

## 시멘트의 종류별 콘크리트의 강도 및 공극률과 염화물 확산계수의 상관관계 분석

윤의식<sup>1)</sup>·이택우<sup>2)</sup>·박승범<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup> 한국원자력안전기술원 구조부지실 <sup>2)</sup> 충남대학교 토목공학과

(2005년 3월 25일 원고접수, 2005년 9월 15일 심사완료)

### Analysis of Correlation between Compressive Strength, Void Ratio and Chloride Diffusion Coefficient of Concrete Using Various Kinds of Cement

Eui-Sik Yoon<sup>1)</sup>, Taek-Woo Lee<sup>2)</sup>, and Seung-Bum Park<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Structural System and Site Evaluation, Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, 305-353, Korea

<sup>2)</sup> Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

(Received March 25, 2005, Accepted September 15, 2005)

#### ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate the salt water resistance of concrete depending on various types of cement. In this regard, 5 types of concrete were selected and their strength, void ratio and chloride ion diffusion characteristics were tested, and mutual correlation were analyzed. From the test results, the compressive strength and void ratio of concrete which using Type V cement was as good as Type I cement at long-term ages but the chloride diffusion coefficient of Type V cement was larger than Type I cement. And the concrete replacing some portion of the Type I cement with fly ash was superior in the cases of compressive strength, void ratio and the resistance of chloride ion permeation compared to the Type I cement with the lapse of ages. On the other hand, the compressive strength, the void ratio and the chloride diffusion coefficient of the concrete all indicated high levels of the correlation coefficient and the coefficient of determination regardless of the type of cement.

**Keywords :** seawater-resistance, compressive strength, void ratio, chloride diffusion coefficient, type V cement

#### 1. 서 론

해양 환경 하에 놓인 매스콘크리트 구조물에는 그동안 해수 성분에 의한 화학적 침식을 억제할 목적으로 국제적으로 저열형의 V종 시멘트가 널리 사용되어 왔다. 그러나 V종 시멘트는 황산염이온에 대한 저항성은 우수한 반면, C<sub>3</sub>A 함량부족으로 인해 해수의 주요 성분인 염화물이온에 대한 저항성 측면에서 사용 효과에 대한 의문이 제기되어 1995년 이후 일본에서는 해양 구조물용 시멘트로서 V종 시멘트의 사용은 배제하고 II종 시멘트 또는 I종 시멘트에 플라이애쉬나 고로슬래그와 같은 혼화재를 혼합하여 사용하도록 콘크리트표준시방서가 개정되었다<sup>1)</sup>.

우리나라에서도 그동안의 국내·외 연구 결과 및 국제적인 추세를 반영하여 1996년 11월 이후 콘크리트표준시방서에서는 해양 구조물에 V종 시멘트의 사용을 제한하도록 개정되었다<sup>2)</sup>. 그러나 콘크리트 구조설계기준에서는

2003년 개정전까지도 해양 환경 하에 건설되는 콘크리트에는 V종 시멘트 또는 V종 시멘트에 포졸란 재료를 혼합하여 사용할 수 있도록 명시되어 해양 콘크리트 구조물용 시멘트 선정에 관한 기술 기준이 정립되지 못했다<sup>3)</sup>. 또한 국내의 경우 일부 연구진<sup>4-9)</sup>에 의하여 콘크리트 중의 염화물이온 확산 및 침투에 관한 연구 및 I종 시멘트를 사용한 콘크리트의 염소이온 확산 및 철근부식 개시 시기 예측에 관한 연구 등이 수행된 바 있으나, 미국, 유럽, 일본 등에 비하여 해양 콘크리트의 내해수성 평가에 관한 연구는 충분히 이루어지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 시멘트의 종류에 따른 콘크리트의 염화물 침투 및 확산 특성을 비교·검토하기 위하여 C<sub>3</sub>A함량이 다른 V종 시멘트, I종 시멘트 및 플라이애쉬 시멘트(본 연구에서는 I종 시멘트의 일부를 플라이애쉬로 치환해 사용) 등 총 5종류의 시멘트를 사용한 콘크리트의 강도 및 공극률, 염화물 침투 실험을 통하여 이를 분석·평가하고, 이들의 상관관계를 분석하였다.

\* Corresponding author

E-mail : park\_sb@cnu.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

## 2. 실험 개요

### 2.1 사용 재료

#### 2.1.1 시멘트

본 실험에 사용된 시멘트는 KS L 5201의 규격을 만족하는 I종 및 V종 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 그 물리·화학적 특성은 각각 Tables 1 및 2에 나타난 바와 같다.

#### 2.1.2 플라이애쉬

플라이애쉬는 국내 S 화력발전소에서 생산·정제된 것으로서 KS L 5405 규격을 만족하는 제품을 사용하였으며, 그 특성은 Table 3에 나타난 바와 같다.

#### 2.1.3 골재

잔골재는 강모래를 입도 조절하여 사용하였고, 굵은골재는 20mm의 부순돌을 사용하였으며, 각각의 물성은 Table 4와 같다.

#### 2.1.4 혼화제

혼화제는 콘크리트의 작업성을 개선시키기 위하여 감수제(W.R.A Water Reduction Agent)는 K사의 Pozzolith 84K를 사용하였고, 공기연행제(A.E.A Air Entraining Agent)는 표준형 AE제인 Vinsol Resin계의 AEA 202를 사용하였으며, 물리적 성질은 Table 5와 같다.

#### 2.1.5 염화물이온 침투 시험 용액

염화물 이론의 침투 및 확산만을 검토하기 위하여 NaCl 95% 농도의 화학약품을 사용하여 3.6%(약 38kg/m<sup>3</sup>)의 용액을 제조한 후 침투 실험을 실시하였다. 이것은 Cl<sup>-</sup> 이온농도로 환산하면 2.184%(21.84kgf/m<sup>3</sup>)에 해당된다.

### 2.2 배합

본 실험에서 사용한 콘크리트는 국내 해양 구조물에 적용된 콘크리트 배합 중에서 많이 적용된 바 있는 설계기 준강도 35MPa, 물·결합재비(W/B) 약 40% 정도의 콘크리트 배합을 선정해 사용하였으며, 배합설계 결과는 Table 6과 같다. 이때, V종 시멘트는 시멘트 중에 함유된

C<sub>3</sub>A의 함량이 콘크리트의 내해수성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 C<sub>3</sub>A량이 각각 1% 및 4% 정도 함유된 2종류를 사용하였으며, I종 시멘트에 대한 플라이애쉬의 치환량은 플라이애쉬를 다량 혼입한 콘크리트일수록 콘크리트의 중성화 속도를 촉진시키고<sup>10)</sup>, 동결융해작용 및 해수 등의 화학적 침해를 동시에 받는 콘크리트에 대해서는 플라이애쉬의 혼입량을 최대 25%로 제한한 ACI 318-99

**Table 1** Properties of ordinary Portland cement (type I cement)

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Setting time (min.)		Compressive strength (MPa)			Ig. Loss (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)
		Initial	Final	3 days	7 days	28 days			
3.14	3,333	4:10	6:40	20.9	30.0	39.3	1.4	2.8	2.3

**Table 2** Properties of moderate heat and high sulfate resistance Portland cement(type V cement)

C <sub>3</sub> A (%)	C <sub>4</sub> AF + 2C <sub>3</sub> A	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Compressive strength (MPa)			Ig. loss	MgO	SO <sub>3</sub>
				3 days	7 days	28 days			
A 1.37	17.15	3.17	3550	15.6	23.1	35.9	0.92	2.31	1.77
B 4.4	19.7	3.17	3290	18.1	25.6	39.7	1.4	2.8	1.9

**Table 3** Physical and chemical properties of fly ash

Fineness (cm <sup>2</sup> /g)	Strength activity index (%)		SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Moisture content (%)	Ig. loss (%)
	7 day	28 day					
3568	89	94	87.48	58.75	0.51	0.07	5.0

**Table 4** Physical properties of aggregates

Items	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption (%)	Fineness modulus	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Abrasion (%)
Fine aggregate	2.56	2.25%	2.62	1,554	-
Coarse aggregate	2.59	1.83%	6.67	1,422	8.7

**Table 5** Physical and chemical properties of admixtures

Admixture	Density (g/cm <sup>3</sup> )	pH	Solid contents (%)	Mortar air content (%)
Possolith 84 K	1.152~1.157	7.0~9.0	31.0~35.0	-
AEA 202	1.027~1.033	11.5±12.0	15.0~16.0	16.8

**Table 6** Mix proportions of concrete

Cement type	G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				Admixture (B×wt%)		
						W	B		S	G	W.R.A	A.E.A
							C	FA				
I	20	10±2	4.5±1	39.4	43.2	172	437	-	712	947	1.6	0.06
V						172	437	-	713	949		
I+FA10%						172	393	44	705	937		
I+FA20%						172	349	88	697	928		

Code<sup>11)</sup>의 규정을 감안하여 10% 및 20%를 혼입하였다. 한편, 콘크리트 비빔은 잔골재와 굵은골재를 섞은 후 시멘트를 넣고 20초간 건비빔을 하고 물과 혼화제를 넣고 1분 30초간 비빔을 하였다.

### 2.3 시험 방법

#### 2.3.1 압축강도

콘크리트의 압축강도는 KS F 2405[콘크리트의 압축강도 시험방법]에 준하여  $\phi 100 \times 200$  mm 원주공시체를 제작해  $23 \pm 1$  °C의 수중에서 표준양생을 실시한 후, 재령 3일, 7일, 14일, 28일, 60일, 91일, 120일, 210일에 강도를 측정하였다.

#### 2.3.2 공극률 및 내부조직 평가

콘크리트의 공극률은  $\phi 100 \times 200$  mm 원주공시체를 제작하여  $23 \pm 1$  °C의 수중에서 28일간 표준양생을 실시한 다음, 재령 28일, 60일, 120일, 210일에서 ASTM C 642 [Standard Test Method for Specific Gravity, and Voids in Hardened Concrete]에 의해 공극률을 측정하였다. 또한 콘크리트의 내부조직 평가를 위하여 재령 91일까지 양생한 콘크리트에 대하여 A제품의 SR-50으로 가속전압 30 kV, 해상능력 50 Å, 배율 200kX인 SEM (Scanning Electron Microscopy)을 이용하여 콘크리트의 미세공극구조를 분석하였다.

#### 2.3.3 염화물 침투시험

염화물침투시험용 시편은 콘크리트의 배합 조건별로  $\phi 100 \times 100$  mm의 원주형 공시체를 제작하여  $23 \pm 1$  °C의 수중에서 28일간 표준양생을 실시한 다음, 염화물의 1방향 침투를 유도하기 위해 공시체 옆면 및 한쪽 단면을 에폭시 수지로 실링(sealing)하고 AASHTO T 259에 준하여 시험체를 NaCl 3.6% 수용액에 침지시켜 염화물을 침투시켰다. 염화물량은 재령 28일, 60일, 91일, 180일 후에 시험체 표면으로부터 15mm 간격으로 시료 40g을 채취해 분말 상태로 만든 다음, 일본콘크리트공학협회 표준(안)[경화 콘크리트 중의 염분량 측정 방법]에 준해 일본 K사 제품의 AG-100 염분측정기(이온전극법 이용 장비)를 이용해 수용성 염화물량을 측정하였다.

또한 본 연구에서는 시멘트의 종류별 염화물 침투·확산특성을 비교·분석하는데 중점을 두었기 때문에 염화물 확산계수는 침지한 공시체의 깊이 15~30mm(22.5mm)에서 추출된 수용성 염화물량을 이용하여 Fick의 제2법칙에 의해 유도된 식(1)을 이용해 산출하였다. 이와 같이 염화물 확산계수를 공시체 깊이 22.5mm에서의 자유염화물량으로 평가한 것은 표면부의 염화물 확산계수의 경우 실제

염화물 확산계수에 비하여 매우 낮은 값을 나타낸다는 보고<sup>6,12-13)</sup> 등을 고려하여 침지재령별로 일정 깊이(22.5mm)에서 시멘트의 종류별 자유염화물 이온에 의한 염화물 침투·확산 특성을 비교·분석하고자 하였으며, 공시체를 염화물 용액에 침지하기 전에 28일간 표준양생을 실시하였기 때문에 외부로부터 유입되는 염소이온으로 인한 고정화 효과는 크지 않을 것으로 예상되어 수용성 염화물량을 이용하여 평가하였다.

$$C_{(x,t)} = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) \right] \quad (1)$$

여기서,  $C_{(x,t)}$ : 콘크리트 표면에  $C_0$ 의 염화물이 존재할 때 재령  $t$ 에서  $x$  깊이에서의 염화물농도 ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_0$ : 표면의 염화물농도 ( $\text{kg/m}^3$ )

$t$ : 경과시간 (sec)

$x$ : 콘크리트 표면으로부터의 깊이 (cm)

$D_e$ : 염화물 확산계수 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

erf: 오차함수(error function)로서, 식(2), (3), (4)과 같이 구성되었다.

$$\operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_e t}} \right) = \frac{C_{\max} - C_x}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (2)$$

$$p = \frac{x}{\sqrt{4D_e t}} \quad (3)$$

$$\operatorname{erf}(p) = 0.00194p^6 - 0.10522p^5 + 0.43814p^4 - 0.75950p^3 + 0.15175p^2 + 1.11076p \quad (4)^{8-9)}$$

## 3. 시험 결과 및 고찰

### 3.1 압축강도

시멘트의 종류별 콘크리트의 압축강도 시험 결과는 Fig. 1과 같다. 이를 분석해 보면, 재령 초기에는 I종 시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도가 V종 시멘트 및 I종 시멘트의 일부를 플라이애쉬로 치환해 사용한 콘크리트의 강도보다 크게 나타났으나, 재령 60일 이후의 장기재령에서는 I종 시멘트의 일부를 플라이애쉬로 치환해 사용한 콘크리트의 강도가 크게 나타났으며, 이러한 경향은 플라이애쉬를 10% 혼입한 경우보다 20% 혼입한 콘크리트가 가장 큰 압축강도를 나타내었다. 이와 같이 플라이애쉬를 사용한 경우 재령이 증가함에 따라 콘크리트의 장기강도가 증가하는 것은 기존의 연구결과에서도 확인된 바와 같이 플라이애쉬의 포졸란반응에 의해 생성되는 C-S-H 수화물에 의해 내부조직이 치밀해지기 때문이다. 또한 V종 시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도는 시멘트 중의  $C_3A$  함량차이에 따른 압축강도의 차이는 크지 않은 것으

로 나타났으며, I종 시멘트를 사용한 콘크리트보다 압축 강도는 다소 낮게 나타났으나, 재령이 경과함에 따라 강도 차이는 거의 나타나지 않았다.

### 3.2 공극률 및 내부 조직 평가

재령 경과에 따른 시멘트의 종류별 콘크리트의 공극률 변화를 비교·검토하기 위하여 공극률 실험을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

이를 고찰해 보면, V종 시멘트를 사용한 콘크리트의 공극률은 초기재령에서 비교적 높게 나타났으나 재령 경과와 함께 I종 시멘트를 사용한 콘크리트와 비슷하게 나타났으며, C<sub>3</sub>A 함량이 작을수록 이러한 경향은 뚜렷하게 나타났으나 그 영향은 크지 않았으며, 이는 시멘트 중의 C<sub>3</sub>A 함량이 적어 수화반응이 지연됨에 따라 수화물에 의한 미세공극 충전이 서서히 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 또한 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트의 경우 재령 초기에는 I종 시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 높은 공극률을 나타내었으나, 재령 경과와 함께 현저한 공극률 감소를 나타내어 재령 60일 이후에는 공극률이 가장 적게 나타났다. 한편, I종 시멘트, V종 시멘트(C<sub>3</sub>A 4%) 및 플라이애쉬를 20% 혼입한 콘크리트 공시체의 단면을 전자현미경으로 관찰한 결과는 Photos 1~3에 나타내었다. 이를 분석해 보면, I종 시멘트 및 V종 시멘트를 사용한 콘크리트는 내부조직은 유사하게 나타났으나, 플라이애쉬를 사용한 경우에는 I종 및 V종 시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 콘크리트 내부 조직이 치밀하게 나타났다. 이는 플라이애쉬를 혼입함으로써 시멘트의 수화반응시 생성된 수산화칼슘과 가용성의 규산염 및 알루미늄산염과 반응하여 규산칼슘염과 알루미늄산칼슘염을 생성하는 포졸란반응에 기인한 것으로 판단된다.

### 3.3 염화물 침투시험

#### 3.3.1 염화물 침투량

염화물이온에 의한 확산만을 고려하기 위하여 화학약품을 사용해서 NaCl 3.6%의 수용액을 제조해 시멘트의 중

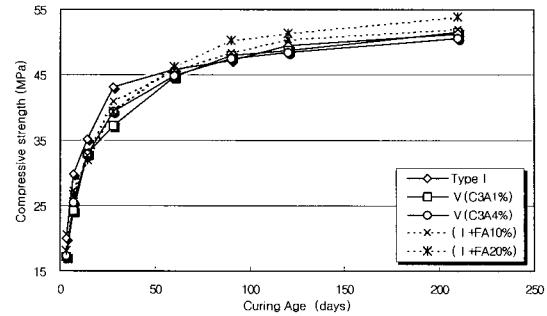


Fig. 1 Relationship between curing ages and compressive strength of concrete by using cement types

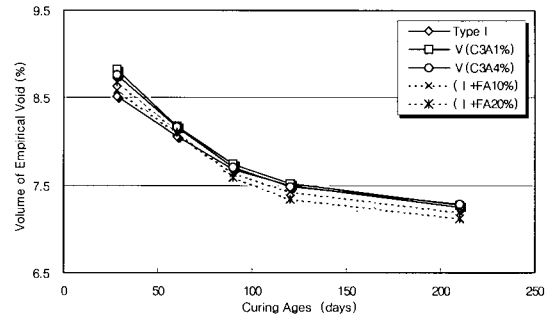
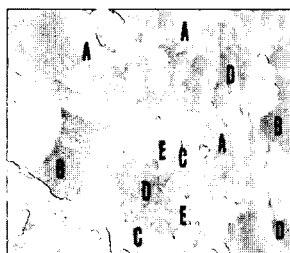


Fig. 2 Relationship between curing ages and internal void ratio of concrete by using cement types

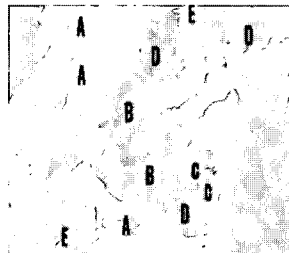
류에 따른 콘크리트의 염화물침투시험을 실시하였으며, 그 결과를 Figs. 3~5에 나타내었다.

이를 고찰해 보면, V종 시멘트를 사용한 콘크리트는 I종 시멘트 및 플라이애쉬를 사용한 콘크리트보다 다소 염화물 침투량이 많으며, 그 차이는 재령 및 깊이가 증가함에 따라 커지는 경향을 나타내었다. 또한 V종 시멘트를 사용한 경우라도 C<sub>3</sub>A 함량이 1%인 시멘트를 사용한 경우가 C<sub>3</sub>A 함량이 4%인 경우에 비해 염화에 취약한 것으로 나타났다. 이는 V종 시멘트인 경우 프리델염(Friedel's salt, C<sub>3</sub>A · CaCl<sub>2</sub> · 10H<sub>2</sub>O)의 생성에 관련된 C<sub>3</sub>A 함량이 작기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 V종 시멘트를 해양 구조물용 시멘트로 사용할 경우에는 ACI 357R<sup>(14)</sup>에서 제시하고 있는 것과 같이 C<sub>3</sub>A가 4% 이상 함유된 것을 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 반면, 플라이애



A: C-S-H  
B: Ca(OH)<sub>2</sub>  
C: Gel pore  
D: Capillary pore  
E: Ettringite

Photo 1 Internal micrograph for concrete using type I cement



A: C-S-H  
B: Ca(OH)<sub>2</sub>  
C: Gel pore  
D: Capillary pore  
E: Ettringite

Photo 2 Internal micrograph for concrete using type V cement



A: C-S-H  
B: Ca(OH)<sub>2</sub>  
C: Gel pore  
D: Capillary pore  
E: Ettringite

Photo 3 Internal micrograph for concrete using type I cement and fly ash 20%

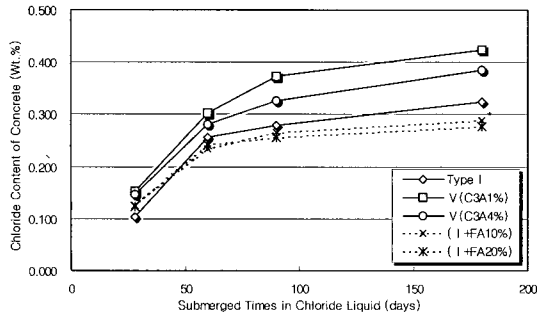


Fig. 3 Relationship between submerged time in chloride liquid and chloride contents of concrete at depth 0~15 mm

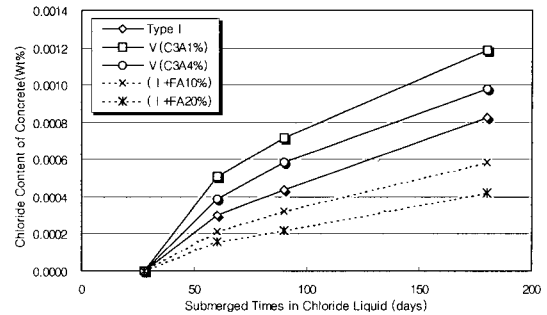


Fig. 5 Relationship between submerged time in chloride liquid and chloride contents of concrete at depth 30~45 mm

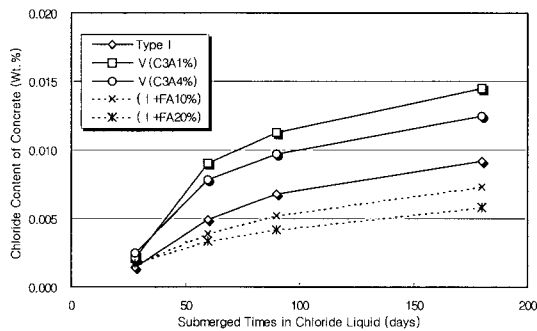


Fig. 4 Relationship between submerged time in chloride liquid and chloride contents of concrete at depth 15~30 mm

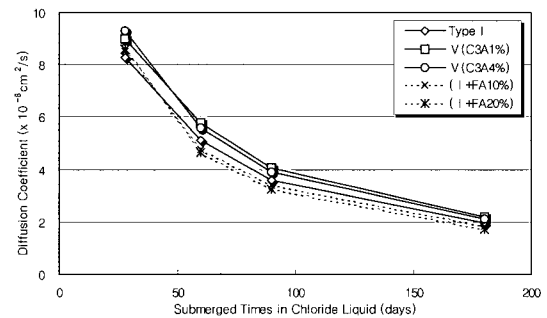


Fig. 6 Relationship between submerged times in chloride liquid and chloride diffusion coefficient of concrete by using cement types

쉬를 사용한 콘크리트의 염화물침투량은 초기의 경우 I종 시멘트를 사용한 콘크리트와 거의 차이가 없는 것으로 나타났으나, 재령이 경과함에 따라 플라이애쉬의 포졸란반응에 의해 콘크리트 조직이 치밀해져 I종 시멘트 및 V종 시멘트에 비해 염해 저항성이 우수한 것으로 나타났다.

### 3.3.2 염화물 확산계수

Fick의 제2법칙을 이용해서 염화물 확산계수를 산출하였으며, 그 결과는 Table 7 및 Fig. 6에 나타내었다.

이를 고찰하여 보면, 콘크리트의 염화물 확산계수는 시멘트의 종류에 관계없이 재령이 증가함에 따라 현저히 감소하고 있는 것으로 나타났으며, 이는 Anna와 Roberto<sup>15)</sup> 등의 연구 결과와 같이 콘크리트의 수화반응의 진행으로 콘크리트 내부에 치밀한 미세구조를 형성하기 때문으로 판단된다. 시멘트의 종류에 따라서는 재령이 증가함에 따라 V종 > I종 > I종 + 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 순으로 염화물 확산계수가 크게 나타났으며, V종 시멘트를 사용한 경우 C<sub>3</sub>A 함량이 적은 시멘트를 사용한 경우가 염해 저항성이 낮은 것으로 나타나 Short와 Page의 연구결과<sup>16)</sup>와 일치하고 있다.

플라이애쉬를 혼입한 콘크리트의 염화물 확산계수는 재령이 증가할수록 낮게 나타나 침지재령 약 40일 정도부터 I종 시멘트를 사용한 경우보다 낮게 나타났다. 이는 재령

Table 7 Assessment result of chloride diffusion coefficient of concrete by using cement types

Submerged time (days)	Chloride diffusion coefficient( $\times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$ )				
	I	V(C <sub>3</sub> A1%)	V(C <sub>3</sub> A4%)	I+FA10%	I+FA20%
28	8.2842	8.9798	9.3062	8.5040	8.6071
60	5.1073	5.7806	5.8449	4.7719	4.6324
90	3.6047	4.0768	3.9248	3.3899	3.2328
180	1.9372	2.1735	2.0914	1.8326	1.7373

경과와 함께 플라이애쉬 혼입에 의한 포졸란 반응으로 콘크리트의 내부조직이 치밀해져 염화물이온의 침투 및 확산이 저하되었기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.5 압축강도와 염화물 확산계수의 상관관계 분석

압축강도는 콘크리트의 품질 특성을 나타내는 지표이므로 Powers<sup>17)</sup>의 공극방정식을 이용하여 재령 경과에 따른 압축강도가 염화물 확산계수에 미치는 영향을 분석하였다.

즉, Powers의 수화된 시멘트분의 압축강도와 공극과의 관계에 대한 식 (5)와 염화물 확산계수와 공극 사이에 관한 식 (6)로부터 식 (7)과 같이 표현할 수 있으며, 시멘트분의 염화물 확산계수를 강도의 향으로 정리하면 식 (7)에 대하여 동일한 재료를 사용한 콘크리트에 적용시키면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

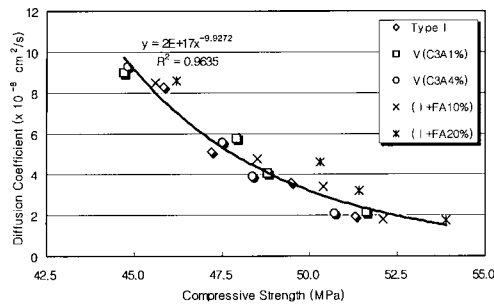


Fig. 7 Comparison of compressive strength and chloride diffusion coefficient of concrete by using cement types

Table 8 Correlation analysis result of between compressive strength and chloride diffusion coefficient of concrete by using cement types

Cement type	Correlation coefficient	Determination coefficient	Coefficient value	
			$\alpha$	$-\beta$
I	0.986415	0.973015	9E+20	-12.0815
V(C <sub>3</sub> A 1%)	0.98157	0.963479	2E+17	-9.9272
V(C <sub>3</sub> A 4%)	0.989147	0.978412	1E+21	-12.191
I+FA 10%	0.985199	0.970617	2E+19	-11.056
I+FA 20%	0.982378	0.965067	9E+17	-10.204

$$f_{cp} = f_{cpo}(1 - V_{cp})^n \quad (5)$$

여기서,  $f_{cp}$  : 시멘트풀의 압축강도 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $f_{cpo}$  : 무공극 시멘트풀의 압축강도 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $n$  : 상수

$$D_{cp} = \frac{D_{cpo}}{(1 - V_{cp})^\beta} \quad (6)$$

여기서,  $D_{cp}$  : 시멘트풀의 염화물 확산계수 (10<sup>-8</sup>cm<sup>2</sup>/s)  
 $D_{cpo}$  : 무공극 시멘트풀의 염화물 확산계수 (10<sup>-8</sup>cm<sup>2</sup>/s),  $\beta$  : 상수

$$D_{cp} = D_{cpo} \left( \frac{f_{cpo}}{f_{cp}} \right)^\beta \quad (7)$$

$$D_e = D_{co} \left( \frac{f_{co}}{f_{ck}} \right)^\beta = \alpha \left( \frac{1}{f_{ck}} \right)^\beta = \alpha f_{ck}^{-\beta} \quad (8)$$

여기서,  $D_e$  : 콘크리트의 염화물 확산계수  
 $D_{co}$  : 무공극 콘크리트의 염화물 확산계수 (×10<sup>-8</sup>cm<sup>2</sup>/s)  
 $f_{ck}$  : 콘크리트의 압축강도 (MPa),  
 $f_{co}$  : 무공극 콘크리트의 압축강도 (MPa)  
 $\alpha, \beta$  : 상수

따라서 식 (8)에 기초하여 재령에 따른 시멘트의 종류별 압축강도와 염화물 확산계수의 상관관계를 검토하기 위하여 압축강도와 염화물 확산계수에 관한 회귀분석을 실시하였다. 그 결과 시멘트의 종류에 관계없이 염화물 확산계수는 Fig. 7에 나타난 V종 시멘트(C<sub>3</sub>A 1%)를 사용한

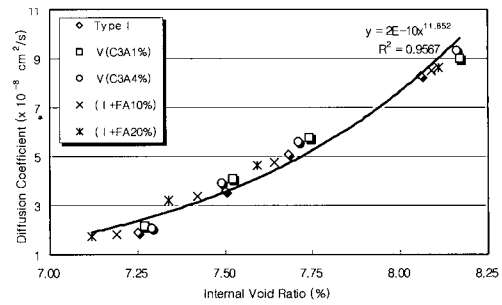


Fig. 8 Comparison of internal void ratio and chloride diffusion coefficient of concrete by using cement types

Table 9 Correlation analysis results of internal void ratio and chloride diffusion coefficient of concrete by using cement types

Cement type	Correlation coefficient	Determination coefficient	Coefficient value	
			$\alpha$	$\beta$
I	0.987371	0.974902	5E-12	13.56319
V(C <sub>3</sub> A 1%)	0.97812	0.956719	2E-10	11.85203
V(C <sub>3</sub> A 4%)	0.972672	0.94609	3E-11	12.62006
I+FA 10%	0.986065	0.972323	3E-11	12.62208
I+FA 20%	0.982401	0.965112	2E-10	11.77525

경우의 곡선과 유사하게 재령이 경과함에 따라 식 (8)과 같이  $D_e = \alpha \cdot f_{ck}^{-\beta}$ 의 경향으로 압축강도의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 시멘트의 종류별 상관계수 및 결정계수와 식(8)의  $\alpha, \beta$ 의 값은 Table 8에 나타난 바와 같으며, 이로부터 압축강도와 염화물 확산계수는 높은 상관계수와 결정계수를 나타내고 있어 염화물 확산계수는 압축강도와 밀접한 상관관계가 있음을 확인하였다.

### 3.6 공극률과 염화물 확산계수의 상관관계 분석

콘크리트의 공극률은 압축강도, 염화물이온의 확산, 이산화탄소의 확산 등에 밀접한 영향을 미치는 요인으로서, 시멘트의 종류에 따른 콘크리트의 공극률과 염화물 확산계수의 상관관계를 분석하기 위하여 등가매개이론(equivalent medium theory)에 기초한 복합 재료의 공극률과 확산계수와의 관계를 공극용적과 내부 표면적에 대하여 표현한 Kozeny-Carman 방정식 (9)<sup>18</sup>로부터 유도된 식 (10)에 기초하여 시멘트의 종류별 공극률과 염화물 확산계수에 관한 회귀분석을 실시하였다. 그 결과 시멘트의 종류에 관계없이 염화물 확산계수는 Fig. 8에 나타난 V종 시멘트(C<sub>3</sub>A 1%)를 사용한 경우의 곡선과 유사하게 공극률이 증가함에 따라 식 (10)의  $D_e = \alpha \cdot V_p^\beta$ 의 경향으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 시멘트의 종류별 상관계수 및 결정계수와 식(10)의  $\alpha, \beta$ 의 값은 Table 9에 나타난 바와 같으며, 이로부터 공극률과 염화물 확산계수는 높은 상관계수와 결정계수를 나타내고 있어 밀접한 상관관계가 있음을 확인하였다.

$$D = \frac{V_p^a}{S^b K_k} \quad (9)$$

여기서, D : 확산계수 ( $\times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ )

$V_p$  : 공극률 (%), S : 비표면적 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )

$K_k$  : Kozeny 상수 ( $K_k = K_t \times K_s$ , 일반적으로  $K_k=2$ )

$K_t$  : 미세구조의 비틀림계수,  $K_s$  : 공극의 형상계수  
a, b : 상수

$$De = a \cdot V_p^b \left( \alpha = \frac{1}{S^b K_k} \right) \quad (10)$$

#### 4. 결 론

시멘트의 종류별 콘크리트의 강도, 공극률 및 염화물 침투·확산 특성에 관한 실험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트의 압축강도는 초기재령에서 I종 시멘트가 다른 시멘트를 사용한 경우에 비해 크게 나타났으나 장기재령에서는 I종 및 V종 시멘트의 종류에 따른 강도 차이는 거의 나타나지 않았으며, 플라이애쉬를 혼입한 경우 재령 60일 이후에는 오히려 I종 시멘트를 사용한 경우에 비해 높은 강도를 나타내었다.
- 2) 콘크리트의 공극률은 초기재령에서 I종 시멘트가 다른 시멘트를 사용한 경우보다 비교적 낮게 나타났으나 장기재령에서는 I종 및 V종 시멘트의 종류에 따른 차이는 거의 나타나지 않았으며, 플라이애쉬를 혼입한 경우 재령 60일 이후에는 I종 시멘트를 사용한 경우보다 낮은 공극률을 나타내었다.
- 3) 재령 91일간 양생한 콘크리트의 내부조직을 SEM 관찰한 결과, I종 및 V종 시멘트를 사용한 콘크리트의 내부조직에는 큰 차이가 없었으나 플라이애쉬를 혼입한 경우에는 포졸란 반응 등으로 생성된 C-S-H 등이 콘크리트의 내부조직을 더욱 밀실하게 하여 매우 치밀한 조직을 형성하고 있는 것을 확인하였다.
- 4) 콘크리트의 염화물 침투량 및 확산계수는 V종 시멘트 > I종 시멘트 > I종 시멘트 + 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 순으로 크게 나타났다. 또한 V종 시멘트는  $C_3A$  함량이 적은 것을 사용한 경우에 염화물 침투 저항성이 낮은 것으로 나타나 해양구조물용 시멘트의 경우  $C_3A$  함량에 대한 제한조건이 필요한 것으로 판단되며, 플라이애쉬를 10% 혼입한 경우에 비해 20% 혼입한 경우 염화물 침투 저항성이 우수한 것으로 나타나 플라이애쉬를 적정량 혼입하면 염소이온의 침투를 억제하는데 효과적일 것으로 판단된다.

- 5) 콘크리트의 압축강도 및 공극률과 염화물 확산계수의 상관관계 분석 결과, 콘크리트의 염화물 확산계수는 강도가 증가함에 따라  $De = a \cdot f_c^b$ 의 경향으로 감소하고, 또한 공극률이 증가함에 따라  $De = a \cdot V_p^b$ 의 경향으로 증가하는 것으로 나타났으며, 압축강도 및 공극률은 모두 염화물 확산계수와 높은 상관계수와 결정계수를 나타내어 밀접한 상관관계가 있음을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단(특정기초 R01-2004-000-10153-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 日本土木學會, 콘크리트標準施工書-施工編 第22章 海洋コンクリート, 22.2 材料, 1995.
2. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서-시공편 제31장, 31.2 재료, 1996.
3. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준-제4장 사용성 및 내구성, 4.5 내구성설계, 2003. pp.75~80
4. 金成秀, 海洋還境下에 방치한 콘크리트의 劣化 및 鐵筋의 腐食, 防蝕에 대한 研究, 漢陽大學校 大學院 土木工學科 博士學位 論文, 1994.
5. 윤의식, 김성욱, 고경택, 김상운, “해양환경하에 노출된 콘크리트의 내구성에 미치는 시멘트 종류 및 플라이애쉬 치환율의 영향”, 대한토목학회 가을학술발표회 논문집(한국건설비전 2025), 2002, pp.634~637.
6. 김은겸, 신치범, 이운환, “콘크리트 構造物의 鹽化物이온 浸透變動解析”, 콘크리트학회지, 9권 6호, 1997, 233~241.
7. 오병환, 장승엽, 신용석, “콘크리트 내부염소이온에 의한 철근의 부식특성 및 임계 염소이온농도의 결정 연구”, 콘크리트학회논문집, 11권, 3호, 1996, pp.193~203.
8. 박승범, 김도겸, “염해를 받는 철근콘크리트 구조물의 철근부식시기 예측시스템 개발에 관한 연구”, 구조물진단학회 논문집, 4권 1호, 2000, pp.121~129.
9. 박승범, 김도겸, “콘크리트 중의 염소이온 확산 특성에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회논문집, 12권 1호, 2000, pp.33~44.
10. 한국수력원자력(주), 원전 구조물 사용시멘트의 내구성 향상 연구(최종보고서), 2002, pp.79~82.
11. ACI 318 Committee, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI, 1999, pp.35~39.
12. J.G.M. Wood, *Prediction of Concrete Durability ; Achieving Durable Concrete*, E&FN SPON, The Geological Society, London, U.K., Nov. 1995, pp.39~50.

13. 小林一輔, 白木亮司, 河合研至 “炭山化によつて引き起にされる中の鹽化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮”, 日本コンクリート工學論文集, Vol.1, No.2, 1990, pp.69~82.
14. ACI 357R, *Guide for the design and construction of fixed offshore concrete structures*, ACI, 1984, pp.3~4.
15. Anna, V. Saetta, Roberto V. Scotta, and Renato V. Vitaliani, “Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete”, *ACI Materials Journal*, Sep.-Oct. 1993, pp.441~ 451.
16. Page, C.L., Short, N.R., and Tarras A.El., “Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Pastes”, *Cement and Concrete Research*, Vol.11, No.3, 1981, pp.395~406.
17. Powers, T.C., Copeland, L.E., Hayes, J.C., and Mann, H.M., “Permeability of Portland Cement Paste”, *Journal of ACI, Proceedings*, Vol.26, No.23, 1954, pp.285~298.
18. Carman, P.C., *Flow of Gases through Porous Media*, Academic, New York, 1956.

## 요 약

본 연구에서는 시멘트의 종류에 따른 콘크리트의 내해수성을 평가하기 위하여 실험을 통해 총 5종류의 시멘트를 사용한 콘크리트의 강도, 공극률 및 염화물 확산 특성을 평가하고, 이들의 상관관계를 분석하였다. 실험 결과, 장기재령에서 V종 시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도 및 공극률은 I종 시멘트를 사용한 콘크리트와 비슷하게 나타났으나 염화물 확산계수는 크게 나타났다. 그리고 I종 시멘트의 일부를 플라이애쉬로 치환해 사용한 콘크리트의 압축강도, 공극률 및 염화물침투 저항성은 재령 경과와 함께 I종 시멘트를 사용한 경우에 비하여 우수한 것으로 나타났다. 한편, 콘크리트의 압축강도 및 공극률과 염화물 확산계수는 시멘트의 종류에 관계없이 높은 상관계수 및 결정계수를 나타내어 높은 상관성을 가지고 있음이 확인되었다.

**핵심용어 :** 내해수성, 압축강도, 공극률, 염화물 확산계수, V종 시멘트