

# 폐석분을 활용한 경량골재 콘크리트의 염화물 확산에 관한 연구

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

이 대 혁\*      지 남 용\*\*      김 재 훈\*\*\*      정 용\*\*\*\*      신 재 경\*\*\*\*\*  
 Lee, Dae-Hyuk      Jee, NamYong      Kim, Jae-Hun      Jeong, Yong      Shin, Jae-Kyung

### Abstract

The purpose of this study is to provide fundamental data on chloride diffusion from lightweight aggregate concrete by utilizing 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 after experiment based on NT BUILD 492. Diffusion coefficient of SLG and CLG were little bit higher than CG Concrete, but the difference is meaningless. Also, chloride diffusion coefficient indicates that it is highly affected by water-binder ratio, and it decreases with the decrease in water-binder ratio. The admixture substitution indicates decrease only with water-binder ratio of 0.4 for FA15% case, but admixture substitution indicates decrease with all levels of ratio for FA10 + BFS20% which means more appropriate. According to the analysis result of chloride diffusion from lightweight aggregate concrete, crushed stone-powder utilized lightweight aggregate concrete indicates higher chloride diffusion coefficient than CG concrete, which is not a significant difference, and can improve resistance through water-binder ratio and admixture substitution.

키 워 드 : 염화물 이온 확산계수, 경량골재 콘크리트, nt build 492  
 Keywords : chloride ion diffusion coefficient, lightweight aggregate concrete, nt build 492

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경 및 목적

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 환경문제를 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 낭비뿐만 아니라 환경오염의 주요 원인이 되고 있다. 또한 최근 건축구조물의 초고층화, 대형화와 토목

교량의 장스팬화 등으로 구조물의 경량화가 절실히 요구되고 있고 그 대책으로서 콘크리트 재료의 70%를 차지하고 있는 골재를 경량골재로 사용하는 방안이 적극적으로 고려되고 있다. 이에 본 연구는 폐석분 활용 경량골재 콘크리트의 실용화를 위한 단계로, 폐석분 활용 경량골재 콘크리트의 염화물 이온 확산계수를 도출하여 철근콘크리트의 성능저하 인자인 염화물 확산에 대한 기초자료를 제시하고자 하였다.

### 1.2 연구의 필요성

철근 콘크리트에서 염소 이온은 높은 알칼리 상태에서도 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 중의 철근이 부식하면 그 체적은 원 단면의 2.5배로 팽창하며 부피팽창으로 인한 내부응력 문제와 지속적인 성능저하의 우려가 있다. 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.

\* 한양대학교 건축환경공학과 석사과정  
 \*\* 한양대학교 건축공학부 교수, 공학박사  
 \*\*\* 경민대학 건축과 교수, 공학박사  
 \*\*\*\* (주)삼표 기술연구소 수석연구원  
 \*\*\*\*\* (주)삼표 기술연구소 연구원

## 2. 폐석분 활용 경량골재

폐석분은 발생과정에서 습윤상태이기 때문에 재료를 건조로에서 약 24시간 이상 항량까지 건조를 시킨 다음 볼밀을 이용하여 100 $\mu$ m이하로 분쇄한다. 이렇게 분쇄한 원료를 용매제 등과 혼합후 원통형 펠레타이저로 성형체를 제조후 건조로에서 105 $^{\circ}$ C 24시간 이상 건조후 소성하여 폐석분 활용 경량골재를 제조한다. 현재 폐기물 관리법에 의해 폐기물로 구분되어 있는 폐석분의 화학조성은 표 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 Tobermorite 결정을 생성시켜 수화반응의 가능성을 갖게 된다.

표 1. 폐석분의 화학조성(%)

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

## 3. 실험 계획 및 방법

### 3.1 실험 인자 및 수준

본 연구는 폐석분 활용 경량골재 콘크리트의 염화물 확산에 대한 물결합재비, 골재 및 혼화제 치환율의 영향을 검토하기 위하여 단위수량을 175kg/m<sup>3</sup>로 고정하고 표 2와 같은 조건으로 실험을 진행 하였다.

표 2. 실험 인자 및 수준

실험인자	수준	수준수
물결합재비	0.4, 0.5, 0.6	3
골재종류	부순골재 (CG) 단일입도 경량골재 (SLG) 연속입도 경량골재 (CLG)	3
결합재 치환율(%)	플라이 애쉬 (FA) 15 플라이 애쉬(FA) 10 + 고로슬래그(BFS) 20	2

### 3.2 사용재료

#### 3.2.1 결합재

결합재인 OPC는 비중 3.15, 분말도 3,400cm<sup>2</sup>/g인 국내 H사의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, FA는 비중 2.21, 분말도 3,362cm<sup>2</sup>/g, BFS는 비중 2.90, 분말도 4,463cm<sup>2</sup>/g인 국내산을 사용하였다.

#### 3.2.2 골재

잔골재는 인천산 세척사, 굵은 골재는 경기 양주산 부순골재 (CG)와 국내산 단일 입도의 비조립형 경량골재(SLG) 및 중국산

연속 입도의 비조립형 경량골재(CLG)를 사용하였으며 물리적 성질은 표 3과 같다.

표 3. 골재의 물성

골재종류	물성	조립률	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	단위용적질량 (kg/m <sup>3</sup> )	흡수율 (%)	파쇄율 (%)
잔골재		2.68	2.56	-	1.47	-
CG		6.67	2.63	1,490	0.72	18.4
SLG		6.98	1.59	806	4.20	20.9
CLG		6.46	1.77	945	5.99	35.8

### 3.2.3 혼화제

굳지 않은 콘크리트의 요구성능 확보를 위하여 국내산 폴리카본산계 고성능감수제, AE제를 사용하였다.

## 3.3 배합 및 시험체 제작

### 3.3.1 배합

콘크리트는 용적배합을 하였으며 표 4와 같다. 콘크리트 배합은 굵은 골재에 따른 영향만을 평가하기 위하여 배합수 175kg/m<sup>3</sup> 및 잔골재율 52% 고정하고, 폴리카본산계 고성능감수제를 결합재 중량의 0.3%, 폴리카본산계 AE제를 결합재 중량의 0.003% 첨가하였다.

표 4. 콘크리트의 배합

시험체	W/B	Volume weight (l/m <sup>3</sup> )				
		C	FA	BFS	S	G
OPC-CG-06	0.6	92.69	-	-	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	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

### 3.3.2 시험체 제작 및 양생

압축강도 및 흡수율과 염화물 이온 확산 시험체는 강제식 펜믹서로 믹싱한 후  $\varnothing 10\text{cm} \times 20\text{cm}$  공시체를 KS F 2403 「콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법」에 따라 제작하여 24시간 경과했을 때 몰드를 탈형하고,  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  수중에서 27일간 수중양생 하였다.

### 3.4 실험 방법

#### 3.4.1 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  $\varnothing 10\text{cm} \times 20\text{cm}$  공시체의 표건질량( $m_0$ )을 측정한 후  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 열풍건조기에서 절건시켜 시험체의 절건질량( $m_1$ )을 측정 후 식(1)에 따라 재령 28일에서 흡수율을 측정하였다.

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

#### 3.4.2 염화물 확산

염화물 이온 이동 저항성은 NT BUILD 492에 준하여 재령 28일의  $\varnothing 10\text{cm} \times 20\text{cm}$  공시체를  $50 \pm 2\text{mm}$ 의 두께로 양측을 절단한 것을 시험편으로 하였으며, 시험 종료 후 시험체를 지름 방향으로 쪼개고 0.1N의 질산은을 분무하여 침투깊이를 측정하였다.

염화물 이온 확산계수는 NT BUILD 492에 의거 유도된 식(2)의 약산식을 사용하여 시험체 3개의 평균값으로 하였다.

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

- $D_{nssm}$  : 염소 이온 확산 계수( $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ )
- $U$  : 가인 전압의 절대값(V)
- $T$  : 측정 전후의 용액의 평균 온도(K)
- $L$  : 시험편의 두께(m)
- $x_d$  : 염소 이온의 침투 깊이(m)
- $t$  : 실험 지속 시간(sec)

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 압축강도 및 흡수율

물결합재비에 따른 재령 28일의 압축강도는 그림 1과 같고, CG 콘크리트, SLG콘크리트, CLG콘크리트 모두 물결합재비가 감소할

수록 높아졌다.

골재에 따른 재령 28일의 압축강도는 CG콘크리트에 비해 SLG 콘크리트 및 CLG콘크리트의 강도가 낮게 나타났다.

혼화재 치환에 따른 강도는 OPC대비 FA15의 경우 물결합재비 0.6, 0.5에서는 약  $2M_{Rt}$  낮았고 물결합재비 0.4에서만 약  $7M_{Rt}$  높게 나타났다. 이는 FA를 15% 치환한 콘크리트의 재령 28일 이전의 수화반응은 포틀랜드시멘트만을 사용한 높은 물결합재비의 콘크리트에 비해 늦기 때문이다. FA10 + BFS20의 경우 3 수준의 물결합재비에서 모두 높게 나타났다.

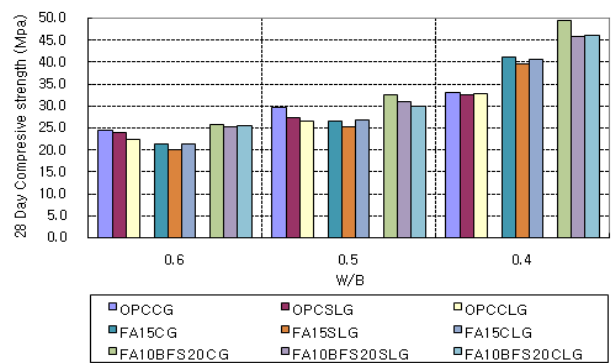


그림 1. 재령 28일 콘크리트 압축강도(MPa)

재령 28일의 콘크리트의 흡수율은 그림 2와 같고 물결합재비 감소와 혼화재 치환에 따라 감소하였다. 골재에 따른 흡수율은 CG에 비하여 SLG 0.5~1.5%, CLG 0.9~1.5% 크게 나타났다.

혼화재 치환에 따른 흡수율은 물결합재비 0.6에서는 감소가 작았으나 0.5, 0.4에서는 감소가 보다 크게 나타났다. 흡수율의 감소는 OPC < FA15 < FA10+BFS20순으로 나타났으며 이는 시멘트수화시 생성되는 수산화칼슘은 시간이 경과함에 따라 용해되어 공극률과 투수성이 커지나 FA 및 BFS는 수화시 포졸란반응에 의하여 수산화칼슘이 줄어 미세구조가 더욱 치밀해지고 균질해지기 때문이다.

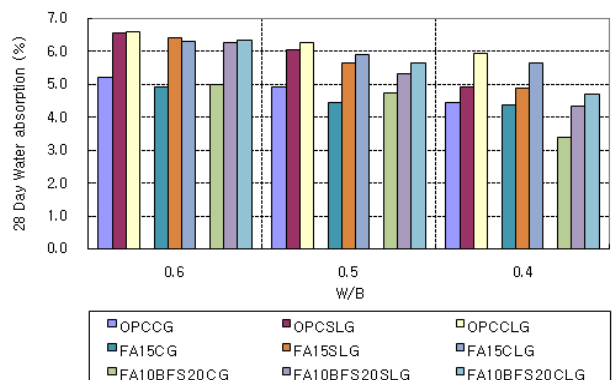


그림 2. 재령 28일 콘크리트 흡수율(%)

### 4.2 염화물 이온 확산계수

골재별 물결합재비 및 혼화재 치환에 따른 염화물 확산 계수는 그림 3, 그림 4, 그림 5와 같다. CG콘크리트 대비하여 SLG콘크리트 및 CLG콘크리트의 염화물 확산 계수는 크게 나타났다. 물결합재비가 낮아질수록 염화물 확산 계수가 감소하는 경향이 나타났다.

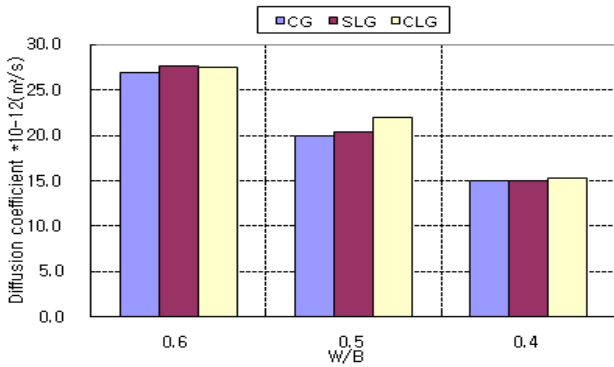


그림 3. OPC 콘크리트의 염화물 확산계수

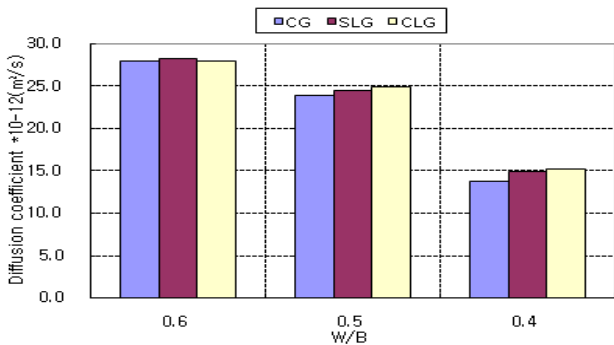


그림 4. FA15 콘크리트의 염화물 확산계수

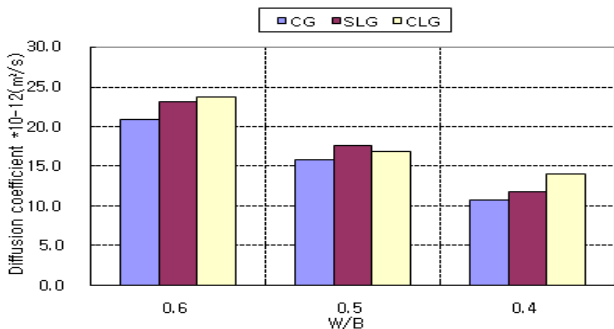


그림 5. FA10 + BFS20 콘크리트의 염화물 확산계수

골재에 따라 CG콘크리트에 비해 SLG콘크리트 및 CLG콘크리트는 염화물 확산계수가 다소 크게 나타났다.

물결합재비가 감소함에 따라 염화물 확산계수도 감소하였으나 물결합재비 0.5의 FA15는 감소가 크지 않았다.

혼화재 치환에 따른 OPC 대비 FA15의 경우 물결합재비 0.4에서 만 감소하였다. FA10 + BFS20의 경우 모든 수준에서 감소하였다.

염화물 이온 확산 실험에서 얻어진 SLG와 CLG 경량골재 콘크리트 염화물 확산 계수는 CG 콘크리트 염화물 확산 계수보다 크지만 크게 차이가 나지는 않았다. 또한 염화물 이온 확산 저항성은 물결합재비의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 이에 폐석분 활용 경량골재 콘크리트의 염화물 확산 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. 결 론

폐석분을 활용한 경량골재 콘크리트의 염소 이온 확산 실험을 실시하여 부순골재 사용 콘크리트와 폐석분을 활용한 경량골재 콘크리트의 비교 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 압축강도는 폐석분 활용 경량골재 콘크리트가 부순골재 콘크리트보다 낮다. 혼화재 치환은 높은 물결합재비 보다 낮은 물결합재비에서 강도의 증가가 큰 것으로 나타나 물결합재비의 영향을 가장 고려해야 할 것으로 사료된다. 콘크리트의 흡수율은 골재의 흡수율이 영향이 있으나 물결합재비 및 혼화재 치환에 따라 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 염화물 확산계수는 SLG 및 CLG가 CG보다 다소 크게 나타났다. 염화물 확산계수는 물결합재비에 영향이 크며 물결합재비가 낮을수록 감소하는 것으로 나타났고 FA15의 경우 물결합재비 0.4에서만 감소를 나타내 높은 물결합재비에서 주의가 필요하며 FA10 + BFS20 모든 수준에서 감소하여 치환에 있어 보다 적합한 것으로 사료된다.

본 연구의 실험결과 부순골재 콘크리트에 비하여 폐석분 활용 경량골재 콘크리트의 염화물 확산계수가 다소 크게 나타났으나 물결합재비 및 혼화재 치환으로 저항성을 향상 할 수 있기에 실용화 할 수 있을 것으로 판단되며, 염화물 확산은 콘크리트 매트릭스의 치밀함에 영향이 크며 이는 압축강도와 상관성이 크기에 이에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

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

### 참 고 문 헌

1. 한국콘크리트학회, 콘크리트 혼화재료, 기문당, pp.201~205, 1997
2. Nordtest Method, NT BUILD 492, Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials : Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, 1999
3. P. Kumar Mehta and Paulo J. M. Monteiro, Concrete : Microstructure, Properties, and Materials Third Edition, McGraw-Hill, New York, 2006 pp.450~456
4. Sang-Chun Yoon, NamYong Jee, Seung-Yup Roh and Hong-Bum Cho The Comparison on Code of Light-weight Aggregate in the Inside and Outside Country, International Symposium on Architectural Interchanges in Asia, Vol.2, pp.924~929, 2008
5. Sidney Mindess, J.Francis Young and David Darwin , Concrete Second Edition, Pearson Education, 2003, pp.493~499