



## 폐석분을 활용한 경량골재 콘크리트의 염화물 확산에 관한 연구

이대혁<sup>1)</sup> · 윤상천<sup>2)</sup> · 정 용<sup>3)</sup> · 신재경<sup>3)</sup> · 지남용<sup>4)\*</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 건축환경공학과 <sup>2)</sup>경주대학교 건축학부 <sup>3)</sup>(주)삼표 기술연구소 <sup>4)</sup>한양대학교 건축공학부

### A Study on Chloride Diffusion in Concrete Containing Lightweight Aggregate Using Crushed Stone-powder

Dae-Hyuk Lee,<sup>1)</sup> Sang-Chen Yoon,<sup>2)</sup> Yong Jeong,<sup>3)</sup> Jae-Kyung Shin,<sup>3)</sup> and Nam-Yong Jee<sup>4)\*</sup>

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

<sup>2)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Gyeongju University, Gyeongju 780-712, Korea

<sup>3)</sup>Sampyo Co., Ltd., Technology Research Center, Kwangju 464-080, Korea

<sup>4)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

**ABSTRACT** The purpose of this study is to provide preliminary data on chloride diffusion of lightweight aggregate concrete containing crushed stone-powder. Accordingly, the study performed experiments using concrete aggregates of Crushed Aggregate (CG), Single-sized Lightweight Aggregate (SLG), Continuous Graded Lightweight Aggregate (CLG), and using water-binder ratio of 0.4, 0.5, 0.6, and using binder of FA and BFS. The chloride diffusion coefficient is calculated according to the NT BUILD 492. Diffusion coefficient of SLG and CLG were higher than that of CG concrete, but the difference was not significant. Also, chloride diffusion coefficient data indicated that it was highly affected by water-binder ratio, and it decreased with the decrease in water-binder ratio. The admixture substitution of FA15% was effective in decreasing the diffusion coefficient only with water-binder ratio of 0.4 while admixture substitution of FA10+BFS20% was effective with all levels of water-binder ratio. The result of study shows lightweight aggregate concrete containing crushed stone-powder has slightly higher chloride diffusion coefficient than CG concrete, but the difference is not significant such that it can be overcome by adjusting water-binder ratio and admixture substitution. In addition, the data indicate the chloride diffusion coefficient of lightweight aggregate concrete can be estimated from the strength of lightweight aggregate.

**Keywords** : durability, chloride ion diffusion coefficient, lightweight aggregate concrete, NT BUILD 492

#### 1. 서 론

콘크리트용 골재 소비의 급증은 국내 골재 자원에 지속적인 감소로 인한 대체 골재의 개발 및 활용이 이루어지고 있으나 골재 품질의 안정화가 정착된 부순골재를 제외한 기타 골재들은 대체 골재로서의 역할을 하지 못하고 있다. 수요가 급증하고 있는 부순골재는 생산시 생산량의 20~30% 정도 발생하는 폐석분으로 인한 심각한 환경 문제를 발생시키고 있어 이에 대한 처리비용 및 방법에 대한 어려움이 가중되고 있다. 폐석분의 발생량은 부순골재 생산량의 약 20%, 부순모래 생산량의 약 30%가 발생된다. 그러나 폐석분의 적절한 재활용 방안을 찾지 못하여 단순히 매립 및 방치하고 있는 실정이며 이는 자원 낭비 뿐만 아니라 환경오염의 주요 원인이 되고 있다.<sup>1)</sup>

또한 최근 건축구조물의 초고층화, 대형화와 토목 교량의 장스팬화 등으로 구조물의 경량화가 절실히 요구되고 있으며 그 대책으로서 콘크리트 재료의 70%를 차지하고 있는 골재를 경량골재로 사용하는 방안이 적극적으로 고려되고 있다.<sup>2)</sup>

그러나 경량골재를 사용한 콘크리트는 높은 흡수율에 의해 부순골재를 사용한 콘크리트에 비하여 염화물 침투 저항성이 낮아 이로 인한 문제가 심화될 수 있으므로 이 연구에서는 폐석분 활용 경량골재 콘크리트의 실용화를 위한 단계로, 폐석분 활용 경량골재 콘크리트의 염화물 이온 확산계수를 도출하여 철근콘크리트의 성능저하 인자인 염화물 확산에 대한 기초자료를 제시하고자 하였다.

#### 2. 폐석분 활용 경량골재

폐석분은 발생과정에서 습윤상태이기 때문에 재료를 건조로에서 약 24시간 이상 항량까지 건조를 시킨 다음 불밀을 이용하여 100 μm 이하로 분쇄한다. 이렇게 분쇄

\*Corresponding author E-mail: nyjee@hanyang.ac.kr  
 Received October 30, 2009, Revised January 29, 2010,  
 Accepted February 6, 2010  
 ©2010 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Chemical composition of stone-powder

(unit: %)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ti <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	L.O.I	etc.
63.5	16.0	5.4	0.1	2.1	4.8	3.6	2.7	0.6	0.2	0.7	0.4

한 원료를 용매제 등과 혼합 후 원통형 펠레타이저로 성형체를 제조 후 건조로에서 105°C 24시간 이상 건조 후 소성하여 폐석분 활용 경량골재를 제조한다.

현재 폐기물 관리법에 의해 폐기물로 구분되어 있는 폐석분의 화학조성은 Table 1과 같다. 폐석분은 약 55~65%의 SiO<sub>2</sub>, 10~20%의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 함유하고 있다. 이러한 특성은 시멘트계 재료의 CaO와 수열합성반응 하여 토버모라이트 결정을 생성시켜 수화반응의 가능성을 갖게 된다.

### 3. 염화물 확산

철근콘크리트에서 염소 이온은 높은 알칼리 상태에서 철근의 부동태 피막을 파괴하여 철근이 부식하기 쉬운 상태를 만드는 문제를 가지고 있다. 이러한 문제는 수용성 철-염소 복합물의 생성으로 발생되며, 이는 다공성 녹의 침전을 유발하고 염소 이온을 다시 활성화 시켜 성능저하를 유발한다. 콘크리트 중 내부의 철근이 부식하면 그 체적은 원 단면의 2.5배로 팽창하며 부피팽창으로 인한 내부응력 문제와 계속적인 성능저하의 우려가 있다.<sup>3)</sup> 경량골재를 사용한 콘크리트는 높은 흡수율에 의해 부순골재를 사용한 콘크리트에 비하여 염화물 침투 저항성이 낮아 이로 인한 문제가 심화될 수 있으므로 이에 염화물 확산에 대한 고찰이 필요하다.

### 4. 실험 계획 및 방법

#### 4.1 실험 인자 및 수준

이 연구는 부순골재와 현재 중국에서 범용적으로 사용되는 구조용 경량골재를 비교기준으로 국내에서 개발된 폐석분을 활용한 경량골재 콘크리트의 염화물 확산에 대한 물결합재비, 골재 및 혼화재 치환율의 영향을 비교

**Table 2** Experimental factor

Experimental factor	Level	Unit
W/B	0.4, 0.5, 0.6	3
Type of coarse aggregate	Crushed stone aggregate (CG)	3
	Single-sized lightweight aggregate (SLG)	
	Continuous graded lightweight aggregate (CLG)	
Binder substitution ratio (%)	FA 15 FA 10+BFS 20	2

FA : fly ash

BFS : blast furnace slag

검토하기 위하여 단위수량을 175 kg/m<sup>3</sup>로 고정하고 Table 2와 같은 조건으로 실험을 진행하였다.

#### 4.2 사용 재료

##### 4.2.1 결합재

결합재로 사용된 OPC, FA, BFS의 화학조성은 Table 3과 같다. OPC는 비중 3.15, 분말도 3,400 cm<sup>2</sup>/g인 국내 H사의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, FA는 비중 2.21, 분말도 3,362 cm<sup>2</sup>/g, BFS는 비중 2.90, 분말도 4,463 cm<sup>2</sup>/g인 국내산을 사용하였다.

##### 4.2.2 골재

잔골재는 인천산 세척사, 굵은 골재는 경기 양주산 부순골재(CG)와 폐석분을 활용한 국내산 단일 입도의 조립형 경량골재(SLG) 및 일반 중국산 연속 입도의 비조립형 경량골재(CLG)를 사용하였으며 물리적 성질은 Table 4와 같다.

**Table 3** Chemical composition of binders

(unit: %)

Binder	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	etc.	Ig.loss
OPC	21.95	2.81	60.12	3.32	2.11	6.59	-	3.1	1.85
BFS	33.40	0.39	42.70	6.30	0.30	14.01	-	2.9	0.50
FA	53.60	9.40	4.70	2.60	1.80	20.00	4.2	3.8	3.4

**Table 4** Physical properties of aggregates

Type	Fineness modules	Surface dried density (g/cm <sup>3</sup> )	Unit volume weight (kg/m <sup>3</sup> )	Solid volume (%)	Water absorption (%)	Aggregate crushing (%)
Fine aggregate	2.68	2.56	-	-	1.47	-
CG	6.67	2.63	1,490	60	0.72	18.4
SLG	6.98	1.59	806	54	4.20	20.9
CLG	6.46	1.77	945	57	5.99	35.8

### 4.2.3 혼화제

굳지 않은 콘크리트의 요구 성능확보를 위하여 국내산 폴리카본산계 고성능감수제, AE제를 사용하였다.

## 4.3 배합 및 시험체 제작

### 4.3.1 배합

콘크리트는 용적배합을 하였으며 Table 5와 같다. 콘크리트 배합은 굵은 골재에 따른 영향만을 평가하기 위하여 배합수 및 잔골재율을 고정하고, 폴리카본산계 고성능감수제를 결합재 중량의 0.3%, 폴리카본산계 AE제를 결합재 중량의 0.003% 첨가하였다.

### 4.3.2 시험체 제작 및 양생

압축강도 및 흡수율과 염화물 이온 확산 시험체는 강제식 팬믹서로 믹싱한 후 Ø100 mm × 200 mm 공시체를 KS F 2403 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법에 따라 제작하여 24시간 경과했을 때 물드를 탈형하고, 20 ± 2°C 수중에서 27일간 수중양생 하였다. 기건단위질

량 시험체는 위와 같이 제작 후 KS F 2462 「구조용 경량 콘크리트의 단위질량시험방법」에 따라 16~27°C 온도 하에서 수분의 증발이나 흡수 없이 6일간 양생하고 24시간 수중양생한 후 온도 23 ± 1.0°C, 상대습도 50 ± 5%에서 21일간 양생하였다.

## 4.4 실험 방법

### 4.4.1 압축강도 및 흡수율 측정

압축강도는 KS F 2405 「콘크리트의 압축 강도시험 방법」에 따라 재령 7일과 28일에 측정하여 각 배합별 3개 시험체의 평균값으로 하였다.

흡수율은 재령 28일 Ø100 mm × 200 mm 공시체의 표건질량( $m_0$ )을 측정 후 105 ± 5°C의 열풍건조기에서 절건시켜 시험체의 절건질량( $m_1$ )을 측정하여 식 (1)에 따라 재령 28일에서 흡수율을 측정하였다.

$$\text{흡수율}(\%) = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

**Table 5** Mix proportions of concrete

Specimen	W/B	S/a (%)	SP/B (%)	AE/B (%)	Volume weight (l/m <sup>3</sup> )					
					W	C	FA	BFS	S	G
OPC-CG-06	0.6					92.59	-	-	357.40	329.91
OPC-SLG-06									357.40	329.91
OPC-CLG-06									357.40	329.91
FA15-CG-06						78.79	13.90	-	357.40	329.91
FA15-SLG-06									357.40	329.91
FA15-CLG-06									357.40	329.91
FA10BFS20-CG-06						64.85	9.28	18.56	357.40	329.91
FA10BFS20-SLG-06									357.40	329.91
FA10BFS20-CLG-06									357.40	329.91
OPC-CG-05	0.5	52	0.3	0.003	175	111.11	-	-	347.82	321.07
OPC-SLG-05									347.82	321.07
OPC-CLG-05									347.82	321.07
FA15-CG-05						94.45	16.66	-	347.82	321.07
FA15-SLG-05									347.82	321.07
FA15-CLG-05									347.82	321.07
FA10BFS20-CG-05						77.78	11.11	22.22	347.82	321.07
FA10BFS20-SLG-05									347.82	321.07
FA10BFS20-CLG-05									347.82	321.07
OPC-CG-04	0.4					138.88	-	-	333.38	307.74
OPC-SLG-04									333.38	307.74
OPC-CLG-04									333.38	307.74
FA15-CG-04						118.05	20.83	-	333.38	307.74
FA15-SLG-04									333.38	307.74
FA15-CLG-04									333.38	307.74
FA10BFS20-CG-04						97.24	13.88	27.76	333.38	307.74
FA10BFS20-SLG-04									333.38	307.74
FA10BFS20-CLG-04									333.38	307.74

SP : superplasticizer, AE : air entraining admixture, B : binder

여기서  $m_o$ : 시험체의 표건질량(g)  
 $m_1$ : 시험체의 절건질량(g)

#### 4.4.2 기건단위질량

기건단위질량은 KS F 2462 「구조용 경량 콘크리트의 단위질량시험방법」에 따라 식 (2)와 같이 3개의 공시체 시험값의 평균으로 기건단위질량을 측정하였다.

$$\text{질량}(\text{kg/m}^3) = \frac{A \times 997}{B - C} \quad (2)$$

여기서  $A$ : 재령 28일 콘크리트 공시체의 건조질량(kg)  
 $B$ : 공시체의 표건질량(kg)  
 $C$ : 공시체의 수중질량(kg)

#### 4.4.3 염화물 이온 확산<sup>4)</sup>

염화물 이온 이동 저항성은 NT BUILD 492에 준하여 재령 28일의  $\text{Ø}100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  공시체를 Fig. 1과 같이  $50 \pm 2 \text{ mm}$ 의 두께로 양측을 절단한 것을 시험편으로 하였다.

음극용액은 10% NaCl수용액, 양극용액은 0.3 M의 NaOH 수용액을 사용하였고 Fig. 2와 같이 설치 한 후 초기 전압 30 V를 가하여 최초 인가시의 전류값을 측정 한 후 그에 따른 인가전압을 설정하고 전류값에 따른 시험시간을 설정하였다. 시험 종료 후 시험체를 지름 방향으로 쪼개고 0.1 N의 질산은을 분무하여 침투깊이를 측정하였다. 침투깊이는 Fig. 3과 같이 버니어캘리퍼스로 가장자리

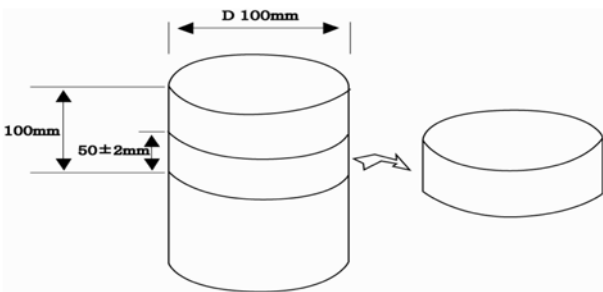


Fig. 1 Preparation of the specimen

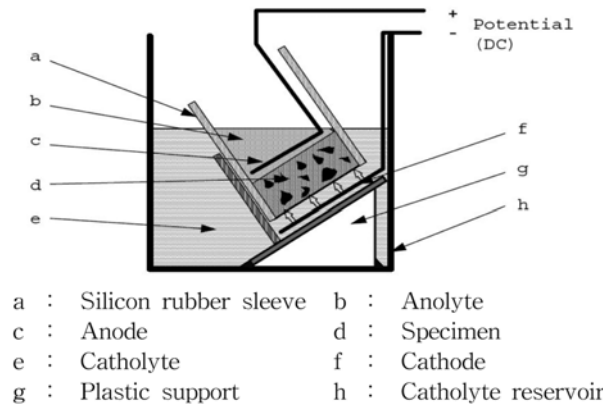


Fig. 2 Arrangement of the migration set-up

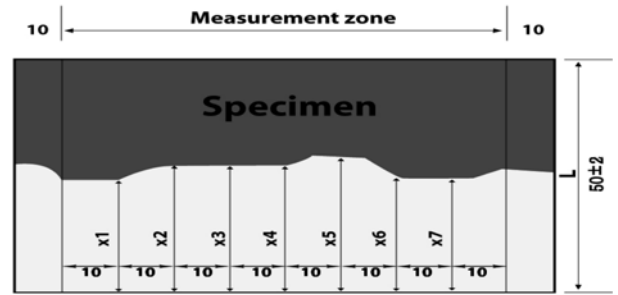


Fig. 3 Measurement method of chloride penetration depth (unit: mm)

10 mm 제외하고 10 mm 간격으로 7개소를 0.1 mm까지 측정 평균으로 하였다.

염화물 이온 확산계수는 NT BUILD 492에 의거 식 (3)~(5)에 의해 유도된 식 (6)의 약산식을 사용하여 실험체 3개의 평균값으로 하였다.

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (3)$$

$$\text{여기서 } E = \frac{U-2}{L} \quad (4)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{2c_d}{c_o} \right) \quad (5)$$

그리고  $\text{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{2 \times 0.07}{2} \right) = 1.28$  이므로

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)}{U-2}} \right) \quad (6)$$

- $D_{nssm}$  : 염소 이온 확산 계수( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )
- $z$  : 이온의 원자가(염소 이온의 경우  $z=1$ )
- $F$  : 페더레이 상수( $9.648 \times 10^4 \text{ J/V}\cdot\text{mol}$ )
- $U$  : 가인 전압의 절대값(V)
- $R$  : 기체 상수( $R=8.314 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$ )
- $T$  : 측정 전후의 용액의 평균 온도(K)
- $L$  : 시험편의 두께(m)
- $x_d$  : 염소 이온의 침투 깊이(m)
- $t$  : 실험 지속 시간(sec)
- $\text{erf}^{-1}$  : 오차 함수
- $c_d$  : 비색법에 의한 염화물 반응 농도(0.07 N)
- $c_o$  : 음극의 염소 이온 농도(2 N $\approx$ 10%)

## 5. 실험 결과 및 고찰

### 5.1 압축강도 및 흡수율

물결합재비 및 혼화재 치환에 따른 골재별 압축강도 및 흡수율은 Table 6과 같다. 물결합재비에 따른 재령 28

**Table 6** Properties of fresh and hardened concrete

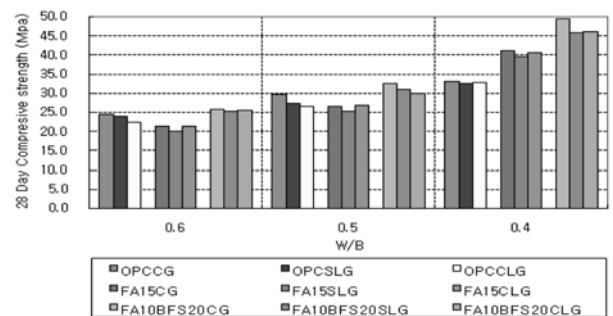
Specimen	Air (%)	Slump (mm)	Compressive strength (MPa)		Water absorption (%)	Dry unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Diffusion coefficient (×10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)
			7 days	28 days			
OPC-CG-06	5.5	180	16.7	24.4	5.2	2231	26.9693
OPC-SLG-06	5.1	187	17.0	24.0	6.1	1922	27.7344
OPC-CLG-06	5.2	185	15.8	23.1	6.6	1958	27.5609
FA15-CG-06	4.1	183	14.4	22.0	4.9	2235	27.9827
FA15-SLG-06	4.2	190	14.3	20.8	6.4	1921	28.2595
FA15-CLG-06	3.9	189	14.5	21.5	6.3	1931	28.0217
FA10BFS20-CG-06	3.5	180	14.1	25.8	5.0	2268	20.8679
FA10BFS20-SLG-06	3.5	190	14.4	25.3	6.3	1941	23.2034
FA10BFS20-CLG-06	4.1	189	14.4	25.5	6.3	1958	23.7533
OPC-CG-05	3.9	183	23.3	29.6	4.9	2258	19.9940
OPC-SLG-05	4.1	197	21.4	27.3	6.0	1917	20.3803
OPC-CLG-05	4.3	195	20.0	26.5	6.3	1936	21.9646
FA15-CG-05	3.5	195	19.0	26.4	4.5	2289	23.9728
FA15-SLG-05	3.6	202	18.6	25.3	5.6	1964	24.4210
FA15-CLG-05	3.7	201	20.0	25.8	5.9	1964	24.9767
FA10BFS20-CG-05	3.7	197	20.7	32.6	4.7	2326	15.8820
FA10BFS20-SLG-05	3.3	203	20.3	31.1	5.3	1992	17.6170
FA10BFS20-CLG-05	3.5	201	19.3	29.9	5.7	1968	16.7953
OPC-CG-04	5.8	180	27.7	33.1	4.5	2218	15.0028
OPC-SLG-04	4.5	190	30.5	32.5	4.9	1939	15.0553
OPC-CLG-04	3.9	195	27.9	32.9	5.9	1919	15.2204
FA15-CG-04	3.4	190	32.6	41.2	4.4	2226	13.7533
FA15-SLG-04	5.1	203	29.0	39.7	4.9	1965	14.8601
FA15-CLG-04	5.1	200	30.3	40.5	5.6	1969	15.1944
FA10BFS20-CG-04	3.9	185	35.4	49.4	3.4	2305	10.7253
FA10BFS20-SLG-04	4.5	201	32.0	45.9	4.3	1956	11.7391
FA10BFS20-CLG-04	4.4	200	31.1	46.1	4.7	1951	13.9601

일의 압축강도는 Fig. 4와 같이 CG콘크리트, SLG콘크리트, CLG콘크리트 모두 물결합재비가 감소할수록 높아졌다.

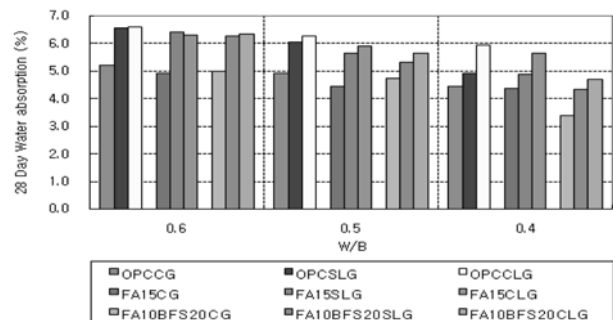
골재에 따른 재령 28일의 압축강도는 CG콘크리트에 비해 SLG콘크리트 및 CLG콘크리트의 강도가 낮게 나타났다. 이는 CG에 비해 밀도가 SLG 1.04 g/cm<sup>2</sup>, CLG 0.86 g/cm<sup>2</sup> 낮고 파쇄율이 SLG 2.5%, CLG 17.4% 높은 영향으로 사료된다.

혼화재 치환에 따른 재령 28일의 강도는 OPC대비 FA15의 경우 물결합재비 0.6, 0.5에서는 약 2 MPa 낮았고 물결합재비 0.4에서는 약 7 MPa 높게 나타났다. 이는 FA를 15% 치환한 콘크리트의 재령 28일 이전의 수화반응은 포틀랜드시멘트만을 사용한 높은 물결합재비의 콘크리트에 비해 늦기 때문이다.<sup>5)</sup> FA10+BFS20의 경우 3 수준의 물결합재비에서 재령 28일 압축강도가 모두 높게 나타났다.

재령 28일의 콘크리트의 흡수율은 Fig. 5와 같고 물결합재비 감소와 혼화재 치환에 따라 감소하였다. 골재에 따른 흡수율은 CG콘크리트에 비하여 SLG콘크리트는 0.5~1.5%, CLG콘크리트는 0.9~1.5% 크게 나타났다. 콘크리트 매트릭스가 동일한 조건에서의 차이이므로 이는 골재의 영향으로 볼 수 있으며 경량골재의 큰 흡수율이



**Fig. 4** 28 Compressive strength at 28 days (MPa)



**Fig. 5** Water absorption at 28 days (%)

경량골재 콘크리트 흡수율로 나타나지 않는 것은 시멘트 페이스트의 모세관 공극률에 더 큰 영향을 받기 때문이다.

혼화재 치환에 따른 흡수율은 물결합재비 0.6에서 감소가 작았으나 0.5, 0.4에서는 감소가 보다 크게 나타났다. 흡수율의 감소는 OPC < FA15 < FA10 + BFS20 순으로 나타났다며 이는 시멘트수화시 생성되는 수산화칼슘은 시간이 경과함에 따라 용해되어 공극률과 투수성이 커지나 FA 및 BFS는 수화시 포졸란반응에 의하여 수산화칼슘이 줄어들 미세구조가 더욱 치밀해지고 균질해지기 때문이다.<sup>6)</sup>

### 5.2 기건 단위 질량

기건단위질량은 Table 6과 같다. 폐석분 활용 경량골재 콘크리트의 기건단위질량은 1,917~1,992 kg/m<sup>3</sup>로 건축공사 표준시방서(2006)와 콘크리트 표준시방서(2003)의 경량골재콘크리트 1종의 기건단위질량 범위 1,700~2,000 kg/m<sup>3</sup>에 만족하였고 부순골재 사용 콘크리트 대비 10~15% 감소하였다. 기건단위질량은 물시멘트비가 낮을수록 결합재 증가로 다소 높았으며 골재에 따라서는 SLG, CLG의 단위용적질량이 적고 밀도가 낮아 감소했다. 또한 혼화재 치환에 따라 FA 및 BFS의 비중이 낮아 감소하였다.<sup>7)</sup>

### 5.3 염화물 이온 확산계수

골재별 물결합재비 및 혼화재 치환에 따른 염화물 확산계수는 Figs. 6~8과 같다. OPC 콘크리트의 염화물 확산계수는 Fig. 6과 같이 물결합재비가 감소할수록 비례하여 감소하였다. FA15 콘크리트의 염화물 확산계수는 Fig. 7과 같이 물결합재비가 감소할수록 감소하나 0.6 대비 0.5에서 OPC 콘크리트보다 감소가 작았다. FA10+BFS20 콘크리트의 염화물 확산계수는 Fig. 8과 같이 물결합재비가 감소할수록 감소하였고 감소율이 크게 나타났다.

물결합재비에 따라 0.6대비 0.5에서 OPC 및 FA10+BFS20은 감소율이 약 25%로 나타났으나 FA15는 약 10%로 감소율이 낮았다. 이는 조직의 치밀성과 관련되는 압축강도 발현이 다른 결합재 수준보다 FA15가 낮기 때문으로 사료된다. 0.6대비 0.4에서 모든 수준의 결합재가 약 40% 이상 감소하여 물결합재비가 낮을수록 염화물 확산계수가 크게 감소하였다.

골재에 따른 CG콘크리트 대비 염화물 확산계수는 OPC의 경우 SLG콘크리트는 모든 물결합재비에서 다소 크게 나타났으나 차이가 크지 않았으며, CLG콘크리트는 0.5의 물결합재비에서 약 10% 정도 높게 나타났으나 그 외의 물결합재비에서는 SLG콘크리트와 유사했다. FA15의 경우 SLG콘크리트 및 CLG콘크리트는 모든 물결합재비에서 크게 나타났으나 큰 차이가 없었다. FA10+BFS20의 경우 SLG콘크리트는 모든 물결합재비에서 차이가 유사했고, CLG콘크리트는 0.5에서 차이가 가장 작게 나타났다. CLG콘크리트에서 SLG콘크리트 보다 염화물 확산

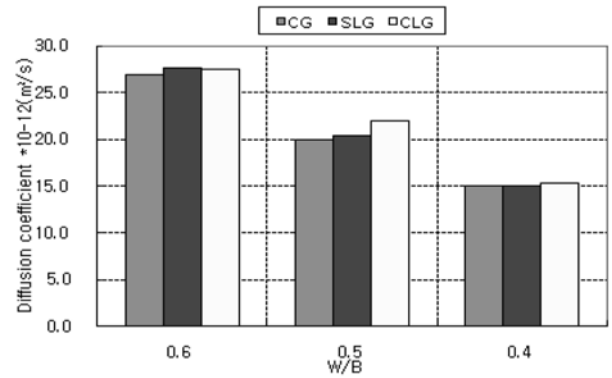


Fig. 6 Diffusion coefficient of OPC concrete

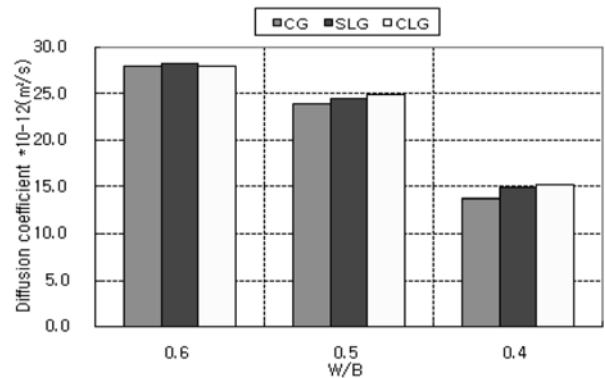


Fig. 7 Diffusion coefficient of substitution FA 15% concrete

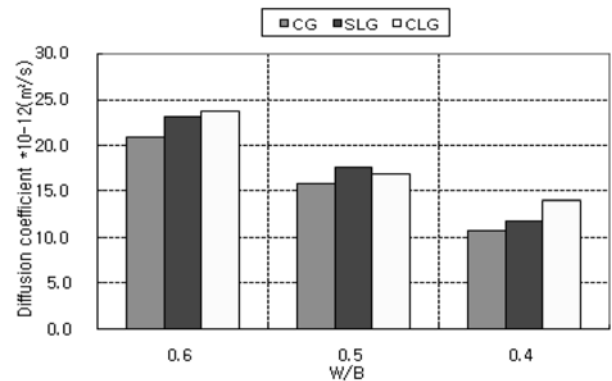


Fig. 8 Diffusion coefficients of FA10+BFS20% concretes

계수가 큰 것은 골재의 물성에 따른 것으로 사료된다.

혼화재 치환에 따른 OPC대비 염화물 확산계수는 FA15의 경우 0.6에서 -3.8~1.7%, 0.5에서 -19.9~13.7%, 0.4에서 0.2~8.3%로 0.4에서만 감소하였다. 이는 0.4에서 결합재량의 증가로 시멘트수화시 생성되는 수산화칼슘의 양과 비표면적이 커져 포졸란반응이 활성화에 되었기 때문으로 사료된다. FA10+BFS20의 경우 0.6에서 13.8~22.6%, 0.5에서 13.6~23.5%, 0.4에서 8.3~28.5%로 모든 수준에서 감소하였다.

SLG와 CLG 경량골재 콘크리트 염화물 확산 계수는 CG콘크리트 염화물 확산계수보다 크지만 크게 차이가

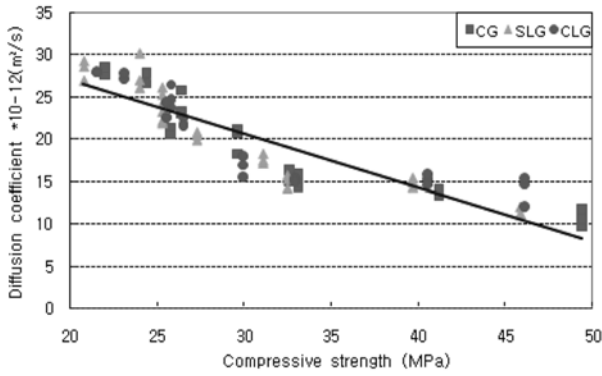


Fig. 9 Relationship between compressive strength and diffusion coefficient

나지는 않았다. 이는 골재의 영향이 콘크리트의 매트릭스에 영향보다 적기 때문으로 사료된다. 또한 물결합재비 및 혼화재 치환율은 콘크리트 압축강도에 주요인자이며 압축강도는 콘크리트의 매트릭스의 치밀성과 관련되기에 강도와 상관성이 있음을 알 수 있다. 폐석분 활용 경량골재 콘크리트의 염화물 확산에 대해 혼화재 치환 보다 물결합재비에 대한 고려가 더욱 효과적이며, 혼화재 치환의 경우 FA15는 물결합재비 0.4에서만 낮은 결과를 나타내 모든 수준에서 낮은 결과를 가져온 FA10+ BFS20이 혼화재 치환에 있어 더욱 적합한 것으로 나타났다.

#### 5.4 압축강도와 염화물 확산계수의 관계

압축강도와 염화물 확산계수의 상관관계는 Fig. 9와 같다. 모든 종류의 골재에서 배합조건에 관계없이 압축강도가 증가함에 따라 염화물 확산계수는 감소하는 경향을 보이고 있다. 콘크리트의 염화물 확산 저항성은 골재물성, 물결합재비, 혼화재치환율에 영향이 있는 것으로 나타났다으나 이는 압축강도에 영향을 끼치는 요인으로써 압축강도와 염화물 확산계수는 큰 상관성이 있음을 알 수 있다.<sup>8)</sup> 이에 골재별 콘크리트의 압축강도를 독립변수로 골재별 염화물 확산계수를 종속변수로 하여 회귀분석을 실시하였다. 골재별 콘크리트 모두 압축강도 증가에 따라 확산계수는 감소하였으며, 압축강도에 염화물 확산계수 추정식을 식 (7)과 같이 도출하였다.

$$D = -0.633(x) + 39.629 \quad (7)$$

$$\overline{R^2} = 0.804, \text{ 표준오차} = 2.51(\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec})$$

여기서 D : 염화물 확산계수( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )

x : 재령 28일 압축강도

### 6. 결 론

폐석분을 활용한 경량골재 콘크리트의 염소 이온 확산 실험을 실시하여 부순골재 사용 콘크리트와 폐석분을 활

용한 경량골재 콘크리트의 비교 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 물결합재비, 혼화재치환율 및 골재별 비교한 결과 압축강도는 그다지 크지 않았다. 혼화재 치환율은 높은 물결합재비보다 낮은 물결합재비에서 강도의 증가가 큰 것으로 나타나 물결합재비의 영향을 가장 고려해야 할 것으로 사료된다. 경량골재 콘크리트의 흡수율은  $CLG > SLG$  순으로 CLG의 높은 흡수율에 영향으로 사료된다.
- 2) 기건단위질량은 폐석분 활용 경량골재 SLG콘크리트가  $1,917 \sim 1,992 \text{ kg/m}^3$ 로 건축공사 표준시방서(2006)와 콘크리트 표준시방서(2003)의 경량골재콘크리트 1종의 기건단위질량 범위  $1,700 \sim 2,000 \text{ kg/m}^3$ 에 만족하였고 CG콘크리트 대비 10~15%의 단위 질량이 감소하는 것으로 나타났다.
- 3) 염화물 확산계수는 SLG콘크리트 및 CLG콘크리트가 CG콘크리트보다 크게 나타났다. 염화물 확산계수에 영향을 미치는 것은 물결합재비 > 혼화재치환율 > 골재 순으로 나타났다. 염화물 확산계수가 작은 순으로 혼화재치환율에서는  $FA10 + BFS20 > OPC > FA15$ 이며, 경량골재는  $CLG > SLG$  순으로 나타났다.
- 4) 회귀분석을 실시 압축강도에 따른 염화물 확산계수 추정식을 도출하여 재령 28일 강도에 따른 염화물 확산계수를 추정할 수 있다.
- 5) 폐석분 활용 경량골재 콘크리트의 염화물 확산을 분석한 결과, 동일한 콘크리트 매트릭스에서 부순골재 콘크리트에 비하여 폐석분 활용 경량골재 콘크리트의 염화물 확산계수는 큰 차이가 없으며, 물결합재비 및 치환율로 저항성을 향상 할 수 있기에 실용화 할 수 있을 것으로 판단되었다.

### 감사의 글

이 연구는 에너지관리공단에서 지원한 2008년도 에너지·자원 기술개발사업의 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Yoon, S. C., Jee, N. Y., Roh, S. Y., and Cho, H. B., "The Comparison on Code of Light-weight Aggregate in the Inside and Outside Country," *International Symposium on Architectural Interchanges in Asia*, Vol. 2, 2008, pp. 924~929.
2. Mehta, K. K. and Monteiro, P. J. M., *Concrete : Micro-structure, Properties, and Materials Third Edition*, McGraw-Hill, New York, 2006, pp. 450~456.
3. Mindess, S., Young, J. F., and Darwin, D., *Concrete Second Edition*, Pearson Education, 2003, pp. 493~499.
4. Nordtest Method, NT BUILD 492, *Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments*, Nordtest,

- Finland, 1999.
5. 한국콘크리트학회, 콘크리트 혼화재료, 기문당, 1997, pp. 201~205.
  6. Leng, F., Naiqian, F., and Lu, X., "An Experimental Study on the Properties of Resistance to Diffusion of Chloride Ions Fly Ash and Blast Furnace Slag Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, Issue 6, 2000, pp. 989~992.
  7. Chandra, S. and Berntsson, L., *Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology and Applications*, Noyes Publications, 2003, pp. 168~190.
  8. Lo, T. Y., Tang, W. C., and Cui, H. Z., "The Effects of Aggregate Properties on Lightweight Concrete," *Building and Environment*, Vol. 42, Issue 8, 2007, pp. 3025~3029.

---

**요 약** 이 연구에서는 폐석분 활용 경량골재 콘크리트의 염화물 확산에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다. 이에 콘크리트의 골재를 부순골재(CG), 폐석분을 활용한 단일 입도의 비조립형 경량골재(SLG), 연속 입도의 비조립형 경량골재(CLG), 물결합재비 0.4, 0.5, 0.6, 결합재 FA, BFS로 실험을 실시하였다. 염화물 확산 계수는 NT BUILD 492준하여 시험 후 산출하였으며 SLG와 CLG콘크리트의 확산계수는 CG콘크리트보다 다소 크게 나타났으나 큰 차이는 없었다. 또한 염화물 확산계수는 물결합재비에 의한 영향이 크며 물결합재비가 낮을수록 감소하는 것으로 나타났고 혼화재 치환은 FA15%의 경우 물결합재비 0.4에서만 감소를 나타내는데 비해 FA10 + BFS20% 모든 수준에서 감소하는 것으로 나타나 더 적합한 것으로 사료된다. 경량골재 콘크리트의 염화물 확산을 분석한 결과, 폐석분 활용 경량골재 콘크리트가 CG콘크리트에 비하여 염화물 확산 계수가 크지만 큰 차이는 없으며 물결합재비 및 혼화재 치환으로 저항성을 향상시킬 수 있다. 또한 경량골재에 대해 강도에 따른 염화물 확산 계수를 추정할 수 있다.

**핵심용어** : 내구성, 염화물 이온 확산계수, 경량골재 콘크리트, NT BUILD 492