

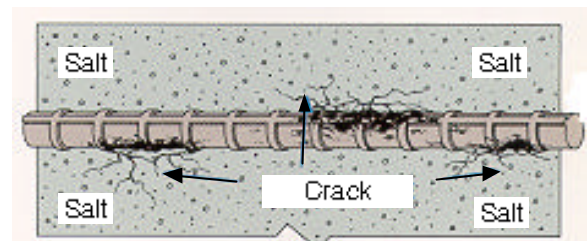
고로슬래그 미분말을 사용한 해양콘크리트의 내염성능에 관한 연구

이상수(주)대우건설 기술연구소, 선임연구원·공박
박상준(주)대우건설 기술연구소, 주임연구원·공박

1. 개 요

해상교량, 방파제 등과 같은 각종 해양구조물들은 해수와 직접적으로 접하게 되므로, 염분 침투에 따른 심각한 염해 피해가 우려된다(<그림-1> 참조). 더욱이, 대부분의 해양구조물들은 단면이 큰 토목구조물로서 콘크리트의 수화열에 기인한 균열발생도 부가되는 경우가 있다. 따라서, 이를 방지하기 위한 여러 가지 대책¹⁾이 제안되고 있는데, 그 중 하나가 잠재수경성을 갖는 고로슬래그 미분말을 사용하여 고품질의 수밀콘크리트를 제조하는 방안이라 할 수 있다. 그러나, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 실제 적용하고자 하는 구조물의 특성이나 주변의 염해 환경조건 등에 따라 적용방법이 상이함에도 불구하고, 아직까지 이에 대한 연구는 다소 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 해안이나 해안가 등에 구축되는 각종 콘크리트 구조물을 대상으로 물결 합재비 및 고로슬래그 미분말의 치환율 등을 변화시켜 수화열 저감 및 철근의 방청효과 등을 검토하였는데, 특히 철근의 방청성능을 검토함에 있어서는 실제 국내의 해수 및 토양 시료를 채취하여 조사·분석하고, 그 결과를 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트에 적용함으로써 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트를 실무에 활용하기 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.



<그림-1> 철근콘크리트 구조물의 염해 사례

2. 고로슬래그 미분말의 제조 및 반응기구

가. 고로슬래그 미분말의 제조

고로슬래그 미분말은 용광로에서 선철과정에 생성되는 용융슬래그를 물로 급냉시켜 얻은 입상의 수쇄슬래그를 건조·분쇄한 것으로서 사용목적에 따라 석고를 첨가하여 사용하기도 한다. 고로슬래그 미분말은 잠재수경성이 있으며, 그 자체로는 경화하는 성질이 미약하지만, 알칼리에 의해 경화하는 특성을 갖고 있다. 즉, 시멘트와 혼합한 경우 수산화칼슘과 석고 등에 의해 경화가

촉진되어 수화열 저감, 장기강도 향상, 수밀성 향상, 염화물 이온 침투 억제, 화학저항성 향상 및 알칼리 골재반응을 억제하는 등의 효과를 나타낸다.

고로슬래그 미분말은 용융상태의 고로슬래그에 가압수를 분사함으로써 얻어진다. 즉, 수분을 포함하고 있는 고로수쇄슬래그를 분쇄(ball mill)하기 위해서는 분쇄전에 미리 건조시켜야 하지만, 최근에는 열풍장치를 장착한 롤러밀(roller mill)을 사용하여 건조와 분쇄를 동시에 실시하여 제조한다.

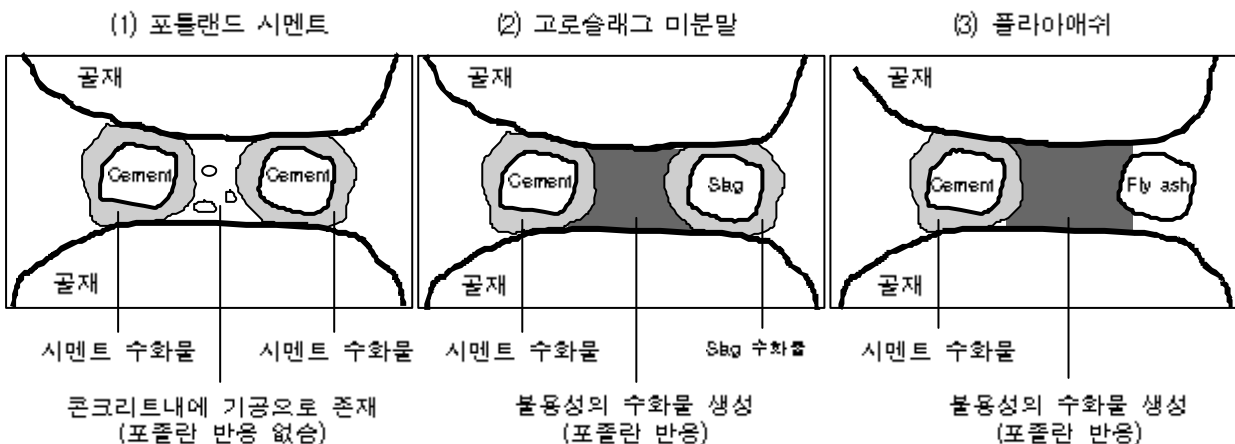
나. 화학성분 및 반응기구

<표-1>은 대표적인 고로슬래그 미분말의 화학성분, 염기도 및 유리질화율 등을 포틀랜드 시멘트와 비교하여 나타낸 것이다. 즉, 고로슬래그 미분말의 주요 화학성분으로는 SiO₂, Al₂O₃, CaO 및 MgO 등이며, 이들은 전체 성분 94~97% 정도를 차지하고 있다. 한편, 포틀랜드 시멘트의 경우 MgO의 함유율이 5%를 초과하면 유리마그네시아가 과다하게 생성되기 때문에 이상 평창을 일으키는 특성을 나타내는데, 이와는 달리 고로슬래그 미분말의 경우는 15% 정도까지 함유하고 있어도 콘크리트에 해가 없다는 연구보고도 있으며¹⁾, 일반적으로 9% 이하의 함유율을 나타낸다.

<표-1> 고로슬래그 미분말과 포틀랜드 시멘트의 주요화학성분

구분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	염기도	ig.loss	유리질화율	비중
Slag	33.1	13.8	42.4	6.1	0.29	-	0.23	0.31	0.004	1.86	0.08	99.0	2.90
PC	21.5	5.2	64.0	1.6	2.9	1.7	0.10	0.26	0.001	-	1.1	-	3.15

고로슬래그 미분말의 반응성은 일반적으로 염기도[(CaO+MgO+Al₂O₃)/SiO₂], 유리질화율, 석고 첨가량 및 분말도 등이 높을수록 반응성이 크게 되는 경향이 있다. 고로슬래그 미분말을 pH 12 이상의 수산화칼슘 용액중에 넣으면 알루미늄규산염의 연결고리(鎖狀結合)가 절단되어 수화가 진행되며, 서서히 칼슘이온(Ca²⁺)이 소비된다. 그러나, Ca(OH)₂의 공급이 중단되어 일정 농도의 알칼리량 이하가 되면, 반응은 진행되지 않는다. 즉, 슬래그가 물과 접하면 슬래그 입자의 표면에 치밀한 불투수성의 산성피막이 형성되기 때문에 강알칼리에 의해 이 피막을 파괴해야만 반응



<그림-2> 고로슬래그 미분말의 반응기구

이 지속된다. 강알칼리의 자극에 의해 슬래그 표면이 용해되면 이후, 용액으로부터 불용성의 물질이 생성되어 경화하기 시작하는데, 이 경우 슬래그는 장기적으로 슬래그 양의 10%에 상당하는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 과 결합하게 된다. 이것이 플라이애쉬와는 다른 포졸란 특성이다. (<그림-2> 참조)

고로슬래그 미분말은 사용하는 자극물질에 따라 생성되는 수화물의 종류와 양이 다소 상이하나, 어느 것이나 토버모라이트상의 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H, 표면 조성 $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_5$)을 함유한다. 한편, 에너지 분산형 X선 마이크로 분석기를 이용해서 칼슘실리케이트의 주요성분을 조사해보면, 포틀랜드 시멘트와 유사한 성분을 나타내면서 치밀하지만, 결정성은 좋지 않은 것으로 나타난다.

3. 실험계획 및 방법

가. 실험계획

고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 방청효과를 검토하기 위한 철근의 부식속진 실험의 계획은 <표-2>와 같고 콘크리트의 배합은 <표-3>과 같다. 즉, 예비실험을 통하여 선정된 3개 수준의 W/B에 대하여 고로슬래그 미분말의 치환율, 오토클레이브 반복회수 및 염화물 함유량을 실험변수로 하였다.

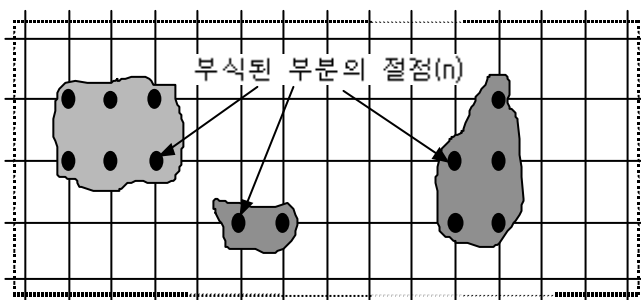
실험사항으로는, 압축강도와 철근부식속진시험을 계획된 재령에서 실시하였으며, 아울러 해양구조물의 대부분이 매시브한점 등을 고려하여 단열 온도상승시험도 실시하였다.

<표-2> 실험요인 및 수준

요인	수준		
W/B(%)	43.2	45.6	47.3
고로슬래그 미분말의 치환율(%)	50	30	15(Plain)
오토클레이브 반복회수	1, 2		2
염화물 함유량 (%Wg)	0.6, 1.2		1.2
실험항목	<ul style="list-style-type: none"> · 압축강도(7, 14, 28일 재령) · 단열온도상승시험(최고상승온도 및 상승속도) · 철근부식속진시험 		

<표-3> 콘크리트의 배합

W/B (%)	고로슬래그 미분말의 치환율(%)	Unit weight(kg/m ³)						
		W	C	SL	S	G	SP(%)	AE(%)
47.3	15	175	315	55	821	926	0.5	0.015
41.0	30	164	280	120	784	962	1.2	0.030
43.2			266	114	818	945		
45.6			252	108	844	936		
41.0	50	164	200	200	782	959	1.0	0.025
43.2			190	190	816	942		
45.6			180	180	842	934		



<그림-3> 부식속진시험용 공시체의 형상 및 부식면적을 선정방법

나. 사용재료 및 실험방법

본 실험에 사용한 재료로서 먼저, 시멘트는 비중 3.14의 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를, 고로슬래그 미분말은 전남 광양산(비중 2.91, 분말도 4,751cm³/g, 염기도 1.70)을 사용하였으며, 잔골재(비중 2.56, 조립률 2.52)는 해사와 강사가 8 : 2의 비율로 혼합된 것을, 굵은 골재는 비중이 2.59인 25mm 쇠석을 사용하였다. 고성능 감수제는 국내 D사의 제품을 사용하였다.

실험방법으로 먼저, 고로슬래그 미분말의 수화열 저감효과를 검토하기 위한 단열온도상승시험은 KS L 5121(포틀랜드 시멘트의 수화열 시험방법), 철근부식촉진시험은 <그림-3>에서와 같이 KS F 2561(부속서 2 : 콘크리트중의 철근의 부식 촉진 시험방법)에 따라 실시하였는데, 이 때 철근의 부식 면적율은 부식된 부분에 포함된 절점수(n)를 철근의 전체 도상에 포함된 전체 절점수(N)로 나누어 구하였다.

4. 실험결과 및 분석

가. 해수 및 토양 조사결과

부산광역시에서 채취한 해수와 토양을 대상으로 염화물 및 황산염 이온량을 분석한 결과 <표-4>에서와 같이 해수보다도 토양의 침출수가 다소 많은 염화물과 황산염 이온을 함유하고 있는 것으로 나타났다. 즉, 염화물 이온은 1.2~1.6%, 황산염 이온은 3,400~3,600ppm인 것으로 나타나고 있어, 콘크리트 구조물의 내구성 저하에 커다란 영향을 미칠 것으로 판단되었다.

나. 단열온도상승시험

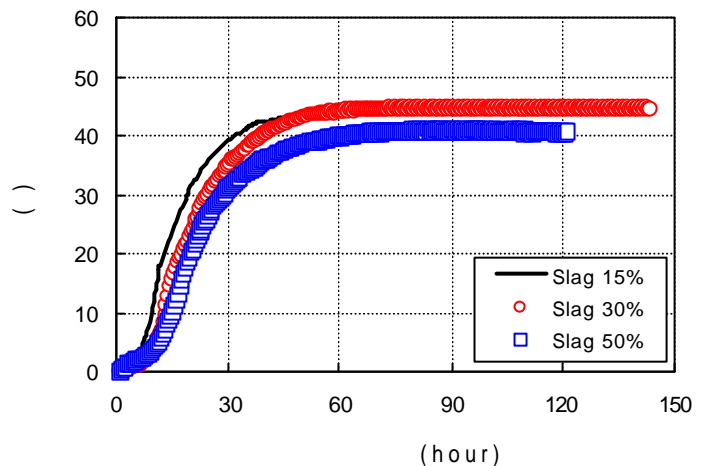
<표-5>와 <그림-4>는 고로슬래그 미분말의 치환율 변화에 따른 단열온도상승시험결과를 나타낸 것이다. 전반적으로, 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 최고상승온도(K)와 상승속도(α, β)는 낮아지는 것으로 나타났는데, 특히 고로슬래그 미분말의 치환율이 50%인 경우, 최고상승온도는 41.22°C, 상승속도는 각각 0.91과 1.801인 것으로 나타나, 수화열에 의한 온도균열발생 확률이 고로슬래그 미분말의 치환율 15%와 30%인 경우에 비해 상대적으로 매우 적은 것으로

<표-4> 해수 및 토양의 샘플링 조사결과

실험항목	해수	토양	토양 침출수
염화물 이온량 (Cl ⁻ %)	1.23	0.099	1.60
황산염(SO ₄ ²⁻)이온량 (ppm)	3,400	280	3,600

<표-5> 단열온도상승시험결과

Levels	K(°C)	α	β
SL15	44.18	1.52	1.806
SL30	44.81	1.03	1.819
SL50	41.22	0.91	1.801



<그림-4> 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 단열온도상승시험결과

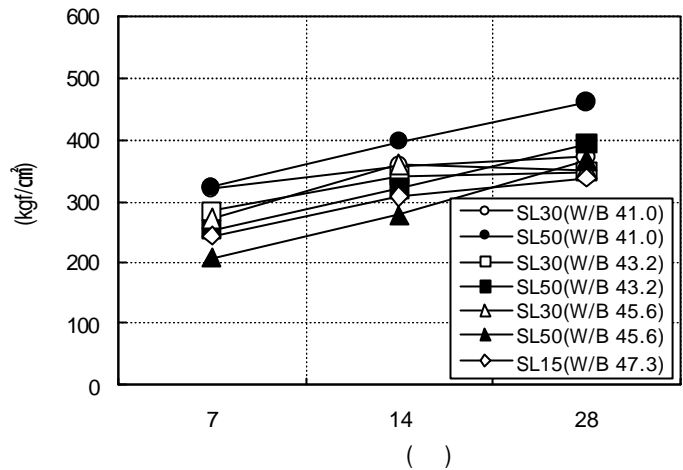
로 나타났다. 한편, 슬래그 치환율이 30%인 경우는 치환율 15%인 경우에 비해 최고상승온도가 약간 높은 것으로 나타났는데, 이는 슬래그의 반응속도가 높고 즉, 슬래그의 염기도나 유리화율 그리고, 분말도가 높은 슬래그를 사용한 경우, 슬래그의 치환율이 적은 범위에서는 오히려, 수화열이 크게 된다는 기존의 연구결과²⁾와 일치하는 결과인 것이다.

다. 압축강도

[그림 5]는 고로슬래그 미분말의 치환율 및 W/B 변화에 따른 강도특성을 각 재령별로 구분하여 나타낸 것이다.

즉, 상대적으로 고로슬래그 미분말의 치환율이 적은 15%와 30%의 경우, 슬래그 치환율이 50%인 경우에 비해 재령 14일까지의 조기강도는 높고 28일 재령에서는 다소 완만한 것으로 나타난 반면, 고로슬래그 미분말의 치환율이 50%인 경우는 조기강도가 낮고, 28일 재령에서는 높은 강도발현특성을 나타내고 있었다. 특히, W/B 41.0%인 경우는 재령 28일에서 동일 W/B의 치환율 30%에 비해 85kgf/cm² 이상 높은 강도를 발현하고 있었다.

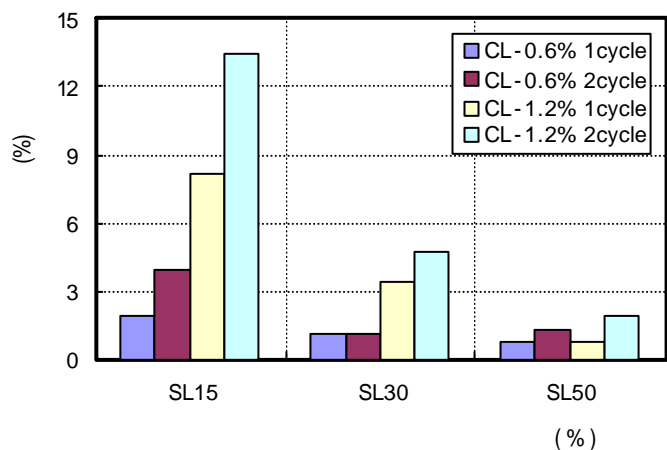
이러한 결과는 기존연구에서도 보고된 바와 같이, 고로슬래그 미분말의 잠재수경성에 기인하여, 상대적으로 낮은 pH를 나타내는 조기재령의 콘크리트가 단위시멘트량이 많은 다른 경우에 비해 수화반응속도 측면에서는 불리하나, 장기재령으로 갈수록 수산화칼슘 [Ca(OH)₂]과의 지속적인 반응에 기인하여 강도가 크게 증진된 것으로 분석된다. 따라서, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트를 실제 구조물에 활용하고자 할 경우에는 타설 후, 초기재령에서의 세심한 양생관리가 요구된다.



<그림-5> 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 압축강도 특성

<표-6> 철근부식촉진시험결과

고로슬래그 치환율(%)	W/B (%)	C ₁ (%)	Autoclave 반복횟수	철근부식면적율(%)
15	47.3	0.6	1	1.9
			2	4.0
		1.2	1	8.1
			2	13.4
30	45.6	0.6	1	1.1
			2	1.2
		1.2	1	3.4
			2	4.7
50	43.2	0.6	1	0.8
			2	1.3
		1.2	1	0.9
			2	1.9



<그림-6> 고로슬래그 미분말의 치환율 및 오토클레이브 반복횟수에 따른 부식면적율 측정결과

라. 철근부식촉진시험

<표-6>과 <그림-6>은 고로슬래그 미분말의 치환율 변화에 따른 철근부식촉진시험결과를 염화물 함유량 및 오토클레이브 반복회수별로 구분하여 나타낸 것이다. 전반적으로 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 철근의 부식면적율은 감소하는 것으로 나타났으나, 염화물 함유량 및 오토클레이브의 반복회수가 증가할수록 부식면적율은 증가하는 것으로 나타났다.

세부적으로는 염화물(Cl⁻) 함유량이 1.2%이고, 오토클레이브 반복회수가 2회이면서 고로슬래그 미분말을 각각 30%와 50%로 치환한 경우, 방청율이 각각 95.3%와 98.1%인 것으로 나타남으로서, 치환율 15%의 방청율 86.6%에 비해 매우 우수한 방청효과가 있는 것으로 나타났다.

이러한 고로슬래그 미분말(치환율 30%와 50%)의 방청효과는 철근 콘크리트용 방청제의 관련 표준인 방청율 95%이상을 모두 만족하고 있는 결과이다. 즉, 철근의 부식방지를 목적으로, 현행 대부분의 해양구조물에 사용되고 있는 고가의 방청제와 비교해 볼 때 거의 유사한 방청성능을 나타내고 있음을 나타내고 있어, 경제적 측면에서도 매우 효과적인 것임을 시사하고 있었다.

5. 결 론

철근콘크리트 구조물의 염해방지를 목적으로 고로슬래그 미분말의 치환율 변화에 따른 수화열, 압축강도 및 철근의 방청성능 등을 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 슬래그의 치환율이 증가할수록 콘크리트의 최고상승온도(K)와 상승속도(α, β)는 낮아지는 것으로 나타났는데, 특히 치환율 50%의 경우가 치환율 15%와 30%에 비해 수화열에 의한 온도 균열발생 확률이 가장 적은 것으로 평가되었다.
- 2) 압축강도는 슬래그의 치환율이 증가할수록 슬래그의 잠재수경성에 기인하여 동일 W/B인 조건에서 조기강도는 낮으나, 28일 재령에서는 오히려 크게 상회하는 것으로 나타났다.
- 3) 철근의 부식면적은 슬래그의 치환율이 증가할수록 감소하고, 염화물 함유량 및 오토클레이브 반복회수가 증가할수록 증가하였다. 그러나, 슬래그의 치환율이 50%인 경우는 방청율이 98.1%인 것으로 나타나, KS F 2561의 방청기준 95%를 만족하는 것으로 나타났다.