

# 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트의 내구특성

## Durability of Concrete Using Blast Furnace Slag Powder



신경수\*  
Kyoung-Su Shin



이보경\*  
Bo-Kyeong Lee



김규용\*\*  
Gyu-Yong Kim

### 1. 서언

최근, CO<sub>2</sub> 배출량은 그림 1과 같이 지속적으로 증가하고 있어 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 움직임이 활발하게 진행되고 있다. CO<sub>2</sub> 배출량의 약 8%는 시멘트 제조 분야에서 발생되고 있어, 시멘트 생산시 고온(약 1450°C)상태에서 탈탄산 반응에 의해 (CaCO<sub>3</sub>→CaO+CO<sub>2</sub>) 제조시 시멘트 1톤당 약 0.7~1.0톤의 CO<sub>2</sub>를 배출하는 등 상당히 심각한 수준이다. 그러나 전 세계적으로 시멘트 사용량은 그림 2에 나타난 바와 같이 21세기 초까지 매년 2.5~5.8% 정도의 증가가 예상되며, 2030년에는 1960만톤의 시멘트를 만들기 위해 연간 약 800만톤의 시멘트 대체 물질이 필요한 실정이므로 CO<sub>2</sub>의 배출이 적은 시멘트의 개발이 필요하다.<sup>1)</sup>

이러한 문제점을 해결하고자 시멘트 대체재로서 산업부산물인 고로슬래그가 사용되고 있다. 고로슬래그 미분말은 선철의 제련시에 발생하는 부산물로서 고온용융상태의 고로슬래그를 살수 및 급랭을 통해 유리화한 고로수쇄슬래그를 건조 및 분쇄하여 제조한 것으로 반응성이 높아 고로시멘트용 슬래그나 시멘트·콘크리트용 혼화재료 등 시

\* 충남대학교 일반대학원 건축공학과

Chungnam National University

E-mail : sks82@cnu.ac.kr

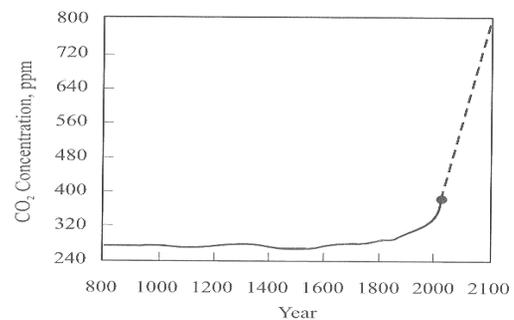
\*\* 충남대학교 공과대학 건축공학과 교수

Chungnam National University

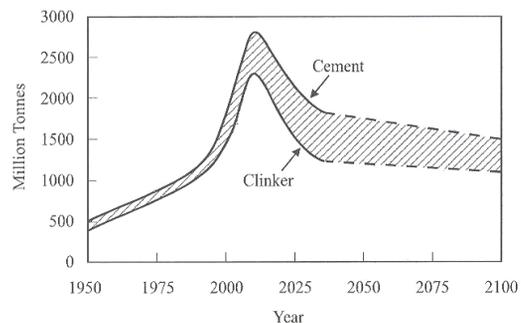
E-mail : gyuyongkim@cnu.ac.kr

멘트 대체재로서 사용량이 증가하고 있다.<sup>2)</sup>

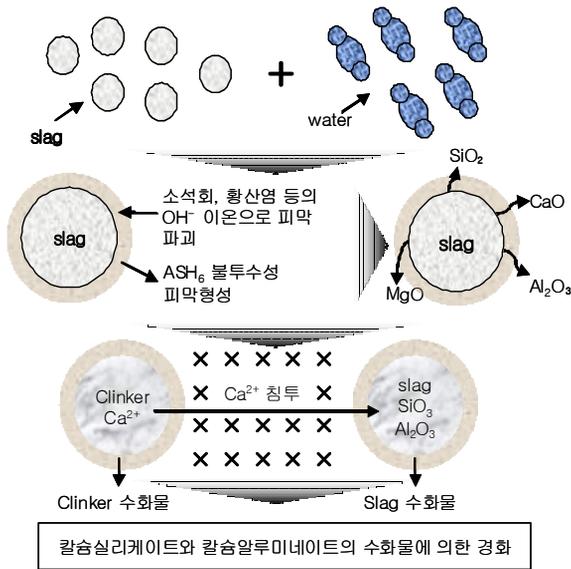
특히, 고로슬래그를 대량 치환한 콘크리트는 수화온도 저감, 수밀성 향상 및 동결융해, 철근부식, 화학적 저항성 등에 대해 우수한 효과가 있어 해양환경에 적용되는 콘크리트에 혼화재료를 혼입함으로써 내구성능이 개선되고 있음을 V.M. Malhotra 연구를 통해서 확인할 수 있다.<sup>3)</sup>



[그림 1] IPCC 보고서의 의한 과거와 현재의 대기 CO<sub>2</sub><sup>4)</sup>



[그림 2] 로드맵에 따른 시멘트와 클링커의 요구사항 예측<sup>4)</sup>



[그림 3] 고로슬래그 미분말의 수화반응

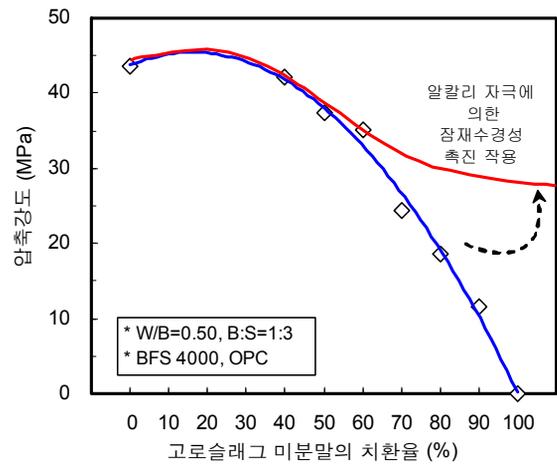
이에 본고에서는 자원재이용 및 환경부하저감을 위한 기초적 연구로서 철강부산물인 고로슬래그를 사용하여 치환율에 따른 콘크리트의 압축강도 확보와 내구성상을 검토함으로써 결합재로서의 상성관계를 평가하여 향후, 대량 활용을 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

## 2. 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트의 내구특성

### 2.1 고로슬래그 결합재 콘크리트의 압축강도발현

고로슬래그 미분말은 잠재수경성으로 그림 3에 나타난 바와 같이 물과 접촉시 슬래그 입자의 표면에 치밀한 불투수성의 산성 피막이 생성된다. 이러한 불투수성의 피막은 수산화칼슘 혹은 석고와 같은 자극성 물질을 혼합시키면 OH<sup>-</sup> 이온이 고로슬래그 입자표면에 흡착하면서 그림 3에 나타난 바와 같이 ASH6로 형성된 피막을 파괴시켜, 입자 내부에 있던 Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> 등과 같은 이온이 용출된다. 용출된 이온은 수경성 물질로서 C-S-H 수화물 또는 알루미늄산칼슘 수화물을 생성하며 경화한다. 또한, 자극작용에 의해 슬래그 표면으로부터 용해반응이 일어나면, 다음에 그 용액으로부터 불용성 물질이 석출되어 경화되기 시작한다. 슬래그의 수화물은 자극물질에 의해 다소 차이는 있지만 어떤 경우에도 칼슘실리케이트 수화물을 포함한다.

알칼리자극제에서는 C-S-H, 6각 판상의 칼슘알루미네이



[그림 4] 고로슬래그 미분말의 치환율에 의한 모르타르의 압축강도 발현 성능

트 수화물 C<sub>4</sub>AH<sub>12</sub> 및 Gehlenite 수화물 C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>이 생성되고, Ca(OH)<sub>2</sub> 자극제의 경우에는 C-S-H와 C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>이 생성되고 C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>은 생성되지 않으며, 유산염 자극제에서는 C-S-H, Ettringite와 유사한 C<sub>3</sub>A-3CS-H<sub>32</sub>와 수산화알루미늄이 생성된다. 자극물질이 황산염과 알칼리 또는 석회와 함께 이루어졌을 경우 수산화알루미늄은 Ettringite로 변화한다. 경화체 중에서는 유리 Mg(OH)<sub>2</sub>는 나타나지 않고, 슬래그의 C-S-H에는 MgO가 매우 많이 고용되어 있다. Voinovich와 Dron은 슬래그의 화학성분을 C<sub>5</sub>AS<sub>3</sub>로 단순화하여 다음과 같은 화학양론식을 나타내었다.<sup>5)</sup>

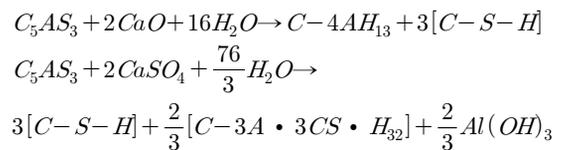
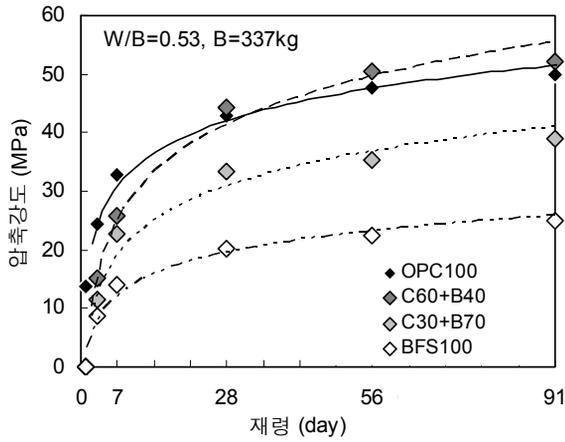
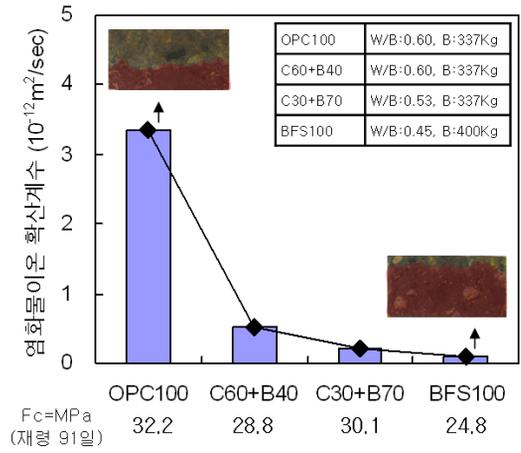


그림 4는 고로슬래그 미분말의 치환율에 의한 모르타르의 압축강도 발현 성능을 나타낸 것이다. OPC에 대하여 W/B 0.50, B:S=1:3이며 4,000cm<sup>2</sup>/g의 고로슬래그 미분말을 0~100% 치환하여 KS F 2563에서 규정에 따라 강도발현을 평가하였다. 그 결과 치환율 70%이상의 범위에서 재령 28일 압축강도가 현저히 감소하였으며, 특히 치환율 100%에서는 압축강도가 측정되지 않았다. 따라서, 알칼리 자극에 의한 잠재수경성 촉진에 의해 고로슬래그 미분말의 치환율 70%이상의 High-volume 슬래그 영역에서의 압축강도 확보를 통한 내구성능의 검증이 필요하다.

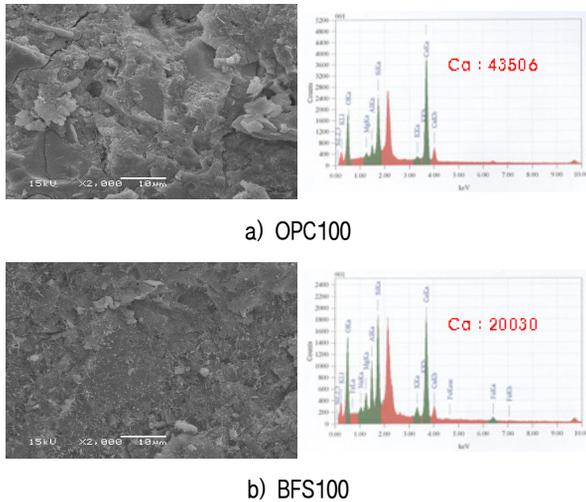
그림 5는 고로슬래그 미분말의 치환 및 기능성 자극분말을 혼합한 콘크리트의 압축강도 측정결과를 나타낸 것이다.



[그림 5] 고로슬래그 미분말의 치환에 의한 압축강도



[그림 7] 배합별 염화물이온 확산계수



[그림 6] SEM & EDS 분석결과

고로슬래그 미분말의 치환율 40%치환 시 재령 3일의 압축강도는 OPC100에 비해 약 60% 발현하였으나, 7일 이후에서는 압축강도가 점차적으로 증가하여 28일 이후의 장기강도가 증가하였다. 그러나, BFS100 시험체의 재령 28일 압축강도는 알칼리 자극에 의한 잠재수경성 촉진으로 인해 약 20MPa를 나타냈지만 OPC100에 비해 약 45%되었다. 이는 그림 6의 SEM&EDS 분석결과를 통해 OPC100 시험체의 경우 조직이 치밀하고 수화생성물 사이의 빈틈이 작아 균질한 조직체가 형성되어 압축강도가 발현된 것으로 판단된다. 그러나, 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 잠재수경성에 의해 수화생성물의 생성량이 감소하여 조직이 치밀하지 못하여 Ca이온의 검출량과 Si/Al비가 전반적으로 낮게 측정되어 미세구조의 활성화가 효과적으로 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

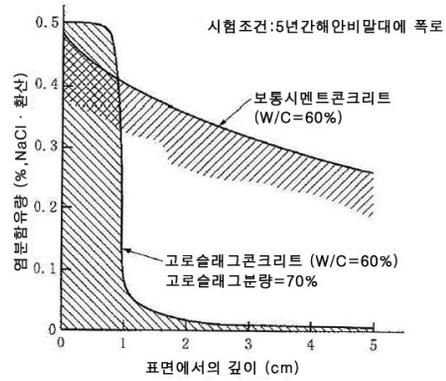
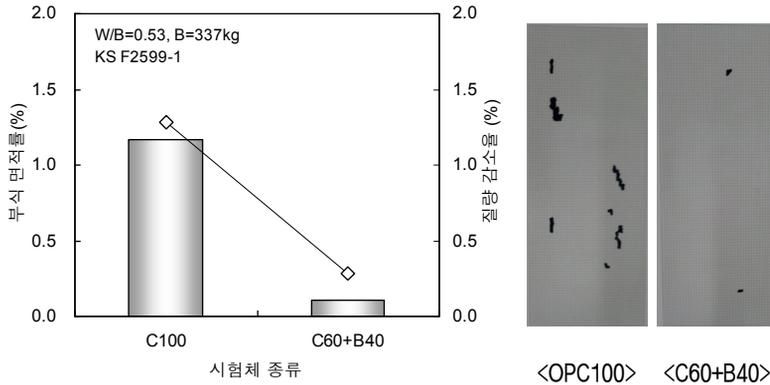


그림 8 염분분포 모델)

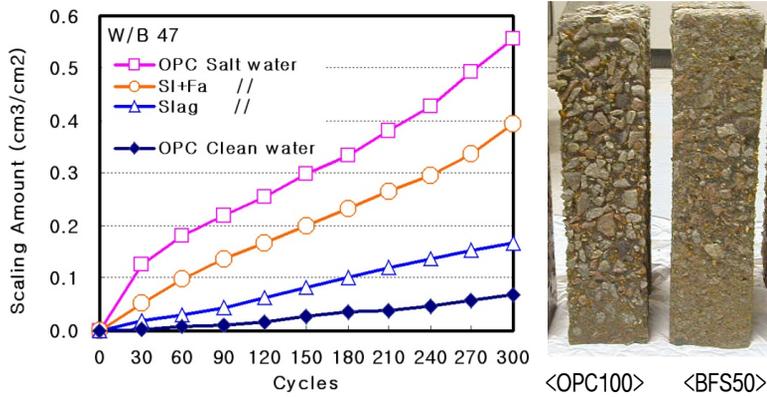
## 2.2 염화물이온 확산계수

그림 7은 슬래그를 다량 함유한 콘크리트의 염화물이온 확산계수이다. 고로슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 염화물이온 확산계수는 크게 감소하였으며, 특히 고로슬래그 미분말을 100% 치환한 경우 C100 시험체에 비해 염화물이온 확산계수는 약 95% 감소하였다. 이는 Hussain, Page, C.L 연구결과와 같이 시멘트의 일부를 고로슬래그 미분말로 치환하여 사용할 경우, 잠재수경성 반응에 의한 콘크리트 세공조직의 치밀화와 산소의 침입에 대한 저항성이 증가하여 염화물이온이 콘크리트 표면부분에 축적되고, 내부로의 확산이 어렵기 때문에 염화물이온에 대한 저항성이 증가하였다.<sup>6,7)</sup> 이러한 결과를 바탕으로 해양구조물에 적용되는 콘크리트의 기초적 자료로 제시될 수 있다고 기대된다.

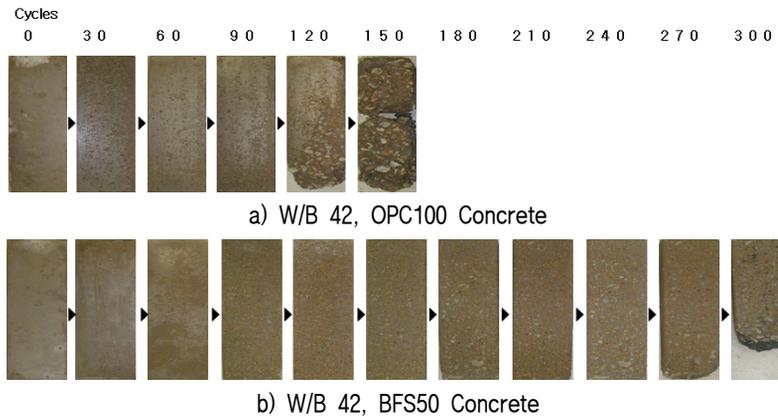
이를 바탕으로 그림 8과 같이 보통시멘트콘크리트와 고로슬래그콘크리트의 염분분포 모델을 비교한 결과 고로슬래그콘크리트는 염화물 이온이 콘크리트 표면에 축적되어



[그림 9] 고로슬래그 미분말의 치환에 의한 철근부식 및 부식면적



[그림 10] 염화물 함유 동결수에 의한 스케일링양



[그림 11] 염화물(1.2kg/m³)이 내재된 콘크리트의 동결파괴현상

내부로의 확산이 어렵기 때문에 해양 구조물에 적용되는 콘크리트의 철근부식에 관한 최소피복두께는 작아질 수 있다고 판단된다.

### 2.3 철근부식 저항성

그림 9는 고로슬래그 미분말의 치환에 의한 철근부식 시험결과를 나타낸 것이다. 고로슬래그 미분말의 치환에

의해 철근부식 면적률이 감소하는 것을 확인하였다. 특히, 고로슬래그 미분말을 40% 치환한 경우 철근부식 면적율은 0.1%로 C100 시험체에 비해 91% 감소하여 철근부식에 우수한 성능이 있는 것으로 판단된다. 이는 기존 연구결과와 같이 시멘트의 일부를 고로슬래그 미분말로 치환하여 사용할 경우, 침입염분을 시멘트 경화체에 고정시켜 세공액 중의 수용성 염화물량을 감소시킴으로써 철근 발청을 억제하는 효과가 큰 것으로 보고되고 있다.<sup>6,7)</sup>

### 2.4 염화물 함유 동결수에 의한 스케일링 열화

그림 10은 염화물 함유 동결수에 의한 스케일링양을 나타낸 것이다. 콘크리트가 해수의 영향을 받은 경우 고로슬래그 미분말을 50% 치환한 콘크리트는 300 cycles에서의 스케일링양이 OPC에 비해 약 73% 감소하였으며, 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 치환한 3성분계 콘크리트에 비해서도 크게 감소하였다. 또한, 해수에 의한 표면 열화는 수도수에 의한 표면열화에 비해 현저하게 나타났다. 이는 OPC의 경우 해수에 존재하는 염화물이온이 시멘트 수화물의 반응으로 생성된 여러 가지 반응생성물로 인하여 콘크리트 내부조직이 침식을 받은 것으로 판단되며, 고로슬래그 미분말을 치환한 콘크리트는 염화물 동결팽창압이 상대적으로 완화되어 내동해성이 향상된 것으로 판단된다. 그림 11은 염화물이 내재된 콘크리트의 동결파괴현상을 나타낸 것으로 OPC에 비해 고로슬래그 미분말 35%+플라이애쉬 15%를 치환한 경우가 동결융해 저항성이 우수한 것을 나타내었다.

### 3. 고로슬래그 미분말의 건설자원화에 의한 CO<sub>2</sub> 저감 효과

표 1은 시멘트와 고로슬래그 미분말의 CO<sub>2</sub>배출량을 분석한 것이다. 일반적으로 시멘트는 생산 공정시 소성과정

<표 1> 시멘트와 고로슬래그 미분말의 CO<sub>2</sub>배출량

구분	항목	CO <sub>2</sub> 배출량 (CO <sub>2</sub> /t)kg	합계 (kg)
시멘트	소성과정	854.7	854.7
고로 슬래그 미분말	Slag 채굴	5.0	39.7
	Slag 분쇄	16.0	
	규석, 석고 채굴	2.9	
	중유	2.4	
	석탄	2.9	
	석유코크스	0.469	
	전력	10.1	

으로 인해 1톤 생산 시 약 854kg의 CO<sub>2</sub>가 발생하였지만, 고로슬래그 미분말을 생산하는 공정에서는 소성과정이 없고 분쇄나 제조, 전력 사용 등에 의한 과정만 있어 1톤 생산 시 약 39kg의 CO<sub>2</sub>가 발생하여 시멘트에 비해 약 815kg (95%)이 저감되었다. 이러한, 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트를 적용할 경우 원가절감 및 CO<sub>2</sub> 저감효과가 상당히 클 것이라 예상되어, 환경배려형 콘크리트로서 고려해야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

제철산업의 비약적으로 발전함에 따라 관련 부산물인 고로슬래그의 발생량도 매년 증가하여, 폐기물의 발생량을 줄이고 재활용을 높여 환경부하저감형 재료로서 유용하게 사용하기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있는 실정이다. 고로슬래그 미분말의 사용확대 및 기존연구 검증 차원에서 치환율에 의한 콘크리트의 내구성능을 검토한 결과 철근 부식, 동결융해 저항성, 염화물이온 확산계수 등 염해에 대한 우수성이 검증되어 해양구조물에 적용되는 콘크리트의 기초적인 자료로 제시될 수 있다고 판단된다. 또한, CO<sub>2</sub> 저감량 분석결과 고로슬래그 미분말을 100% 치환한 콘크리트는 일반콘크리트에 비해 약 95%의 CO<sub>2</sub> 저감효과를 확인하여 환경배려형 콘크리트로서 유용할 것으로 기대된다. 그러나, 일반콘크리트에 비해 다소 낮은 압축강도는 계속적으로 해결해야 할 과제라 판단된다.

따라서, 향후 해안콘크리트 구조물 설계시 고로슬래그 미분말의 치환율에 의한 압축강도와 내구성능에 대한 연구가 지속적으로 진행된다면 환경부하저감 및 장수명형 콘크리트 재료로서의 가치가 커질 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- 1) 並木 哲 · 吉田 泰 · 山本 佳城 · 陣内 浩 · 黒岩 秀介 · 辻谷 薫 : 環境配慮型超高強度コンクリートに関する研究その3コンクリートの圧縮強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.211~212, 2011
- 2) M. Roy, "Alkali Activated Cements Opportunities and Challenges," CCR, 29[2] 249-54 (1999)
- 3) Song, H. W. and Kwon, S. J., "Permeability Characteristics of Carbonated Concrete considering Capillary Pore Structures", Cement and Concrete Research, Vol. 37, Issue6, 2007, pp. 909~915.
- 4) V.M. Malhotra and P.K. Mehta, "High-performance, high-volume fly ash concrete"
- 5) R. Dron, Ph. Petit, "Thermodynamic and kinetic approach to the alkali-silica reaction. Part 2: Experiment, Cement and Concrete Research, Vol. 23, Issue1, 1993, pp. 93-103.
- 6) Hussain, S. E., In Mechanisms of High Durability Performance Plane and Blended Cements, Ph.D. Dissertation, Department Civil Engineering, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia, 1991, pp221~228.
- 7) Page, C.L. and Havdahl, J., Electrochemical Monitoring of Corrosion of Steel in Microsilica Cement Pastes, Material and Structure, RILEM, Vol.18, No.103, Jan.-Feb. 1985, pp.41~48.
- 7) 일본철강슬래그협회, 「鐵鋼スラグの高セメントへの利用」