

부산-거제간 연결도로 사업에 적용한 100년 수명 고내구성 콘크리트

High Durability Concrete for Service Life of 100 years Applied in GK Project



박상준*
Sang-Joon Park



김영진**
Young-Jin Kim



임현철***
Hyun-Chil Lim



장현갑****
Hyun-Gab Jang

1. 서론

현행 콘크리트 구조물은 주로 강도를 기준으로 설계되고 있다. 그러나 부산~거제간 연결도로 민자사업(이하 GK Project라 칭함)에서는 구조물의 각종 환경 열화요인에 대응하여 구조물이 목표로 하는 내구수명을 만족할 수 있도록 하는 개념의 콘크리트 배합설계가 국내 최초로 적용되었다. 즉, CEB-FIP에서 제안하고 있는 Duracrete modeling 기법에 따라 콘크리트의 주요성능저하요인을 도출하고, 그 결과에 따라 내구수명 100년을 만족하는 콘크리트를 적용하고 있다. 본고에서는 Duracrete의 내구성 설계 과정과 그 결과를 바탕으로 수행된 실내배합시험 및 현장 적용성 검토 결과에 대하여 소개하고자 한다.

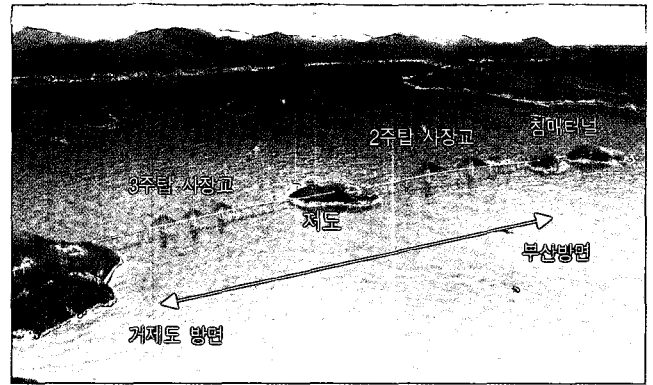


그림 1. 부산~거제간 연결도로 사업의 조감도

2. GK Project의 개요

GK Project는 <표 1>, <그림 1>과 같이 거제도와 가덕도를 연결하는 부산~거제간 연결도로 민자투자사업으로 총 연장은 8.2km이며, 왕복 4차선도로로 계획된 2개의 사장교를 포함하여 총 8개의 교량(4.5 km) 구간과 침매터널(3.7 km) 구간으로 계획되어 있다. 공사방식은 fast track 방식으로 2004년부터 2010년 까지 총 6년 동안 시공하는 것으로 계획되어 있다.

표 1. 사업의 개요

구분	내용	비고
구간	경남 거제시 장목면 (거제도) ~ 부산 천성도 (가덕도)	-
규모	연장 8.2km, 왕복 4차로	침매터널구간 3.7 km 교량구간 4.5 km
사업비	14,469억원	정부 4,473억원 민자 9,996억원
사업기간	2004 ~ 2010년 (72개월)	공사기간 6년
공사방법	Fast track 방식	-
시행사	경상남도, 부산광역시	-

2.1 교량

본 사업에서 대상으로 하는 교량의 제원은<표 2>와 같다. 즉, 국내 최초로 적용되는 3주탑 사장교와 2주탑 사장교, 그리고 4개의 접속교로 계획되어 있다.

표 2. 교량의 제원

구분	지간(m)	폭(m)	상부형식	교각형식	기초
접속 1교	458.5	20.5	강 합성교 (1형 거더)	T형	직접, 케이슨
3주탑 사장교	676.0	22.0			케이슨
접속 2교	510.0	20.5			직접, 케이슨
접속 3교	330.0	20.5			케이슨
2주탑 사장교	919.0	24.0			케이슨, 현장타설말뚝
접속 4교	610.0	12.5/10.5			케이슨, 현장타설말뚝

* 정희원, (주)대우건설기술연구소 선임연구원
concrete@dwconst.co.kr
** 정희원, (주)대우건설기술연구소 수석연구원
*** 정희원, (주)대우건설 GK PC제작현장 소장
**** 정희원, (주)대우건설 GK 시공사업단장

표 3. 침매터널의 제원

구분	차선 수	높이(m)	폭(m)	번호	제작수
일반 차선	거제방향 2차선 부산방향 2차선	9.75	26.5	Shallow 1~8 Deep 9~16	16합체
오르막 차선	거제방향 3차선 (중죽도 진입구간) 부산방향 2차선	9.75	28.5	Element 17, 18	2합체

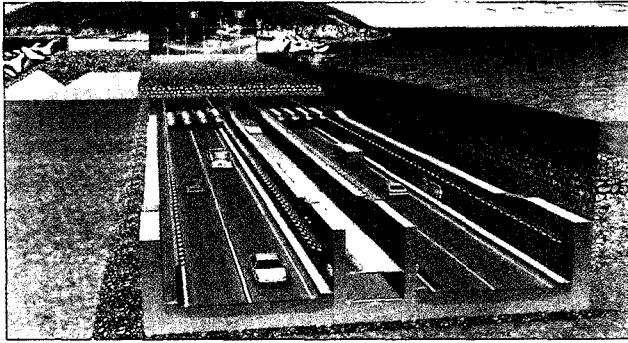


그림 2. 침매터널 조감도

2.2 침매터널(해저터널)

침매터널은 매시브한 콘크리트 합체 구조물로서, 길이 180 m를 22.5 m씩 8개로 분할하여 1개의 유닛(unit)으로 제작하고, 제작된 18개의 합체를 연결시킴으로서 총 3.7 km의 해저터널을 건설하는 것으로 계획되어 있다. 침매터널의 제원 및 조감도는 각각 <표 3>, <그림 2>와 같다.

3. GK Project에 적용된 내구성 설계

3.1 Duracrete의 기본개념

Duracrete에서 제안하고 있는 내구성 설계의 기본적인 목표는 염소이온 침투 및 탄산화 등을 고려하는 열화 메커니즘에 대하여 일정 수준의 안전도를 확보하는데 있으며, 목표내구수명 동안 구조물의 각종 열화요인에 충분히 저항할 수 있는 재료, 배합 및 구조상세를 선정하고, 적용하는 것이다.

즉, 설계의 첫 번째 단계는 목표내구수명을 정하는 것이다. <그림 3>은 사용수명(service life) 동안에 발생 가능한 열화 현상을 나타낸 것으로서, 일반적으로 ①~② 단계의 기간이 구조물의 사용성을 확보할 수 있는 것으로 평가하고 있다. 일례로 염소이온의 경우는 철근이 부식되어 콘크리트에 발생하게 되는 균열의 허용균열폭이 0.3 mm에 도달하는 시간까지를 내구수명으로 보는 것이다.

두 번째 단계는 환경하중분석 및 해당 열화 메커니즘을 정량화 하는 단계로서 이를 위해서는 시간에 따른 열화과정과 사용재료의 저항특성에 대한 수학적 모델링이 적용된다.

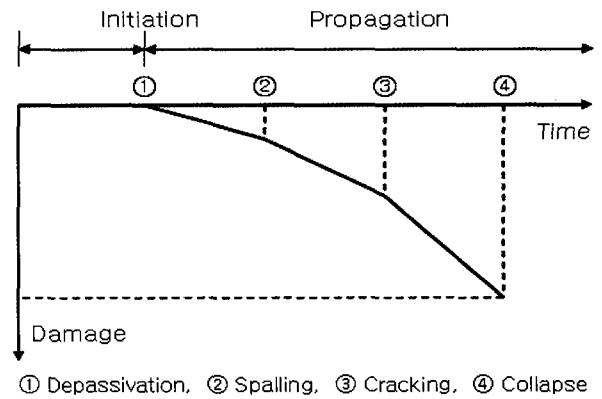


그림 3. 콘크리트 구조물의 열화 과정 개념도

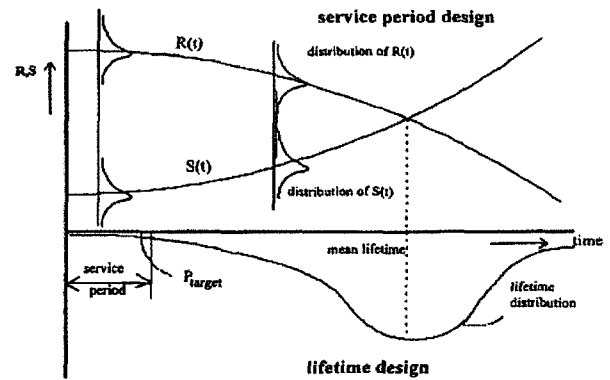


그림 4. 파괴확률과 목표 사용수명 비교

마지막으로 기존 구조설계에 이용되고 있는 신뢰성 이론을 적용하여 사용수명 동안에 발생하는 각 열화현상의 발생확률을 산정하게 된다. 열화현상은 식(1)과 같다.

$$g(x, t) = R(t) - S(t) \quad (1)$$

여기서, x 는 기본 변수들의 벡터이며, $R(t)$ 는 저항함수를, $S(t)$ 는 하중함수를 나타내는데, 이때 특정 기간 내 $[0; T]$ 에 구조물의 파괴확률은 식(2) 및 <그림 4>와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f(T) = 1 - P\{g(x, t) > 0 \text{ for all } t \in [0; T]\} \quad (2)$$

3.2 내구성 설계 과정

부산~거제간 연결도로 구조물에 고려되고 있는 내구성관련 기본적인 사항들은 구조물의 형상, 사용재료, 구조물의 노출환경 및 시공환경 등이다. 즉, 해양환경 하에서 지배적인 염소이온의 침투와 관련된 열화 메커니즘을 대상으로 설계방식, 하중과 저항의 설계변수, 각종 특성 값 그리고 각 하중 및 저항변수 등과 같은 부분계수를 적용하는데, 이 때 부분계수들은 설

계된 구조물이 고려하는 각각의 한계상태에 대하여 일정한 허용 값을 갖도록 하고 있으며, 식(3)과 같은 신뢰성지수(β : reliability index)를 적용한다.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (3)$$

한편, 부식이 시작되는 시점인 임계염화물량에 도달하는 상태는 식(4)를 이용하여 구한다. 즉, 설계 값으로 임계 염화물 이온농도(c_{cr}^d), 표면염화물 이온농도($c_{s,cl}^d$) 와 피복두께(x^d), 그리고 시간에 따른 저항계수($R_{cl}^d(t)$) 등을 고려하는데, 여기서 저항계수의 경우는 식(5)에서와 같이 촉진시험장치를 이용하여 구한 염화물 침투 저항계수와 양생계수, 환경계수 및 재령계수 등을 고려하여 결정한다.

$$g = c_{cr}^d - c^d(x, t) \quad (4)$$

$$= c_{cr}^d - c_{s,cl}^d \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x^d}{2\sqrt{\frac{t}{R_{cl}^d(t)}}} \right) \right]$$

표 4. 교량 비말대구간의 염화물 확산계수, 재령계수 및 신뢰성지수

공칭 피복두께 (mm)	재령 28일 Max. $D_{cl} \times 10^{-12}$ (m^2/sec)	β		
		$a : 0.40$	$a : 0.50$	$a : 0.60$
75	2.0	2.2	3.0	3.3
	3.0	1.5	2.3	2.7
	4.0	1.1	1.9	2.3
	5.0	-	1.6	1.9
	6.0	-	1.3	1.7
	7.0	-	-	1.5

표 5. 교량 해수중구간의 염화물 확산계수, 재령계수 및 신뢰성지수

공칭 피복두께 (mm)	재령 28일 Max. $D_{cl} \times 10^{-12}$ (m^2/sec)	β		
		$a : 0.30$	$a : 0.40$	$a : 0.50$
75	2.0	3.2	$\gg 2.0$	$\gg 2.8$
	3.0	2.5		
	4.0	2.0		
	5.0	1.7		
	6.0	1.4		
	7.0	1.2		

표 6. 교량 대기구간의 염화물 확산계수, 재령계수 및 신뢰성지수

공칭 피복두께 (mm)	재령 28일 Max. $D_{cl} \times 10^{-12}$ (m^2/sec)	β			
		cover 40 mm		cover 50 mm	
		$a : 0.40$	$a : 0.50$	$a : 0.40$	$a : 0.50$
50	2.0	1.3	2.1	2.1	2.5
	3.0	0.9	1.6	1.5	1.9
	4.0	-	1.2	1.2	1.4

$$R_{cl}^d(t) = \frac{R_{cl,0}^c}{k_{e,cl}^c \cdot k_{e,cl}^c \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{n_{cl}^c} \cdot \gamma_{R_{cl}}} \quad (5)$$

여기서, $R_{cl,0}$: Compliance test로 구한 염화물 침투 저항계수

$k_{e,cl}$: 양생계수

$k_{e,cl}$: 환경계수

t_0 : Compliance test가 수행된 때의 콘크리트 재령

n_{cl} : 재령계수

$\gamma_{R_{cl}}$: 부분계수(deicing salt의 사용정도 등)

3.3 Duracrete를 이용한 내구성 설계

Duracrete는 확률론적 설계방법 중 하나로서 이미 유럽의 대규모 프로젝트에서 요구되는 사용수명과 신뢰성을 제공하는데 성공적으로 적용된 실적이 있다. 부산 ~ 거제간 연결도로 구조물의 경우 주된 열화 요인은 염화물에 의한 철근부식이며, 사용수명은 철근이 부식되는 시점으로 설정하였다. 또한, 이와 관련된 신뢰성 지수는 1.3으로 설정하였는데, 이는 100년이 경과하기 이전에 철근이 부식될 확률이 10%인 것이다.

3.3.1 교량의 비말대 및 해수중구간

콘크리트의 피복두께는 75mm에 대하여 평가하였으며, <표 4, 5>는 비말대와 해수중구간을 대상으로 도출한 최대 염화물 확산계수와 재령계수에 따른 신뢰성지수를 나타낸 것이다.

3.3.2 교량의 대기구간

피복두께는 40mm와 50mm를 대상으로 하였으며, <표 6>은 최대 염화물 확산계수와 재령계수에 따른 신뢰성지수를 나타낸 것이다.

3.3.3 침매터널의 내부

콘크리트의 설계 품질 결정은 다음과 같다.

① CI_s^- : Binder 무게의 2.0%

② CI_0^- : Binder 무게의 0.1%

여기서, D_{cl^-} 는 재령 28일의 콘크리트에서 염화물 촉진시험인 NT Build 492에 의해 결정되었으며, 아래와 같이 네 가지의 경우를 고려하였다.

- D_{cl^-} : $3.0 \times 10^{-12} m^2/sec$ (= 94 $mm^2/year$)

- D_{cl^-} : $4.0 \times 10^{-12} m^2/sec$ (= 125 $mm^2/year$)

- D_{cl^-} : $5.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ (= $156 \text{ mm}^2/\text{year}$)
- D_{cl^-} : $6.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ (= $187 \text{ mm}^2/\text{year}$)

③ CI_{cr}^- = Binder 무게의 0.7 %

④ 다른 종류의 시멘트와 플라이애쉬를 대체할 목적으로 재령계수 0.4와 0.5에 대하여 검토하였다.

〈표 7〉은 Duracrete를 바탕으로 구해진 공칭피복두께 (75 mm)에 대하여 확보 가능한 대기구간에서의 최대 염화물 확산계수와 재령계수에 따른 신뢰성지수를 나타낸 것이다.

3.3.4 침매터널의 외부

콘크리트의 설계품질 결정은 다음과 같다.

① CI_s^- : Binder 무게의 2.5 %

② CI_0^- : Binder 무게의 0.1 %

여기서, D_{cl^-} 는 침매터널의 내부와 동일하게 NT Build 492에 의해 결정되었으며, 아래와 같이 네 가지의 경우를 고려하였다.

- D_{cl^-} : $3.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ (= $94 \text{ mm}^2/\text{year}$)
- D_{cl^-} : $4.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ (= $125 \text{ mm}^2/\text{year}$)
- D_{cl^-} : $5.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ (= $156 \text{ mm}^2/\text{year}$)
- D_{cl^-} : $6.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$ (= $187 \text{ mm}^2/\text{year}$)

③ CI_{cr}^- = Binder 무게의 2.2 %

④ 다른 종류의 시멘트와 플라이애쉬에 대처하기 위하여 재령계수를 0.3과 0.4로 고려하였으며, 〈표 8〉은 공칭피복 두께 75 mm에 대해 확보 가능한 수중구간에서의 최대 염화물 확산계수와 재령계수에 따른 신뢰성지수를 나타낸 것이다.

3.4 내구성 설계 결과

3.4.1 교량

교량 구조물에 적용한 최대 염화물 확산계수 D_{cl^-} 와 외부 콘크리트의 공칭피복두께는 다음과 같다.

- 비말대 구간 : $\text{Max. } D_{cl} = 3.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$, $c = 75 \text{ mm}$
- 수중 구간 : $\text{Max. } D_{cl} = 6.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$, $c = 75 \text{ mm}$
- 대기 구간 : $\text{Max. } D_{cl} = 3.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$, $c = 75 \text{ mm}$

3.4.2 침매터널

침매터널의 최대 염화물 확산계수 D_{cl^-} 와 외부 콘크리트의 공칭피복두께는 다음과 같다.

- 터널내·외부 : $\text{Max. } D_{cl} = 6.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{sec}$, $c = 75 \text{ mm}$

표 7. 대기구간의 염화물 확산계수, 재령계수 및 신뢰성지수

공칭 피복두께 (mm)	재령 28일 Max. $D_{cl} \times 10^{-12}$ (m^2/sec)	β	
		$\alpha : 0.40$	$\alpha : 0.50$
75	3.0	2.4	3.1
	4.0	1.9	2.7
	5.0	1.5	2.3
	6.0	1.3	2.1

표 8. 해수중구간의 염화물 확산계수, 재령계수 및 신뢰성지수

공칭 피복두께 (mm)	재령 28일 Max. $D_{cl} \times 10^{-12}$ (m^2/sec)	β	
		$\alpha : 0.30$	$\alpha : 0.40$
75	3.0	3.8	$\gg 3.3$
	4.0	3.4	
	5.0	3.1	3.3
	6.0	2.8	

표 9. 구조물별 콘크리트 목표성능

항목	침매터널	교량	
		비말대 및 대기	해수중
물-결합재비	W/(C + FA)	0.40 ~ 0.42	0.35 ~ 0.40 (Target 0.38)
공기량	(%)	-	4 ~ 5 ^(*)
설계기준강도	(MPa)	35	40, 50
굵은 골재 최대치수	(mm)	25	19, 25
염화물 확산계수	(m^2/sec)	6×10^{-12}	3.5×10^{-12} / 6.5×10^{-12}

주) 경화상태 공기량

3.4.3 구조물별 콘크리트의 목표성능

최종적으로 결정한 구조물별 배합설계 요구사항은 〈표 9〉와 같다.

4. 100년 내구수명을 위한 해양 콘크리트의 배합설계

4.1 실험계획 및 방법

4.1.1 실험계획

본 배합시험에 앞서 시멘트 및 결합재 종류, 배합수준 등에 관하여 2차에 걸쳐 선행배합시험을 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 계획한 3차 배합시험의 실험계획은 〈표 10〉과 같다. 즉, 시멘트 종류는 보통 포틀랜드 시멘트와 슬래그 시멘트를 사용하는 2개 수준을 대상으로 하였고, 물-결합재비는 0.35 ~ 0.40 범위의 3 수준에 대하여 검토하였다. 무기질 혼화재의 종류는 플라이애쉬와 실리카폼을 사용하는 것으로 계획하였는데, 세부적으로 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우는 플라이애쉬 치환율을 25%로 고정된 조건에서 실리카폼을 전혀 혼합하지 않은 경우와 각각 3%, 5% 수준으로 변화시킨 경우에

대하여 검토하였으며, 시멘트 종류로 고로슬래그 시멘트를 사용한 경우는 무기질 혼화재를 전혀 포함하지 않은 plain의 경우와 슬래그 시멘트에 플라이애쉬를 혼합한 경우 그리고, 슬래

그 시멘트에 실리카폼을 혼합한 경우를 대상으로 검토하였다.

한편, 단위수량은 기존 Øresund 터널에 적용된 배합조건과 선행된 배합시험의 결과를 참고하여 140 kg/m³를 기본으로 하였으며, 적정 유동성을 만족하는 범위 내에서 최소화하고자 하였다.

표 10. 실험계획

시멘트 종류	W/B	혼화재 종류 및 치환율 (%)		시험항목
		FA	SF	
OPC	0.35	25	0 3 5	· 슬럼프 플로, 공기량(직후, 30분) · 압축강도(재령 7, 28일) · 염화물 확산(재령 28, 56일) · 길이변화(직후 ~ 재령 28일)
SLC	0.375	0	0	
	0.40	10	0	
		20	3	

*OPC: 보통 포틀랜드 시멘트, SLC: 고로슬래그 시멘트

표 11. 시멘트의 물리적 성질

시멘트 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	안정성 (%)	응결시간 (min.)		압축강도 (MPa)		
				초결	종결	3일	7일	28일
OPC	3.17	3,384	0.08	280	360	21.9	29.7	38.1
SLC	3.00	3,970	0.01	275	520	18.2	28.6	47.8

표 12. 무기질 혼화재의 물리·화학적 특성

시멘트 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	강열 감량 (%)	화학생분 (%)					
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
실리카폼	2.21	210,000	0.10	91.2	1.3	0.8	0.7	0.3	-
플라이애쉬	2.27	3,556	3.57	56.4	23.7	9.0	2.5	1.3	1.1

표 13. 골재의 물리적 특성

골재종류	비중	조립률	흡수율 (%)	단위질량 (kg/m ³)	0.08mm체 통과율 (%)
잔골재	2.60	2.81	0.97	1,470	0.20
굵은골재	2.68	6.5	0.52	1,577	0.25

표 14. 콘크리트용 화학 혼화재의 물리적 특성

혼화재 종류	주성분	외관	비중 (20℃)
고성능 감수제	폴리카르본산	연노랑 액체	1.20 ± 0.02

표 15. 콘크리트의 길이변화 측정방법

측정법	콘크리트 상태	문제점
레이저 반사법	소성 및 경화상태	- 고가의 장비 소요 - 진동이 없는 시험환경 필요
광학 컴퍼레이터법	경화상태	- 고가의 장비 소요 - 경화상태에서만 적용가능
다이얼 게이지법	경화상태	- 게이지의 스프링 탄력으로 굳지 않은 콘크리트의 소성변형 측정 불가 - 시험오차범위가 매우 큼
표면 부착형 스트레인 게이지법	경화상태	- 경화상태에서만 적용가능

4.1.2 사용재료

본 실험에 사용한 각종 사용재료의 물리·화학적 성질은 <표 11> ~ <표 14>와 같다. 즉, 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 치환율이 40%인 고로슬래그 시멘트를, 플라이애쉬는 비중 2.27의 국내 S사 제품을 사용하였으며, 실리카폼은 undensified 상태의 제품을 사용하였다.

잔골재는 비중 2.60의 중국산 강모래를, 그리고 굵은 골재는 비중 2.68의 25 mm 쇄석을 사용하였으며, 고성능 AE감수제는 폴리카르본산계를 사용하였다.

4.1.3 실험방법

굳지 않은 상태 및 경화상태의 각종 특성은 ASTM 및 BS, 그리고 AASHTO 등의 표준적인 방법에 따라 실시하였다.

한편, 본 프로젝트에서는 상가에서 언급한 표준적인 시험방법 이외에 콘크리트 타설 직후부터 재령 28일까지의 길이변화를 측정하였는데, 그 내용을 정리하면 다음과 같다. 즉, <표 15>와 같이 기존에 제안되어 있는 길이변화 측정방법의 경우 각각의 문제점을 갖고 있어, 굳지 않은 상태에서부터 경화상태에 이르기까지의 전체 체적변화특성을 정량적으로 검토하기에는 많은 어려움이 있는 것으로 평가되었다. 따라서 매립형 vibrating wire strain gage를 적용하여 소성단계에서부터 경화상태까지의 길이변화를 측정하였는데, 설치한 상황은 <그림 5>와 같다.

염화물 확산시험은 NT Build 492에 의거 <그림 6>과 같은

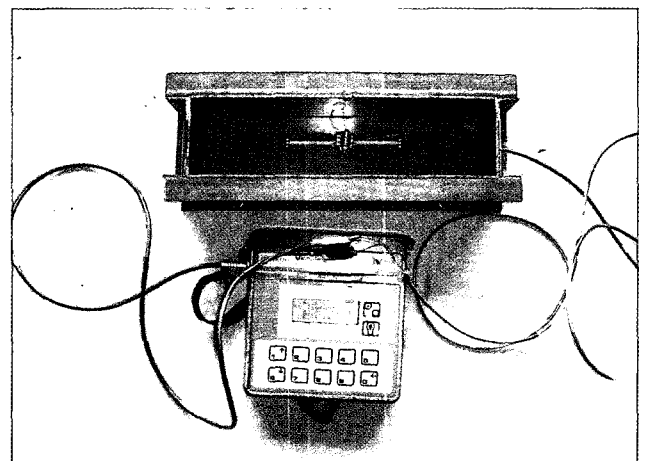


그림 5. 매립형 Vibrating wire strain gage

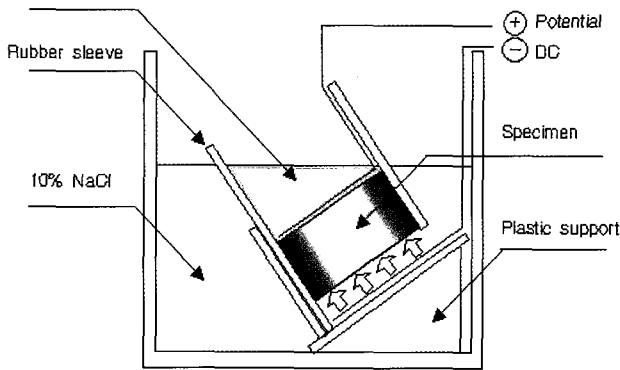


그림 6. 염화물 촉진시험 모식도 (NT Build 492)

장치를 이용하였다. 즉, 0.3N의 NaOH 수용액(대략 물 1ℓ 에 NaOH 12g)을 양극으로 하고, 10%의 NaCl 수용액 (NaCl 100g + 증류수 900g)을 음극으로 하여 30V의 전압을 가하였을 때 지시되는 전류 값을 바탕으로 적용할 전압과 시험지속시간을 정하였다.

염화물 침투깊이는 시험이 종료된 후, 시험편을 할렬하여 0.1N AgNO₃를 분무하는 변색법을 이용하였으며, 염화물 확산계수(chloride migration coefficient)는 식(6)를 적용하여 산출하였다.

$$D = \frac{RT}{zFE} \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (6)$$

여기서, $\alpha = 2 \sqrt{\frac{RTL}{zFE}} \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right)$,

$$E = \frac{U - 2}{L}$$

- D : 비정상상태의 염화물 확산계수 (cm²/sec)
- z : 이온의 원자가 (염소이온의 경우 $z=1$)
- F : 패러데이 상수 (96,481.04 J/Vmol)
- U : 적용한 볼트의 절대 값 (V)
- R : 기체상수 (8.314 J/Kmol)
- T : 처음과 끝의 양극 용액의 평균 온도 (K)
- L : 시편의 두께 (m)
- x_d : 염소이온의 침투깊이 (m)
- t : 실험 지속시간
- erf : error function
- c_d : 질산에 의해 변색된 부분의 염소이온 농도
- c_0 : 음극쪽 셀의 염소이온 농도

4.2 실험결과 및 분석

4.2.1 굳지 않은 상태 특성

배합시험결과 <표 16>에서와 같이 물-결합재비가 낮아질수록 즉, 단위결합재량이 증가할수록 양호한 재료분리저항성과 유동 특성이 있는 것으로 나타났다. 그러나 시멘트 종류에 따라 차이가 있는데, 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우에 있어서는 슬래그 시멘트를 사용한 경우에 비해 유동성이 현저히 낮

표 16. 배합시험결과

구분	물-결합재비	잔골재율 (%)	W	C	단위질량 (kg/m ³)					AD (B×%)	굳지 않은 상태			
					FA	SF	S	G	슬럼프		플로우 (cm)	공기량 (%)		
											초기	30분	초기	30분
OPC	FA20	0.35	39.0	140	320	80	0	683	1102	0.60	46.0	43.0	5.8	4.8
	F20S3		40.0		308		12	699	1081	0.75	42.0	42.5	3.8	3.1
	F20S5		40.0		300		20	698	1079	0.90	42.0	41.5	4.0	3.5
	FA20	0.375	40.0	143	305	76	0	699	1080	0.52	48.5	45.5	5.6	4.6
	F20S3		39.0		294		11	680	1096	0.60	41.0	40.0	6.0	5.3
	F20S5		44.0		286		19	766	1005	0.65	39.5	38.0	5.9	5.3
	F20		41.0		292		0	725	1075	0.55	45.5	44.5	5.9	4.6
	F20S3	0.40	40.0	146	281	73	11	705	1091	0.50	40.0	37.0	5.0	4.7
F20S5	43.0		274				18	757	1035	0.70	41.5	41.0	5.0	4.9
SLC	Plain	0.35	41.5	137	391	0	0	737	1070	0.60	51.0	49.0	6.0	5.5
	S3		38.0		379		12	673	1132	0.85	48.5	46.0	4.5	3.8
	F10		40.0		352		39	706	1091	0.65	50.5	48.5	4.5	3.5
	F20	0.375	40.0	143	313	78	0	701	1084	0.60	51.5	53.0	5.4	4.4
	Plain		41.5		381		0	734	1066	0.58	47.0	47.5	4.3	4.1
	S3		39.0		370		11	688	1110	0.80	51.5	53.5	6.5	5.6
	F10		41.0		343		38	721	1069	0.58	48.5	51.0	5.2	4.7
	F20	0.40	40.0	149	305	76	0	699	1080	0.53	51.5	53.0	4.5	4.0
	Plain		42.0		373		0	739	1052	0.65	48.0	46.5	3.8	3.4
	S3		40.0		362		11	703	1086	0.75	45.5	46.0	5.0	4.4
	F10		41.5		336		37	726	1055	0.60	46.5	43.5	4.5	4.1
	F20		40.0		298		75	696	1076	0.53	50.0	50.0	4.9	3.9

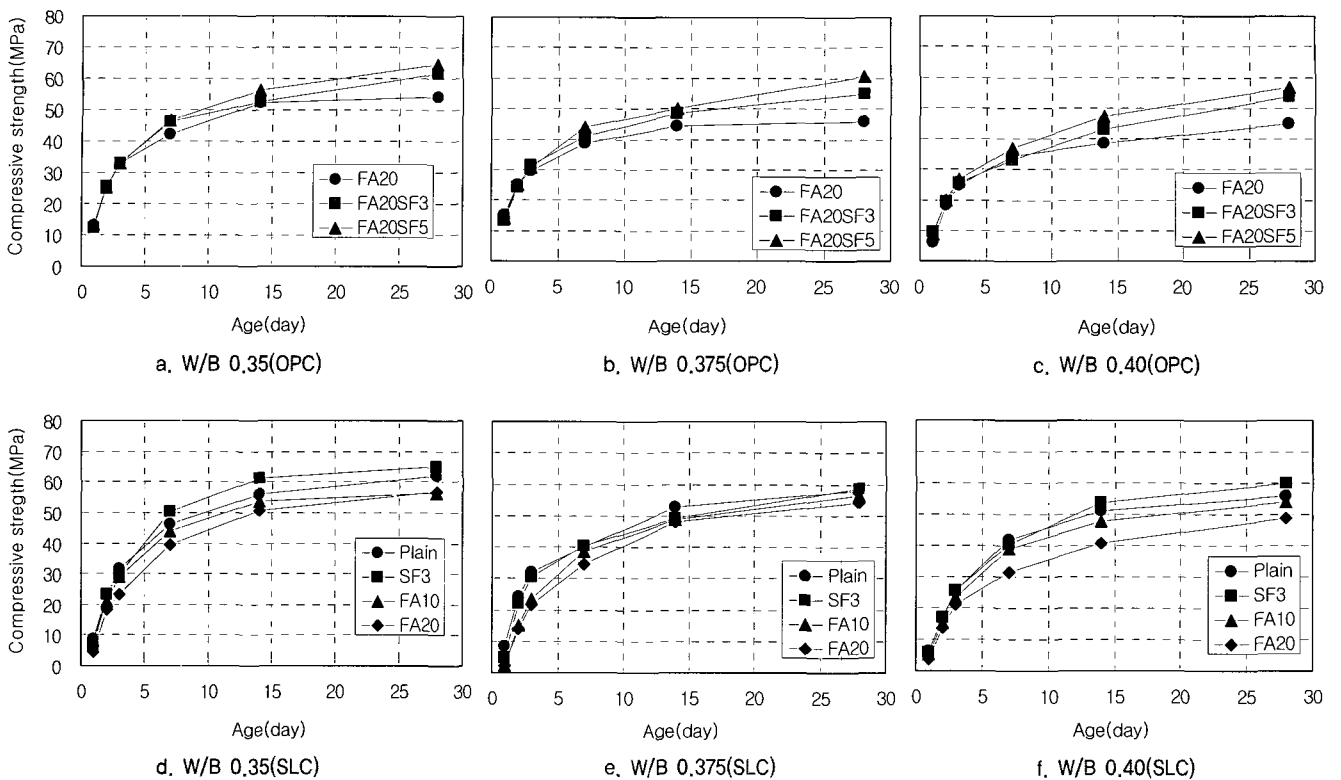


그림 7. 시멘트 종류 및 물-결합재비 변화에 따른 압축강도 특성

아저 목표 유동성인 슬럼프 플로 50 cm를 만족하지 못하는 것으로 평가되었는데, 이는 보통 포틀랜드 시멘트의 경우 상대적으로 분말도가 높고, 비중이 낮은 슬래그 시멘트(분말도 3.890 cm²/g, 비중 3.03)에 비해 콘크리트 내에서 차지하는 전체용적 및 비표면적이 적기 때문에, 재료분리저항성 및 시공성이 낮아지게 되는 효과에 기인한 것으로 분석되었다. 따라서 보통 포틀랜드 시멘트를 대상으로 한 상기의 배합조건을 부산 ~ 거제간 연결도로 구조물에 활용하기 위해서는 슬럼프 플로가 아닌, 대상 구조물의 시공 특성이 반영된 적정의 슬럼프 값을 산정하여 적용하는 것이, 재료분리 발생확률이 높게 된 고유동성의 콘크리트를 어렵게 적용하는 것보다 콘크리트 품질관리 측면에서 매우 바람직한 것으로 평가되었다.

4.2.2 경화상태 특성

(1) 압축강도

〈그림 7〉은 시멘트 종류 및 물-결합재비 변화에 따른 압축강도 특성을 나타낸 것이다. 전반적으로, 물-결합재비가 높아질수록, 그리고 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 강도는 크게 낮아지는 것으로 나타났는데, 본 배합설계 범위에서는 시멘트의 일부로 플라이애쉬와 실리카폼을 복합하여 사용한 경우가 플라이애쉬만을 단독으로 사용한 경우에 비해 약 16.1 ~ 24.1% 정

도 높은 강도특성이 있는 것으로 나타났다. 그러나 플라이애쉬만을 사용한 배합조건이라 할지라도 본 현장에서 대상으로 하고 있는 침매 구조물의 설계기준강도가 35 MPa이고, 교량의 경우는 각각 40 및 50 MPa 이므로, 강도 측면에서는 어떠한 경우라도 모두 설계기준강도를 만족하는 것으로 나타났다.

(2) 염화물 확산계수

전반적으로 재령이 경과할수록, 그리고 물-결합재비가 낮아질수록 염화물 확산계수도 낮아지는 것으로 평가되었는데, 특히 무기질 혼화재의 종류로 플라이애쉬보다는 실리카폼이 그리고, 실리카폼 보다는 고로슬래그 미분말을 사용한 경우가 염화물 확산 저항이 우수한 것으로 나타났다. 이는 기존의 많은 연구보고에서도 언급하고 있는 바와 같이 고로슬래그 미분말이 콘크리트의 화학 저항성을 개선시키는 효과에 기인한 결과로 분석되었다. 한편, 보통 포틀랜드 시멘트에 플라이애쉬와 실리카폼을 복합하여 사용하는 3성분계 배합조건인 염화물 확산계수는 재령 28일이고, 물-결합재비 0.35에서 2.02 ~ 4.88 m²/s, 물-결합재비 0.375에서는 2.58 ~ 5.80 m²/s, 그리고 물-결합재비 0.40에서는 3.40 ~ 7.07 m²/s 수준인 것으로 나타난 반면, 고로슬래그 시멘트를 사용한 경우는 물-결합재비 0.40이고, 플라이애쉬 치환율 20%인 일부 배합조건을 제외한 모든 배합조건에서 염화물 확산계수 값이 2.0 m²/s 이하인 것

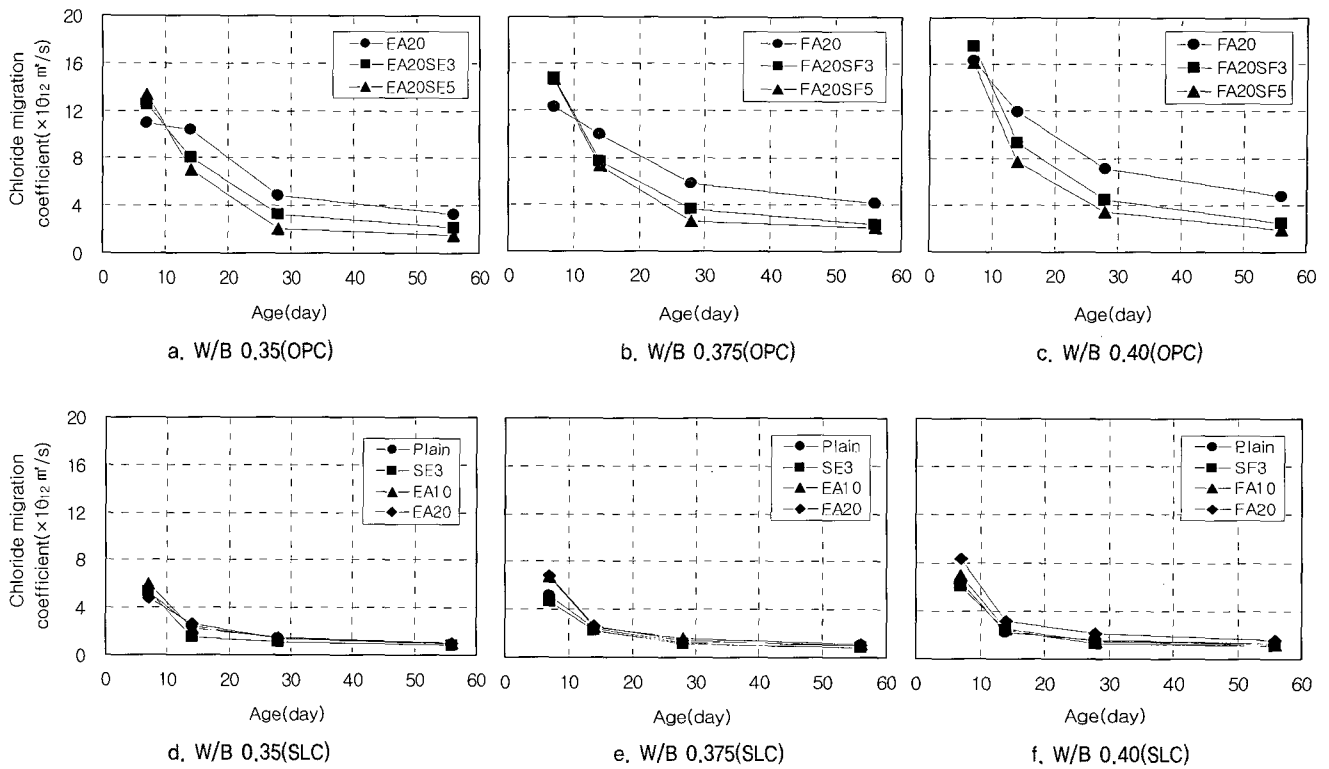


그림 8. 시멘트 종류 및 물-결합재비 변화에 따른 염화물 확산 특성

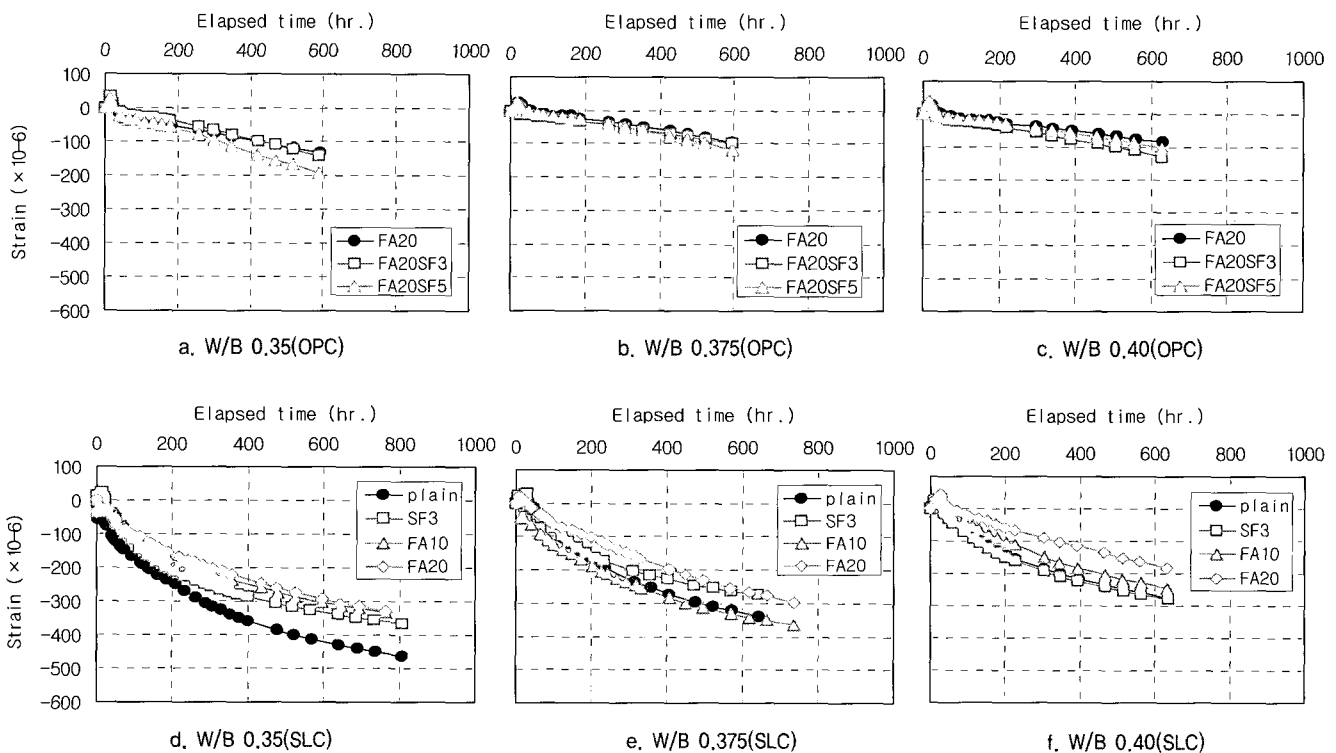


그림 9. 시멘트 종류 및 물-결합재비 변화에 따른 길이변화

으로 나타남으로서 고로슬래그 미분말의 우수한 화학저항성 개선효과를 다시금 확인할 수 있었다. 그러나 고로슬래그 시멘트의 경우 지경성(遲硬性)을 가지고 있기 때문에 초기양생을 소

홀히 하거나 중단하게 되면 강도 및 소요성능이 현저히 불량하게 되는 단점이 있기 때문에 최적의 양생방법 및 기간을 정하여 철저히 관리하는 것으로 하였다.

(3) 길이변화

〈그림 9〉는 시멘트 종류 및 배합조건에 따른 길이변화 특성을 나타낸 것이다. 전반적으로 물-결합재비가 낮을수록, 그리고 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우보다 고로슬래그 시멘트를 사용한 경우가 수축량이 매우 크게 되는 것으로 나타났다.

그러나, 고로슬래그 시멘트를 사용한 경우 약 800시간까지의 길이변화 특성이 일반 콘크리트의 건조수축 범위인 $400 \sim 800 \times 10^{-6}$ (6개월 기준)보다 다소 적게 된 것과 여기에 플라이애쉬와 같은 무기질 혼화재를 복합하여 사용한다면 수축량은 크게 저감할 수 있는 것으로 분석되었다.

이상을 종합하여 볼 때 교량 구조물은 프리캐스트(deck slab, caisson 등)와 현장 타설(pylon, abutment 등)을 복합하여 시공하는 것으로 계획되어 있기 때문에 양생온도에 대해 매우 민감한 고로슬래그 시멘트를 사용하기 보다는 보통 포틀랜드 시멘트에 무기질 혼화재를 복합하여 사용하는 것을 기본으로 하고, 여기에 염화물 확산계수, 설계기준강도 및 균열저항성 등의 요구성능을 만족할 수 있도록 배합이나 양생조건 등을 적절히 조정해야 한다는 결론을 얻었다. 침매 구조물의 경우는 대부분의 구조물이 프리캐스트로 제작하는 것으로 계획되어 있기 때문에 염화물 확산 계수 및 수화열 저감 특성이 우수한 고로슬래그 시멘트를 사용하고, 여기에 플라이애쉬를 활용하는 것이 유리하다는 결론을 얻었다.

5. 현장 적용성 검토

일반적으로 각종 콘크리트의 유동특성은 〈그림 10〉에서와 같이 주로 슬럼프나 슬럼프 플로우 시험에 대응하는 항복값과 재료분리저항성에 대응하는 소성점도를 이용하여 평가하게 되는데, 본 프로젝트에서 대상으로 하고 있는 100년 내구수명의 고내구성 해양콘크리트의 경우는 배합사항으로 물-결합재비를 0.40 이하로 계획하였고, 최소의 단위수량과 결합재량을 적용하고 있기 때문에 겉보기 항복값은 적으나 소성점도가 매우 크게 되는 특성을 가지고 있어, 갇힌공기(entrapped air) 등의 영향으로 콘크리트 노출면이 다소 불량하게 되는 등의 문제점도 갖고 있다.

따라서 이를 개선할 목적으로 시공측면에서 거푸집 및 박리제 종류, 그리고 다짐장비와 방법 등에 대하여 검토하였는데 그 결과, 거푸집보다는 다짐효과에 따른 콘크리트 표면개선효과가 우수한 것으로 평가되었다. 즉, 타설방법으로 대상 구조물의 중앙에서 가장자리방향으로 타설하면서 측면거푸집에 직경이 다소 큰 $\phi 65$ mm의 다짐기를 밀착하여 시공하는 경우가 가장 우수한 표면개선효과를 발휘하는 것으로 평가되었다.

한편, 소성점도가 높은 콘크리트의 경우는 〈그림 11〉에서와 같이 펌프의 압력손실도 크게 되는 등 압송성 측면에서도 다소 불리한 것으로 보고되고 있다.

즉, 이러한 특성을 고려하여 GK Project에 적용하고 있는 고내구성 콘크리트의 경우 소요성능을 만족하기 위해서는 콘크리트의 혼합시간을 일반콘크리트에 비해 2배 이상 크게 증가시

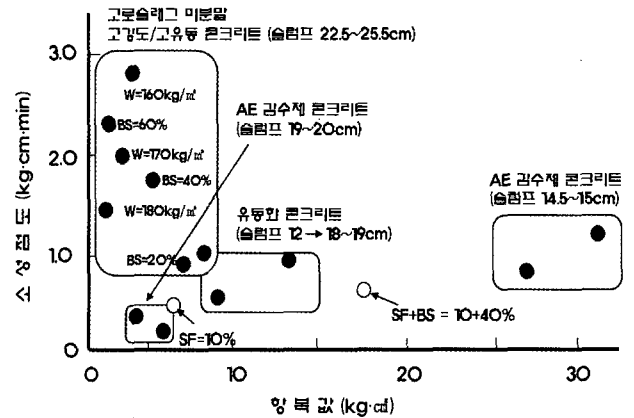


그림 10. 각종 콘크리트의 유동특성^{6,7)}

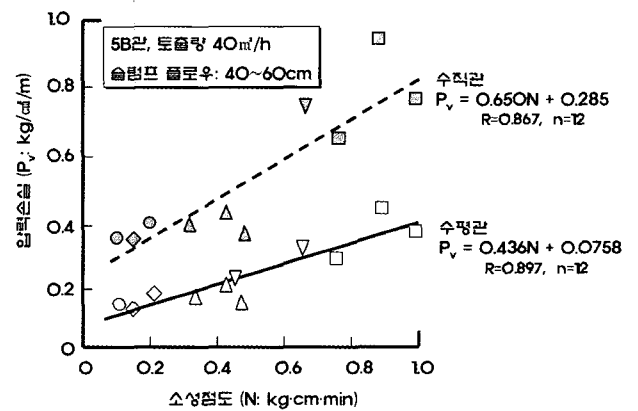


그림 11. 소성점도와 압력손실과의 관계⁸⁾

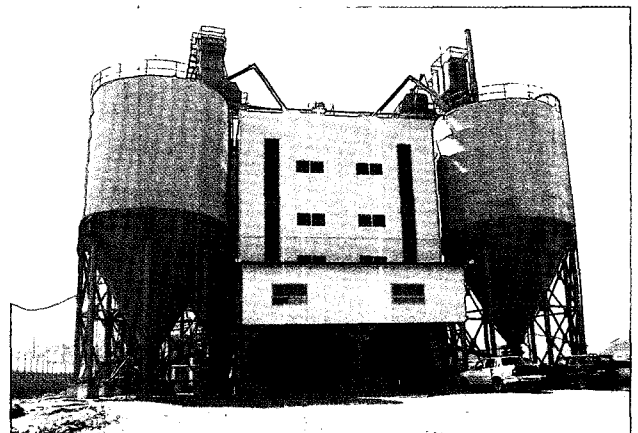


그림 12. GK Project의 자체 배치플랜트 전경

켜 주어야 할 뿐만 아니라 앞에서도 언급한 바와 같이 높은 소성점도에 기인하여 펌프 압송능력이 불리하게 되는 등의 특성을 가지고 있다.

따라서 향후 본 프로젝트와 유사한 요구 성능을 갖는 고내구성 콘크리트를 활용하기 위해서는 앞에서 언급한 콘크리트의 특성에 대응할 수 있는 종합적인 시공계획수립이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본고에서는 GK Project에 적용된 내구성 설계 개념 및 이에 근거한 100년 수명의 고내구성 해양콘크리트 개발 과정에 대하여 간략히 소개하였다.

즉, 기존 콘크리트의 배합설계 과정은 구조물의 구조적 내력을 만족하는 설계기준강도를 기준으로 콘크리트의 품질관리 수준이나 환경조건 등에 따른 할증률 등을 부여하는 단계로 수행되었다. 그러나 GK Project에서는 유럽의 선진화 기법인 Duracrete 모델을 적용하였는데, 이는 구조물이 노출되어 있는 환경조건을 대상으로 구조물의 주요성능저하요인을 도출하고, 그 결과를 바탕으로 구조물이 목표로 하는 사용기간까지 충분히 저항할 수 있도록 콘크리트를 설계하는 것이다. 따라서 GK Project에서는 주요성능저하요인으로 염해환경을 대상으로 하였고, 내구수명 100년을 만족하는 콘크리트를 개발하였다.

이렇게 축적된 각종 자료는 향후 국내 해양 구조물의 염해 저항형 내구성 설계 및 콘크리트 개발에 크게 활용할 수 있을

것으로 기대된다. □

참고문헌

1. J. K. Yoo, S. J. Park, S. S. Lee, Y. J. Kim, "Investigation of corrosion protection properties of concrete containing ground granulated blast-furnace slag for massive coastal concrete structures in Korea," International conference advance in concrete and structure, ICACS 2004, Vol.2, 2004. 5, pp.818~826.
2. D. S. Kim, J. K. Yoo, Y. J. Kim, "The Effect of Mineral Admixtures on the Chloride Diffusion of the Concrete Immersed in Chloride Solution," ConMat'05, Vol.1, 2005. 8. 402pp.
3. CEB-FIP, "Duracrete Final Technical Report-Probabilistic Performance based Durability Design of Concrete Structures(Brite-EuRam Programme, project BE 96-3942)".
4. NT BUILD 492, "Concrete, Mortar and Cement-Based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments," Nordtest.
5. Øresundsbro Konsortiet Vester SØgade 10, "The Øresund Technical Publications," 2001. 5.
6. 日本建築學會, "海水の作用を受けるコンクリート", 建築工事標準仕様書・同解説, JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 1997.
7. 和美廣喜, 柳田克己, "高强度コンクリートの流動特性に関する實驗的研究", 콘크리트工學論文集, Vol.4, 1993, pp.123~131.
8. 森永繁, "コンクリートポンプの管内壓送壓に関する研究", 콘크리트・ジャーナル, Vol.9, No.7, 1997.

도서소개

레미콘 플랜트 설비와 콘크리트 품질

◆ 소개

: ... 이 시리즈는 그간 각 분야별로 학회지 특집기사에 참여한 전문가들의 경험과 축적된 연구결과 및 국내외에서 개발된 각종 기술 등에 대하여 체계적이고 깊이 있는 내용을 수록하고 있어 관련분야에 종사하는 실무자들이나 학생들에게 매우 유익한 도서가 될 것이다.

- 저 자: 한국콘크리트학회
- 출판사: 기문당
- 발행일: 2004년 12월 30일
- 정 가: 10,000원(회 원: 8,000원)
- ISBN: 89-7086-631-0
- 총쪽수: 139 쪽(판형: B5)

