

알칼리 자극제를 혼입한 고로슬래그 모르타르의 건조수축 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Properties of Drying Shrinkage for Alkali-Activated Slag Mortar

천정환*
Chun, Jung-Hwan

김재훈**
Kim, Jae-Hun

지남용***
Jee, Nam-Yong

Abstract

This paper report the result of the investigation on the properties of drying shrinkage for alkali-activated slag mortar in different relative humidity. Commonly we know that drying shrinkage means lost more moisture but the mechanism of drying shrinkage of alkali activated slag mortar is not entirely due to the quantity of weight loss of water from mortar. pore size distribution and the calcium silicate hydrate gel characteristics have a critical influence on the magnitude of drying shrinkage to alkali activated slag mortar.

For this investigation, Ca(OH)₂, Na₂SiO₄ were as alkali activator with 5 dosages(6%, 9%, 12%, 15%, 20%) and curing condition were three different relative humidity(35%, 65%, 95%) at 20±3℃

키워드 : 건조수축, 고로슬래그 미분말, 자극제, 상대습도

Keywords : Drying Shrinkage, Ground Granulated Blast-Furnace Slag Powder, Activator, Relative Humidity

1. 서론

고로슬래그 미분말은 용광로에서 선철과 동시에 생성되는 산업부산물을 미분쇄한 것으로, 환경문제의 부담을 줄이고 콘크리트의 성능 향상을 위해 부분 치환되어 사용되고 있으며, 국외의 경우 고로슬래그가 대량으로 발생하는 나라를 중심으로 고로슬래그의 단독 활용에 대한 연구가 진행 중이다.

고로슬래그는 잠재수경성을 가진 재료로서 보통 포틀랜드 시멘트와는 다르게 단독적인 경화성이 없기 때문에 자극제를 첨가하여야만 수화 반응을 일으킬 수 있으며, 고로슬래그를 혼화재로 사용하였을 경우 건조수축으로 인한 내구성이 문제점으로 지적되고 있다. 이는 고로슬래그를 혼화재로 사용한 경우 고로슬래그의 잠재수경성으로 인해 경화체 내부 수분거동이 보통 포틀랜드 시멘트 경화체와 다르게 작용하기 때문이다.

고로슬래그를 단독으로 사용할 경우 산화피막을 제거하기 위해 알칼리성 자극제가 필수적인 조건이 되며 자극제의 종류나 조합에 따라 다양한 수경 특성을 가지게 되며 혼화재로 고로슬래그를 사용한 경화체와 다른 건조수축 특성을 가지게 된다. 또한 알칼리 자극제의 종류 및 투여량에 따라 알칼리 자극제가 산화피막 파괴에 미치는 영향이 달라지기 때문에 건조수축특성도 자극제 종류 및 투여량에 따라 다르게 나타나게 되어

검토가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 알칼리 활성화 슬래그를 사용할 경우 건조수축 특성을 파악하기 위해 알칼리 활성화 모르타르를 대상으로 상대습도에 따라 자극제의 종류 및 투여량을 인자로 하여 건조수축 특성을 실험을 통하여 분석하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험인자 및 수준

본 연구에서는 표 1과 같은 실험인자 및 수준으로 실험을 진행하였다. 알칼리 자극제의 종류 및 혼입량에 따른 알칼리 활성화 모르타르의 건조수축 특성을 파악하기 위하여 Ca계열 및 Na계열의 자극제 중 대표적으로 사용되고 있는 Ca(OH)₂ 및 Na₂SiO₄ 두 가지를 자극제 종류로 선정하였다. 그리고 이들의 혼입량은 결합재 중량의 6%, 9%, 12%, 15%, 20%로 정하였다.

그리고 상대습도에 따른 건조수축 특성을 평가하기 위해 상대습도를 각각 35%, 65%, 95%의 3수준으로 하여 실험하였다.

표 1. 실험인자 및 수준

실험인자	수준	수준수
자극제 종류	Ca(OH) ₂ , Na ₂ SiO ₄ ¹⁾	2
자극제 혼입량(wt%)	6, 9, 12, 15, 20	5
상대습도(%)	35, 65, 95	3

1) A1-Ca(OH)₂, A2-Na₂SiO₄

* 한양대학교 대학원 건축공학과 석사과정

** 경민대학 실용건축과 교수, 공학박사

*** 한양대학교 건축공학부 교수, 공학박사

2.2 사용재료

2.2.1 고로슬래그 미분말

비중 2.91, 분말도 5300cm²/g인 국내산 고로슬래그 미분말을 사용하였으며, 화학성분은 표 2와 같다.

표 2. 고로슬래그의 화학성분 (단위 : %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	lg.loss
33.40	14.01	42.70	6.3	03	0.5

2.2.2 자극제

자극제는 시약으로 제조된 일본 J사의 Ca(OH)₂, (순도 95.0%)와 일본 K사의 Na₂SiO₄ 사용하였다.

2.2.3 잔골재

KS L 5100에서 규정하고 있는 주문진산 표준사를 사용하였다.

2.3 배합 및 시험체 제작

시험체 배합은 물결합재비(W/B)를 0.5로 고정하였고, KS L 5105에 준하여 고로슬래그와 표준사 배합비를 1:2.45로 고정하였으며, 자극제는 고로슬래그 중량에 대한 혼입비율에 따라 배합수에 혼합하여 혼입하였다. 배합표는 표 3와 같다.

표 3. 모르타르 배합표

물결합재비 (W/B) ¹⁾	자극제 혼입량 (%) ²⁾	물(g)	슬래그(g)	모래(g)
0.5	6	380	760	1862
	9			
	12			
	15			
	20			

- 1) 시멘트를 사용하지 않았기 때문에 W/B는 고로슬래그에 대한 물의 중량비
2) 고로슬래그에 대한 분말상태 자극제의 중량 백분율

KS F 2424에 따라 4×4×16cm인 시험체를 제작하고 타설 24시간 후 탈형하여 길이변화 측정용 게이지 플러그를 부착하였다.

2.4 양생 및 측정방법

2.4.1 양생

KS F 2424에서는 재령 7일까지 시험체를 수중양생을 하도록 되어 있지만, 본실험에서와 같이 여분의 알칼리를 혼입할 경우에는 알칼리 자극제가 모르타르 외부로 용출될 우려가 있으므로 온도 20±3℃, 상대습도 100%를 유지한 항온항습실 내부에 그림 1같이 습기함을 제작·설치하여, 이 습기함에서 7일간 양생하였다. 재령 7일 후 부터는 온도 20±3℃, 상대습도 35%, 65%인 항온항습기와 온도 20±3℃, 상대습도 95%인 항온항습실에서 각각 양생하였다.

2.4.2 건조수축 측정

건조수축의 측정은 KS F 2424 중 “콘택트 게이지 방법”에 따라 최소 눈금 0.001mm, 오차범위 ±0.0005mm인 독일 BAUARI

PFENDER사 (모델명 MSG-D1)의 콘택트 게이지를 사용하여 사진 1과 같이 실시하였다.

측정 시기는 타설 24시간 후 최초 1회 측정하고, 재령 2일부터 재령 14일까지 매일 1회 측정하였다. 이후 7일 간격으로 21일, 28일에 측정하였다. 측정은 매회 2번 실시하여 평균을 취하였다.

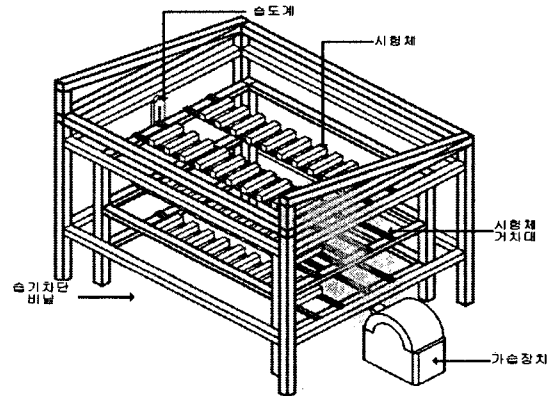


그림 1. 습기함 모식도

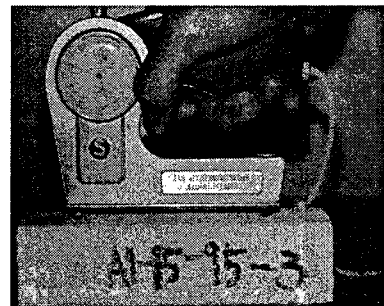


사진 1. 길이변화측정

2.4.3 중량감소율 측정

중량 감소율은 최소 눈금 0.01g, 오차범위 ±0.005g인 일본 AND사(모델명 HF-6100) 저울을 사용하여 건조수축 측정과 동일 재령에 실시하였으며 측정은 매회 2번 실시하여 평균을 취했다.

3. 실험결과 및 고찰

건조수축 결과는 표 4에 나타내었으며, 그림 2, 3, 4에서 OPC 모르타르, Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르, Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르의 각각의 재령에 따른 건조수축 및 중량감소율을 나타내었다. 온도 20±3℃, 상대습도 100%인 습기함에서 양생된 재령 7일까지는, OPC모르타르, Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르, Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르의 모든 시험체에서 건조수축량 변화가 거의 없었다. 이는 수분이 지속적으로 공급되어 건조수축이 발생하지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 재령 7일 이후의 건조수축 및 중량감소율을 중심으로 실험결과를 분석하였다.

표 4. 건조수축량 및 중량감소를 측정결과

결합재	자극제종류	자극제혼입률(%)	재령(일)	건조수축량 (×10 ⁻³ mm)					중량감소율(%)				
				3	7	14	21	28	3	7	14	21	28
S L A G	A1	6	35	-3.08	4.93	34.00	64.75	69.00	-0.754	-1.020	2.661	4.029	4.279
			65			28.50	43.50	49.00			1.832	2.667	2.871
			95			26.00	34.25	35.25			1.293	1.357	1.359
		9	35	-0.69	1.70	53.50	80.50	83.00	-0.897	-0.810	1.994	3.334	3.575
			65			34.25	65.50	72.00			1.796	2.586	2.780
			95			25.00	32.50	31.50			0.920	0.954	0.952
		12	35	0.00	4.63	29.17	57.50	59.50	-0.468	-1.035	2.002	3.362	3.614
			65			35.50	57.50	64.00			1.478	2.287	2.470
			95			46.25	47.00	47.00			0.719	0.879	0.866
	15	35	2.75	4.13	29.50	61.75	66.25	-0.489	-1.292	1.930	3.233	3.471	
		65			30.00	57.75	60.75			1.078	1.754	1.919	
		95			36.50	33.00	39.25			0.228	0.222	0.089	
	20	35	1.64	1.29	34.50	63.50	72.25	-0.562	-1.505	1.991	2.233	2.447	
		65			30.00	54.17	56.83			0.773	1.363	1.504	
		95			52.50	55.00	55.50			-0.187	-0.211	-0.229	
	A2	6	-3.13	1.61	118.33	153.33	161.50	-1.020	-1.435	3.792	5.101	5.298	
					65	108.00	139.00			146.75	2.339	2.849	2.979
					95	53.00	56.75			57.75	0.916	0.802	0.782
		15	-2.33	3.31	86.00	133.25	144.50	-1.060	-1.372	3.894	5.321	5.563	
					65	81.83	120.50			127.83	2.626	3.308	3.466
					95	26.00	26.05			26.25	1.116	1.015	0.986
		12	5.38	7.83	53.25	107.25	118.75	-0.883	-1.018	4.109	5.654	5.901	
					65	51.50	81.50			96.50	3.168	3.993	4.209
					95	26.35	26.55			26.83	1.893	1.811	1.793
15		1.88	2.06	35.00	91.00	118.50	-0.675	-0.722	4.526	6.255	6.551		
				65	44.17	87.33			94.17	3.770	4.750	4.993	
				95	32.00	33.50			34.75	2.525	2.466	2.463	
20	2.83	6.29	35.17	64.25	79.50	-0.814	-0.678	4.493	6.228	6.526			
			65	44.25	85.50			90.50	2.414	4.557	4.778		
			95	15.00	12.25			12.50	2.352	2.267	2.266		
O P C	-	-	35	50.17	84.00	88.50	-0.921	-1.572	1.385	2.342	2.487		
			65	38.25	58.00	59.00			0.936	1.289	1.329		
			95	19.50	21.00	21.50			-0.165	-0.169	-0.203		

주 1) RH의 상대습도: 100%

주 2) A1 : Ca(OH)₂ A2 : Na₂SiO₄

3.1 자극제 종류에 따른 중량감소율과 건조수축량

그림 4는 상대습도별 자극제 종류 및 투여량에 따라 건조수축량 및 중량감소율을 나타낸 것이다.

상대습도 35%와 65%일 때 중량감소율은 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르, Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르, OPC모르타르순으로 크게 나타났다. 건조수축량은 상대습도 35%에서 Na₂SiO₄모르타르, OPC모르타르, Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르 순으로 크게 나타났고, 65%에서 Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르와 OPC모르타르의 건조수축량은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

상대습도 95%일 때 중량감소율은 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르와 Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르 모두 OPC모르타르보다 크게 나타났으며, 건조수축량은 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르 투여량이 20%인 경우를 제외하고 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르와 Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르 모두 OPC 보다 크게 나타났다. 그리고 자극제의 종류에 관계없이 재령 14일 이후의 건조수축량 및 중량감소율은 거의 일정하게 나타났는데 이는 경화체 내·외부 수분이 평형을 이루었기 때문으로 사료된다.

자극제 종류에 따른 중량 감소율은 상대습도 35%, 65%, 95% 일 때 모두 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르, Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르, OPC모르타르순으로 높게 나타났다. 건조수축량은 상대습도 35%, 65%일 때 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르 Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르의 보다 크게 나타났고 상대습도 95%일 때 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르와 Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르가 비슷하게 나타났다.

3.2 자극제 혼입량에 따른 중량감소율과 건조수축량

자극제 혼입량에 따른 중량감소율은 Na₂SiO₄모르타르는 자극제 혼입량이 많을수록 중량감소율은 높게 나타났고, Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르의 경우는 자극제 혼입량이 많을수록 중량감소율은 낮게 나타났다.

자극제 혼입량에 따른 건조수축량은 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르는 자극제 혼입량이 많을수록 건조수축량은 낮게 나타났으나, Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르는 자극제 혼입량에 따른 건조수축량의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

일반적으로 OPC모르타르의 경우 중량감소율이 높으면 건조수축량이 큰 것으로 알려져 있으나 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르는 자극제 혼입량이 많을수록 중량감소율은 커지지만 건조수축량은 작은 것으로 나타났다. 따라서 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르는 자극제 혼입량이 건조수축량에 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다. 한편 Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르는 자극제 혼입량이 증가할수록 중량감소율은 낮아지지만 건조수축량의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

3.3 상대습도에 따른 중량감소율과 건조수축량

그림 2와 그림 3과 상대습도에 따른 중량감소율 및 건조수축량을 각각 나타낸 그림이다.

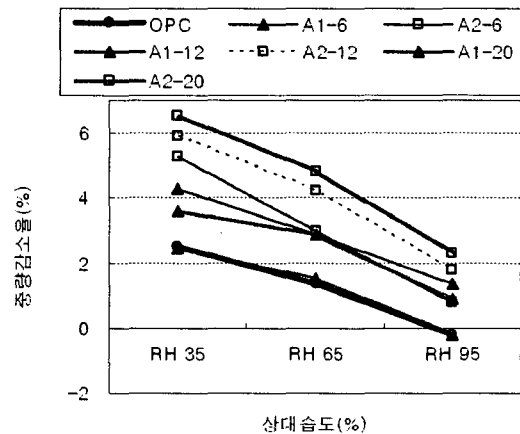


그림 2. 상대습도에 따른 중량감소율(재령 28일 기준)

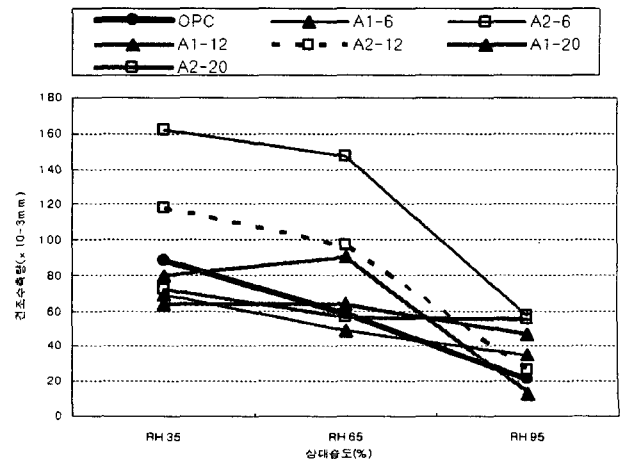


그림 3. 상대습도에 따른 건조수축량(재령 28일 기준)

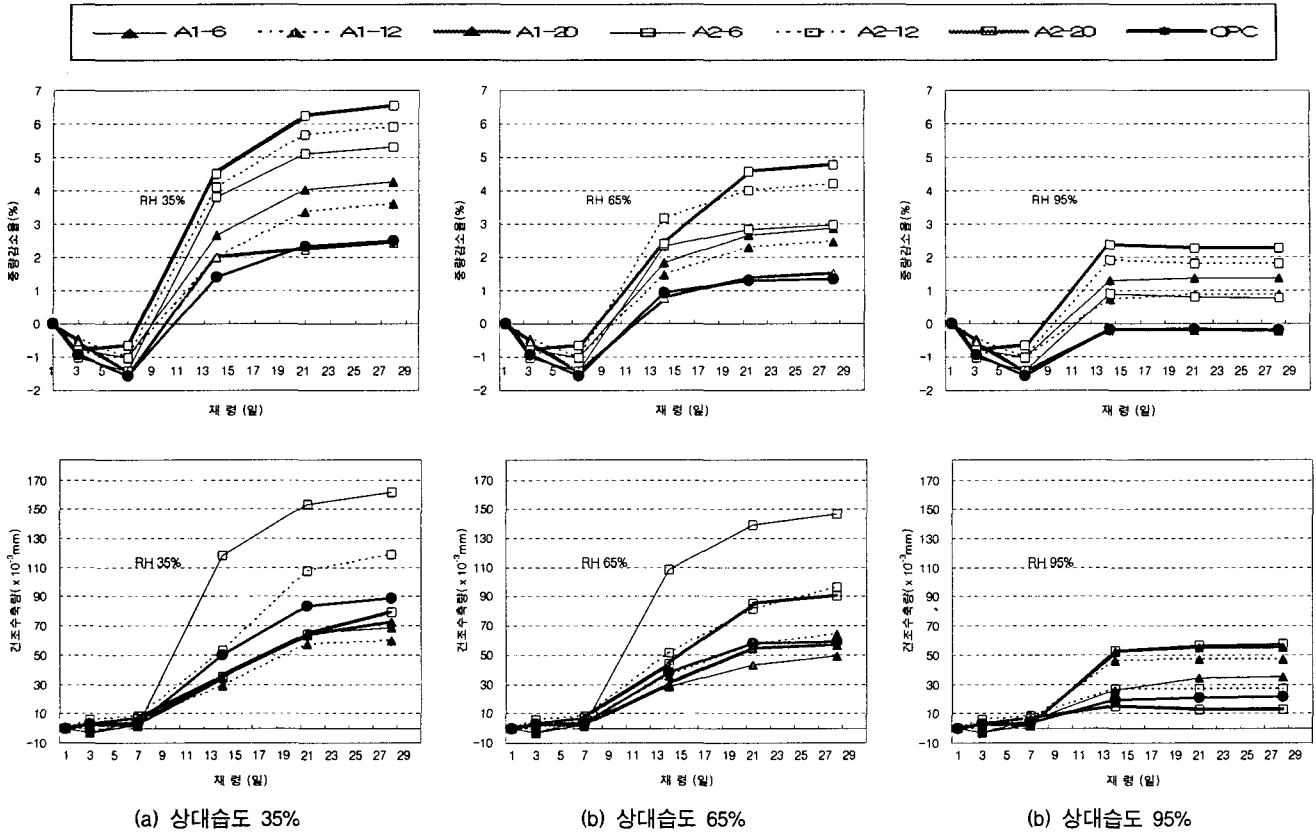


그림4. 상대습도별 자극제 종류 및 첨가량에 따른 건조수축량에 따른 건조수축량과 중량감소율

그림 2에서와 같이 OPC모르타르와 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르, Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르 모두 상대습도가 높을수록 중량감소율은 낮게 나타났다.

또한 OPC 모르타르의 경우 상대습도가 높을수록 건조수축량은 적게 나타난 것과 같이 자극제를 사용한 슬래그 모르타르의 경우도 상대습도가 높을수록 건조수축량이 적은 것으로 나타났다. 그러나 상대습도의 고저가 건조수축량에 미치는 영향은 OPC 모르타르보다 자극제가 혼입된 모르타르가 적은 것으로 나타났다. 즉 알칼리 활성화 슬래그 모르타르는 상대습도보다 알칼리 자극제의 종류 및 투여량이 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

많을수록 OPC모르타르와 유사하게 중량감소율은 높고 건조수축량은 많은 것으로 나타났다. 그러나 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르는 자극제 혼입량이 많을수록 중량 감소율이 높게 나타났으나 건조수축량은 적게 나타났다. 따라서 Na₂SiO₄를 자극제로 사용할 경우에는 그 투입량이 건조수축에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3) 상대습도가 건조수축량에 미치는 영향은 알칼리 활성화 슬래그 모르타르가 OPC모르타르의 경우보다 적은 것으로 나타났다. 따라서 알칼리 활성화 슬래그 모르타르는 상대습도 보다는 알칼리 자극제의 종류 및 투여량이 건조수축량에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

알칼리 자극제 종류 및 투여량과 상대습도에 따른 알칼리 활성화 슬래그 모르타르의 건조수축 실험결과는 다음과 같다.

1) 중량감소율은 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르, Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르, OPC모르타르 순으로 크게 나타났다. 건조수축량은 Na₂SiO₄를 자극제로 사용한 모르타르가 Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르, OPC모르타르보다 크며 Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르와 OPC모르타르의 건조수축량 차이는 크지 않다.

2) Ca(OH)₂를 자극제로 사용한 모르타르는 자극제 혼입량이

참고문헌

- 1) Caijun Shi, Robert L. Day "Selectivity of Alkaline Activators for Activation of Slages" cement, concrete, and aggregates, CCAGDP, Vol, 18, No. 1 pp. 8-14, 1996
- 2) Caijun Shi, Robert L. Day "Selectivity of Alkaline Activators for Activation of Slages" cement, concrete, and aggregates, CCAGDP, Vol, 18, No. 1 pp. 8-14, 1996
- 3) 최우진, 지남용 「고로슬래그를 혼입한 콘크리트의 습도변화에 따른 건조수축 특성에 관한 연구」 대한 건축학회, Vol. 24, No.1, pp.424-430, 2004