

## 광물질 혼화재를 혼합한 해양 콘크리트의 해석적 성능 평가

# Analytical Estimation of the Performance of Marine Concrete with Mineral Admixture

이방연<sup>1</sup> · 권성준<sup>2</sup> · 강수태<sup>3\*</sup>

Bang-Yeon Lee<sup>1</sup> · Seung-Jun Kwon<sup>2</sup> · Su-Tae Kang<sup>3\*</sup>

(Received December 1, 2015 / Revised December 18, 2015 / Accepted December 21, 2015)

For the purpose of developing high performance marine concrete with improved crack resistance and durability, this analytical study aimed to estimate strength, hydration heat characteristics, and chloride attack resistance of concrete with mineral admixture. Ground granulated furnace slag and fly ash were considered for mineral admixture. The replacement of ground granulated furnace slag and fly ash considered in the analysis was in the range of 0~70% and 0~40 %, respectively. The analysis results indicated that both ground granulated furnace slag and fly ash decreased compressive strength, and the effect of adding ground granulated furnace slag on mitigation of hydration heat was limited whereas fly ash had a noticeable influence on it. It was also found that the replacement with ground granulated furnace slag enhanced the chloride attack resistance but fly ash deteriorated the resistance. From the analytical studies, It could be expected that a ternary blended cement composition with proper amount of ground granulated furnace slag and fly ash might be effective to control crack resistance as well as chloride attack resistance of marine concrete.

**키워드** : 해양 콘크리트, 고로슬래그, 플라이애시, 수화발열, 염해저항성

**Keywords** : Marine concrete, Ground granulated furnace slag, Fly ash, Hydration heat, Chloride attack resistance

## 1. 서론

해양 콘크리트 구조물은 일반적으로 해양공간에 설치된 구조물 전반을 말하며, 석유 및 천연가스 탐사용 플랫폼, 선박정박시설, 도크, 해상도시, 해상 비행장, 해상 발전소, 해상 터널, 해상 교각 등을 예로 들 수 있다. 이러한 해양 콘크리트 구조물을 경제적이고 친환경적이며 안정적으로 설계 및 시공하기 위한 필수불가결한 핵심요소 기술 중의 하나가 고성능 해양 콘크리트 기술이라고 할 수 있다.

일반적으로, 대부분의 부유구조물은 표면 좌굴을 발생시키는 휨하중에 저항해야 하는데 소요강도에 대해 적절한 두께를 가진 콘크리트는 국부적인 좌굴과 과도한 비틀림에 저항할 만한 강성을 가지고 있고 적절한 설계를 통하여 셸작용(shell action)을 효과적

으로 이용할 수도 있기 때문에 부유구조물 건설에 있어서 매우 적절한 재료이다. 또한 콘크리트는 상당히 큰 압축력에 효과적으로 저항할 수 있는 재료성질을 가지고 있기 때문에 정수압이 지배하는 tension-leg platform(TLP)과 같이 흡수가 큰 구조물 건설에 매우 효과적이다(ACI 2010; Mehta 2005).

하지만 해양 환경이라는 특수 환경에서 콘크리트는 해수, 저온 등 일반적인 환경보다 훨씬 열악한 환경에 놓이게 되기 때문에 적절한 설계, 시공 및 재료의 선정이 더욱 엄격하다. 부유구조물의 특성 상, 일반 구조물과 달리, 콘크리트 구조물의 균열이 엄격히 제한받게 되고, 해수와 직접적으로 맞닿기 때문에 염해 및 황산염에 대한 성능저하를 고려해야 하는 등 많은 고려사항이 존재한다. 그러므로 해양 환경 하의 콘크리트는 철근의 부식이 일어나지 않도록 균열에 대한 저항성이 매우 우수하여야 하며, 또한 열화인자

\* Corresponding author E-mail: [stkang@daegu.ac.kr](mailto:stkang@daegu.ac.kr)

<sup>1</sup>전남대학교 건축학부 (School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea)

<sup>2</sup>한남대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea)

<sup>3</sup>대구대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongbuk, 38453, Korea)

의 콘크리트 내부로의 침투가 용이하지 않도록 충분한 내구성을 확보하여야 한다.

이 연구는 콘크리트 부유구조체의 구조적 기능을 설계수명동안 원활히 수행될 수 있도록 콘크리트의 균열저항성, 내구성 등의 소요성능을 충분히 확보하는 해양 콘크리트의 고성능화를 목적으로 이루어졌으며, 광물질 혼화재 사용 효과를 균열저항성과 내구성 관점에서 해석적으로 평가해 보고자 하였다. 균열저항성에 대해 초기 수화발열 특성을 비교하였으며, 내구성에 대해서는 해양 콘크리트에 가장 큰 영향을 미치는 염해저항성을 비교 평가하였다. 광물질 혼화재로는 고로슬래그와 플라이애시를 고려하였다.

## 2. 해석방법 및 조건

### 2.1 해석방법

광물질 혼화재 사용에 따른 해양 콘크리트의 압축강도, 수화발열특성, 염소이온 침투특성을 해석을 통해 평가하였으며, DUCOM 프로그램을 이용하여 해석을 실시하였다. DUCOM 프로그램은 미세공극구조 모델링(Maekawa et al, 1999) 기법을 이용하여 압축강도, 수화발열특성, 염소이온 침투특성을 해석적으로 예측할 수 있다. Fig. 1은 수화가 진행됨에 따라 나타나는 공극구조 형성모델을 개략적으로 나타낸 것이다(Maekawa et al, 1999). 내·외부 생성물을 동시에 포함하는 전체 공극구조의 공극분포는 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\phi(r) = \phi_{cp} V_{cp}(r) + \phi_{gl} V_{gl}(r) + \phi_{tr} \quad (1)$$

여기서,  $\phi_i, \phi_g, \phi_c$ 는 간극 공극, 겔 공극 및 모세관 공극을 나타내며,  $V_{cp}(r), V_{gl}(r)$  ( $m^3/m^3$ )은 시멘트 경화체 중의 모세관 공극

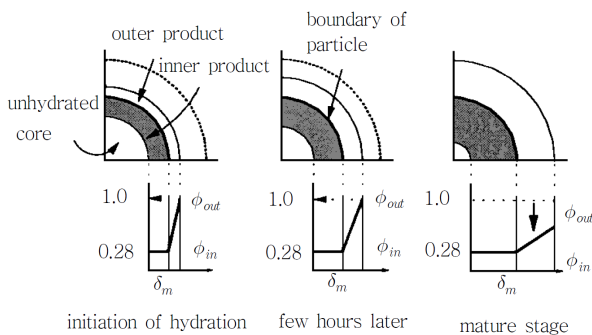


Fig. 1. Pore structure modeling with hydration process (Maekawa et al. 1999)

및 겔 공극에 대한 공극크기분포를 규정한 함수이다. 미세공극구조 형성모델에 대한 자세한 내용은 이 모델에 대한 여러 연구들 (Maekawa et al, 2003; Ishida et al, 2007; Maekawa et al, 1999; Ishida et al, 1996)에서 확인할 수 있다.

공극구조 형성모델을 이용하여 재령에 따른 공극률을 구하고 나면, 수화물 생성을 공극률의 함수로 나타내어 강도예측이 가능하다(Lee and Kwon 2012).

또한 DUCOM 프로그램에서는 수화발열특성 예측도 가능하다. 이 프로그램에서는 초기재령 콘크리트의 수화 과정을 시멘트의 광물 구성성분들을 기초로 한 콘크리트의 수화발열에 대한 다중요소 수화발열 모델을 사용하여 나타내고 있다. 이 모델은 시멘트의 다중요소 광물조성을 가정하여 시멘트에 존재하는 각각의 클링커 광물의 수화 과정을 통합하여 전체 수화 현상을 나타낸다. 다중요소 수화발열 모델에서 선택한 시멘트의 클링커 성분들은 알루미늄이트( $C_3A$ ), 알라이트( $C_3S$ ), 벨라이트( $C_2S$ ), 페라이트( $C_4AF$ ) 그리고 모노설페이트이며, 슬래그나 플라이애시 같은 결합재들도 유사 클링커 성분으로 모델 속에 포함시킨다. 온도에 의해 결정되는 각 클링커 성분의 수화발열률( $H_i$ )은 Arrhenius의 법칙으로 나타낼 수 있으며, 각 구성성분의 열발생률은 수정 Arrhenius식과 성분 간의 상호작용을 고려한 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$\bar{H}_i = \beta_i \gamma \mu s_i \bar{H}_{i, T_o}(\bar{Q}_i) \exp\left\{-\frac{E_i(\bar{Q}_i)}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)\right\} \quad (2)$$

$$\bar{Q}_i = \int \bar{H}_i dt$$

여기서,  $\bar{H}_{i, T_o}(\bar{Q}_i)$ 와  $E_i(\bar{Q}_i)$ 는 각각  $i$ 번째 성분의 누적발열량  $\bar{Q}_i$ 에 따른 기준열 발생률(기준온도  $T_o=20^\circ C$ )과 활성화에너지를 나타내는 재료상수이다.  $\beta_i$ 는 가용수량의 감소 및 수화생성물의 침전에 의한 반응감소효과를 고려하고 있으며,  $\gamma$ 는 플라이애시와 유기혼화제의 첨가로 인하여 초기 반응 지연 효과를 고려하기 위한 계수이다.  $\mu$ 는 보통 포틀랜드 시멘트의 광물조성의 변화를 고려하기 위한 계수이며,  $s_i$ 는 분말도 변화에 따른 열발생률의 차이를 고려하는 계수이다.

시멘트 복합재료의 단위질량 당 평균수화발열특성은 식 (2)로 구한 각 성분의 발열특성  $\bar{H}_i$ 와 각 광물조성의 중량률  $p_i$ 를 고려하여 구할 수 있고, 전체 열발생률은 석고에 의한 발열특성까지 고려하여 구한다. 온도 분포와 콘크리트의 수화도는 열역학적 에너지 보존과 다음과 같은 식 (3)을 적용하여 구할 수 있다.

$$(\rho c) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k \nabla T) + H \quad (3)$$

여기서,  $k$ 는 콘크리트의 열전도율을 나타내고,  $\rho c$ 는 콘크리트의 열용량을 의미하며,  $H$ 는 콘크리트 발열률을 나타낸다.

염소이온 침투해석에 대해서 DUCOM 프로그램은 시간의존성을 가지는 촉진염화물 확산계수를 간단하게 공극률의 함수로 나타내어 염소이온 침투를 해석할 수 있는 기법을 사용하고 있다(Kwon and Park 2013). 공극구조 변화를 고려한 염소이온 확산계수는 다음 식 (4)와 같다.

$$D_d = -\frac{\phi S}{\Omega} \delta D_0 \quad (4)$$

여기서,  $D_d$ 는 콘크리트 내의 염화물 이온 확산계수,  $\phi$ 는 공극률,  $S$ 는 포화도,  $D_0$ 는 수용액 중의 기본확산계수이다.  $\Omega$ 는 복잡한 미세공극구조로 인한 확산계수의 감소를 나타내기 위한 계수이고,  $\delta$ 는 공극과 이온이동 사이의 상호작용에 따른 확산계수의 감소를 나타내기 위한 계수이다.

## 2.2 해석조건

콘크리트의 균열저항성 및 내구성 향상을 목적으로 광물질 혼화재의 사용을 검토하였으며, 구체적으로는 광물질 혼화재를 혼합한 해양 콘크리트의 압축강도 특성, 수화발열 특성 및 염소이온 침투특성에 대한 해석적 평가를 수행하였다.

균열제어 목적의 수화열 저감과 염해저항성 향상 방안으로 광물질 혼화재의 부분치환을 검토하였으며, 광물질 혼화재로는 고로슬래그와 플라이애시를 대상으로 하였다. 고로슬래그의 치환율은 70%까지 고려하였으며, 플라이애시의 치환율은 40%까지 고려하였다. 해석에 사용한 배합은 Table 1와 같다. 해석에 사용한 시멘트, 고로슬래그 및 플라이애시의 물리적·화학적 성질은 Table 2와 같다. 잔골재는 밀도 2.67g/cm<sup>3</sup>, 조립율 2.60, 흡수율 1.80, 단위용적질량 1,422kg/m<sup>3</sup>으로 가정하였으며, 굵은골재는 밀도 2.63g/cm<sup>3</sup>,

Table 1. Mix proportions for concrete

Mix.	Unit weight(kg/m <sup>3</sup> )					
	Binder materials			W	S	G
	OPC	GGBS	FA			
C100	400	-	-	160	640	1106
C70-S30	280	120	-	160	640	1106
C50-S50	200	200	-	160	640	1106
C30-S70	120	280	-	160	640	1106
C80-F20	320	-	80	160	640	1106
C70-F30	280	-	120	160	640	1106
C60-F40	240	-	160	160	640	1106

OPC: ordinary portland cement, W: water, S: sand, G: gravel

GGBS: ground granulated blast furnace slag

FA: fly ash

조립율 6.87, 흡수율 0.63, 단위용적질량 1,429kg/m<sup>3</sup>으로 가정하였다.

염소이온 침투 해석은 비말대에 놓이는 콘크리트 구조물을 대상으로 가정하여 200mm 두께에 대해 1차원 일면 침투 해석을 실시하였으며, 이 때 표면부의 염소이온 농도는 0.17mol/l로 가정하였고, 상대습도는 75%로 가정하였다.

## 3. 해석결과

### 3.1 압축강도

미세공극구조 형성모델에 근거하여 구한 압축강도 발현 특성에 대한 해석결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)는 고로슬래그 치환에 따른 압축강도 발현 특성을 나타낸 것으로, 고로슬래그 치환율이 증가함에 따라 압축강도가 현저히 떨어지는 경향을 확인할 수 있다. 28일 강도를 기준으로 볼 때, 고로슬래그를 30% 치환했을 때는 OPC만을 사용한 경우에 비해 강도가 약 35% 정도 떨어지는 결과를 보이고, 50% 치환했을 때는 20MPa를 조금 상회하는 강도를 나타내고 있다. 또한 70%를 치환한 경우는 거의 강도가 발현되지 않는 것을 볼 수 있었다. Fig. 2(b)는 플라이애시를 치환한 경우에 대한 압축강도 발현 특성의 결과이다. 플라이애시 치환율이 증

Table 2. Physical and chemical properties of OPC, FA and GGBS

Item Type	Surface area (cm <sup>2</sup> /g)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Ig.loss (%)	Chemical composition(%)					
				SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
OPC	3,413	3.15	1.40	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.14
FA	3,850	2.13	3.82	65.3	16.6	5.58	-	0.82	0.51
GGBS	6,350	2.89	0.37	33.76	15.65	0.08	44.81	4.98	2.68

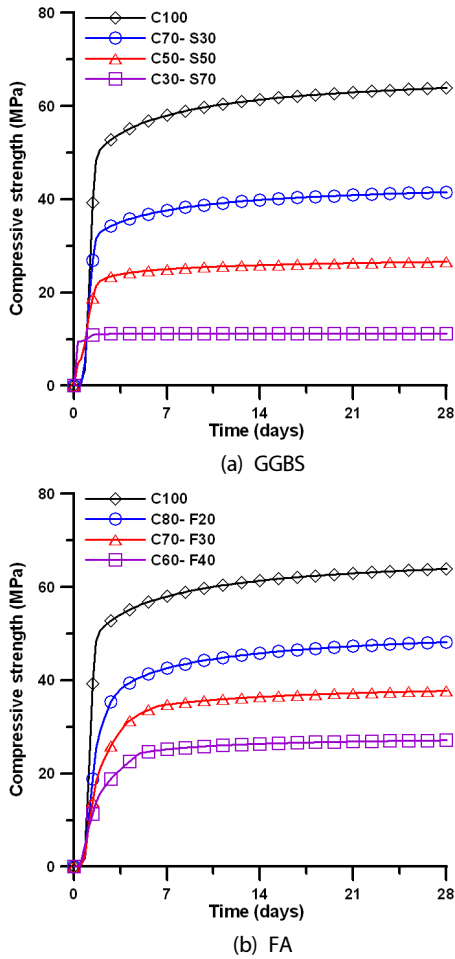


Fig. 2. Comparison of strength development according to replacement ratio of mineral admixture

가함에 따라 강도저하가 일어나는 경향을 확인할 수 있었으며, 플라이애시 30%를 치환한 경우에는 강도가 약 50%까지 떨어지는 결과를 나타내고 있다.

### 3.2 수화발열 특성

광물질 혼화재 사용에 따른 콘크리트 수화발열 특성의 해석결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)는 고로슬래그 치환율에 따른 수화열을 비교하여 나타낸 것으로, 고로슬래그 치환율이 증가함에 따라 수화발열량이 약간 감소하는 경향을 보이지만, 그 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 반면에 플라이애시 치환율에 따른 수화발열량의 차이는 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 현저히 크게 나타났다. 플라이애시 치환율이 증가함에 따라 뚜렷하게 수화발열량이 감소하는 경향을 확인할 수 있으며, 수화반응 후 7일에서의 수화발열량을 비교했을 때, 플라이애시를 20% 치환함에 따라 수화발열량을

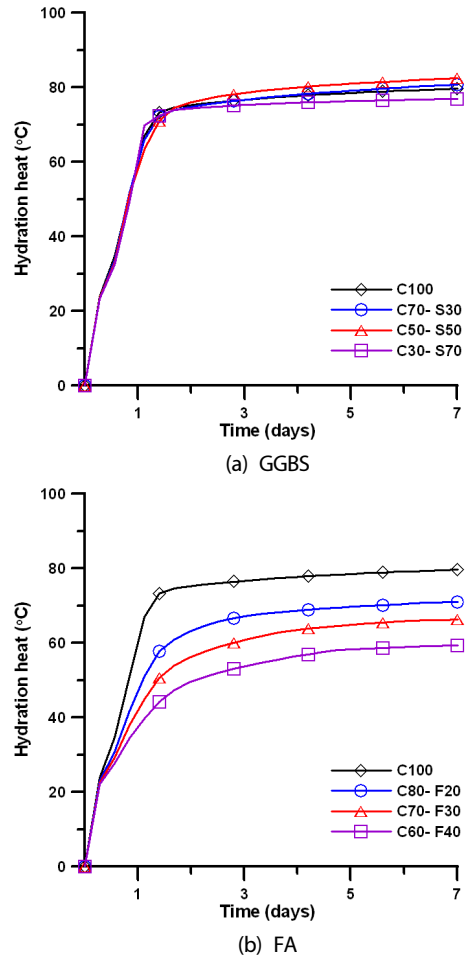


Fig. 3. Comparison of hydration heat according to replacement ratio of mineral admixture

약 20% 정도 줄일 수 있고 30% 치환했을 때는 약 30%까지 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 수화열 저감의 측면에서 볼 때에는 고로슬래그는 효과가 미미한 반면, 플라이애시는 치환에 따른 효과가 크게 나타나므로 플라이애시를 적정량 치환하여 사용함으로써 수화열 저감 및 제어가 가능할 것으로 보인다.

### 3.3 염소이온 침투특성

Fig. 4는 광물질 혼화재 치환율에 따른 콘크리트의 염소이온 침투특성을 나타낸 것이다. 콘크리트가 염해 환경에 노출된 후 20년이 경과된 후의 콘크리트 깊이에 따른 총 염소이온 농도의 관계로 나타내었다. Fig. 4(a)는 고로슬래그 치환율에 따른 침투깊이별 염소이온 농도를 나타낸 것으로, 고로슬래그를 50% 치환했을 때 침투저항성이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 30% 및 70% 치환율에서도 OPC의 경우보다는 침투저항성이 상대적으로 좋은 경향을

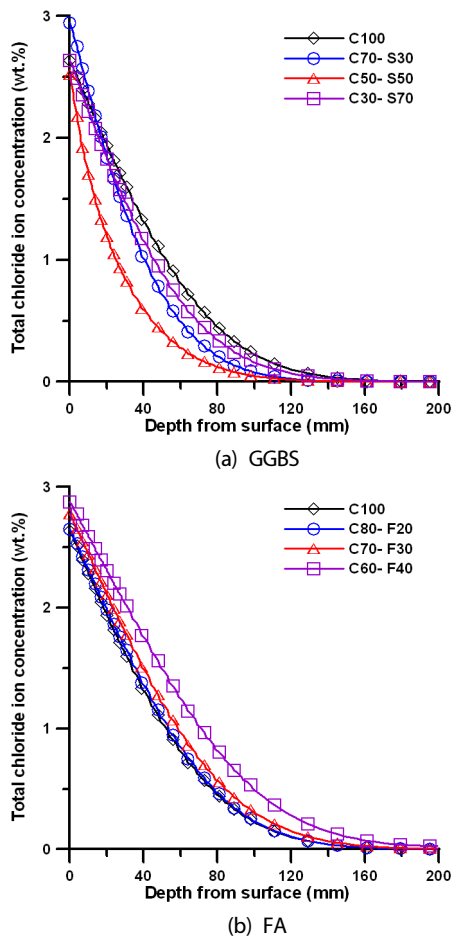


Fig. 4. Comparison of chloride ion profile according to replacement ratio of mineral admixture (after 20 years)

보였다. Fig. 4(b)는 플라이애시 치환율에 따른 결과를 나타낸 것으로, 플라이애시를 치환함에 따라 침투저항성이 저하되는 결과를 나타내었다. 특히 치환율 40%의 경우는 OPC 경우에 비해 크게 성능이 저하되는 것으로 나타났다. 20% 치환한 경우에는 OPC와 비교했을 때 거의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 30% 치환하였을 때에는 OPC에 비해 약간 저하되기는 하지만 큰 차이를 보이지는 않았다.

따라서 염소이온 침투특성의 관점에서 볼 때는 고로슬래그의 치환 사용이 효과적인 것으로 나타났으며, 특히 50% 치환했을 때가 가장 효과적임을 확인할 수 있었으며, 플라이애시의 치환 사용은 효과적이지 못한 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

이 연구에서는 해양 콘크리트의 균열저항성 및 내구성 향상을

시킨 고성능 해양 콘크리트 개발 연구의 일환으로 광물질 혼화재를 혼합한 콘크리트의 강도, 수화발열 특성 및 염해저항성에 대한 해석적 평가를 실시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미세공극구조 형성모델에 근거한 압축강도 발현 특성에서는 고로슬래그 및 플라이애시 모두 치환율 증가에 따라 강도저하가 크게 나타났다. 고로슬래그를 50% 치환한 경우 압축강도가 대략 1/3 수준으로 저하되었으며, 플라이애시는 30% 치환했을 때 50% 정도로 떨어지는 결과를 보였다.
2. 수화발열 특성에서는 고로슬래그는 70%까지 치환하여도 수화열 저감에 효과가 별로 없는 것으로 나타난 반면, 플라이애시는 치환율 증가에 따라 뚜렷한 수화열 저감효과를 확인할 수 있었다. 플라이애시 치환율 30%에서는 약 30%의 수화열 저감효과를 확인할 수 있었다.
3. 염소이온 침투특성에 대한 해석결과에서는 고로슬래그를 치환하여 사용할 경우 침투저항성 증대에 효과가 있는 것으로 나타난 반면, 플라이애시의 경우에는 치환하여 사용할 경우 침투저항성을 저해하는 것으로 나타났다. 플라이애시 20%를 치환하였을 경우에는 OPC와 비교했을 때 거의 차이가 없었으나, 40% 치환한 경우에는 침투저항성이 크게 저하되는 결과를 볼 수 있었다.
4. 수화발열 특성 및 염소이온 침투특성에 대한 해석 결과를 종합적으로 살펴볼 때, 수화열 저감 측면에서는 플라이애시가 상대적으로 효과적이고 염해저항성 향상 측면에서는 고로슬래그가 상대적으로 효과적인 것으로 판단되므로 수화열과 염해내구성을 동시에 고려할 경우, 적절한 양의 고로슬래그와 플라이애시를 함께 사용한 3성분계 시멘트 배합 구성이 효과적일 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업의 연구비 지원(14RDRP-B076268) 및 건설기술연구사업의 연구비 지원(13 건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

#### References

ACI. (2010). 357.2R-10 Report on Floating and Float-In Concrete Structures, American Concrete Institute, USA.  
Ishida, T., Chaube, R., Maekawa, K. (1996). Modeling of pore

- content in concrete under generic drying wetting conditions, Concrete Library of JSCE, **18(1)**, 113–118.
- Ishida, T., Maekawa, K., Kishi, T. (2007). Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, Cement and Concrete Research, **37**, 565–578.
- Kwon, S.J., Park, S.G. (2013). Analysis technique for chloride penetration in high performance concrete behavior considering time-dependent accelerated chloride diffusivity, Journal of the Korea Concrete Institute, **25(2)**, 145–153 [in Korean].
- Lee, H.S., Kwon, S.J. (2012). Modeling on compressive strength in high performance concrete using porosity, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **16(6)**, 124–133 [in Korean].
- Maekawa, K., Chaube, R., Kishi, T. (1999). Modeling of Concrete Performance: Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport, Routledge, London and New York, 31–58.
- Maekawa, K., Ishida, T., Kishi, T. (2003). Multi-scale modeling of concrete performance, Journal of Advanced Concrete Technology, **1**, 91–126.
- Mehta, P.K. (2005). Concrete in Marine Environment, Taylor & Francis, London and New York, 106–205.

#### 광물질 혼화재를 혼합한 해양 콘크리트의 해석적 성능 평가

이 연구에서는 해양 콘크리트의 균열저항성 및 내구성을 향상시킨 고성능 해양 콘크리트 개발 연구의 일환으로 광물질 혼화재를 혼합한 콘크리트의 강도, 수화발열 특성 및 염해저항성에 대한 해석적 평가를 실시하였다. 고로슬래그와 플라이애시를 광물질 혼화재로 검토하였으며, 고로슬래그 치환율은 70%까지 플라이애시 치환율은 40%까지 검토하였다. 해석검토 결과, 고로슬래그 및 플라이애시 치환은 모두 압축강도를 크게 저하시키는 결과를 보였으며, 수화발열 특성에서는 고로슬래그는 영향이 적은 반면, 플라이애시는 수화발열량 저감에 크게 효과가 있는 것으로 나타났다. 염소이온 침투 특성에서는 고로슬래그는 침투저항성을 증대시키는 반면, 플라이애시는 저하시키는 경향을 보였다. 해석적 평가를 통해 수화열과 염해내구성을 동시에 고려할 경우, 적절한 양의 고로슬래그와 플라이애시를 함께 사용한 3성분계 시멘트 배합 구성이 효과적일 것으로 판단된다.