

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 특성 및 사용시 유의사항

오 병 환(서울대학교 지구환경시스템공학부 교수)

1. 서론

최근 건설기술의 눈부신 발전과 함께 고성능·고기능성 콘크리트에 대한 개발 및 적용이 활발히 이루어지고 있다. 특히 고로슬래그를 콘크리트 재료로 사용할 경우, 시멘트 사용량을 줄일 수 있을 뿐 아니라 수화반응에 의한 온도상승을 억제하고, 장기강도가 증가하는 등의 장점이 있다. 그러나 무엇보다도 슬래그를 포함한 콘크리트는 슬래그와 시멘트수화물의 2차 반응에 의해서 공극구조가 더욱 치밀해지고 수밀성이 크게 증가함으로써 염화물을 비롯한 각종 유해물질의 침투에 대한 저항성이 증가하게 된다. 따라서 슬래그를 포함한 콘크리트는 특히 내구성 측면에서 많이 사용되고 있다.

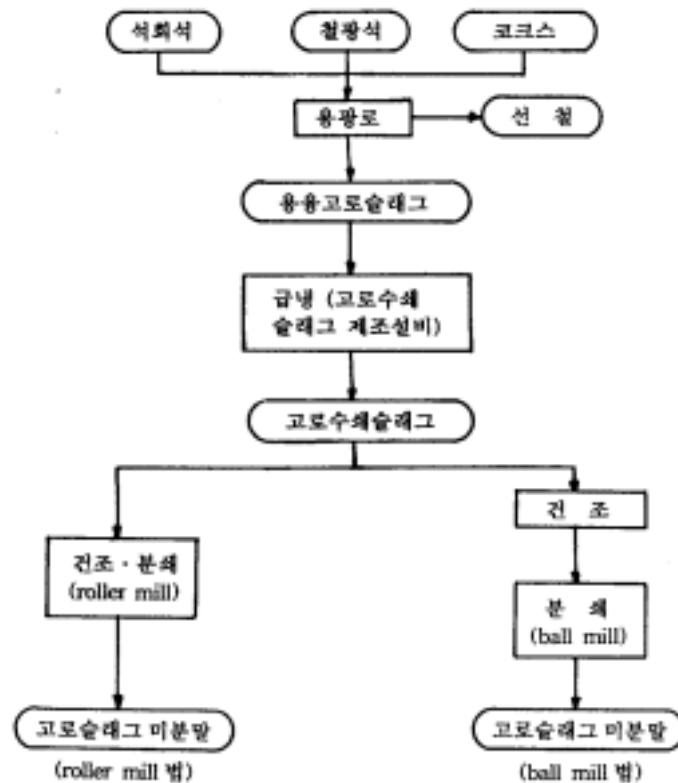
그러나, 최근들어 고로슬래그 미분말 및 고로슬래그 시멘트의 사용이 일반화되면서, 일부 현장에서는 고로슬래그를 혼입한 콘크리트에 대한 확실한 지식이 없이 무분별하게 사용되는 경향이 있으며, 일부에서는 고로슬래그 미분말을 사용함으로써 강도 및 내구성 등 콘크리트의 모든 성능을 함께 모두 높일 수 있다는 그릇된 인식을 가지고 있을 수도 있다. 그러나, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 일반적으로 초기강도발현이 낮기 때문에 콘크리트의 타설온도나 양생조건, 양생온도에 따라 강도나 투수성 등의 성능이 크게 변하는 것으로 알려져 있고, 특히 중성화나 건조수축 등에 좋지 않은 영향을 미칠 수도 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트를 현장에 적용하기 위해서는 중성화나 건조수축 등에 대한 충분한 검토가 필요하고, 타설온도 및 양생온도 등, 품질관리에 각별한 주의가 요망된다.

따라서, 본 소고에서는 고로슬래그 미분말의 제조과정 및 특성에 대해서 알아보고, 고로슬래그 미분말 및 고로슬래그 시멘트의 생산현황, 사용현황을 분석하고자 한다. 또한, 콘크리트에 고로슬래그 미분말을 사용함으로써 얻을 수 있는 작업성 증진효과, 강도증진효과, 수화발열 저감효과 등을 분석하였다. 더불어 본 소고에서는 고로슬래그 미분말의 좋은 점과 함께 고로슬래그 미분말의 사용시 유의사항도 고찰하였는데, 콘크리트의 타설온도 및 양생온도 등이 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 성능에 미치는 영향을 분석하고, 고로슬래그 미분말이 콘크리트의 중성화 및 건조수축에 미치는 영향을 분석함으로써 고로슬래그 미분말을 콘크리트의 혼화재로서 사용하는데 있어서 특히 주의할 사항을 고찰하였다.

2. 고로슬래그 미분말의 제조 및 특성

가. 고로슬래그 미분말의 제조 과정

고로슬래그 미분말은 용융상태의 고로수쇄슬래그에 가압수를 분사하여 급랭시킴으로써 얻어진다. 고로수쇄슬래그는 수분을 포함하고 있기 때문에 종래에는 고로수쇄슬래그를 미리 건조시킨 후에 분쇄기(Ball Mill)로 분쇄하여 제조하였지만 최근에는 열풍 발생기를 장치한 롤러밀(Roller Mill)을 사용하여 건조와 분쇄를 동시에 실시한다. 또한, 사용목적에 따라서 석고를 첨가하는 설비를 갖추기도 한다. <그림-1>은 고로슬래그 미분말의 제조과정을 나타낸 것이다.



<그림-1> 고로슬래그 미분말의 제조 과정

나. 고로슬래그 미분말의 화학성분

<표-1>은 고로슬래그 미분말의 주요 화학성분을 보통 포틀랜드 시멘트와 비교해서 나타낸 것이고, <표-2>는 고로슬래그 미분말의 염기도 및 유리질화율 등을 보통 포틀랜드 시멘트와 비교해서 나타낸 것이다. 고로슬래그 미분말은 주요 화학성분인 SiO₂, Al₂O₃, CaO 및 MgO가 94~97%를 나타낸다. 포틀랜드시멘트의 경우 MgO가 5%를 초과하면 유리마그네시아가 생성되어 이상팽창의 원인이 되지만 고로슬래그 미분말의 경우에는 15% 정도 포함하고 있어도 해가 없다고 하며 대체로 9% 이하의 함유율을 가지고 있다.

<표-1> 고로슬래그 미분말의 주요 화학성분

구분	화 학 성 분 (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	MnO	TiO ₂	S	SO ₃
고로슬래그 미분말	33.1	13.8	42.4	6.1	0.29	0.40	0.96	0.66	-
보통 포틀랜드 시멘트	21.5	5.2	64.0	1.6	2.9	0.13	0.31	-	0.2

<표-2> 고로슬래그 미분말의 물리·화학적 특성

구분	염기도	R ₂ O (%)	ig.loss (%)	insol. (%)	유리질화율 (%)	비중	습분 (%)
고로슬래그 미분말	1.86	0.40	+0.08	0.18	99.0	2.91	0.14
보통 포틀랜드 시멘트	-	0.57	+1.1	0.3	-	-	-

3. 고로슬래그 미분말의 사용현황

가. 고로슬래그 생산현황

국내의 고로슬래그는 대부분 포항제철의 광양 및 포항제철소에서 생산되고 있으며, 선철 생산에 따른 고로슬래그 생산량은 <표-3>과 같다. 즉, 선철1톤 생산시 357~372kg의 고로슬래그가 생성되며, 이 가운데 콘크리트용 혼화재료로서 활용이 가능한 수재 고로슬래그의 비율은 포항제철은 90%, 대야제철은 99%로 각각이다.

<표-3> 선철 생산량에 따른 고로슬래그의 생산량

(단위:천톤)

	고로슬래그량	선철 생산량	슬래그(kg)/선철(t)	수재율(%)
포항제철소	3,698	9,931	372	36
광양제철소	4,422	12,381	357	63

나. 고로슬래그 미분말 및 시멘트의 생산현황

본 보고서에서는 선철 생산량에 따른 고로슬래그의 생산량을 분석한 것으로서, 보통포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 시멘트의 생산량의 합을 100으로 볼 때, 고로슬래그 시멘트가 차지하는 비율이 최근 5년 사이에 거의 2배 가까이 신장되었으나, '97년 현재 시멘트 전체 생산량 가운데 약18%에 이르는 고로슬래그 시멘트가 제조되고 있는 일본의 경우에 비하여 매우 빈약한 실정이다.

<표-4> 국내 및 일본의 포틀랜드시멘트와 슬래그시멘트 생산량 비교

(단위:천톤)

		1993	1994	1995	1996	1997
한국	포틀랜드 시멘트	44,476	48,324	51,520	52,505	54,856
	고로슬래그 시멘트	2,068	3,310	3,609	4,755	4,940
	계	46,544	51,634	55,129	57,260	59,796
	점유비(%)	4.4	6.4	6.5	8.3	8.2
일본	포틀랜드 시멘트	71,336	73,275	72,946	75,825	74,684
	고로슬래그 시멘트	16,156	16,982	16,372	17,779	16,331
	계	87,492	90,257	89,318	93,604	91,015
	점유비(%)	18.5	18.8	18.3	19.0	17.9

다. 고로슬래그 미분말 및 시멘트의 사용현황

국내 건설현장에서 고로슬래그가 적용되고 있는 실태를 파악하는 것은 불가능하여 그 생산량 및 사용량이 정확하게 파악되지 않는 실정이지만, 고로슬래그 시멘트의 생산현황은

파악이 가능하였다.

고로슬래그 미분말의 경우에도 SOC 건설사업 또는 민간건설업체의 대규모 건설현장에서 자체적으로 특기시방을 작성하여 고로슬래그 미분말을 사용하는 것으로 파악되고 있으며, 특히 내구성이 특별히 요구되는 LNG, 발전소, 해안지역의 구조물 등에서의 사용실적이 확인되고 있다.

<표-5>는 현재 진행중인 대규모 공항건설공사에서 적용되고 있는 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 요구성능 및 적용부위, 고로슬래그 미분말의 치환율 등을 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 토목·건축분야 전반에 걸쳐서 고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트를 적용하고 있으며, 보통 포틀랜드 시멘트에 대한 치환율은 건축구조물의 경우 12.5%, 토목구조물의 경우 25%까지 적용되고 있다.

표 5 국내 대규모 공항건설공사에서의 고로슬래그 미분말 적용 예

구분	내용	설계기준 강도	물/시멘 트비(%)	혼화제		시멘트		
				고로슬래그	AE 제		SP 제	
무근콘크리트	활주로, 유도로, 계류장	(50) 휨강도		혼입않거나 15%		×	1종	
철근 콘크 리트	해수에 직접 노출되는 구간	배수갑문 구조물	240	0.45	25%	○	○	5종
	간척지 및 준설토에 노출되는 지하구간	지하차도, 배수암거 IAT/BHS	Airside:280	0.43	25%	○	○	5종
		지하터널구조물	Landside:240	0.45				
	해풍의 영향을 받는 지상구간	여객터미널	280		12.5%	○	○	1종
여객터미널 고가교		상부:280	0.43					
		하부:240	0.45					
	통로,수로,Box 일반 배수구조물	240	0.45					

4. 고로슬래그 미분말의 사용에 따른 성능분석

나. 워커빌리티의 개선

Wood(1981)의 연구에 의하면 슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 워커빌리티가 향상되는데, 이것은 시멘트 페이스트 내에서 고로슬래그 미분말이 매끄러운 평면을 형성하기 때문이다. 슬래그 미분말의 표면이 매끄럽고 촘촘하기 때문에 배합초기에 슬래그 미분말이 수분

을 함유하더라도 포틀랜드 시멘트와 같이 점성을 발휘하지는 않는다. 따라서 같은 슬럼프일 경우에는 고로슬래그 미분말을 혼화제로 사용하는 것이 다짐작업이 쉬워진다.

일반적으로 슬래그 미분말을 사용하면 콘크리트가 경화하는데 걸리는 시간이 증가한다. 응결시간은 초기 양생온도, 슬래그 치환율, 물-결합재비 그리고 포틀랜드 시멘트의 특성 등의 영향을 받는다(Fulton 1974). 보통 응결시간은 상온(23℃)에서 30분에서 1시간 정도이다. 낮은 온도에서는 응결시간이 지연되는 경향이 있지만 염화 칼슘과 같은 급결제를 첨가하면 이러한 현상을 없앨 수 있다.

콘크리트의 블리딩은 단위수량에 대한 고체의 표면적의 비에 주로 영향을 받는데, 고체의 표면적이 클수록 블리딩은 감소한다. 따라서, 슬래그 미분말을 사용한 경우 슬래그의 분말도가 시멘트의 분말도보다 크면 블리딩은 감소하고, 시멘트의 분말도보다 작으면 블리딩은 증가한다. Cesareni와 Frigione의 연구에 의하면 총 블리딩량과 블리딩 속도는 슬래그를 혼입한 경우 증가하는 경향이 있다. 이것은 슬래그 미분말과 시멘트의 분말도가 거의 같은 수준이기 때문이다.

나. 발열특성

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 발열특성은 고로슬래그 미분말의 품질이나 치환율의 영향을 받는다. 또 고로슬래그 미분말의 반응속도는 보통 포틀랜드 시멘트에 비하여 칠 때의 콘크리트 온도 및 외기온도에 영향을 보다 민감하게 받는다.

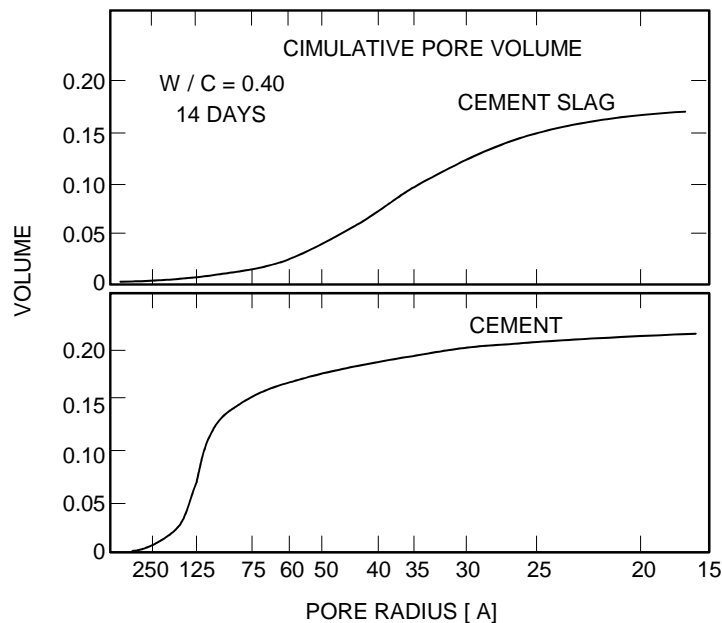
고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 단열온도 상승량은 고로슬래그 미분말의 치환율이 작을수록 또 반죽된 콘크리트의 온도가 클수록 커지고, 경우에 따라서는 보통 포틀랜드 시멘트만을 사용한 경우보다 커질 때도 있다. 그러나 이 경우에도 발열속도는 보통 포틀랜드 시멘트만을 사용한 것과 비교할 때 고로슬래그 미분말의 분말도가 작을수록 또 치환율이 클수록 늦어진다. 이 때문에 고로슬래그 미분말의 분말도 및 치환율을 적절하게 선정하면 보통 구조물의 콘크리트의 최고 온도 도달시간을 늦추고 또한 최고온도도 작게 할 수 있으므로 온도 균열 억제에 유효하다.

다. 콘크리트의 강도특성

분말도가 높은 고로슬래그 미분말을 30~50% 정도 치환하면 콘크리트의 고강도화도 가능한 것으로 보고되고 있다. 이러한 물성과 장기강도증진효과가 크다는 점으로부터 초고층 RC건축물이나 RC조 타워의 저층부 콘크리트 또는 지하구조물이나 강도관리재령을 길게 할 수 있는 구조물에서 특히 유효하게 적용될 수 있다.

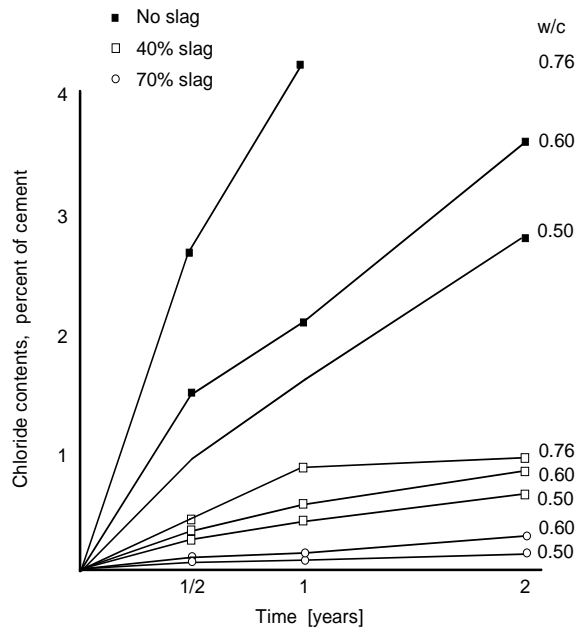
라. 투수성

슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트는 양생이 충분히 이루어지면 투수성이 크게 감소하는데, 슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 투수성은 감소한다. 슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 경우 시멘트의 수화과정에서 발생하는 칼슘 수산화물 등의 알칼리와 슬래그가 반응하면서 콘크리트의 공극구조가 바뀌게 되는데, 공극이 칼슘 수산화물 이외에 일부는 칼슘 실리케이트 수화물로 채워지게 된다(Bakker 1980 ; Mehta 1980 ; Roy and Idorn 1982). Mehta 에 의하면 콘크리트의 투수성은 공극의 크기와 분포에 의해서 결정되는데, <그림-2>와 같이 슬래그 시멘트의 경우 공극의 크기가 감소하므로 투수성도 감소하게 된다.



<그림-2> 공극 크기 분포도

<그림-3>은 3.0 mol의 NaCl 용액에 침지된 콘크리트 빔의 염소이온 함량을 시간에 따라 나타낸 것이다. 콘크리트 표면으로부터 깊이가 2 cm ~ 4 cm 인 부분에서 염소이온의 함량을 측정하였고, 슬래그의 치환율과 물-결합재비에 따라 도시하였다(Smolczyk, 1977). 슬래그의 치환율이 작을수록, 물-결합재비가 클수록, 같은 깊이, 같은 시간에서의 염소이온의 양이 많으므로 콘크리트의 투수성은 슬래그의 치환율이 증가할수록, 물-결합재비가 감소할수록 증가하는 것을 알 수 있다.

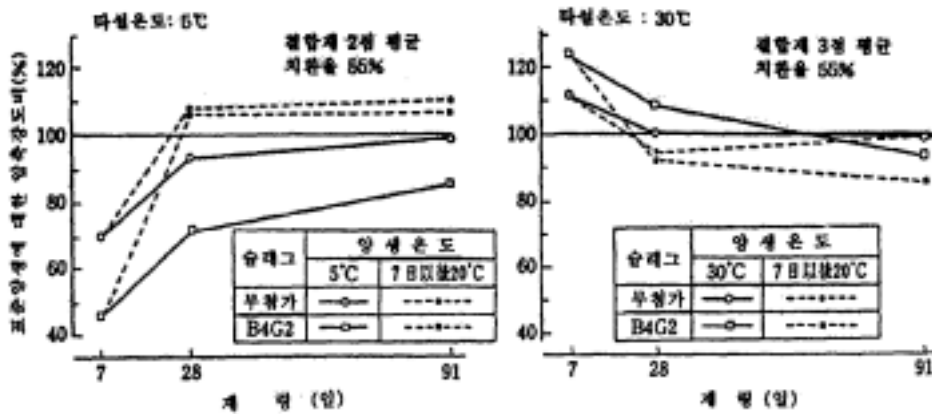


<그림-3> 시간에 따른 염소이온의 함량

5. 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 적용시 유의사항

가. 콘크리트의 타설온도

고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트는 혼입하지 않은 콘크리트에 비해 강도발현속도가 느리며, 특히 콘크리트의 타설 및 양생온도에 의해 크게 영향을 받는다. 콘크리트 제조시의 온도를 5°C, 20°C, 30°C로 변화시킨 경우의 압축강도와 20°C의 표준조건에서 제작·양생한 콘크리트의 압축강도를 비교하면 <그림-4>와 같다.

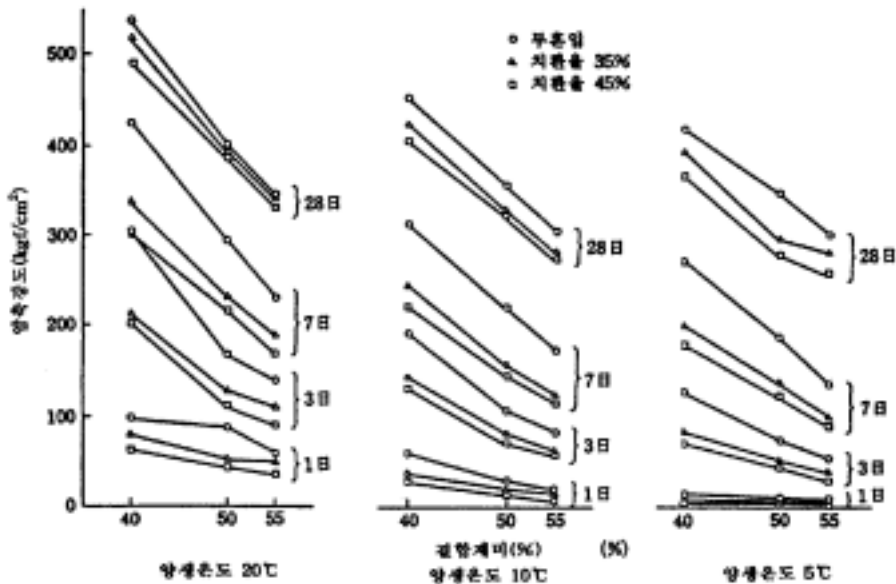


<그림-4> 재령별 표준양생에 대한 압축강도비의 관계

즉, 타설온도가 5℃이고 양생온도가 낮은 경우에는 표준양생시킨 경우에 비해 재령 7일에서 45% 정도밖에 강도가 발현되지 않으며, 재령 91일에 겨우 80% 정도의 강도발현수준을 나타낸다. 그러나, 콘크리트를 타설하고 7일이 경과한 후, 20℃로 양생온도를 높인 경우에는 표준양생의 경우와 동등이상으로 되어 재령초기의 양생온도를 높임으로써 압축강도의 만회가 가능할 것으로 판단된다.

나. 양생온도와 양생기간

콘크리트 타설시의 온도가 17℃이며 재령 1일 이후부터 소정의 재령까지 일정온도의 물로 수중양생한 경우의 압축강도를 <그림-5>에 나타냈다. 저온양생시킨 경우 표준양생에 비하여 치환율이 클수록, 물결합재비가 클수록 압축강도가 작아지고 있으며, 양생수의 온도가 높을수록 재령에 따른 압축강도 증가율이 커지는 것을 알 수 있다. 초기재령에서는 치환율이나 물-결합재비의 영향보다는 양생온도에 의한 영향이 가장 크다는 사실을 알 수 있다. 적정한 온도로 양생되지 않는 경우에는 수화반응이 촉진되지 않아 강도발현이 지연되기 때문에 초기동해를 방지하는 의미에서도 콘크리트의 온도를 10℃ 이상으로 유지할 필요가 있다. 고로슬래그 미분말 콘크리트는 강도증진을 위해서는 혼입콘크리트에 비하여 양생기간을 길게 할 필요가 있다.

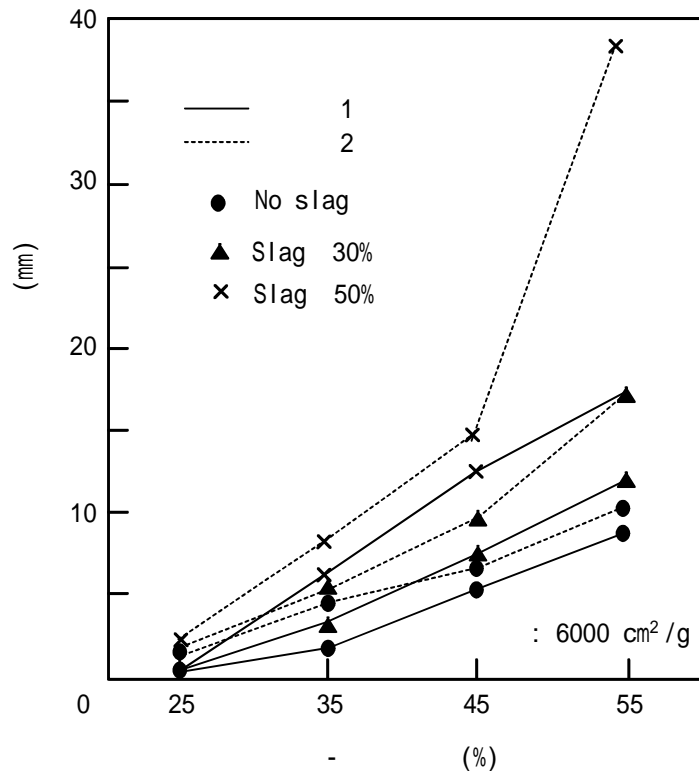


<그림-5> 양생온도와 압축강도의 관계

다. 중성화

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 시멘트 수화시에 발생하는 수산화칼슘과 고로슬래그의 성분이 반응하여 콘크리트의 알칼리성이 약간 저하되기 때문에 콘크리트의 중성화가 빠르게 진행될 수도 있다. <그림-6>은 탈형 후 재령 1주까지 수중양생한 후 2주간 20℃ RH 60% 의 공기중에서 건조시킨 콘크리트를 탄산가스 농도 5%, 30℃ RH 60% 에서 촉진 중성화시험을 한 결과를 나타낸 것이다.

콘크리트의 중성화 깊이에 가장 큰 영향을 미치는 것은 물-결합재비임을 알 수 있다. 즉, 물-결합재비 25% 및 35%에서는 치환율에 관계없이 10mm 이하의 중성화 깊이를 나타내고 있으나, 55%에서는 10mm 이상의 중성화 깊이를 나타내었다. 또한 치환율이 증가함에 따라서 중성화 깊이가 증가하지만 30%의 경우는 무혼입콘크리트에 비해서 약간 큰 값을 나타내는 정도이다.

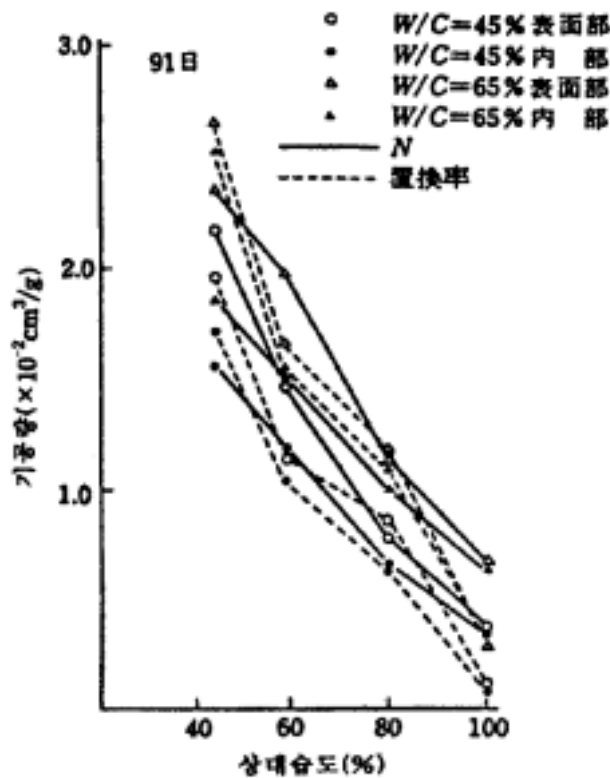


<그림-6> 콘크리트의 중성화 시험결과

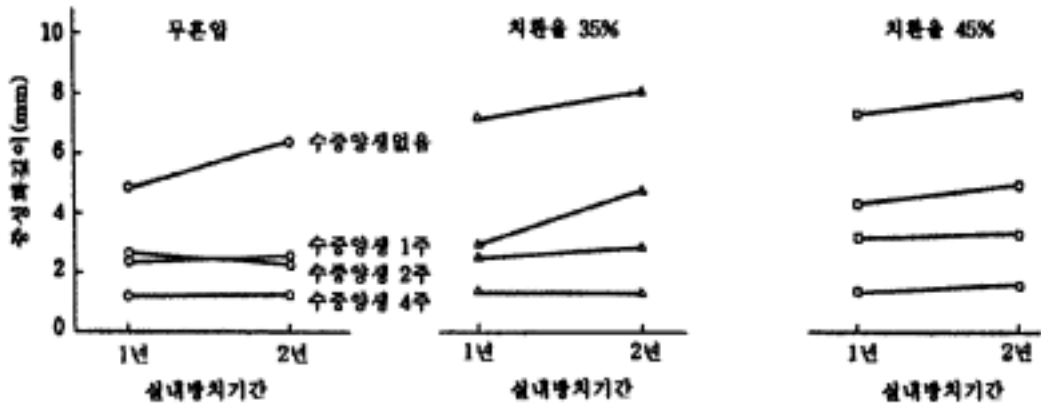
고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 양생은 급열·보온 뿐만 아니라, 충분히 긴 시간동안 습윤한 상태를 유지시키는 것이 매우 중요하다. 물-시멘트비와 시멘트의 종류를 달리 한 몰탈 시험결과로부터 얻은 상대습도와 세공용적의 관계를 <그림-7>에 나타낸다.

100% 습윤양생(수중)에서는 세공량이 작으며, 상대습도가 저하함에 따라 세공량이 현저하게 증가하는 경향을 나타낸다. 또한, 물-시멘트비가 커질수록 표면부의 세공량이 내부보다 커지게 된다. 따라서, 충분한 습윤상태가 아닐 경우에는 수화작용이 저해되어 중성화의 진행을 촉진시키게 된다.

<그림-8>은 초기 양생기간의 차이가 중성화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 공시체 제작 24시간 후에 탈형하여 즉시 20℃, 상대습도 70%의 항온항습실에 방치한 것과 1, 2, 4주간 수중양생한 뒤 동일한 조건의 항온항습실에 방치한 것을 재령 1년 및 2년 경과후 중성화 깊이를 측정해 본 것으로서 수중양생기간이 짧을수록 중성화깊이가 큰 것을 알 수 있다. 이것은 수중양생기간이 짧을수록 콘크리트 중의 세공량이 많으며, 치밀하지 않아 통기저항이 작은 조직이 되었기 때문이라고 생각된다. 따라서, 중성화에 대해서도 충분한 습윤양생과 기간이 필요하다는 것을 알 수 있다.



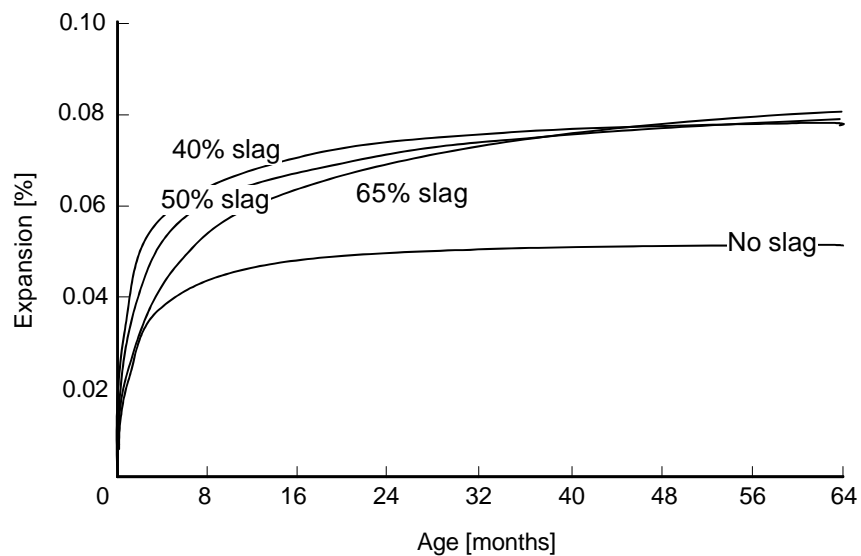
<그림-7> 상대습도와 세공량의 관계



<그림-8> 초기양생기간의 차이가 중성화에 미치는 영향

라. 건조수축

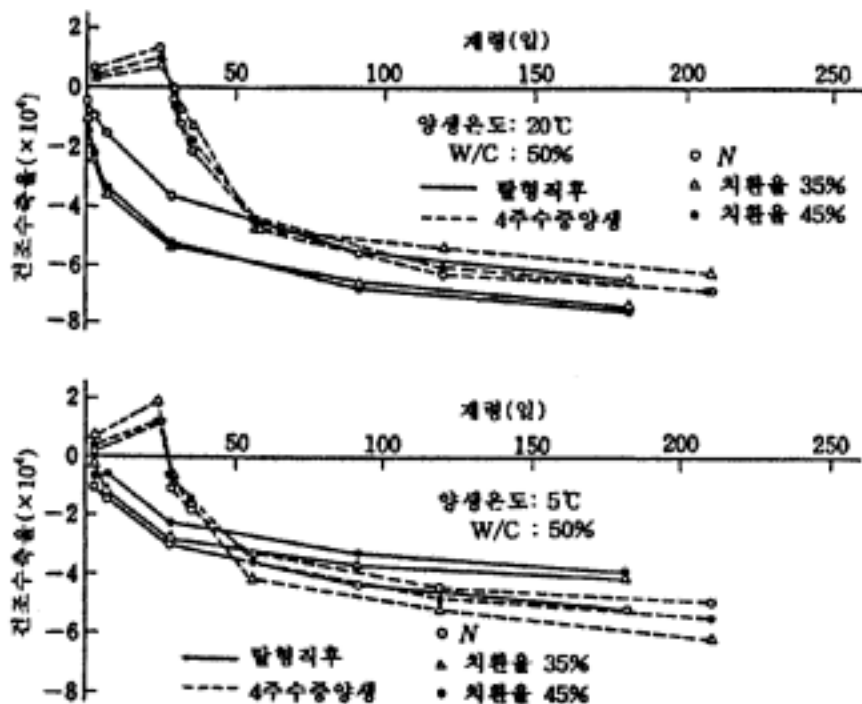
고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 크리프와 건조수축에 대해서는 아직 충분한 자료가 확보되지 못한 실정이고, 몇 가지 실험결과들도 서로 대치되는 결과를 보여주고 있다. Klieger와 Isberner 등은 슬래그 미분말의 혼입이 크리프와 건조수축에 영향을 미치지 않는 것으로 발표했으나(1962), Fulton 등에 의하면 슬래그 미분말을 혼입한 경우 크리프와 건조수축이 크게 증가하는 것으로 알려져 있다. 그림 9는 슬래그 미분말의 치환율에 따른 건조수축량을 나타낸 것이다. 슬래그의 혼입으로 인해 건조수축이 증가하는 것은 슬래그 미분말을 사용할 경우 시멘트 페이스트의 체적이 증가하기 때문인 것으로 생각된다.



<그림-9> 슬래그 미분말의 치환율에 따른 건조수축 (Hogan & Meusel, 1981)

고로슬래그 미분말 콘크리트의 건조수축은 양생기간, 양생온도 등에 의해 영향을 받는다. 탈형직후 및 5℃와 20℃에서 4주간 수중양생시킨 경우에 대하여 각각 실내와 상대습도 70%인 실내에서 방치한 경우의 건조수축율을 <그림-10>에 나타냈다. 20℃에서 수중양생한 경우 고로슬래그 미분말 콘크리트는 보통 포틀랜드시멘트 콘크리트와 동등한 값을 나타냈으며, 충분히 수중양생하지 않은 경우에는 매우 큰 값을 나타내고 있다.

또한, 수중양생기간이 길수록 건조수축량이 적었으나, 저온에서 수중양생을 실시한 경우에는 탈형직후 실내에 방치한 경우보다 오히려 건조수축율이 더 컸다. 이것은 장기간 저온에서 양생한 경우에는 수화작용의 진행이 상당히 천천히 진행되기 때문으로 수화작용에 관여하지 않은 채 남아 있던 자유수가 전조하였기 때문으로 판단된다. 또한 실내온도가 높은 쪽이 건조수축이 크다. 이상의 결과로부터 양생방법, 양생기간 등에 의해 건조수축이 영향을 받기 쉬우며, 특히 표면적이 큰 부재 등에서 기온이 높고 또한 바람이 동반되는 조건이나 극단적인 저온에서의 양생에 의해 탈수되기 쉬우며, 초기강도가 낮은 조건에서는 균열이 발생하기 쉽기 때문에 충분한 주의가 필요하다.



<그림-10> 재령과 건조수축율의 관계

6. 결론

본 소고에서는 최근들어 우리나라에서도 사용이 늘어나고 있는 고로슬래그 미분말과 이를 사용한 콘크리트의 특성을 분석하여 고찰하였다. 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 강도증진 및 내구성 증진 등 콘크리트의 품질관리에 각별한 주의를 기울여야 하며, 특히 중성화나 건조수축에 의한 피해가 우려되는 경우에는 추가적인 실험이나 사례조사 등을 통하여 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 적용성을 사전에 충분히 검토할 필요가 있다.

고로슬래그 미분말 및 이를 사용한 콘크리트는 강도증진 및 내구성 증진 등 콘크리트의 품질관리에 각별한 주의를 기울여야 하며, 특히 중성화나 건조수축에 의한 피해가 우려되는 경우에는 추가적인 실험이나 사례조사 등을 통하여 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 적용성을 사전에 충분히 검토할 필요가 있다.

고로슬래그 미분말 및 이를 사용한 콘크리트는 강도증진 및 내구성 증진 등 콘크리트의 품질관리에 각별한 주의를 기울여야 하며, 특히 중성화나 건조수축에 의한 피해가 우려되는 경우에는 추가적인 실험이나 사례조사 등을 통하여 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 적용성을 사전에 충분히 검토할 필요가 있다.

재료는 아니므로, 이에 대한 인식을 확실히 할 필요가 있으며, 일반적으로 알려져 있는 고로슬래그 미분말의 좋은점을 살리기 위해서는 고로슬래그 미분말의 사용에 있어 타설온도 및 양생온도 등 품질관리에 있어 매우 세심한 검토와 충분한 주의가 필요하다.