

## 광물질혼화재 혼합 수중불분리성 콘크리트의 물성 및 동결융해 저항성

문한영<sup>1)</sup> · 신국재<sup>1)\*</sup> · 송용규<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과 <sup>2)</sup> 동부건설(주)

(2005년 3월 2일 원고접수, 2005년 5월 19일 심사완료)

### Freezing and Thawing Resistance and Fundamental Properties of Antiwashout Underwater Concrete Containing Mineral Admixtures

Han-Young Moon<sup>1)</sup>, Kook-Jae Shin<sup>1)\*</sup>, and Yong-Kyu Song<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

<sup>2)</sup> Dongbu Co. Ltd., Seoul, 135-280, Korea

(Received March 2, 2005, Accepted May 19, 2005)

#### ABSTRACT

Today, the application of antiwashout underwater concrete to the construction sites is increasing steadily, while its reliability is in issue. Particularly, antiwashout underwater concrete is known to have very weak durability on frost attack, and hence Japan society of civil engineers(JSCE) regulated that not to use of antiwashout underwater concrete where the freezing and thawing is suspected. This study aims the improvement of the freezing and thawing resistance for antiwashout underwater concrete. From the results of fundamental test, FA20 and SG50 showed good performance in fluidity and long term compressive strength than control concrete. Meanwhile, MK10 marked the highest compressive strength through the whole curing age but a defect on fluidity was discovered. The results from the repeated freezing and thawing test show that the large volumes of air entrapped by cellulose based antiwashout underwater admixture gave bad effects to frost durability and hence not much benefits were confirmed from the use of mineral admixtures. However there were some increasing effects on frost durability of MK10 and SG50 by securing  $6\pm 0.5\%$  of entraining air. In the meantime, there was a increasing tendency of frost durability by increasing blaine's fineness of ground granulated blast furnace slag.

**Keyword:** antiwashout underwater concrete, freezing and thawing resistance, ground granulated blast furnace slag, spacing factor, durability factor

#### 1. 서 론

최근 수중불분리성 콘크리트가 우리나라의 서해대교, 영종대교 및 평안대교와 같은 수중에 건설되는 교량의 기초와 대형 수중 콘크리트 구조물의 현장시공 등에 적용된 사례가 점차 증대되고 있는 추세이다<sup>1-3)</sup>. 그러나 수중불분리성 콘크리트는 수중불분리성 혼화재가 개발된 역사가 비교적 짧은 탓으로 현장에 적용한 시공실적이 많지 않아 그 신뢰성에 대한 의문을 제기하는 등의 문제점이 지적되고 있다<sup>4)</sup>.

한편 수중이나 해양환경 하에서 수중 콘크리트 구조물을 건설할 경우, 육상에서 건설되는 콘크리트구조물과는 달리 유속, 해풍, 조풍, 파도 및 부유물질 등에 의한 물리적 작용, 해수중의 유해이온에 의한 화학적 침식작용, 동결융해의 반복작용 및 이들의 상승작용 등과 같은 가혹한

환경조건의 영향을 받게 되면 콘크리트 구조물의 내구성능은 크게 저하된다고 한다<sup>5,6)</sup>.

또한 수중불분리성 콘크리트로 건설된 구조물이 동결기 가뭄으로 인하여 하천이나 강의 수위가 낮아질 경우와 간만의 차이가 심한 해양환경 하에서 동결융해의 반복작용 및 물리·화학적 상승작용을 받을 경우에도 내구성능이 크게 저하됨으로 수중불분리성 콘크리트의 내구성을 향상시키기 위한 대책 연구가 절실히 요망되는 시기로 생각된다.

주지하는 바와 같이 수중불분리성 콘크리트의 동결융해의 반복작용에 의한 저항성이 매우 취약한 것으로 알려져 있으며<sup>7,8)</sup>, 일본토목학회의 수중불분리성 콘크리트의 설계시공 지침(안)<sup>9)</sup>에서는 통상 수면 하에 있는 구조물에 적용하는 것이 기본이지만, 즉 다시 말해서 평균수면까지는 수중불분리성 콘크리트를 적용하여도 좋지만 동결융해작용을 받는 지역에 사용해서는 안된다고 규정하는 등 이러한 이유들로 인하여 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성에 대한 연구 성과를 찾아보기 힘든 실정이다.

따라서 본 연구에서는 수중불분리성 콘크리트의 내구성을

\* Corresponding author

E-mail : rickyshin@hotmail.com

©2005 by Korea Concrete Institute

개선, 향상시키기 위한 연구의 일환으로 먼저 광물질혼화제 3종류, 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말 및 메타카올린을 선정하여 적정량 혼합 제조한 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 현탁물질량, 유동성과 압축강도 등의 실험결과에 대하여 광물질혼화제를 사용하지 않은 수중불분리성 콘크리트(이하 기준콘크리트, control concrete)와 비교 평가하였다. 또한 목표 연행공기량  $2\pm 0.5$ ,  $4\pm 0.5$  및  $6\pm 0.5$  % 3종류와 분말도가 상이한 4380, 6030, 및  $8050 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 고로슬래그 미분말을 사용한 경화한 수중불분리성 콘크리트의 공기량, 압축강도와 기포간격계수 및 동결융해 저항성 실험을 실시하여 얻어진 결과에 대하여 고찰하였다.

## 2. 실험개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트 및 광물질혼화제

시멘트로는 국내 A사의 비중 3.15, 비표면적  $3,112 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 보통 포틀랜드 시멘트(이하 OPC)를 사용하였으며, 광물질혼화제로서 국내 B사의 비중 2.63, 비표면적  $12,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 메타카올린(이하 MK)과 보령 화력발전소에서 포집 정제한 플라이애쉬(이하 FA) 및 광양 제철소에서 발생된 고로슬래그 미분말(이하 SG, 비표면적 4380, 6030 및  $8050 \text{ cm}^2/\text{g}$  의 3종류)을 각각 사용하였다. 이들 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

#### 2.1.2 골재

잔골재는 비중 2.60인 세척해사를 사용하였으며, 해사를 세척할 경우 미립분의 유실에 따른 입도분포가 맞지 않을 수 있으므로 KS F 2502에 따라 체가름시험을 실시하였으며, 그 결과 Fig. 1에 나타난 바와 같이 양호한 입도분포 곡선을 얻을 수 있었다. 한편 굵은골재는 최대치

수 25mm인 부순골재를 사용하였다. 골재의 물리적 성질은 다음 Table 2와 같다.

### 2.1.3 화학 혼화제

수중불분리성 혼화제(이하 AWA)는 주성분이 hydroxypropyl methyl cellulose(이하 HPMC)계이며, 고성능감수제(이하 HRWR)는 멜라민계(Melaminesulfonate based)를 사용하였다. 이들의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 3과 같다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 공시체의 제조

수중불분리성 콘크리트의 압축강도 및 기포간격계수를 구하기 위한 원주형 공시체( $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ ) 및 동결융해 실험을 위한  $70 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ 의 각주형 공시체를 한국콘크리트학회 KCI-CT102의 수중불분리성 콘크리트의 압축강도 시험용 수중제작 공시체의 제작방법<sup>10)</sup>에 따라 제작하였으며 KCI-CT102를 응용한 동결융해 시험용 수중불분리성 콘크리트의 제작방법을 다음 Fig. 2에 나타내었다.

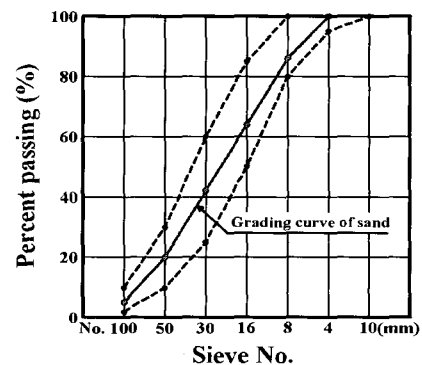


Fig. 1 Grading curve for sand with KS F 2502 grading limits

Table 1 Chemical compositions and physical properties of cement and mineral admixtures

	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> (%)	Loss of ignition (%)	Specific gravity	Specific surface (cm <sup>2</sup> /g)
OPC	21.95	6.59	2.81	60.10	3.32	2.11	2.58	3.15	3,112
MK	53.00	38.00	2.50	0.02	0.05	-	0.50	2.63	12,000
FA	67.70	25.00	2.85	2.00	0.90	-	3.47	2.15	3,270
SG	34.34	15.76	0.09	42.19	6.81	0.16	-	2.90	4,380 6,030 8,050

Table 2 Physical properties of aggregate

	Specific gravity	Absorption (%)	F.M.	Percentage of solids (%)	Abrasion value (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )
Fine aggregate	2.60	0.80	2.83	60.2	-	1,473
Coarse aggregate	2.66	0.78	6.51	64.9	28.6	1,741

**Table 3** Properties of chemical admixtures

	Main composition	Specific gravity	Density(kg/l)	Standard dosage (%)		pH	Appearance
				Water ×	Binder ×		
AWA	HPMC	-	0.8 ± 0.1	0.8 ~ 1.5	-	-	White powder
HRWR	Melaminesulfonate based	1.23 ± 0.02	-	-	0.5 ~ 3.0	10 ± 1	Transparent liquid

**2.2.2 수중낙하시험**

수중불분리성 콘크리트의 타설시 발생하는 시멘트 유실에 따른 재료분리도를 측정하기 위하여 대한토목학회의 “콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준(안)”의 수중낙하시험에 따라 현탁물질과 pH 값을 측정하였다.

[수중낙하시험] 바깥지름 110mm, 높이 150mm의 1,000cc용 비커에 800cc의 물을 넣고 수중불분리성 콘크리트 500g을 10등분으로 분할하여 수면에서부터 가만히 낙하시킨다. 이 낙하는 10초에서 20초 사이에 끝나는 것으로 한다. 그 후 3분간 비커를 움직이지 않도록 놓고 비커 내의 물을 스포이트를 사용하여 콘크리트가 혼탁되지 않도록 가만히 600cc 분취한다. 이 물에 대하여 신속하게 현탁물질 및 pH 시험을 실시한다.

**2.2.3 공기량시험**

굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 공기량은 에어미터를 이용하여 KS F 2421의 압력법에 따라 실시하였으나, 본 논문의 주제인 동결융해 저항성은 공기량과 매우 밀접한 관계에 있으므로 보다 정확한 실험을 실시하기 위하여 시료의 타설은 KCI-CT102(수중불분리성 콘크리트의 압축강도 시험용 수중제작 공시체의 제작방법)에 따라 수중낙하하여 공기량 시험이 실시되었다.

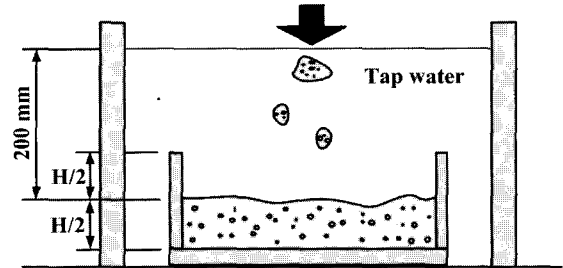
**2.2.4 유동성시험**

수중불분리성 콘크리트는 다짐을 할 수 없는 경우가 대부분 이므로 매우 큰 유동성 및 충전성이 요구 된다<sup>4,11)</sup>. 따라서 본 연구에서는 유동성 향상을 목적으로 펠라민계 고성능감수제를 사용하였으며, 유동성 평가를 위하여 콘크리트학회 KCI-CT103의 “수중불분리성 콘크리트의 슬럼프플로우 시험방법”에 따라 슬럼프플로우 시험을 실시하였다.

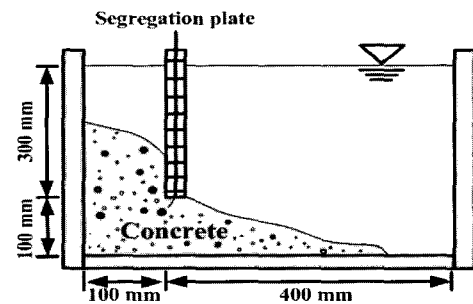
한편 수중에서의 흐름 특성을 알아보기 위하여 문한영의 연구에서 적용한 L형 박스시험<sup>3)</sup>을 실시하여 굳지않은 수중불분리성 콘크리트 시료가 400mm 위치에 도달하는 시간을 측정하였으며, 이를 도달시간(elapsed time)으로 나타내었다. 다음 Fig. 3에 L형 박스시험 모식도를 나타내었다.

**2.2.5 동결융해 시험**

동결융해 실험은 70×100×400mm의 각주형 공시체를 제작하여 재령 14일 동안 수중양생한 후, ASTM C 666의 A법에서 제안한 수중동결, 수중융해의 방법으로 실시하였



**Fig. 2** Manufacture method of antiwashout underwater concrete for freezing and thawing specimen



**Fig. 3** Details of L-type box test

다. 측정 사이클은 공시체의 중심온도를 -17.8℃에서 4.4℃로 동결 및 용해한 것을 1사이클로 300사이클 까지 실시하였으며, 수중불분리성 콘크리트가 동결융해에 취약한 점을 고려하여 처음 25사이클까지는 5사이클마다 그 이후부터는 10사이클마다 진동주파수 및 중량변화를 측정하였다. 또한 상대동탄성계수 및 내구성지수(DF)는 ASTM C 666에서 제안하고 있는 다음 식에 의하여 각각 계산되었다.

$$P_c = \frac{n_c^2}{n^2} \times 100 (\%), \quad DF = \frac{PN}{300} (\%)$$

- 여기서,  $P_c$  : C 사이클 후의 상대동탄성 계수,
- $n$  : 동결융해 실험 실시 전의 진동주파수,
- $n_c$  : C 사이클 후의 진동주파수,
- DF: 내구성 지수,
- P : N 사이클에서의 상대동탄성 계수,
- N : 300 사이클 또는 상대동탄성계수가 60% 이하로 내려가는 사이클 수

### 2.2.6 기포간격계수 측정

수중불분리성 콘크리트의 기포간격계수는 재령 14일에서 원주형 공시체를 길이방향으로 잘라 100×200×25 mm의 시편을 만든 후 이를 다시 반으로 잘라 100×100×25 mm의 시험편을 만들어 사포(sand paper)로서 측정 면을 잘 연마한 후 ASTM C 457에서 제안하는 Modified point-count method에 따라 측정하였다.

### 2.3 수중불분리성 콘크리트의 배합

수중불분리성 콘크리트의 기초물성과 동결융해 저항성을 알아보기 위하여 배합설계를 시리즈 I 과 시리즈 II로 구분하였다. 먼저 시리즈 I의 배합설계는 광물질혼화제 3종류와 AE제의 혼합물에 따른 연행공기량 3종류(2±0.5, 4±0.5 및 6±0.5%)로 합계 12배합이며, 광물질혼화제의 혼합물은 메타카올린 10%(MK10), 플라이애쉬 20%(FA20) 및 고로슬래그 미분말 50%(SG50)로 정하였다. 시리즈 II는 고로슬래그 미분말의 분말도를 4380(시리즈 I의 SG50), 6030 및 8050 cm<sup>2</sup>/g로 달리한 3종류 수중불분리성 콘크리트로서 배합설계는 Table 4와 같다. 이때 설계기준 강도=29.4 MPa, W/B=50%, 잔골재율=42% 및 슬럼프플로우=450~500 mm 범위로 정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 광물질혼화제 혼합 수중불분리성 콘크리트의 기초물성

수중불분리성 콘크리트의 기초물성 시험은 Table 4의 기준배합에 대해서 실시하였으며, 평가항목은 수중나하시험, 유동성 시험 및 압축강도 시험이었다.

#### 3.1.1 재료분리도

수중 콘크리트는 타설 시 물에 의한 시멘트 유실 및 희

석으로 인한 콘크리트의 품질 저하뿐만 아니라 수질오염에 따른 타설 현장 주변의 생태계에 나쁜 영향을 미치는 문제가 종종 발생한다. 따라서 대한토목학회의 “콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준(안)”에서는 pH 값을 12이하 및 현탁물질량을 150 mg/ℓ 이하로 규정하고 있다. 한편 콘크리트학회 규준(안)에서는 시료의 낙하속도를 20~30초로 늦춤으로서 현탁물질량을 50 mg/ℓ로 제안하고 있다.

광물질혼화제를 혼합하여 제조한 수중불분리성 콘크리트의 pH와 현탁물질량 실험을 실시하였으며 측정된 결과를 정리한 것이 Fig. 4이다. 이 그림에서 플라이애쉬 및 슬래그미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 현탁물질량은 각각 118 및 81 mg/ℓ로서 기준콘크리트 보다 약 45 및 20%가 큰 값이다.

고로슬래그 미분말 혼합 수중불분리성 콘크리트의 현탁물질량이 증가하는 이유는 유리질의 슬래그미분말이 수중불분리성 혼화제에 잘 흡착되지 않는 특성으로 인해 물과 접촉하면 쉽게 분리되어 현탁물질량이 많아졌다고 생각된다. 또한, 플라이애쉬 혼합 수중불분리성 콘크리트의 경우, 플라이애쉬 중의 미연소 탄소가 수중불분리성 혼화제를 다소 흡착함으로써 굳지않은 콘크리트의 점성이 떨어져 시멘트입자의 유실이 커졌을 뿐만 아니라<sup>12)</sup> 수중불분리성 혼화제가 시멘트 성분 중 C<sub>3</sub>S 및 C<sub>3</sub>A를 흡착함으로써 시멘트의 수화속도를 방해하는 등의 상승작용으로 FA20의 현탁물질량이 증가한 것으로 판단된다. 한편 메타카올린 혼합 제조한 경우, 현탁물질량이 42 mg/ℓ로써 가장 작은 값을 나타낸 이유는 메타카올린의 빠른 수화특성에 기인한다고 판단되며, 메타카올린이 산화칼슘과 매우 빠르게 포졸란반응을 일으킨다고 하는 Kostuch et. al.<sup>13)</sup>와 Razak et. al.<sup>14)</sup>의 연구내용과도 잘 일치한다.

이번에는 4종류 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 pH 값을 측정된 결과를 비교한 Fig. 4에서 MK10, FA20 및 SG50의 pH 값은 기준콘크리트와 비교하여 약간 작은 값을 나타내었다. 광물질혼화제 혼합 수중불분리성 콘크리트의 pH 값이 작은 이유는 혼화제의 혼합율만큼 비례하여

Table 4 Mixture proportions

	G <sub>max</sub> (mm)	Slump flow (cm)	Air content (%)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )						Chemical admixtures			
						Water	Binder				Aggregate		AWA (W×%)	HRWR (C×%)	
							Cem	MK	FA	SG	Sand	G			
Series I *	Control	25	45±5	2±0.5	50	42	210	420	-	-	-	693	982	1.05	2.0
	MK10							378	42	-	-	690	978	1.20	1.8
	FA20							336	-	84	-	679	963	1.10	1.8
	SG50**							210	-	-	210	686	973	1.10	1.8
Series II ***	SG6030	25	45±5	2±0.5	50	42	210	210	-	-	-	686	973	1.10	1.8
	SG8050							-	-	-	210	686	973	1.10	1.8

\* The aimed air contents of the basic mixture in Series I was 2±0.5% with no AE agent, then for the other mixtures, AE agent was added to achieve 4±0.5 and 6±0.5% of entrained air contents respectively (Total 12 mixtures).

\*\* The symbol SG50 in Series I is changing to SG4380 after the 3.2.3 section for easy comparison with SG6030 and SG8050.

\*\*\* The Series II is the mixture considering the effects of blaine's fineness of blast furnace slag, and the air contents is fixed as 6±0.5% by adding AE agent.

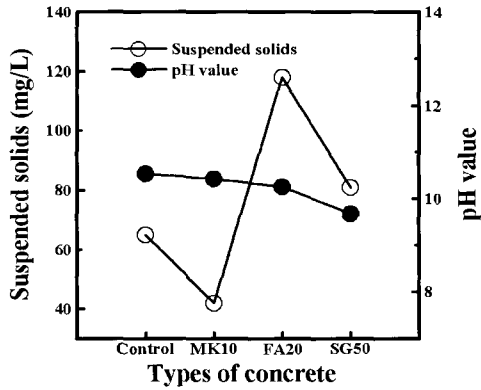


Fig. 4 Segregation of antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures

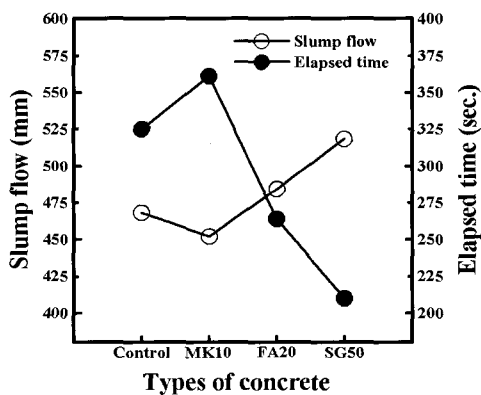


Fig. 5 Slump flow and elapsed time of antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures

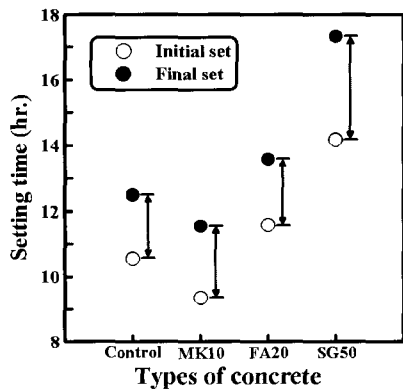


Fig. 6 Setting time of antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures

시멘트양이 적어졌기 때문에 수중불분리성 콘크리트의 알칼리성이 다소 낮아진 결과로 생각된다. 그러나 현탁물질량과 pH 값은 각각 대한토목학회의 “콘크리트용 수중불분리성 혼화제 품질규준(안)”의 규정을 만족하는 결과임을 알 수 있었다.

### 3.1.2 유동특성

광물질혼화제 3종류를 혼합하여 제조한 굳지않은 수중 불분리성 콘크리트의 슬럼프플로우 값과 도달시간을 정리한 것이 Fig. 5이다. 이 그림에서 FA20과 SG50의 슬럼프플로우 값은 각각 484와 518mm로써 기준 콘크리트보다 4 및 10% 정도 큰 값이며, 도달시간은 각각 264 및 210초로서 기준 콘크리트보다 19 및 35.4% 빠른 결과를 나타내었다. 플라이애쉬 및 슬래그미분말이 수중불분리성 콘크리트의 유동성 및 충전성 향상에 기여한 이유는 플라이애쉬의 구형 입자가 시멘트 입자사이에서 불-베어링작용을 하기 때문이며, 또한 급냉한 유리질의 고로슬래그 미분말의 경우 믹싱시 혼합수를 적게 흡수한 때문으로 생각되며, 문한영의 연구<sup>15,16)</sup> 결과와도 잘 일치하였다. 또한 추가 시험으로 실시된 SG6030 및 SG8050의 슬럼프플로우 결과는 각각 476 및 468mm로 단위수량 및 유동화제의 추가가 없이도 소요 슬럼프플로우 범위를 만족하였으며, 이는 자체로 수경성이 없으며 물을 잘 흡수하지 않는 유리질의 표면특성을 가진 고로슬래그 미분말의 특성과, HPMC계인 수중불분리성 혼화제가 C<sub>3</sub>S 및 C<sub>3</sub>A를 흡착하여 수화속도를 지연하는 등의 결과로 판단된다. 그러나 MK10의 경우에는 슬럼프플로우 값과 도달시간이 기준콘크리트보다 각각 4% 정도 작았으며, 10% 정도 늦게 도달하였다. MK10의 유동성이 기준콘크리트나 FA20 및 SG50보다 좋지 않은 이유는 SiO<sub>2</sub> 및 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 91% 이상을 차지하며 분말도 역시 12,000cm<sup>2</sup>/g로 매우 큰 메타카올린의 빠른 수화반응의 영향에 기인된다고 판단되며 Fig. 6에 나타난 응결시간의 결과에서도 메타카올린을 혼합한 MK10의 초결 및 종결시간이 가장 빠름을 확인할 수 있었다.

이상의 실험결과를 종합해보면 플라이애쉬 및 고로슬래그 미분말은 수중불분리성 콘크리트의 유동성 향상에 유효하였으나, 메타카올린을 혼합할 경우 유동성이 기준콘크리트보다 좋지 않음으로 유동성 개선을 위하여 고성능감수제 사용량의 증가 등의 대책이 요망되었다.

### 3.1.3 압축강도

시리즈 I의 기준배합에 대한 압축강도 시험결과를 재령별로 정리한 것이 Fig. 7이며 이 그림에서 FA20 및 SG50의 압축강도는 재령 28일 까지 기준콘크리트 보다 낮았으나 재령 91일에서의 압축강도는 포졸란 반응과 잠재수경성의 영향으로 인하여 FA20 및 SG50의 경우 각각 30.5 및 34MPa로 향상되는 결과를 나타내었다.

한편 MK10의 재령 14일의 압축강도는 26MPa로써 기준콘크리트보다 약 14.3% 큰 값이며, FA20 및 SG50보다는 각각 26.2 및 22% 정도 큰 값을 나타내었다. MK10의 압축강도가 재령 91일까지 가장 큰 값을 나타낸 이유는 3.1.2에 나타난 바와 같이 메타카올린의 조성광물 및 높은 분말도 특성에 따라 초기재령부터 매우 빠른 수화반응을 나타낸 이유로 생각되며, 이는 Kostuch et. al.<sup>13)</sup> 및 Razak et. al.<sup>14)</sup>의 연구내용과도 잘 일치하는 결과이다.

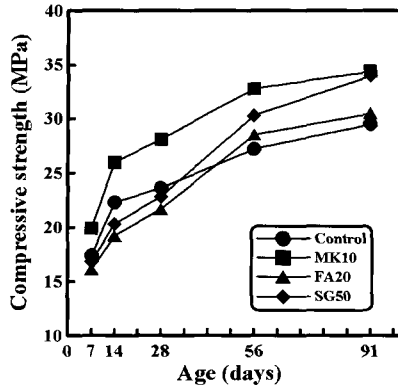


Fig. 7 Compressive strength of antiwashout underwater concrete containing mineral admixtures

### 3.2 광물질혼화재 혼합 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 특성

#### 3.2.1 광물질혼화재 및 연행공기가 동결융해 저항성에 미치는 영향

광물질혼화재 혼합 수중불분리성 콘크리트 3종류와 기준콘크리트의 동결융해시험 결과를 나타낸 것이 Fig. 8이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 사이클은 ASTM C 666에서 제안하고 있는 최초 시험시에 측정된 상대동탄성계수의 60%가 될 때까지 시험을 계속한 결과, 15사이클 정도에 지나지 않는 매우 작은 값을 나타내었다. 특히 플라이애쉬 혼합 수중불분리성 콘크리트의 경우, 동결융해 사이클이 5에도 못 미쳐서 상대동탄성 계수가 60% 이하로 떨어지는 가장 좋지 않은 결과를 나타내었다.

이번에는 시리즈 I의 기준배합에 AE제를 사용하여 연행공기량을  $4\pm 0.5\%$  및  $6\pm 0.5\%$ 로 제조한 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성을 측정한 결과를 Fig. 9 및 10에 나타내었다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 연행공기량이  $4\pm 0.5\%$ 인 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성은 Fig. 8의 AE제를 사용하지 않은 기준배합의 실험결과와 거의 차이가 없음을 확인하였다. 따라서 수중불분리성 콘크리트의 동결융해저항성은 연행공기량  $4\pm 0.5\%$ 의 확보에도 향상의 기미를 찾아볼 수 없었다.

한편 연행공기량을  $6\pm 0.5\%$ 로 한 수중불분리성 콘크리트의 상대동탄성계수를 정리한 Fig. 10에 의하면, MK10과 SG50의 상대동탄성계수가 60%가 될 때의 동결융해 사이클 수는 Figs. 8 및 9와는 달리 다소(약 3배) 향상되었음을 확인하였으나, FA20 및 기준콘크리트의 경우에는 동결융해 사이클 수가 거의 변동이 없었다.

이와 같이 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성이 매우 취약한 원인으로는 본 연구에 사용된 셀룰로오스 계열의 수중불분리성 혼화제가 믹싱 시 다량의 큰 갭한공기

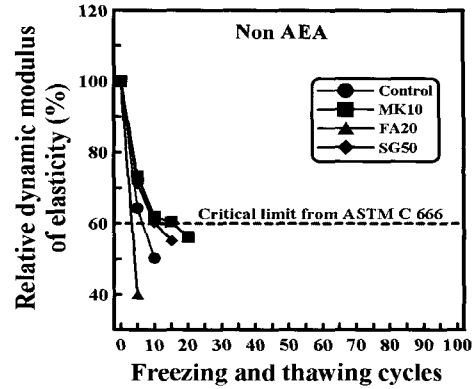


Fig. 8 Relative dynamic modulus of elasticity vs. freezing and thawing cycles (non AEA)

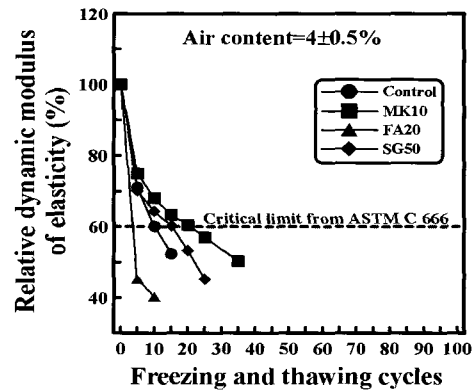


Fig. 9 Relative dynamic modulus of elasticity vs. freezing and thawing cycles (air content =  $4\pm 0.5\%$ )

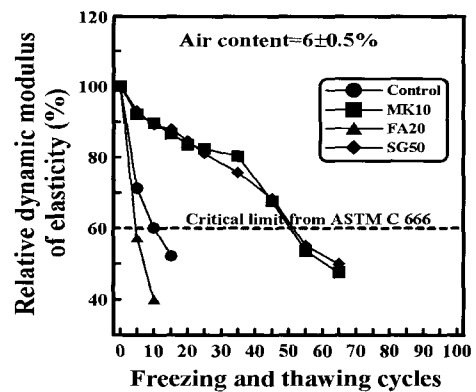


Fig. 10 Relative dynamic modulus of elasticity vs. freezing and thawing cycles (air content =  $6\pm 0.5\%$ )

를 콘크리트 내부에 불규칙적으로 생성시켰기 때문으로 생각되며, 이는 셀룰로오스나 합성 폴리머 계열의 수중불분리성 혼화제가 많은 양의 갭한공기를 생성함으로 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성에 악영향을 미친다고 하는 Kawai, Khayat 및 Neeley의 연구내용<sup>17-19)</sup>과도

비교적 잘 일치하는 결과로 생각된다. 그러나 AE제를 이용한 적량의 연행공기 확보와 메타카올린 또는 고로슬래그 미분말의 사용으로 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성을 다소간 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었으며 향후 수중불분리성 콘크리트의 동결융해저항성 향상을 위한 더욱 다각적인 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

최초 시험시에 측정된 상대동탄성계수의 60%가 될 때의 동결융해 사이클 수를 연행공기량 별로 정리한 것이 Fig 11이다. 이 그림에서 AE제를 사용하지 않은 기준배합과 연행공기량 4±0.5%인 수중불분리성 콘크리트의 상대동탄성계수가 60%가 되는 동결융해 사이클 수는 크게 차이가 없었다. 그러나 연행공기량 6±0.5%인 수중불분리성 콘크리트 중 FA20과 기준콘크리트의 상대동탄성계수가 60%가 되는 동결융해 사이클 수는 각각 5와 10 사이클 정도임에 비하여 MK10과 SG50의 동결융해 사이클 수는 각각 50과 51 정도로 5~10배 정도 상승된 값을 알 수 있었다.

### 3.2.2 공기량 및 기포간격계수가 동결융해 저항성에 미치는 영향

연행공기량 6±0.5%를 목표로 하여 제조한 4종류 경화한 수중불분리성 콘크리트의 재령 14일의 압축강도, 공기량, 기포간격계수 및 비체적을 측정하여 정리한 것이 Table 5이다. 이 표에서 수중불분리성 콘크리트의 종류별 압축강도와 내구성지수를 나타낸 것이 Fig. 12이며, 여기서 MK10을 제외한 FA20 및 SG50의 경우 압축강도가 기준콘크리트 보다 다소 작았으나, SG50의 내구성지수는 오히려 크게 나타났다. 그런데 SG50의 경우 압축강도가 작아도 불구하고 내구성지수가 큰 이유는 동결융해 측정 기간 중에도 고로슬래그 미분말의 잠재수경성으로 콘크리트의 내부조직이 밀실화 함에 기인되었다고 판단되며, Khayat<sup>18)</sup>도 수중불분리성 콘크리트에 고로슬래그 미분말을 30~50% 혼합하게 되면 반경 0.01~0.1 μm의 모세관 공극이 밀실하게 형성되어 동결융해 저항성을 향상시킬 수 있다고 하는 연구와도 유사한 결과이다.

한편, MK10의 동결융해 저항성이 큰 원인은 메타카올린의 포졸란 반응으로 경화한 수중불분리성 콘크리트의 압축강도의 향상 및 기포간격계수가 기준콘크리트 613 μm와 FA20 624 μm에 비하여 512 μm로 다소 감소한 탓으로 판단된다.

그런데 ACI<sup>20)</sup>에서는 내동해성을 확보해야 하는 일반 콘크리트 구조물의 경우 내부 공극이 200 μm 이하의 기포간격계수 및 24 mm<sup>2</sup>/mm<sup>3</sup> 이상의 비체적(α)을 확보해야 한다고 제안하고 있으며, 鎌田 등<sup>21)</sup>은 기포간격계수 250 μm 이하에서 충분한 내동해성을 확보할 수 있다고 한다. 그러나 Khayat<sup>18)</sup>는 기포간격계수가 200 μm 이상에서도 상당히 좋은 내동해성을 유지한다고 하며, 405 μm에서 74%의 내구

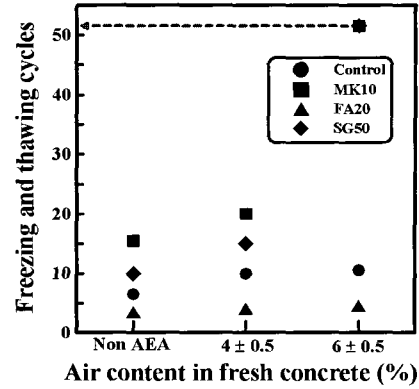


Fig. 11 Number of cycles to reaching 60% of relative dynamic modulus of elasticity

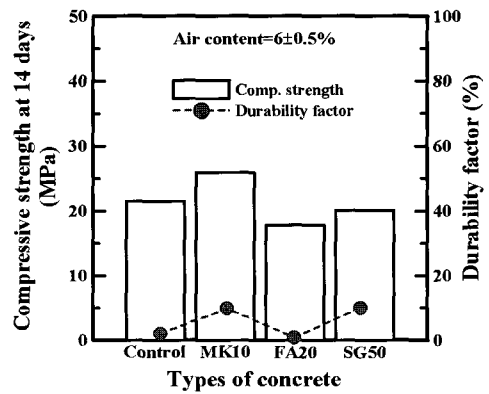


Fig. 12 Relationship between compressive strength and DF

성 지수가 확보된 연구논문을 발표한바 있다. Table 5에서 4종류 굳지않은 수중불분리성 콘크리트의 연행공기량이 6±0.5% 범위임에도 불구하고 경화한 수중불분리성 콘크리트의 공기량은 FA20과 기준 콘크리트가 각각 5.4와 5.5%임에 비하여 MK10과 SG50의 경우 6.2와 6.4%로서 1% 정도 상이한 값을 나타내었다. 다시 말해서 공기량이 5.4와 5.5%인 FA20과 기준 콘크리트에 비하여 MK10과 SG50이 각각 6.2와 6.4%로 증가하는데 따라 기포간격계수는 작

Table 5 Test results of properties and air void system (air content=6±0.5%)

	Control	MK10	FA20	SG50
Slump flow (mm)	522	505	544	553
Air content in fresh concrete (%)	6.2	6.3	5.9	6.3
Air content in hardened concrete (%)	5.5	6.2	5.4	6.4
Compressive strength at 14 days (MPa)	21.5	25.9	17.8	20.1
α (mm <sup>-1</sup> )	14.2	17.3	13.5	14.4
L (μm)	613	512	624	521
DF (%)	2.0	9.8	0.9	10.1

아지며, 내구성지수는 증가하는 경향을 나타내었다.

이상의 실험결과를 종합해 볼 때, 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성은 굳지않은 콘크리트의 연행공기량이 동일할 경우, 경화한 콘크리트의 기포간격계수가 작고 공기량이 많은 쪽이 유리함을 알 수 있었다.

### 3.2.3 고로슬래그 미분말의 분말도가 동결융해 저항성에 미치는 영향(series II)

고로슬래그 미분말을 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성을 향상시키기 위한 연구의 일환으로 고로슬래그 미분말의 분말도 4380, 6030 및 8050 cm<sup>2</sup>/g 3종류로 달리하여 제조한 수중불분리성 콘크리트의 상대동탄성계수 값을 정리한 것이 Fig. 13이며, 경화된 콘크리트의 공기량, 기포간격계수 및 재령 14일의 압축강도를 정리한 것이 Table 6이다.

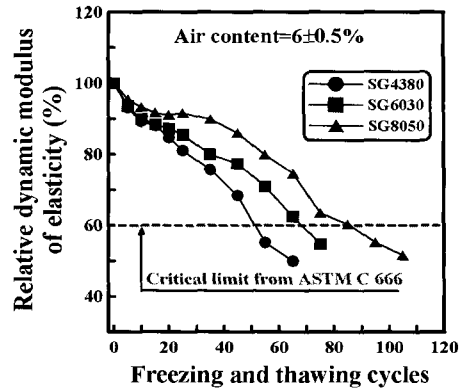
Fig. 13에서 알 수 있듯이 고로슬래그 미분말의 분말도가 커질수록 동결융해 저항성이 다소 증가함을 확인할 수 있었다. 그 이유는 고로슬래그 미분말의 분말도가 커지는데 따라 활성도 지수가 커져 재령 14일 동결융해 개시시기에서의 압축강도가 Fig. 14에서와 같이 약간 향상되었기 때문으로 판단된다. 다시 말해서 슬래그의 활성도 지수 등급이 120인 고품질의 고로슬래그 미분말(5200 cm<sup>2</sup>/g)의 경우, ASTM C 989에서 재령 7일의 활성도 지수가 90%로서 보통 포틀랜드 시멘트의 압축강도를 상회한다고 하는 내용과도 일치한다.

한편 경화한 수중불분리성 콘크리트의 공기량과 기포간격계수 및 내구성 지수와와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 15로서 이 그림에서 고로슬래그 미분말의 분말도가 커질수록 경화한 콘크리트의 공기량이 커지고 기포간격계수는 작아지며, 내구성 지수는 향상되는 경향을 나타냄을 알 수 있다.

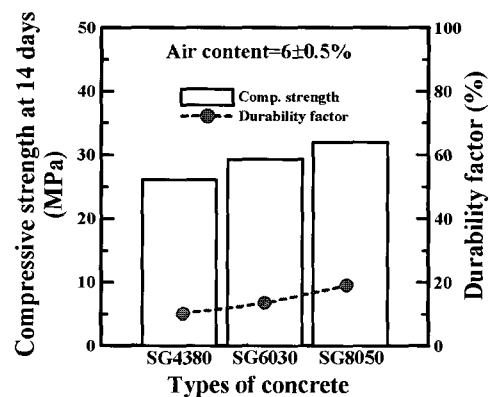
그러나 SG8050의 기포간격계수 460 μm 및 내구성지수 19.1%는 일반 구조물용 콘크리트의 기포간격계수와 비교해 볼 때 매우 좋지 않은 값에 해당됨으로 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성을 개선시키기 위한 근원적인

**Table 6** Test results of properties and air void system (series II)

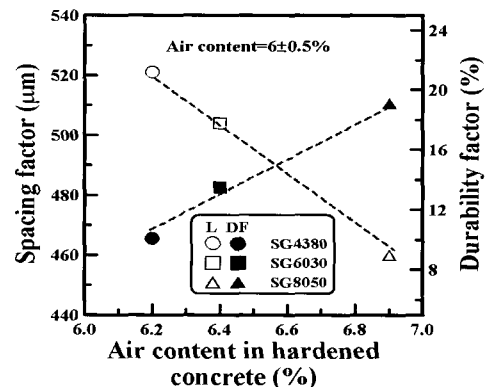
	SG4380	SG6030	SG8050
Slump flow (mm)	553	536	544
Air content of fresh concrete (%)	6.3	5.9	6.4
Air content of hardened concrete (%)	6.2	6.4	6.9
Compressive strength at 14days (MPa)	26.1	29.3	32.0
a (mm <sup>-1</sup> )	14.4	12.3	13.2
L (μm)	521	504	460
DF (%)	10.1	13.5	19.1



**Fig. 13** Relative dynamic modulus of elasticity (series II)



**Fig. 14** Relationship between compressive strength and DF (Series II)



**Fig. 15** Relationship between air content, spacing factor and DF(Series II)

대책이 요망된다.

이상의 실험결과를 종합해 보면 고로슬래그 미분말의 분말도가 큰 쪽이 기포간격계수가 다소 작았으며, 내구성 지수가 큰 값을 나타냄으로서 분말도가 큰 고로슬래그 미분말을 사용한 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성이 가장 좋은 결과를 나타내었다고 생각된다.



#### 4. 결 론

- 1) 광물질혼화재 혼합 수중불분리성 콘크리트의 현탁물질량은 FA20 및 SG50가 각각 118 및 81 mg/l로서 기준 콘크리트 보다 약 45 및 20%의 큰 값을 나타내었으나 유동성 면에서는 오히려 양호한 경향을 보였다. 한편 MK10의 경우 빠른 수화반응으로 현탁물질량은 기준콘크리트보다 좋은 결과를 나타내었으나 유동성은 다소 떨어지는 문제점이 있었다.
- 2) 광물질혼화재 혼합 수중불분리성 콘크리트의 초기재령에서의 압축강도는 FA20 및 SG50가 기준 콘크리트 보다 낮은 반면, 장기재령에서의 압축강도는 포졸란반응 및 잠재수경성의 영향으로 오히려 증가하는 경향을 보였다. 한편 MK10의 경우 빠른 수화반응의 특성으로 인하여 재령 91일 까지 높은 압축강도를 나타내었다
- 3) 광물질혼화재 혼합 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성은 셀룰로오스계 수중불분리성 혼화제에 의한 크고 불규칙한 간헐공기 때문에 기준콘크리트와 마찬가지로 효과가 적었다. 그러나 공기량 6±0.5%인 SG50과 MK10의 경우 기포간격계수가 작아지는 탓으로 FA20 및 기준 콘크리트 보다 동결융해 저항성이 약간 향상되었다. 이때 기포간격계수가 증가할수록 내구성지수는 감소하는 경향을 나타내었다.
- 4) 고로슬래그 미분말의 분말도를 SG4380, SG6030 및 SG8050 3종류로 달리하여 제조한 수중불분리성 콘크리트의 경우, 고로슬래그 미분말의 분말도가 8,050 cm<sup>2</sup>/g으로 커질수록 활성도는 커지며 기포간격계수는 460 μm으로 작아지며, 반면 내구성지수는 19.1%로 커짐으로서 동결융해 저항성이 다소 향상되는 결과를 나타내었다.

이상의 실험결과를 종합해 볼 때 고로슬래그 미분말과 메타카올린을 적정량 혼합하며, AE제에 의한 연형공기량을 6% 정도 확보할 경우 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성은 기준콘크리트보다 다소 향상되는 결과를 얻었다. 그러나 향후 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성에 관련된 연구를 수행하기 위해서는 아래 사항이 연구실험에 큰 영향을 미칠 것으로 사료되므로 검토가 요망된다.

- 1) 광물질혼화재 혼합 수중불분리성 콘크리트의 경우 기존의 동결융해 실험에서 요구하는 표준조건이 되는 수중양생 14일은 수중불분리성 콘크리트의 강도가 충분히 발현되지 못한 탓으로 동결융해 저항성이 턱없이 작은 결과를 나타냄으로 수중양생 기간에 대한 검토
- 2) 셀룰로오스계 수중불분리성 혼화제의 특성상 크고 불규칙한 간헐공기가 발생하기 때문에 기포간격계수가 커지는 등 동결융해 저항성에 나쁜 영향을 미치므로 동결융해 저항성을 고려해야하는 수중 콘크리트 구조물에 수중불분리성 콘크리트를 적용할 경우 AE제 이외에 공기저감제와 같은 혼화제의 병용에 대한 검토

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호 : 04 핵심기술 C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 문한영, 김진철, “수중불분리성 콘크리트의 기초적 물성에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 18권, 1998.5, pp. 313~321.
2. 문한영, 김성수, 전중규, 송용규, “수중불분리성 콘크리트의 고품질화 연구”, 콘크리트학회논문집, 12권 5호 2000. 10, pp. 111~119.
3. 문한영, 김성수, 이재준, “수중불분리성 혼화제의 성능 평가를 위한 실험적 연구”, 콘크리트학회논문집, 11권 5호 1999. 10, pp. 51~60.
4. 문한영, 신국재, 이창수 “광물질혼화재를 혼합한 수중불분리성 콘크리트의 물성 향상을 위한 연구”, 콘크리트학회논문집, 14권 3호 2002. 6, 409~419.
5. M.N. Haque and H. Al-Khaiat, “Durable Concrete Structure in a Chloride Sulfate Rich Environment”, *Concrete International*, Vol.9, 1999, pp.49~52.
6. O.E. Gjrv, “Long-Time Durability of Concrete in Seawater”, *ACI Journal*, Vol. 68, Jan. 1971, pp.60~67.
7. 大和竹史, 江本幸雄, 添田政司, “水中不分離性コンクリートの耐凍害性”, 水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム, 特殊水中コンクリート研究小委員会 論文集, 日本土木學會, pp.161~166, 1990.
8. Fukudome, K., Miyano, K., Taniguchi, H., and Kita, T., *Resistance to freezing and thawing and chloride Diffusion of Anti-Washout Underwater Concrete Containing Blast Furnace Slag*, SP-132, American Concrete Institute, Farmington Hills, 1992, pp.1565~1582.
9. 水中不分離性コンクリート設計施工指針(案), 콘크리트 라이브러리 第67号, 日本土木學會研究小委員会, 1991, 7pp.
10. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서해설 KCI-CT102, 한국콘크리트학회, 2004, pp.600~602.
11. 舟橋政可, 大西雅也, 森本英樹, 渡部 正, “水中不分離性コンクリートの低發熱化, 高流動化に関する研究”, 콘크리트工學年次論文報告集, 20~2, 1998, pp.319~324.
12. 大友 建, 松岡康訓, “水中不分離性コンクリートの流動性の保持に及ぼす各種混和劑の作用に関する研究”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.13, No.1, 1991, pp.192~202.
13. Kostuch, J.A., Walters, G.V., and Jones, T.R., “High performance concretes incorporating metakaolin” review. In: R.K. Dhir and M.R. Jones, Editors, *Concrete 2000* vol. 2, E&FN Spon, London, 1993, pp. 1799~1811.

14. Razak and Wong, *Effect of Incorporating Metakaolin on Fresh and Hardened Properties of Concrete*, *ACI, Recent Advances in Concrete Technology*, SP 200-19, pp.309~323.
15. 문한영, 서정우, 손정호, “플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 내약품성에 관한 연구,” *대한토목학회논문집*, 8권, 1호, 1988. 3, pp. 103~112.
16. 문한영, 송용규, 전중규, 김태욱, “고로슬래그 미분말을 혼합한 고강도 수중불분리성 콘크리트,” *한국콘크리트학회 가을 학술발표회논문집*, Vol.11, No.2, 1999, pp. 199~202
17. Kawai, T., “Nondispersible Underwater Concrete Using Polymers”, *Marine Concrete, International Congress on Polymers in Concrete*, Brighton, England, Sep. 1987, 6pp.
18. Khayat, K. H., “Frost durability of concrete containing viscosity-modifying admixtures,” *American Concrete Institute Materials Journal*, Vol.92, No.6, 1995, pp. 625~633.
19. Neeley. B.D., “Evaluation of Concrete mixes for Use in Underwater Repairs”, Technical Report REMR-CS-18, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, Apr. 1988, 115pp.
20. Concrete International, “Standard Practice for Concrete Highway Bridge Deck Construction”, *ACI Concrete International*, Vol.3, No.9, Sep. 1981, pp.19~58.
21. 権・浜・鎌田・金, “高爐スラグ微分末を混入した高強度コンクリートの気泡組織と耐凍害性”, *自然暴露とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集*, 1993, pp. 77~84.

## 요 약

수중불분리성 콘크리트의 적용 사례가 점차 증대되고 있는 추세임에도 불구하고 역사가 짧은 탓으로 신뢰성 등에 대한 문제점을 지적하고 있다. 특히 수중불분리성 콘크리트는 동결융해에 대한 저항성이 매우 취약한 것으로 알려져 있어 일본토목학회에서는 동결융해작용을 받는 지역에서는 사용하지는 않된다고 규정하고 있다. 본 연구에서는 수중불분리성 콘크리트의 내구성을 향상시키기 위한 목적으로 광물질혼화제 3종류로 제조한 수중불분리성 콘크리트의 기초물성과 동결융해 저항성에 대한 실험을 실시하였다. 본 연구실험결과 FA20 및 SG50의 유동성 및 장기강도는 기준콘크리트 보다 양호한 경향을 보인 반면 현탁물질량은 약간 큰 값을 나타내었다. 한편 MK10의 경우, 빠른 수화반응으로 현탁물질량과 압축강도는 양호한 결과를 나타내었으나 유동성은 다소 떨어지는 문제점이 있었다. 한편, 수중불분리성 콘크리트의 동결융해 저항성은 셀룰로오스계 수중불분리성 혼화제에 의한 크고 불규칙한 갭현공기 때문에 광물질혼화제를 혼합한 경우에도 효과가 적었으나 SG50과 MK10의 공기량 6±0.5%의 경우, 동결융해 저항성이 약간 향상되는 결과를 얻었다. 그러나 고로슬래그 미분말의 분말도를 달리한 경우 분말도가 증가할수록 활성도가 높아져 동결융해 저항성이 향상되는 경향을 나타내었다.

**핵심용어 :** 수중불분리성 콘크리트, 동결융해저항성, 고로슬래그 미분말, 간격계수, 내구성지수