技術情報

콘크리트에서 슬래그 시멘트의 효과

吳 炳 煥
〈서울大學校 工學科學 土木工學科敎授〉

목 차

1. 서 론
2. 슬래그 시멘트의 필요성
3. 슬래그 시멘트콘크리트의 워커빌리티
4. 슬래그 시멘트콘크리트의 양생
5. 슬래그 시멘트의 온도 효과
6. 슬래그 시멘트의 치밀성 및 화학적 저항성
7. 슬래그 시멘트콘크리트의 동결융해 저항성
8. 결 론

1. 서 론

스웨덴 산업의 선구자인 K. Nicolin은 "종래보다 25% 정도의 비용감소와 품질 향상이 있어야 신 상품의 개발이 성공했다고 볼 수 있다."라고 말한 바 있는데 이 표현이 맞는다면 고로 슬래그(이하 슬래그)는 앞으로의 레미콘 산업 기술발전에 큰 역활을 할 것이다.

일반적으로 콘크리트의 "상품개발 수명"은 앞서 Nicolin이 상정한 전자제품 개발 수명보다는 "장기적"이라고 생각되어 왔으나 근래에 들어서 콘크리트 산업 특유의 "장기개발 수명"이 점차 짧아지고 개발 가능한 기술이 아직 실용화되지 못하고 있으므로 그 기술개발 현황을 요약하여 제시하는 것도 의미있는 일이라 할 수 있다.

본 소고에서는 슬래그시멘트를 콘크리트에 사용함으로서 얻어지는 잇점과 특징들을 요약하여 설명하고자 한다. 이러한 슬래그시멘트의 개발은 콘크리트 재료의 새로운 개발을 위한 좋은 가능성을 제시하여 주고 있기 때문이다.

2. 슬래그 시멘트의 필요성

콘크리트에 있어서 슬래그 시멘트 사용은 여로모로 유용하다. 레미콘 공급자의 입장에서 보면 강도저하없이 콘크리트의 워커빌리티를 증가시킬 수 있다면 시멘트의 사용량도 줄일 수 있을 것이고 따라서 이는 구미 당기는 제안

일 수 있는 것이다.

슬래그 시멘트 사용시 다음과 같은 잇점이 있다.

- 콘크리트 양생시 수화열 발생을 조절할 수 있다.
- 순수하게 포틀랜트 시멘트를 사용했을 때보다 더 큰 밀도를 얻을 수 있으며 강도와 화학적 저항성을 증진시킨다.
- 양생시 알칼리 성분을 조정하여 알카리－골재 반응을 억제할 수 있다.
  - ○ 고 알칼리 시멘트 사용이 가능하다.
  - ○ 알카리 반응 골재를 제한없이 사용할 수 있다.

이러한 잇점은 레미콘 회사는 물론 사용자들에게도 대단히 유리하며 또, 이를 통해 건설비용과 유지비를 절감할 수 있다. 또한 부수적으로 에너지 절감을 꾀할 수 있고 산업 부산물인 슬래그를 재 활용함으로써 시멘트 및 골재 자원의 재 활용 역시 촉진시켜 크게 보면 사회 전반의 자원활용에도 큰 도움이 된다. 슬래그 시멘트 사용은 이러한 실질적인 잇점이 있지만 "구워진 비둘기가 날아들지는 않는다."는 덴마크 속담처럼 기술개발없이는 시장을 확대할 수 없다. 따라서 매년 개최되는 NRMCA (National Ready Concrete Association)는 이러한 기술개발을 통해 콘크리트의 시장을 확대하는데 그 목적이 있다.

3. 슬래그 시멘트콘크리트의 워커빌리티

다년간 각 국에서 수행된 슬래그 시멘트에 대한 연구는 그 잇점을 다음과 같이 제시하고 있다.

- 굳지 않은 콘크리트의 워커빌리티가 좋다. 이를 통해 공정의 질을 향상시킬 수 있다.
- 화학적 저항성이 우수한 것으로 알려져 있는데 이는 유럽의 해양구조물에서 그 예를 찾아 볼 수 있다.

1980년 "Performance of Concrete"를 주제로 개최된 ACI심포지움에서 프랑스 연구원 M. Regourd는 다음과 같은 연구결과를 발표한 바 있다.

"장기간의 재령을 통해 실험한 결과 상당량의 슬래그를 첨가하여 콘크리트를 시공한 경우 해양 환경에 대한 저항성이 대단히 우수하다."

일반적으로 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트보다 슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트가 상대적으로 초기 강도증진이 느리게 나타나는 것으로 보고 있는데 이는 슬래그 시멘트 사용상 피하기 어려운 단점으로 지적되고 있다.

오랫동안 유럽에서 사용되어온 슬래그 활용 방안은 슬래그와 포틀랜드 시멘트를 섞어서 투입하는 것인데 일본이나 남 아프리카에서는 슬래그를 따로 첨가하는 방안을 채택하고 있고 몇 몇 유럽국가들에서도 이 방법을 쓰고 있다.

노로터 녹아 있는 슬래그를 꺼낸 후 즉시 물로 빠르게 냉각시키면 슬래그는 과립상의 고체로되고 결정체 성질의 물질이라기보다는 유리성질의 물질이 되는데 이 경우 딴 방법에 비해 좀 더 나은 슬래그를 얻을 수 있다.

과립형 슬래그의 분쇄는 입자의 유리성상 구조(Glass-Fragmentary Structure)를 유지시켜 표면조직을 부드럽게 해주고 패각상(Conchoidal)의 파괴 형상을 보여 준다. 슬래그의 분쇄는 포틀랜드 시멘트 클링커의 분쇄보다 더 힘들기 때문에 이들을 함께 섞어 분쇄할 경우 시멘트 입자를 과도하게 분쇄하게 되고 따라서, 재료의 입도가 틀려지므로 분리해서 분쇄하는 것이 바람직하다. 이럴 경우 결국 시멘트 분쇄에 드는 에너지가 절약되는 셈이 되고 이 저장된 에너지로 슬래그를 더 곱게 갈아낼 수 있어 반응률을 향상시킬 수 있다.

그림 1은 조립률 5000㎠/g까지 분쇄한 슬래그 입자의 모양을 나타내고 있다. 그림 2는 조립률 3800㎠/g의 포틀랜드 시멘트와의 비교를 나타낸 것인데 슬래그 시멘트를 포틀랜

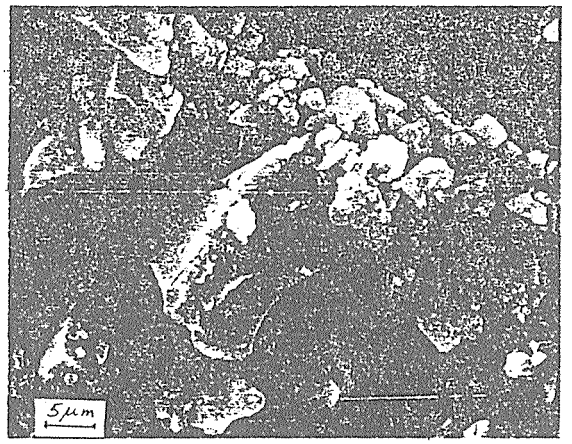

그림 1. 조립률 5000cm²/g의 쇄석 슬래그 시멘트 입자의 모양
(1600배 확대 전자현미경 사진)

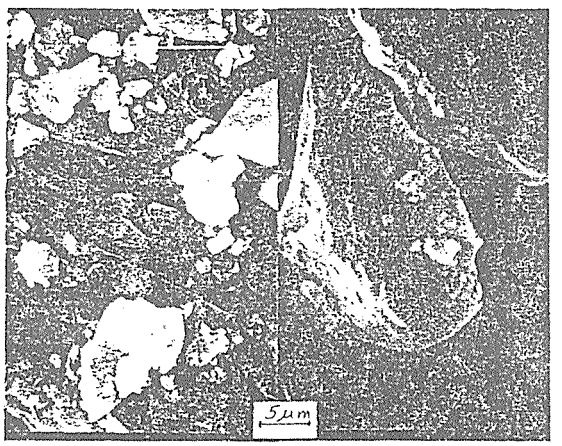

그림 2. 조립률 3800cm²/g의 포틀랜드 시멘트 입자의 모양
(1600배 확대 전자현미경 사진)

랜드 시멘트에 대해 40%이상 대체했을때 콘크리트의 워커빌리티를 증가시킴을 알 수 있다. 펜실베니아 주립대의 White와 Roy의 연구에 의하면 상호 연관된 표면-화학적 요소는 워커빌리티 증진에 크게 기여하는 것으로 알려졌다.

실제 경험에 의하면 슬래그 시멘트의 사용은 워커빌리티를 현저하게 증가시켜 주며 콘크리트의 사용수량을 감소시켜 단위시멘트량의 감소를 가져온다. 또한 굳지 않은 콘크리트에서 응집력이 좋아지고 운반성이 향상되어 재료분리나 블리딩없이 타설할 수 있다.

사실, 원하는 워커빌리티를 만족스럽게 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 기술자의 경험에 의존할 수 밖에 없고 현재 이것보다 더 좋은 방법은 없을지 모른다. 따라서 이러한 주제에 대해서도 더 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

최근, 유럽 표준화 위원회(European Committee for Standardization) CEN에서는 다음과 같은 실험을 하여 결과를 발표하였다. 이 실험에서는 최대골재치수 16㎜, 슬럼프 80±10㎜를 두고 슬래그를 53/47로 배합한 시멘트 콘크리트와 순수한 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 워커빌리티를 비교하였는데 이때의 단위 수량은 각각 199 1/m³(포틀랜드 시멘트), 186 1/m³(슬래그 시멘트)으로 두었고 각 경우 공히 결합재의 양은 300 KG/M³으로 두었다. 실험 결과, 슬래그를 분리해서 분쇄할 경우(분말도 5~5500) 단위수량이 상당히 줄어들고 유동화제를 첨가할 경우 역시 운반이나 타설에 영향을 주지 않으면서 단위수량을 더욱 줄일 수 있는 것으로 알려졌다.

4. 슬래그 콘크리트의 양생

콘크리트 제품의 품질의 최종적인 확인 수단으로 굳지 않은 콘크리트와 경화한 콘크리트의 특성을 드는 것이 일반적이다.

슬래그 시멘트뿐만 아니라 다른 콘크리트 재료의 효과 역시 양생에 의하여 나타나게 된다. 따라서 어떤 콘크리트든지 초기의 양생기간이 가장 중요하다. 그림 3은 30-50년전과 현재의 콘크리트 양생 온도 변화를 나타낸 것이다. 최근 개발된 조립식 중기양생을 포함하여 더운 지방에서는 단위 시멘트량 350kg/m³이상을 사용한 해양 플랫폼, 댐, 냉각탑 등의 콘크리트는 중기 양생을 실시한다.

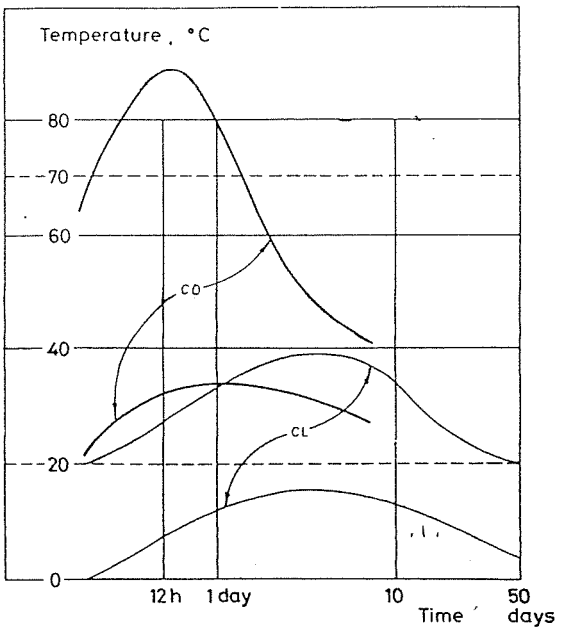

그림 3. 양생에 따른 콘크리트의 온도변화(CL : Classical Concrete, CO : Contemporary Concrete)

그림 3에서 알 수 있듯이 '고전적'인 의미의 콘크리트 경화시간은 적어도 7－14일이 필요하지만 최근에는 초기 10－24 시간내에 강도나 밀도등의 제 성능을 발휘할 수 있게 한다.

지금까지는 20℃의 표준 실온 양생이 실제의 운용상에서도 잘 맞는 것으로 간주되어 왔으나 현재에 이르러서는 좀 더 높은 양생온도가 합리적이라는 견해가 대두되고 있다. 이러한 관점에서 볼 때, 기존의 표준 실온 양생은 사실, "실온 증후군"이라고까지 표현할 수 있는데 이는 콘크리트에 균열을 유발하는 초기 온도 응력을 무시함으로써 콘크리트에 열화를 초래할 가능성이 있는 것이다.

그림 4는 양생온도에 따른 강도의 상대적인 증진을 나타낸 것으로 양생온도 20℃에 비해 양생온도 80℃의 경우 약 10배 가량 빨리 경화함을 알 수 있다. 이같은 경화시간의 단축은 공학적 견지에서 볼 때 대단히 유리하지만 자칫하면 값 비싼 댓가를 치를 수 있는데 70℃ 이상에서 경화시킨 시멘트 풀은 공극이 형성되고 상온에 비해 콘크리트의 온도가 높을 경우 온도응력으로 인한 균열발생확률이 높다는 것이다. 슬래그 시멘트를 사용할 경우 이러한 현상을 상당부분 줄일 수 있고 이것이 슬래그에 의한 성능 개선 효과중 가장 크다고 할 수 있다.

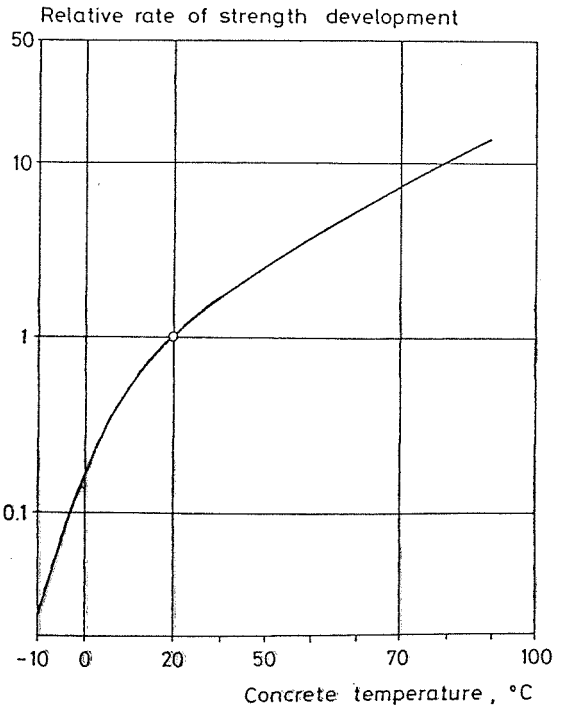

그림 4. 양생온도에 따른 상대적 강도증진 변화

그림 5는 포틀랜드 시멘트의 일부분을 슬래그 시멘트(75%)와 플라이 애쉬 시멘트(43%)로 대체했을 때 양생시의 콘크리트 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 슬래그 시멘트와 플라이 애쉬 시멘트를 사용하면 콘크리트의 최대 발열량을 낮출 수 있다. 왜냐하면 포틀랜드 시멘트와 슬래그 시멘트를 혼합하여 사용한 경우 포틀랜드 시멘트는 경화 초기에 많은 열을 발산하고 슬래그 시멘트는 다시 이 열로 콘크리트를 경화시킴으로써 온도 증가가 완화되기 때문이다. 다시말하면 포틀랜드 시멘트의 경화열이 슬래그 시멘트의

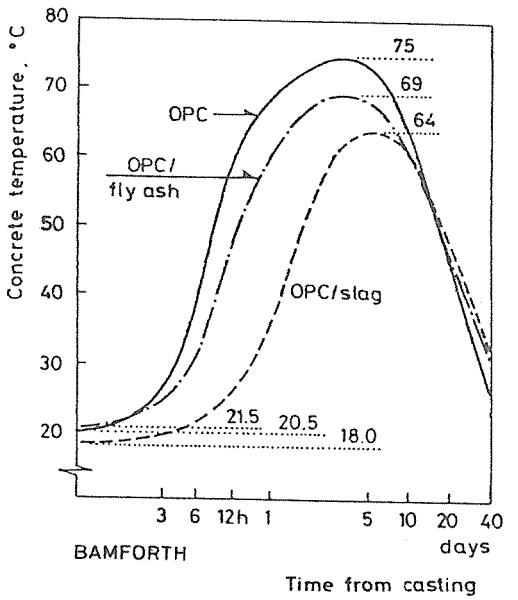

그림 5. 슬래그 및 플라이 애쉬 대체 콘크리트의 온도 변화 (플라이애쉬 43%, 슬래그 75%)

양생을 활성화시키는 역활을 한다. 이러한 과정을 통해 콘크리트는 적정 양생온도를 얻게 되고 따라서 극한강도 역시 증가하고 더욱 수밀한 콘크리트를 얻게 된다.

그림 6은 슬래그 시멘트 대체량에 따른 압축강도의 변화로서 재령 3-7일이 경과한 후에는 슬래그 시멘트를 대체한 모르타르 강도가 포틀랜드 시멘트만을 사용한 모르타르 강도를 상회하는 것으로 나타났다. 사실, 실온 양생을 한후 강도증진을 측정하였기 때문에 위 결과가 전적으로 다 맞지는 않을수도 있다. 그러나 실제로 콘크리트는 실온보다 높은 온도에서 양생되는 경우가 대부분이므로 표준 실험에서 보다는 초기에 강도가 발현될 수 있다.

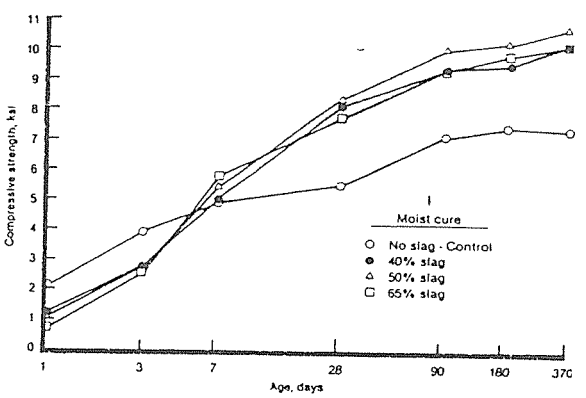

그림 6. 슬래그 시멘트 대체량에 따른 압축강도 변화

5. 슬래그 시멘트의 온도효과

"실온 증후군"은 필연적으로 슬래그 시멘트 콘크리트의 초기강도증진을 완만하게 하는데 이는 실온 양생시 콘크리트 양생온도가 일정하

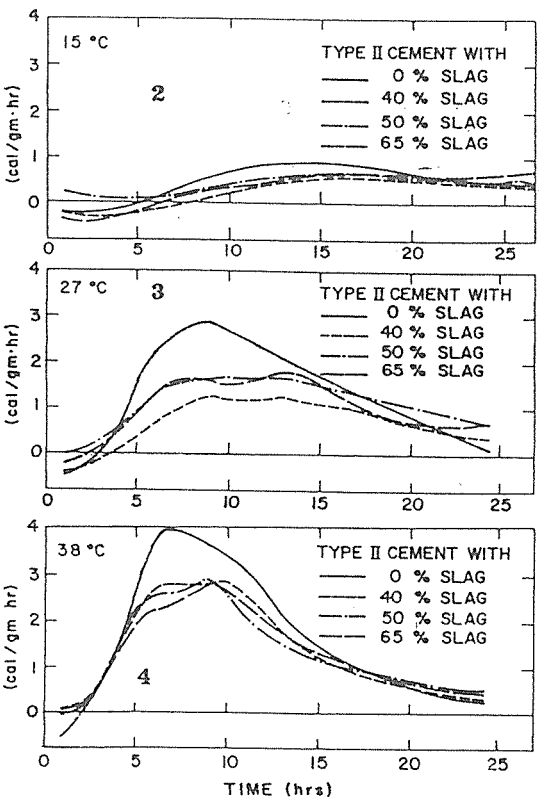

그림 7. 양생온도 15℃, 27℃, 38℃에서의 슬래그 시멘트 대체량에 따른 열량의 변화

고 또, 이 온도가 전반적으로 낮기 때문에 포틀랜드 시멘트에 의한 수화를 지속적으로 지연시키기 때문이다.

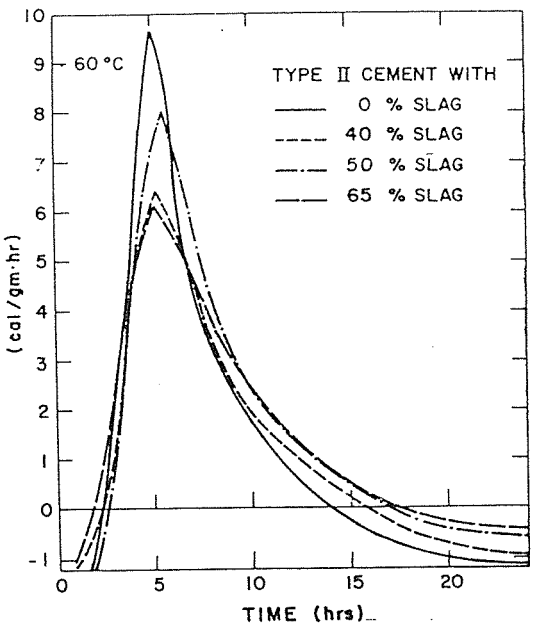

그림 8. 양생온도 60℃에서의 슬래그 시멘트 대체량에 따른 열량의 변화

그림 7, 8은 슬래그 시멘트 대체량에 따른 각각 다른 온도의 양생에서 열량의 변화를 나타낸 것으로 양생온도가 높아질수록 슬래그 시멘트가 활성화되는 것을 관찰 할 수 있다.

그림 9는 슬래그 시멘트 활성화에 대한 온도의 영향을 더욱 명백히 보여주고 있는데 50 % 대체 슬래그 시멘트는 60℃의 양생시 약 7시간이후 열 발산량이 순수 포틀랜드 시멘트보다 더 높게 나타나는데 이는 급격한 강도증진을 나타내는 실험 결과와 일치한다. 27℃의 양생시에는 슬래그 시멘트의 활성화가 더 느리게 나타난다.

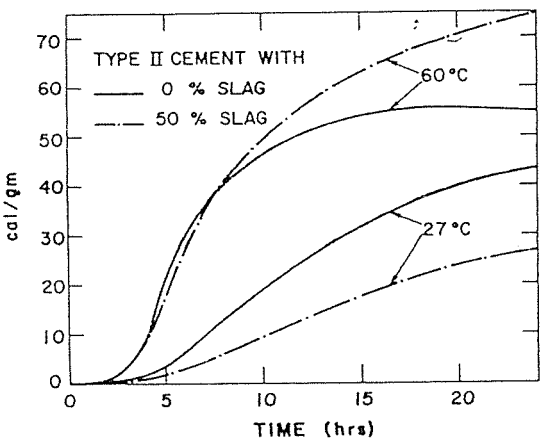

그림 9. 양생온도 27℃, 60℃에서의 슬래그 시멘트 대체량에 따른 누적열량의 변화

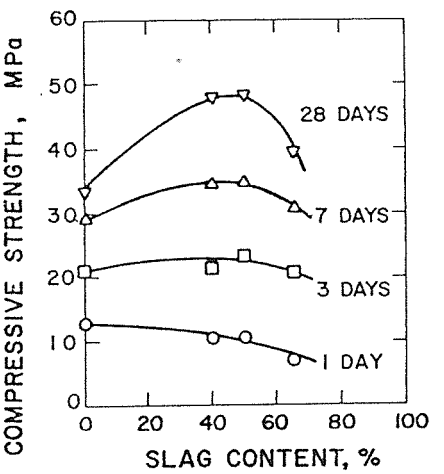

그림 10. 슬래그 시멘트 대체량에 따른 측정일에서의 압축강도 변화

그림 10은 실온 양생시 슬래그 시멘트 대체량에 따른 압축강도 변화로서 포틀랜드 시멘트와 슬래그 시멘트를 각각 50%씩 혼합한 경우가 최적임을 알 수 있다. 현장의 콘크리트에서와 같은 실제의 양생온도에서는 1일 또는 3

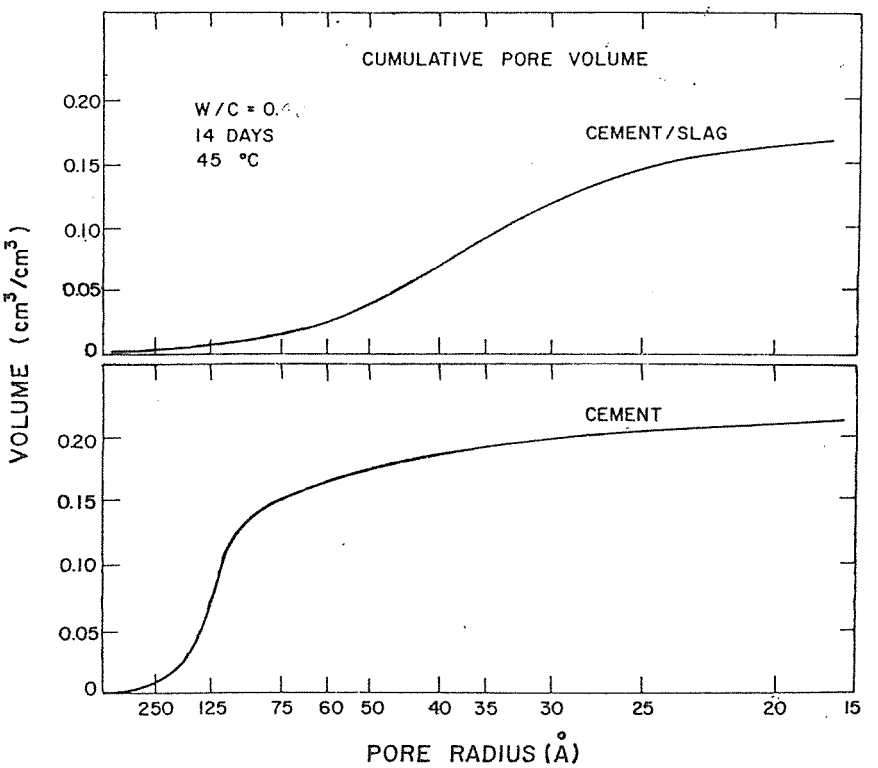

그림 11. 슬래그 시멘트 대체량에 따른 누적 공극체적의 변화

일의 압축강도보다도 더 높게 나타날 것이다.

6. 슬래그 시멘트의 치밀성 및 화학적 저항성

지금까지 굳지 않은 콘크리트와 경화도중의 콘크리트에 대해 슬래그 시멘트의 효과를 살펴보았는데 지금부터 경화 콘크리트에 미치는 슬래그 시멘트의 효과에 대해 고찰해 보기로 한다.

그림 11은 슬래그 시멘트가 순수한 포틀랜드 시멘트보다 더 미세한 공극구조로 되어 있다는 것을 보여주고 있다. 이것은 Smolczyk 이나 그 밖의 다른 사람들에 의해 일찌기 발견된 바 있는데 Baker는 포틀랜드 시멘트에 비하여 슬래그시멘트에서 나트륨, 칼륨, 염화물 이온들의 확산(Diffusivity)이 20배 가량 느리게 진행되고 슬래그 시멘트에서의 수분 이동은 일정한 경화시간이 지난 후에 실제로 정지하게 되며 알칼리 실리카 반응에 대한 억제효과는 알카리의 확산이 낮다는 효과와 투수성(Permeability)이 아주 낮다는 효과가 결합하여 나타난 결과라 할 수 있다.

Roy와 Idorn은 슬래그와 알카리의 초기반응과 시멘트풀에서의 알칼리－실리카 상호수화작용은 따로 분리하여 생각할 수 없는 중요한 변수임을 알아냈다. 슬래그가 혼합된 시멘트에서 양생온도가 더 높아지거나 시멘트의 알카리 성분이 더 많아질수록 알카리의 활성화가 현저해 진다. 따라서 슬래그를 함께 사용

할 경우 알카리는 혼합시멘트의 초기 수화작용을 활성화시키고 경화된 구조물의 밀도를 높게 해 준다. 따라서, 알칼리성분이 시멘트 풀속으로 흡수되며 차후의 해로운 반응을 위해 이용될 수 없는 상태로 된다.

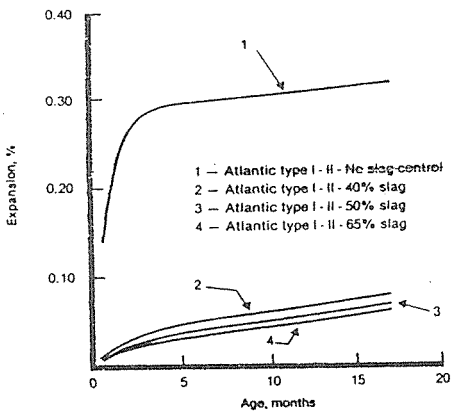

그림 12. 슬래그 시멘트 대체량에 따른 알칼리 골재 반응의 변화

그림 12는 Hogan과 Meusel이 수행한 실험을 도시한 것인데 ASTM C 227－81 모르타르봉 실험 방법에 의해 측정한 슬래그 시멘트 대체에 따른 알카리－골재 반응의 변화를 나타낸 것이다. 실제 콘크리에서 알카리－실리카 반응을 억제하는 슬래그의 효과는 표준실험(Standard Testing)에 의해 측정되어지는 것보다 더욱 큰 데 이는 표준실험 과정이 슬래그의 열효과(Thermal Activation)와 그에 관련된 몇 몇 유용한 對 알카리 초기 반응을 생략했기 때문이다.

Lesniak, Thaulow, Roy, Idorn의 그림 13은 강한 마그네슘－나트륨 황산염 용액안에 9개월 동안 저장된 ASTM 모르타르 봉의 단면을 보여주고 있다. 가장 바깥쪽 0.5－1.0㎜층은 완전히 파괴되고 안쪽의 나머지 모르타르가 서로 엉켜 석고상태를 형성하지만 내부의 모르타르는 전혀 손상을 받지 않아 조밀하며

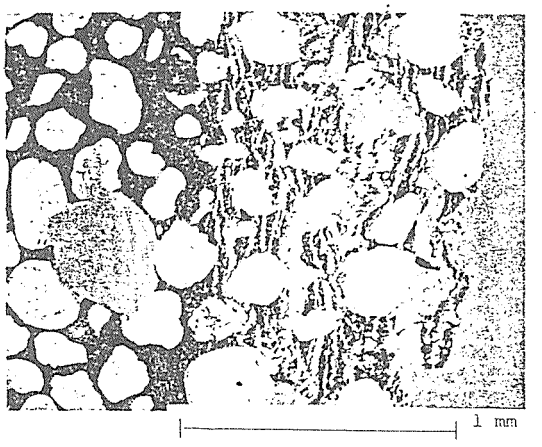

그림 13. 강 황산마그네슘 용액에 저장된 모르타르 보의 단면

약간의 수산화칼슘염이 생성된다. 이것은 해로운 용액이 관입되지 않을만큼 슬래그의 입자들이 완전히 수화되기 때문이다.

유사한 상황에 있는 좀 더 큰 콘크리트구체를 생각해 보면 가장 바깥쪽 0.5－1.0㎜는 경화된 풀이 조밀하기 때문에 화학적 용액의 침투에 대해 효과적인 방어막(Defense Barrier)으로 작용한다. 표면층의 악화 상태에 대한 모르타르 보의 저항성은 같은 상황에서의 콘크리트보다 작다. 더구나 실험에 사용된 용액은 자연 상태의 황산액보다 훨씬 더 농밀하고 모

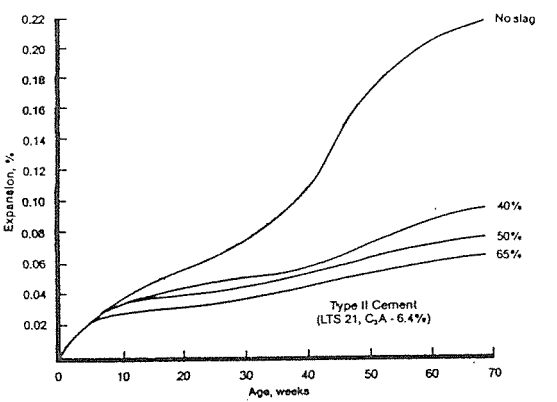

그림 14. 슬래그 시멘트 대체량에 따른 모르타르 보의 황산 저항성.(Wolochow Test Method)

르타르는 실온에서 양생되었기 때문에 상대적으로 높은 온도에서의 슬래그 수화작용에 의한 수밀성증가는 무시되어 있다.

Hogan, Meusel의 그림 14는 Wolochow 시험에 의한 슬래그 시멘트 모르타르 봉의 황산 저항성을 보여주는 것으로 이실험 방법은 슬래그 모르타르 고유의 장점을 무시한 것이지만 이 경우에도 포틀랜드 시멘트보다 황산 저항성이 우수함을 보여준다.

7. 슬래그 시멘트의 동결융해 저항성

슬래그 시멘트의 사용은 콘크리트의 동결융해 저항성을 증가시켜 준다. 이것은 슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트가 순수 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리경우보다 공극률과 투수성이 낮고 공극의 크기가 작기 때문이다. 원칙적으로 슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트가 포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트와 같은 정도의 동결융해 저항성을 얻기 위해서는 포틀랜드 시멘트 콘크리트에서와 같은 기포나 전체적으로 많은 공기량이 필요하지 않음을 의미한다. 또한 슬래그 시멘트 콘크리트는 외부로부터 물과 염화이온을 적게 흡수하는 경향이 있어 공기 첨가제가 없는 경우에도 동결융해에 대한 저항성이 더 높다.

8. 결 론

본 소고에서는 슬래그시멘트를 포틀랜드 시멘트와 혼합하여 사용한 콘크리트에 대한 제반 특성과 장점을 조사분석하였다.

결론적으로 슬래그 시멘트와 포틀랜드 시멘트의 혼합에 의해 얻어지는 일반적인 장점은 다음과 같다.

- 경화된 시멘트풀이 조밀하고 상대적으로 공극이 작아도 우수한 동결융해 저항성을 보이며 공기연행 특성이 포틀랜드 시멘트에 비해 더 좋은 편이다.
- 알칼리는 슬래그의 수화작용을 활성화시켜 시멘트풀을 조밀하게 한다.
- 알칼리 성분이 많은 포틀랜드 시멘트는 슬래그 시멘트의 혼합으로 알칼리－골재 반응을 효과적으로 방지할 수 있으며 또한 알카리 성분을 포함한 골재도 제한없이 사용할 수 있다.
- 시멘트풀의 낮은 투수성과 확산으로 황산이나 염화물의 침투에 저항성이 높다.
- 슬래그 시멘트는 포틀랜드 시멘트의 수화작용으로 인해 생성된 수산화칼슘을 이용하여 장기 강도를 증진시키며 치밀성을 높게 해준다.
- 슬래그 시멘트 입자는 포틀랜드 시멘트 입자의 수화작용에 의해 발생되는 열을 자신의 초기 수화작용에 이용한다. 따라서 슬래그는 초기 양생동안의 최고 발열량을 저감시킨다.
- 슬래그 시멘트는 굳지 않은 콘크리트의 워커빌리티를 증가시켜 강도의 손실없이 물－시멘트비를 줄일 수 있다.

이러한 일련의 장점들은 균질하고 품질이 좋은 슬래그 시멘트와 포틀랜드 시멘트가 약 40/60에서 60/40까지의 비율로 혼합된 경우에 대한 결과이며 또한 슬래그 시멘트의 분말도는 약 5000－5500cm^2/g이고 포틀랜드 시멘트는 약 3800cm^2/g인 경우에 대한 결과들이다.

본 연구에서는 슬래그 시멘트의 순수 특성을 알아 보기 위해 유동화제와 같은 화학적 혼화재료의 사용 및 더운 지방의 노출 상태에 대해서는 고려하지 않았다. 따라서, 앞으로 이들과 같은 경우의 계속적인 연구 개발이 필요하다. 전술한 바와 같이 슬래그 시멘트는 위커빌리티증가, 장기강도증가, 화학저항성 증가 등 상당히 바람직한면을 가지고 있어 앞으로 그 이용이 기대되고 있다.