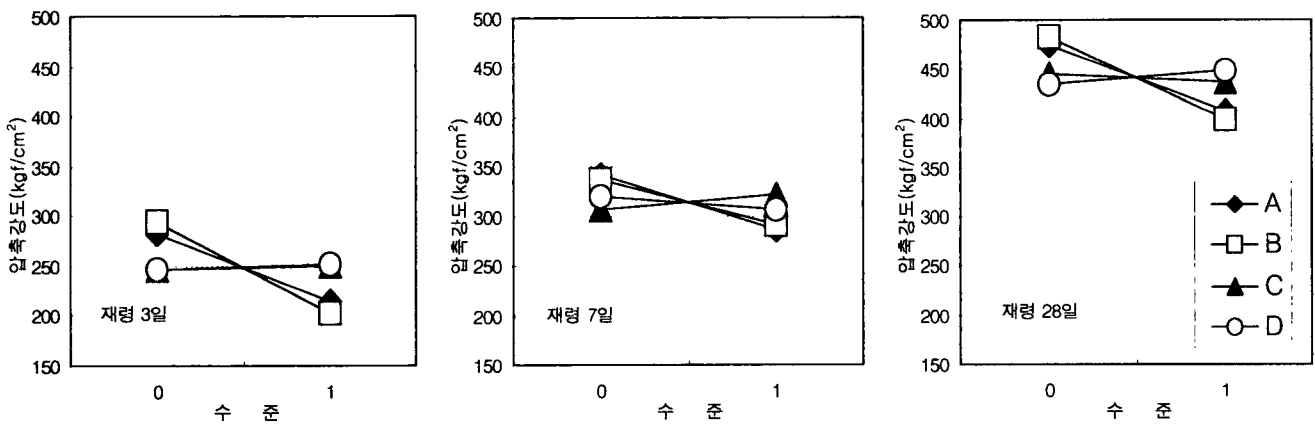


그림 3. 압축강도의 실험 수준별 모평균치의 변화(A, B, C, D는 실험인자)

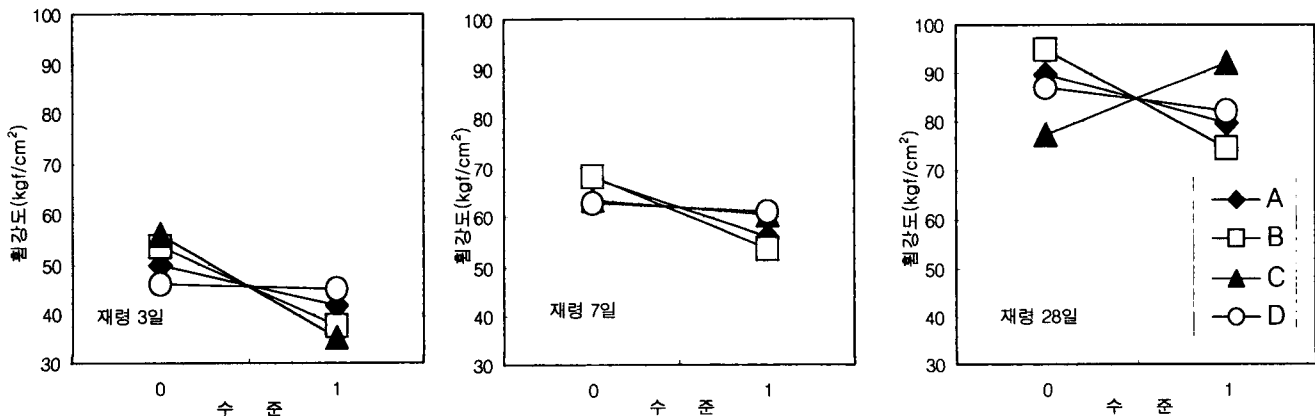


그림 4. 휨강도의 실험 수준별 모평균치의 변화(A, B, C, D는 실험인자)

수준에 따른 차이가 보이지 않고, 재령 28일의 C 인자가 실험 수준 1에서 0보다 높은 강도를 발현하고 있는 것을 제외하면, 대부분의 실험 조건에서 실험 수준 0이 1보다 높은 휨 강도를 보이는 것으로 나타났다.

이와 같이 강도 시험결과에서는 전반적으로 A 및 B 인자의 경우 실험수준 0에서 우수한 결과를 보이고 있고 C 인자의 경우는 불규칙적이며, D 인자의 경우에는 실험수준에 관계없이 거의 동등한 강도값을 보이고 있다.

강도 시험결과와 유동성 시험결과를 종합하면, 실험수준에 따라 B, C, D 인자는 명확한 영향이 나타나지 않고 있다. 이러한 결과는 이들 인자가 SL재의 물성을 좌우하는 주요 인자가 아니라는 점을 의미하는 것이다.

한편 A 인자의 경우 유동성에서는 수준 1이 우수하지만 강도에서는 수준 0이 우수한 결과를 보이는 등 유동성 시험결과와 강도 시험결과가 명확히 상반된 결과를 보이고 있어 결론을 도출하기 어렵지만, 강도 측정치의 경우에는 모두 요구되는 강도 수준을 크게 상회하고 있으므로 경제성을 고려하여 수준 1, 즉 Sand/Binder비 1 : 1.25를 이후 실험에 반영하였다.

#### 4. SL재 결합재의 적정 배합비

##### 결정을 위한 실험

##### 4.1 실험계획

본 실험은 결합재의 배합비율이 고강도 SL재의 유동성 및 강도특성에 미치는 영향을 분석하여 결합재량을 최적화하기 위한 것이다. 실험결과를 반응표면분석(Response surface analysis)하기 위하여 심플렉스법(Simplex design)에 의하여 실험 조건을 배열하였다.

반응표면분석은 여러 개의 설명변수  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ 가 복합적인 작용을 함으로써 어떤 반응변수  $\eta$ 에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계학적인 분석방법을 말한다. 여기서 설명변수는 반응에 영향을 주는 독립변수 또는 인자를 말하고 반응변수는 설명변수의 영향을 받아서 어떤 반응을 나타내는 종속변수를 말한다.

예를 들어 어떤 제품의 성능이 온도와 시간에 따라 변화한다고 하면, 온도( $\xi_1$ )와 시간( $\xi_2$ )는 설명변수이고, 성능( $\eta$ )은 반응변수가 된다.  $\xi_1$ 와  $\xi_2$ 의 변화에 따라  $\eta$ 가 어떤 반응표면(Response surface)을 그림 5와 같이 갖게 되며, 이 반응 표면을 통계적 모형으로 만들어  $\eta$ 와  $\xi_1, \xi_2$ 간의 방정식으로 표현하여 주고자 하는 것이 반응표면분석에서 다루는 방법이다.

본 실험에서는 설명변수를 OPC, AC, AG의 중량백분율로 하고 반응변수를 플로우, 압축강도, 휨강도로 하였다. 실험인자 및 수준은 표 9와 같이 실험인자를 OPC, AC, AG로 하고, 각각의 제한영역(관심영역 또는 수준)을 결합재에 대한 중량비로 OPC는 70~90%, AC는 5~25%, AG는 5~25%로 선정한 후, 실험인자의 제한영역을 그림 6과 같이 심플렉스법에 따라 격자형으로 배열하여 경계치 6점 등 10점을 선정하여 실험을 실시한 후 SL재 결합재의 적정 배합비를 찾고자 하였다.

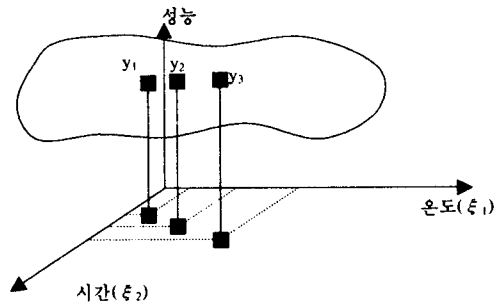


그림 5. 반응표면 분석의 개념도

Binder와 Sand비는 앞의 실험결과를 토대로 유동성 측면에 중점을 두어 1 : 1.25로 하고, 필러인 석회석(LS)의 사용량은 경제성을 고려하여 전재료의 15%로 하여 표 10과 같이 각 조건별 배합비를 결정하였다.

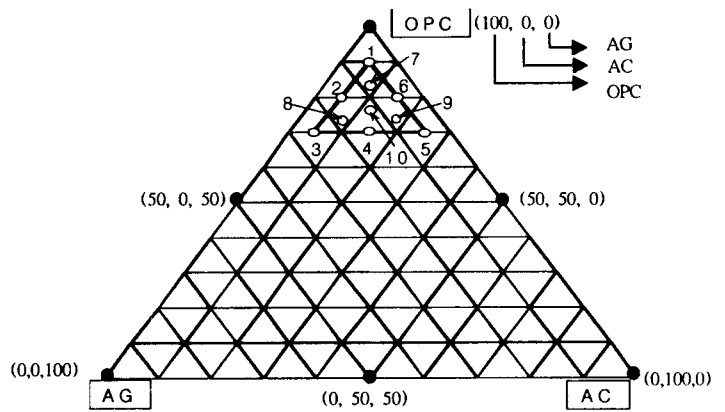


그림 6. 관심영역에서의 심플렉스 격자형 배열

또한 본실험에서 목표로 하고 있는 고강도 SL재의 성능 목표치는 표 11과 같다.

표 9. 실험요인 및 수준

실험요인	수준(제한영역)	측정항목
OPC	70 ~ 90 %	· 플로우 · 압축강도 · 휨강도
AC	5 ~ 25 %	
AG	5 ~ 25 %	

표 10. 실험조건 및 배합비

No.	실험조건			배합비 (%)				Sand	Filler (LS)	총계
	OPC	AC	AG	결합재						
				OPC	AC	AG	소계			
1	90	5	5	34.0	1.9	1.9	37.8	47.2	15	100
2	80	5	15	30.2	1.9	5.7	37.8	47.2	15	100
3	70	5	25	26.4	1.9	9.5	37.8	47.2	15	100
4	70	15	15	26.4	5.7	5.7	37.8	47.2	15	100
5	70	25	5	26.4	9.5	1.9	37.8	47.2	15	100
6	80	15	5	30.2	5.7	1.9	37.8	47.2	15	100
7	83.3	8.3	8.3	31.5	3.1	3.1	37.8	47.2	15	100
8	73.3	8.3	18.3	27.7	3.1	6.9	37.8	47.2	15	100
9	73.3	18.3	8.3	27.7	6.9	3.1	37.8	47.2	15	100
10	76.7	11.7	11.7	29.0	4.4	4.4	37.8	47.2	15	100

\* 배합조건

- 1) 물비 : 22%, 2) 고유동화제 : 0.5%, 3) 증점제 : 0.1%, 4) 소포제 : 0.2%, 5) 분말수지 : 1%

표 11. SL재의 성능 목표치

항 목		목 표 값
Flow	직후	205cm 이상
	15분	90% 이상
	30분	85% 이상
압축강도	3일	200 kgf/cm2 이상
	7일	250 kgf/cm2 이상
	28일	300 kgf/cm2 이상
휨강도	3일	30 kgf/cm2 이상
	7일	40 kgf/cm2 이상
	28일	73 kgf/cm2 이상

4.2 실험결과와 고찰

실험결과를 나타낸 표 12에서 알 수 있는 바와 같이 플로우치는 직후의 경우 목표치를 만족하지 않는 실험조건은 2개에 불과하지만 경시 30분에는 8개에 달하고 있다. 압축강도의 경우에는 재령 초기에는 성능 목표치에 도달하지 않은 비율이 높지만 재령 28일에는 2개만을 제외하고 모두 목표치를 만족하고 있다. 휨강도의 경우에는 모든 재령에서 성능 목표치에 도달한 비율이 다른 반응변수에 비하여 높게 나타나고 있다.

플로우치의 반응표면 분석결과를 나타낸 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 AC의 사용 비율이 낮아지고, AG의 사용 비율이 높아질수록 높은 플로우치를 보이고 있고 이러한 경향은 측정시간에 무관하게 거의 동일하게 나타나고 있다. 이것은 AC가 AG에 비하여 상대적으로 반응 속도가 빨라 수분을 빨리 소비하게 되므로 나타난 현상으로 사료된다. OPC의 양은 플로우에 미치는 영향이 상대적으로 낮게 나타나고 있다.

그림 8은 압축강도의 반응표면 분석 결과를 나타낸 것이다. 압축강도의 경우에는 재령의 증가에 따라 최고 강도 발현 조건이 AG의 양이 감소하고 AC의 양이 증가하는 방향으로 이동하고 있는데 이는 AC의 반응이 AG보다 뛰어나기 때문으로 사료된다. 휨강도의 경우에는 그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 압축강도에서 나타난 경향이 더욱 더 뚜렷하게 나타나고 있다. 또한 OPC의 경우에는 플로우치에서와 동일하게 강도치에서도 그 영향이 다른 설명변수에 비하여 상대적으로 낮게 나타나고 있다.

그림 7, 8, 9에 나타난 반응표면분석의 결과를 바탕으로 본 실험의 성능목표치를 만족하는 영역을 표 13에 각 항목별로 나타낸 후 모든 목표값을 만족하는 영역을 도출하고 이를 그림 10에 나타내었다.

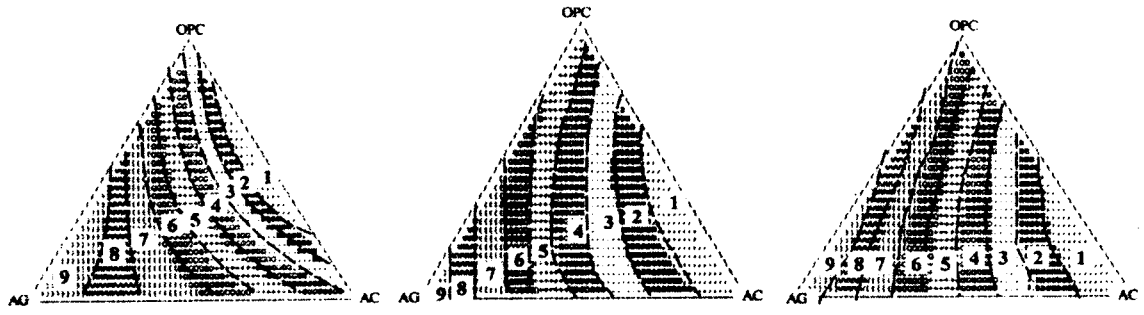
이를 정리하면 본 실험결과 모든 성능 목표치를 만족하는 고강도 SL재의 결합재의 배합비는 결합재 전체에 대한 중량비로 OPC 78~85.5%, AC 7.5~9.5%, AG 9~12.5%인 A영역과 OPC 72.5~78.5%, AC 9~12.5%, AG는 13~15%인 B영역으로 나타났다.

표 12. 실험결과

No.	Flow 경시변화						압축강도 (kg/cm2)			휨강도 (kg/cm2)		
	실측정치 (mm)			직후값에 대한비율(%)								
	직 후	15 분	30 분	직 후	15 분	30 분	3 일	7 일	28 일	3 일	7 일	28 일
1	206	182	168	100	88	82	205	295	415	35	40	75
2	210	188	186	100	90	89	179	231	279	37	37	80
3	212	199	190	100	86	72	108	158	236	23	26	70
4	210	189	177	100	90	84	226	263	330	33	40	80
5	210	181	151	100	86	72	157	235	313	33	47	84
6	204	176	156	100	86	76	206	250	315	37	47	87
7	206	180	164	100	87	80	212	293	320	30	47	61
8	219	200	190	100	91	87	167	233	309	35	47	70
9	199	150	106	100	91	53	207	293	383	42	49	77
10	212	193	171	100	91	81	216	295	389	42	45	80

표 13. SL재의 적정 배합비 산출

항 목		목표값	적정 영역		
			OPC	AC	AG
Flow 경시 변화	직후	205mm 이상	70~90	5~23	7.5~25
	15분	90% 이상	70~90	5~17.5	5~25
	30분	85% 이상	70~90	5~15	5~25
압축 강도	3일	200kgf/cm2 이상	70~90	5~22.5	5~20
	7일	250kgf/cm2 이상	70~90	5~22.5	5~18
	28일	300kgf/cm2 이상	70~90	5~25	5~22.5
휨 강도	3일	30kgf/cm2 이상	70~90	5~25	5~21
	7일	40kgf/cm2 이상	70~90	5~25	5~17.5
	28일	73kgf/cm2 이상	70~90	7.5~25	5~25
모든 목표치를 만족하는 영역		A	78~85.5	7.5~9.5	9~12.5
		B	72.5~78	9~12.5	13~15



최소 (mm)	번호	최대 (mm)	최소 (mm)	번호	최대 (mm)
105	1	118	170	6	183
118	2	131	183	7	196
131	3	144	196	8	209
144	4	157	209	9	222
157	5	170			

직 후

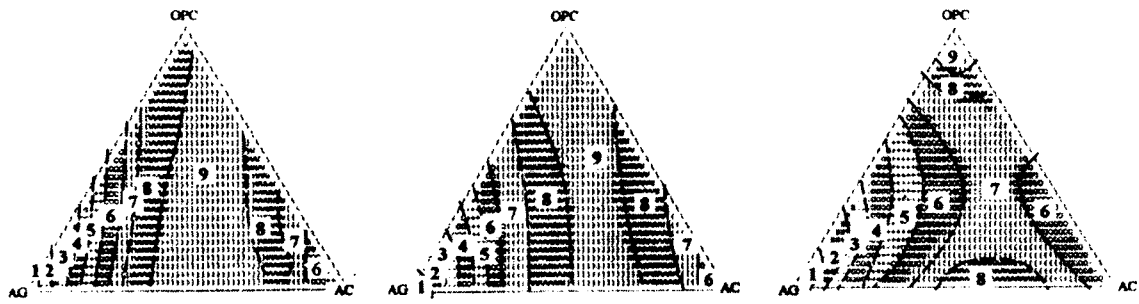
최소 (%)	번호	최대 (%)	최소 (%)	번호	최대 (%)
82.9	1	84.2	89.5	6	90.8
84.2	2	85.5	90.8	7	92.1
85.5	3	86.8	92.1	8	93.4
86.8	4	88.1	93.4	9	94.7
88.1	5	89.5			

15 분

최소 (%)	번호	최대 (%)	최소 (%)	번호	최대 (%)
67.8	1	69.6	80.8	6	83.6
69.6	2	72.4	83.6	7	86.4
72.4	3	75.2	86.4	8	89.2
75.2	4	78.0	89.2	9	91.9
78.0	5	80.8			

30 분

그림 7. 실험요인별 플로우의 반응표면



최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	번호	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	번호	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )
105	1	118	170	6	183
118	2	131	183	7	196
131	3	144	196	8	209
144	4	157	209	9	222
157	5	170			

직 후

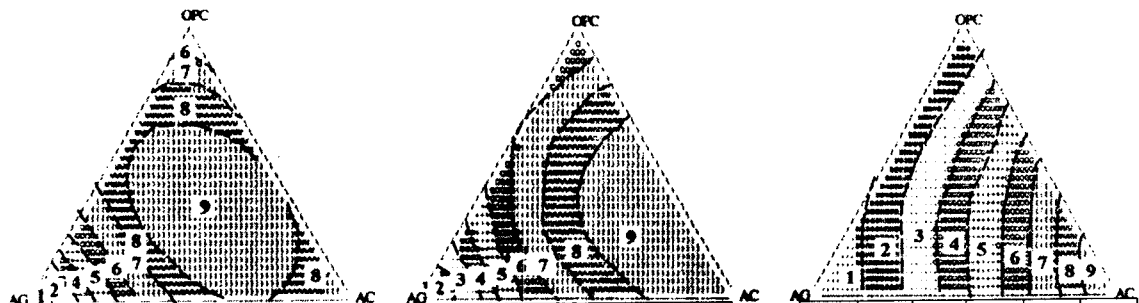
최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	번호	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	번호	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )
152	1	168	231	6	246
168	2	183	246	7	262
183	3	199	262	8	278
199	4	215	278	9	293
215	5	231			

15 분

최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	번호	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	번호	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )
230	1	249	324	6	343
249	2	268	343	7	361
268	3	287	361	8	380
287	4	305	380	9	399
305	5	324			

30 분

그림 8. 실험요인별 압축강도의 반응표면



최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	번호	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	번호	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )
23	1	25	32	6	34
25	2	27	34	7	35
27	3	28	35	8	37
28	4	30	37	9	39
30	5	32			

직 후

최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	번호	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	번호	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )
28	1	30	40	6	42
30	2	32	42	7	44
32	3	35	44	8	47
35	4	37	47	9	49
37	5	40			

15 분

최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	번호	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )	번호	최소 (kgf/c <sup>m<sup>2</sup></sup> )
71	1	73	79	6	80
73	2	74	80	7	82
74	3	75	82	8	83
75	4	77	83	9	85
77	5	79			

30 분

그림 9. 실험요인별 휨강도의 반응표면



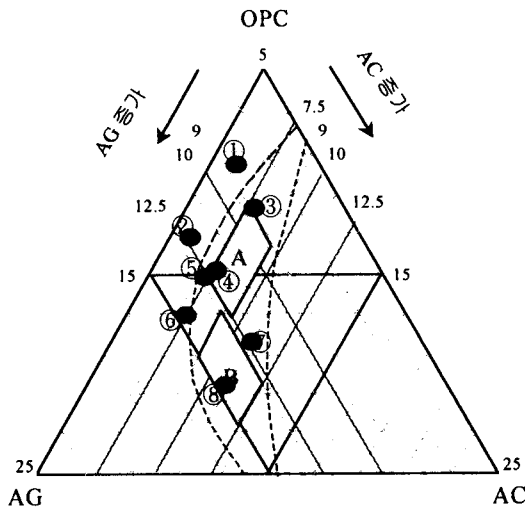


그림 10. SL재 결합재의 적정 배합비 영역

## 5. 결합재 배합비 확인 실험

### 5.1 실험계획

본 실험에서는 표 13 및 그림 10에 나타난 적정 결합재 배합비 영역 내에서 SL재의 성능을 확인하기 위하여 영역 A 및 B의 경계조건에서 그림 10과 같이 ①~⑧의 8개 지점을 선정하여 확인실험을 실시하였다.

확인실험에 사용한 배합표는 표 14와 같고, 측정항목은 플로우, 압축강도, 휨강도로 하였다.

표 14. SL재 적정 배합비의 확인실험을 위한 배합비

No.	실험조건			배합비 (%)					총계	
	OPC	AC	AG	결합재			Sand	Filler (LS)		
				OPC	AC	AG				소계
1	83.5	7.5	9	31.55	2.83	3.40	37.78	47.2	15	100
2	80	7.5	12.5	30.22	2.83	4.72	37.78	47.2	15	100
3	81.5	9.5	9	30.79	3.59	3.40	37.78	47.2	15	100
4	78	9.5	12.5	29.47	3.59	4.72	37.78	47.2	15	100
5	78.5	9	12.5	29.66	3.40	4.72	37.78	47.2	15	100
6	76	9	15	28.71	3.40	5.67	37.78	47.2	15	100
7	75	12.5	12.5	28.34	4.72	4.72	37.78	47.2	15	100
8	72.5	12.5	15	27.39	4.72	5.67	37.78	47.2	15	100

※ 배합조건

- 1) 물비 : 22%, 2) 고유동화제 : 0.5%, 3) 중점제 : 0.1%,
- 4) 소포제 : 0.2%, 5) 분말수지 : 1%

### 5.2 실험결과와 고찰

표 15는 SL재의 적정 배합비 내에서 성능확인 실험결과를 나타낸 것이다. 적정배합비 영역에서 8배합을 선정하여 실험

한 결과 초기 플로우는 표 11에서 설정한 목표치인 205mm 보다 높은 210mm 이상을 보이고 있을 뿐만 아니라 플로우 유지율도 목표치를 만족하는 30분까지 90% 이상 플로우를 유지하는 것으로 나타났다.

압축강도 및 휨강도의 경우도 그림 11 및 12에 나타난 바와 같이 목표 압축강도 300kgf/cm<sup>2</sup>와 목표 휨강도 73kgf/cm<sup>2</sup>보다 더 높은 강도를 보이고 있다.

이상의 확인 실험 결과 SL재의 결합재 적정배합비로 설정한 그림 10의 A 및 B 영역은 바닥용 고강도 SL재의 요구성을 만족하는 영역임을 확인할 수 있었다.

표 15. 실험결과

NO	Flow 경시변화						압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )			휨강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	직후		15분		30분		3일	7일	28일	3일	7일	28일
	mm	%	mm	%	mm	%						
1	213	100	213	100	207	97	203	353	439	56	89	91
2	215	100	212	99	211	98	208	339	531	48	86	93
3	217	100	217	99	210	97	231	356	494	64	79	99
4	217	100	216	100	211	97	256	367	528	57	77	93
5	220	100	218	99	212	97	206	322	439	52	73	85
6	219	100	218	99	217	99	169	325	408	47	66	79
7	218	100	215	99	210	96	192	319	417	54	70	79
8	217	100	211	97	203	93	178	336	422	48	64	85

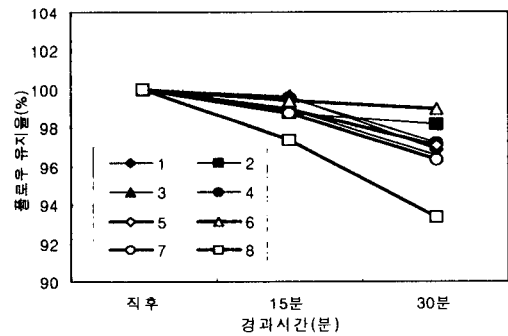


그림 11. 적정 SL재 배합비에서의 플로우 유지율 변화

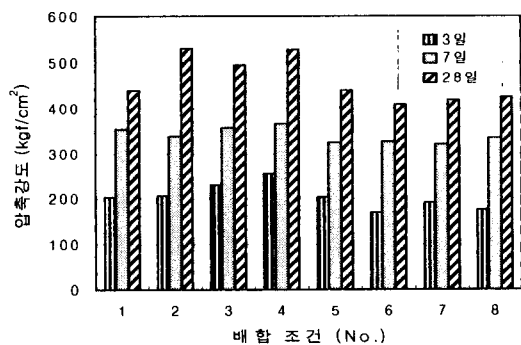


그림 12. 적정 SL재 배합비에서의 압축강도 변화

## 5. 결론

고강도 SL재의 최적 결합재비를 선정하기 위하여 실험계획법에 의해 실험하고, 그 결과를 통계적으로 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Sand/Binder비의 증가는 고강도 SL재의 유동성의 증진에 유리하지만 압축강도에는 불리한 영향을 주는 것으로 나타나 성능 목표치와 경제성을 고려하여 Sand/Binder비를 결정하여야 할 것으로 사료된다.
- 2) AC/AG, AG/AC 및 LS양은 고강도 SL재의 유동성 및 강도 특성에 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.
- 3) 구성재료가 SL재의 유동성능 및 강도특성에 미치는 영향을 검토한 후 최적의 SL재 결합재의 배합비를 도출하기 위한 실험을 행한 결과 설정한 목표값에 만족하는 적정 결합재의 배합비는 OPC 78~85.5%, AC 7.5~9.5%, AG는 9~12.5%인 A영역과 OPC 72.5~78.5%, AC 9~12.5%, AG 13~15%의 B영역인 것으로 나타났다.

## 참고 문헌

1. 박성현, 현대실험계획법, 민영사, 1998.
2. 小保一夫, セメント系セルフレベルング材, Gypsum & lime, No. 222, 1989.
3. 久保田, NSK規格 セメント系セルフレベルング材 (NSK-008 A, B) について `月刊建築任上技術, 1993.8.
4. 石井四郎 外2人, セメント系セルフレベルング材, Gypsum & Lime, No192, 1984.
5. 조성현 외, Self-leveling재 배합비 결정에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표논문집 제19권 제1호, 1999.
6. 여동구 외, 기능성 첨가제의 첨가율 및 물비변화에 따른 Self-leveling재 특성, 대한건축학회 학술발표논문집 제19권 제2호, 1999.