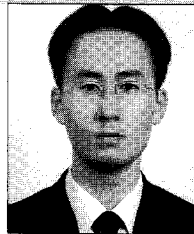


국내 최초 100년 수명 고내구성 해양콘크리트 설계

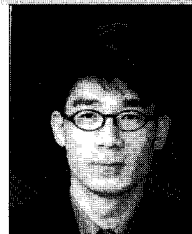
100 years service life Design of High-Durable Marine Concrete



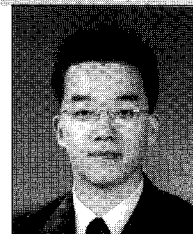
김 영 진*



전 세 진**



박 상 준**



최 명 성***

* (주)대우건설 기술연구원 연구위원

** (주)대우건설 기술연구원 책임연구원

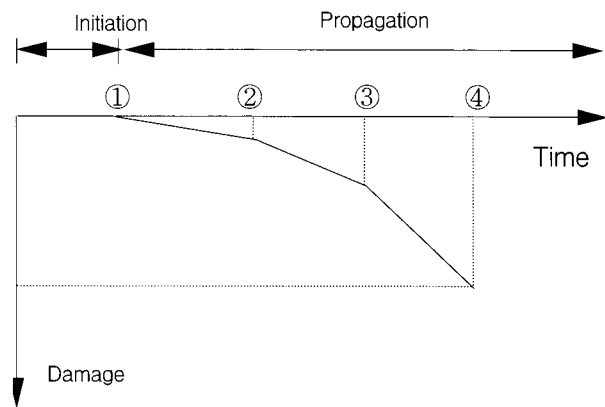
*** (주)대우건설 기술연구원 전임연구원

1. 서론

부산-거제간 연결도로 프로젝트(GK Project) 콘크리트 구조물의 내구성 설계는 국내에서는 최초로 유럽을 중심으로 여러 분야의 전문가가 참여, 구조물의 성능을 기반으로 실제 구조물의 거동 및 실험데이터를 사용하여 개발된 최신 설계법인 DuraCrete에 의하여 수행되었다. DuraCrete에서 내구성 설계의 기본적인 목표는 염소이온 침투 및 탄산화 등 고려하는 열화 메커니즘에 대하여 납득할 만한 수준의 안전도를 확보하는데 있으며, 기본적인 설계개념은 일반적인 구조설계 과정과 마찬가지로 성능기반의 하중저항계수 설계법(LRFD)에 근거하고 있다. 이러한 개념 하에서 특정 사용기간 즉 목표내구수명 동안에 구조물의 각종 열화위험에 저항하도록 재료배합 및 구조 상세를 선정하고 적용하게 된다.

내구성 설계의 첫 단계는 목표내구수명에 대한 정의이며, 그림 1은 사용수명(service life)동안에 발생 가능한 손상을 나타내고 있다. 내구수명 동안에 발생하는 열화현상을 4 단계로 나누고 있으며, 일반적으로 ①~②단계의 기간이 구조물의 사용성을 확보할 수 있는 것으로 보고 있다. 즉, 염소이온 등의 유해물질이 철근 표면에 닿아 부식이 개시되어 부식 생성물의 팽창 압에 의하여 피복 콘크리트에 균열

이 발생하는 전파기에 이르러 허용 균열폭 0.3mm에 달하는 시간까지를 내구수명으로 보고 있다.



① De-passivation, ② Spalling, ③ Cracking, ④ Collapse

그림 1 콘크리트 구조물의 열화 과정

내구성 설계의 두 번째 단계는 환경하중의 분석 및 해당 열화 메커니즘의 정량화로 이를 위해서는 시간에 따른 열화 과정과 재료의 저항특성에 대한 수학적 모델링이 요구된다.

마지막으로 기존의 구조설계에 이용되고 있는 신뢰성 이론을 적용하여 사용수명 동안에 발생하는 주어진 각 열화

현상의 발생확률을 산정한다. 고려하는 열화현상은 다음 식 (1)과 같이 한계상태 함수로 나타낼 수 있다.

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

여기서 x 는 기본변수들의 벡터이며, $R(t)$ 는 저항함수를, $S(t)$ 는 하중함수를 각각 나타낸다. 따라서 특정 기간 $[0; T]$ 내의 파괴확률은 다음 식 (2) 및 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

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

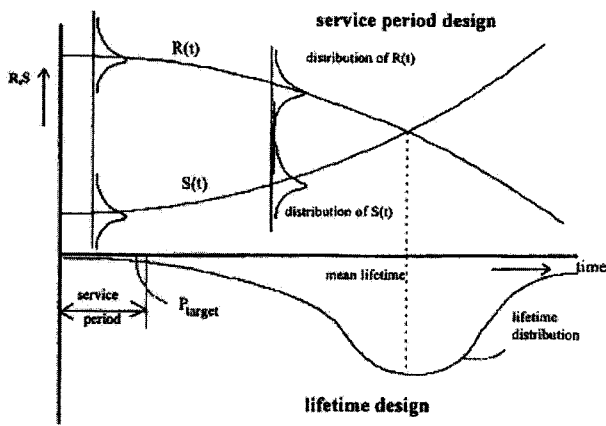


그림 2 파괴확률과 목표 사용수명 비교

GK Project 콘크리트 목표수준은 구조물이 처할 환경조건을 고려하여 구조물의 내구성능에 직접적으로 영향을 미치는 성능저하 인자의 침투속도를 평가하여 소요의 내구성을 확보할 수 설계개념을 통해 도출하였다. 이는 소요의 피복두께를 확보했을 경우 염해환경에서 100년 후 철근이 부식될 확률이 10%이내가 되도록 설계되었으며, 신뢰성 이론을 통하여 콘크리트의 피복두께 및 염화물 확산계수를 선정하였다. 이러한 확률론적 내구성 설계 절차 그림 3을 통해 GK Project에 적용되는 대상구조물에 대한 콘크리트 목표수준을 정리하면 표 1과 같다.

표 1 DuraCrete 설계 결과

대상	위치	최대 염화물 확산계수 D_x (m ² /sec)	공칭피복두께 (mm)
교량	물보라지역	3.5×10^{-12}	75
	해중	6.5×10^{-12}	75
	해상대기중	3.5×10^{-12}	50
침매 터널	해중	6.0×10^{-12}	75
	해상대기중	6.0×10^{-12}	75

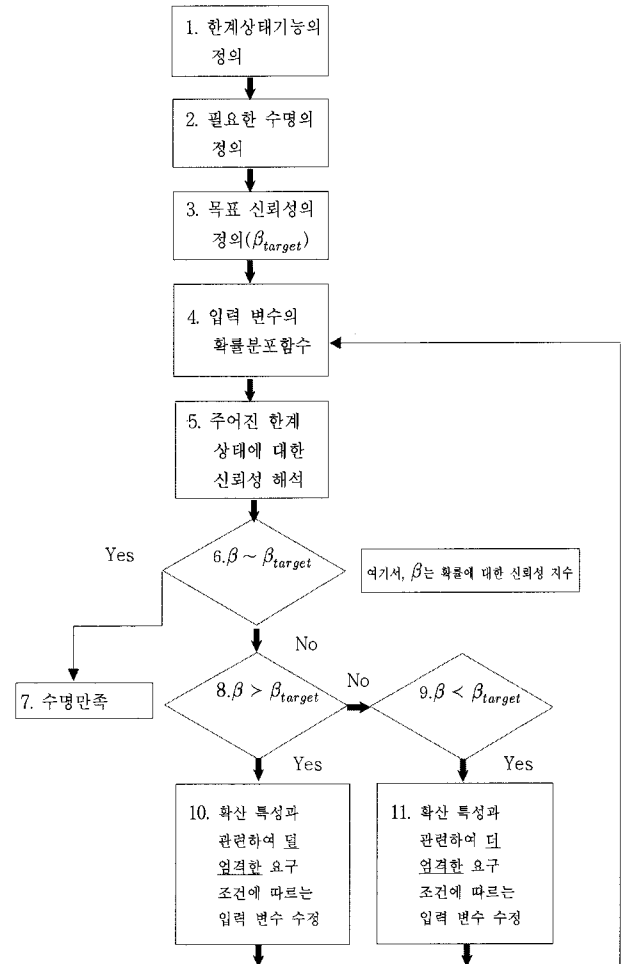


그림 3 확률론적 내구성 설계절차

2. GK Project에 적용된 고내구성 해양콘크리트

2.1 고내구성 해양콘크리트 배합설계

기존의 콘크리트 배합설계 과정은 구조물의 구조적 내력을 만족하는 설계기준강도를 기준으로 콘크리트의 품질관리 수준 및 환경조건에 기인한 할증률을 부여한 배합강도 수준을 목표로 설계를 하고, 시공성을 고려한 적정의 워커빌리티(Workability)를 갖도록 수행되어 왔다.

그러나 본 프로젝트의 배합설계 흐름은 기존의 설계기준강도에 근거한 배합설계가 아니라, 구조물이 처할 환경조건을 고려하여 구조물의 내구성능에 직접적으로 영향을 미치는 성능저하 인자의 침투속도를 평가함으로써 소요의 내구성을 확보하고자 하는 단계로 배합설계를 진행하였다. 그림 4 및 그림 5는 기존의 배합설계와 본 프로젝트의 배합설계 절차를 개략적으로 비교하여 나타낸 것이다.

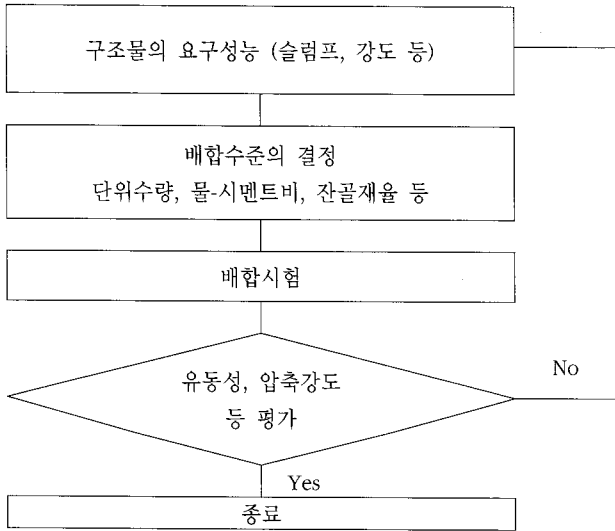


그림 4 기존 배합설계 절차

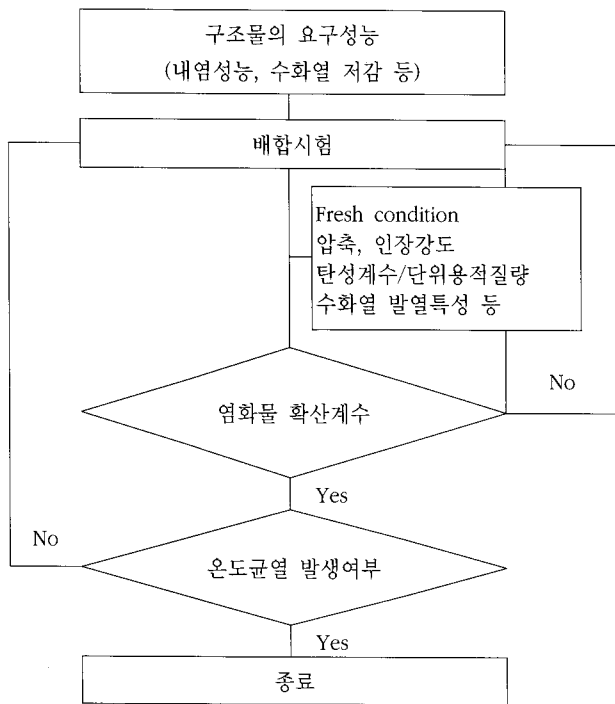


그림 5 GK Project 배합설계 절차

그림 6은 배합설계 절차를 토대로 실제 적용된 배합설계 진행 플로우를 나타낸 것으로서, 해양에 노출된 매시브한 토목 구조물인 부재특성을 고려하여 목표 염화물 확산계수를 만족하면서 수화열 저감에 효과적인 배합을 선정하고자 하였다. 우선 시멘트 및 혼화재료가 내염성능 및 수화열 저감에 미치는 효과에 대하여 검토한 후, 2성분계 및 3성분계 콘크리트 배합의 제 특성을 검토하였다. 검토된 배합을 바탕으로 각 부재별 요구수준을 만족하는 배합을 선정하였으며, 압축강도, 정탄성계수, 포아송비, 인장강도, 단열온도

상승시험, 염화물 확산계수 및 수축변형 거동특성 등 배합의 기초적 특성을 검토하였다.

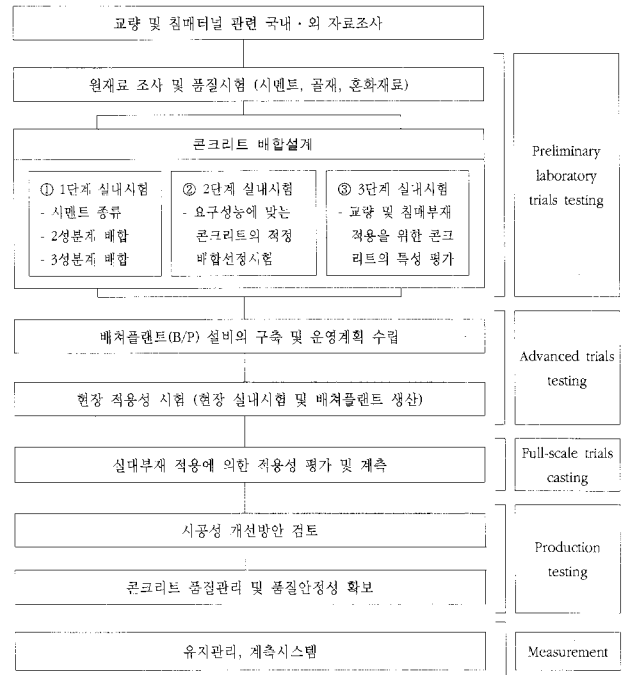


그림 6 콘크리트 배합설계의 진행과정

또한, 부재 및 재료특성을 고려한 수화열 해석을 수행하였으며, 균열발생 저감을 위한 최적의 양생 방안을 검토하였다. 선정된 배합은 현장 배치플랜트에서 생산성 시험을 수행하여 품질관리를 위한 방안을 검토하였으며, 실대부재를 제작하는 Full scale trial casting을 통하여 실 부재 적용성을 사전에 검토하였다. 이를 통한 시공 상의 문제점들에 대한 개선방안을 검토하고 안정적인 품질확보를 위한 시공방안을 결정하였다. 아울러 결정된 시공방안으로 실시공사의 관리 및 평가할 수 있는 계측시스템을 적용하였다.

2.2 배합실험 계획

본 프로젝트에 적용하기 위한 콘크리트 배합을 선정하기 위하여 기본단계로서 시멘트 종류, 혼화재 종류 및 치환율에 따른 콘크리트의 수화열 발열특성, 염화물 침투저항성 등을 검토하였다(표 2). 이를 통해 기본단계에서 수행된 배합시험 결과를 바탕으로 실시단계로서 각 부재별 목표성능을 만족하는 배합수준을 선정하여 보다 상세한 재료특성을 검토하였다.

검토결과 교량 구조물의 경우 육상, 해상 조건에서 시공되기 때문에 시공 중 외기조건에 덜 민감한 보통포틀랜드 시멘트와 2종류의 혼화재를 치환하는 3성분계 배합을 중심

표 2 GK Project 배합실험 계획

W/B (%)	시멘트	혼화재	실험 방법
30 35 40	보통포틀랜드 시멘트	플라이애쉬 (0,10,20%)	□ 굳지않은 콘크리트 슬럼프 (플로우), 공기량, 수화열
	저열시멘트	실리카폼 (0,5,10%)	
	고르슬래그 시멘트		메타카올린 (0,5,10%)
	저발열 혼합 시멘트		

으로 검토하였으며, 침매터널 구조물은 제작장에 설치된 Shelter 내에서 시스템 거푸집으로 제작되기 때문에 부재제작 및 양생 시 외부환경으로부터 보호할 수 있는 조건을 갖추에 따라 외기온도 및 환경조건에 다소 민감하지만 염화물 침투저항성이 우수한 고르슬래그시멘트를 기본으로 하여 검토하였다.

2.2.1 교량구조물 배합설계 기준 및 특성

교량을 구성하는 주요 구조부재는 교량 케이슨, 주탑, 교량상판, 수중파일 등으로 구성되어 있으며, 100년의 내구수명을 만족하기 위하여 표 3과 같이 소요의 피복두께, 염화물 침투저항성 및 동결융해 저항성 등이 요구되고 있다.

선행된 배합시험 결과를 바탕으로 교량구조물에 적용 가

능한 배합수준을 검토하였으며, 수화열에 대한 검토가 요구되는 부재를 대상으로 유한요소 해석법(FEM: Finite Element Method)에 의한 부재 모델링 및 수화열 해석을 실시하였다 (그림 7, 8, 9).

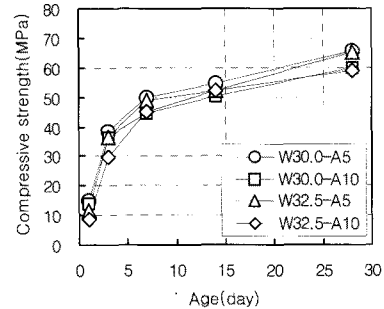


그림 7 물-결합재비 및 공기량 변화에 따른 압축강도 특성

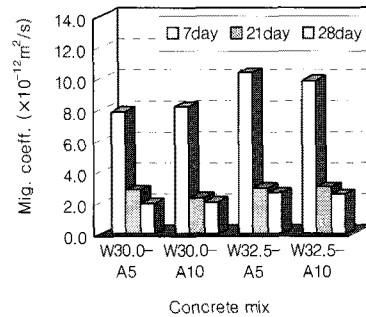


그림 8 물-결합재비 및 공기량 변화에 따른 염화물 확산 특성

표 3 교량 구조물용 콘크리트의 요구성능

Class		A	B	C
Max. water/binder ratio	W/(C+0.4FA)	0.40 (target 0.38)		
Fly ash (FA)	(% of powder)	20		
Air contents*)	(%)	consider	consider	neglect
Min. compressive cylinder strength (28 days)	(N/mm ²)	50	40	40
Migration coefficient	(m ² /s)	3.5×10 ⁻¹² (above level -3.5) 6.5×10 ⁻¹² (below level -3.5)		
Max. nominal size of coarse aggregate	(mm)	19	25	19
Chloride content, max.	(%, of powder)	0.10		
equivalent alkali content, max.	(kg/m ³)	3.0		
Target member		-Pylon(in-situ) -Deck(Pre-fab) -Deck joints (in-situ)	-Caissons(pre-fab) -Caisson caps(in-situ) -Pier shafts(pre-fab) -Pier shaft joints (in-situ) -Pile caps(in-situ) -Abutments(in-situ)	-Piles (cast in-situ under water)

*) 경화상태에서의 공기량

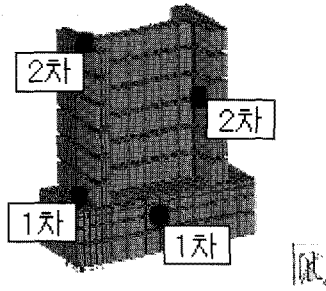


그림 9 수화열(접속교 케이슨 하부)

한편, 현장에 반입되는 원재료에 대하여 물성평가를 수행함으로써, 원재료의 특성에 대한 이해를 도모하였으며, 배치플랜트 생산성 실험을 통해 실내 배합설계를 통해 도출된 배합설계가 원재료의 사용을 통한 소요의 품질을 안정적으로 확보할 수 있는 방안에 대하여 검토하였다(그림 10, 11, 12).



그림 10 배치플랜트 생산성실험

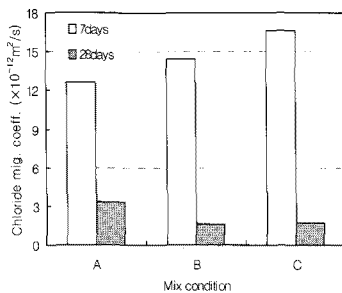


그림 11 염화물 확산계수 측정결과

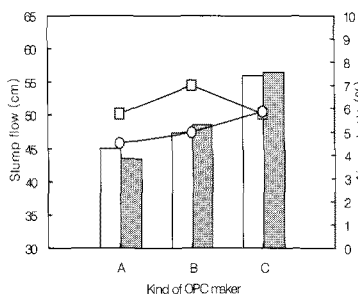


그림 12 슬럼프 플로우 및 공기량 측정결과

아울러 교량구조물 중 해상 배치플랜트로 시공될 교량 주탑, 바닥판 및 조인트에 적용 가능한 콘크리트의 배합수준 선정을 위해, 실제 해상 배치플랜트에서 생산성 시험을 수행하였다(그림 13, 14, 15).

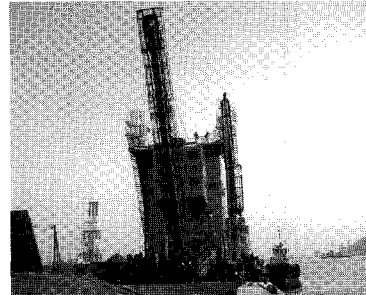


그림 13 해상 배치플랜트 생산성실험

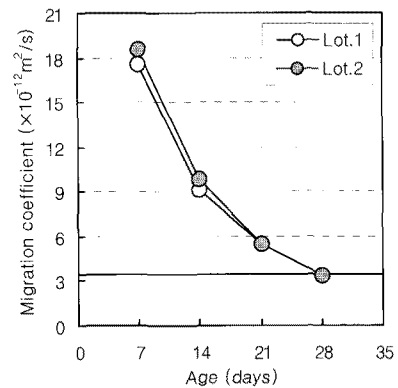


그림 14 염화물 확산계수 측정결과

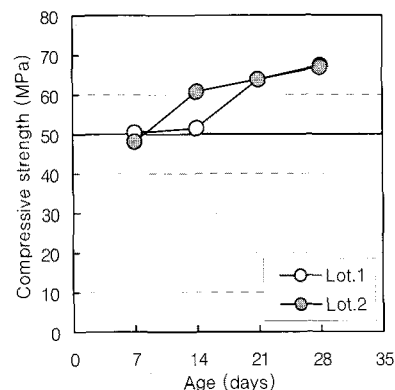


그림 15 압축강도 측정결과

실제 시공에 적용될 사용재료 및 작업인력을 이용하여, 작업성, 생산성 및 시공성을 평가하기 위해 교량 케이슨 기초 및 케이슨 벽체 구조물에 대하여 Full scale trial casting 시험(그림 16)을 수행하였고, 이를 통해 실 구조물로 가정할 부재의 수화열 발열특성(그림 17), 수축거동, 염화물 확산계수(그림 18) 등을 검토하여 최종 배합설계를 도출하였다.

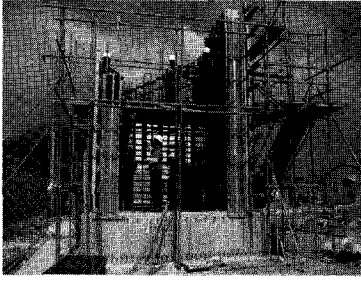


그림 16 옹벽 및 벽체철근 배근 전경

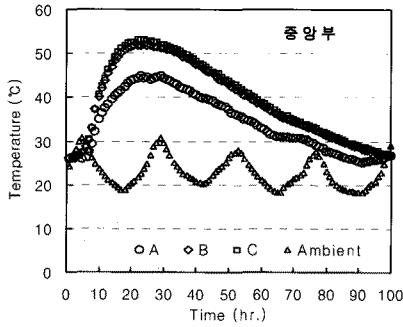


그림 17 옹벽 콘크리트의 수화열 측정결과

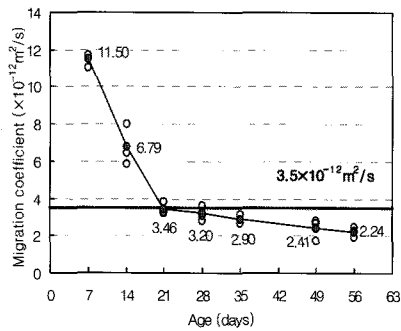


그림 18 코아시험체의 염화물 확산계수 측정결과

2.2.2 침매터널 구조물 배합설계 기준 및 특성

국내 최초로 시공되는 해저 침매터널 구조물은 염화물 침투에 대한 100년의 내구수명 확보와 더불어 수심 50m에 위치하기 때문에 수압에 대한 높은 수밀성을 요하게 된다. 특히, 함체의 일체성을 확보하기 위해서 시공조인트 없이 일체시공을 하기 때문에 콘크리트의 응결시간, 조기강도 발현특성에 대한 검토 후 수화열에 의한 균열없이 밀실하게 시공되어야 한다. 한편, 제안된 침매터널 및 관련 구조물용 콘크리트의 요구성능은 표 4와 같다.

교량 구조물과 동일한 방법으로 선행된 기본단계 배합시험 결과를 바탕으로 침매 구조물에 적용 가능한 배합수준을 검토하였으며, 수화열에 대한 검토가 요구되는 부재에 대해 유한요소해석법(FEM: Finite Element Method)에 의한 부재 모델링 및 수화열 해석을 실시하였다(그림. 19, 20, 21). 침매함체의 경우 그 중요도를 고려하여 연속타설시의 시공단계를 고려한 시공단계해석을 실시하였다.

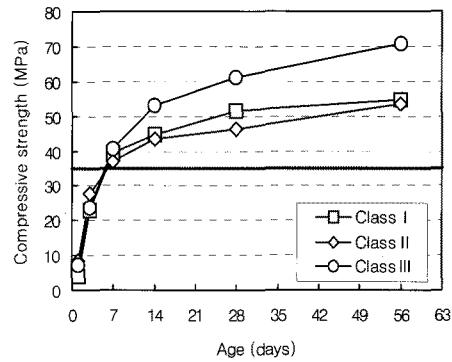


그림 19 재력에 따른 압축강도 발현성상

표 4 침매터널 및 관련 구조물용 콘크리트의 요구성능

Class		I	II	III
Max. water/binder ratio	(%)	40	50	40~42
Max. replacement ratio of Fly Ash (FA) (% of powder)		30		
Min. com. strength (28 days)	(MPa)	35		
Chloride migration coefficient	(m ² /s)	6.0×10 ⁻¹²	-	6.0×10 ⁻¹²
Max. nominal size of coarse aggregate	(mm)	-	-	25
Target member		- Vent. B/D (External) - Ramp - Cut & Cover - Block & TTP	- Vent. B/D (Internal) - Ballast	- Immersed tunnel

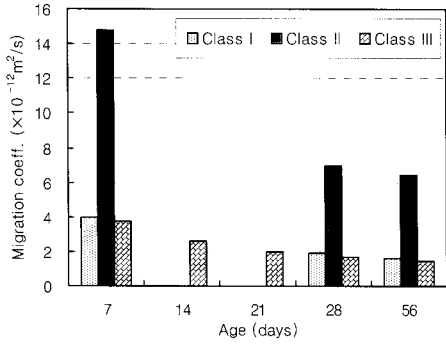


그림 20 재령에 따른 염화물 확산계수 측정결과

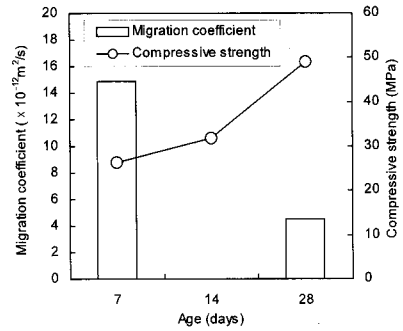


그림 24 압축강도 측정결과

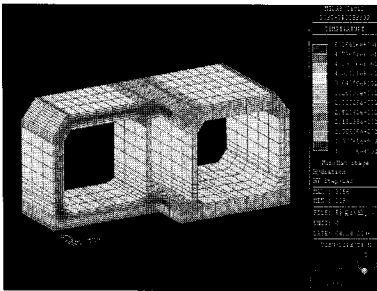


그림 21 수화열(침매터널 표준단면)

한편, 교량구조물과 동일하게 현장에 반입되는 원재료에 대하여 물성평가를 수행함으로써, 원재료의 특성에 대한 이해를 도모하였으며, 배처플랜트 생산성실험을 통해 실내 배합설계를 통해 도출된 배합설계가 원재료의 사용을 통해 소요의 품질을 안정적으로 확보할 수 있는 방안에 대하여 검토하였다(그림 22, 23, 24).

아울러 침매함체 반단면에 대해 Full scale trial casting 시험(그림 25)을 수행함으로써, 실시공시의 작업성 및 시공성 등을 평가하였고 실 구조물로 가정된 부재의 수화열 발열 특성(그림 26), 수축거동, 염화물 확산계수(그림 27) 등을 검토하여 최종 배합설계를 도출하였다.

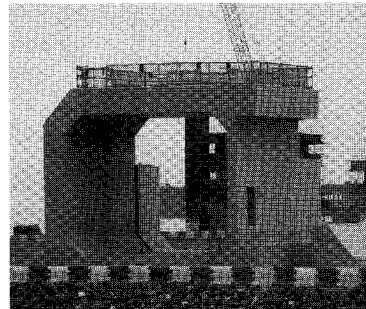


그림 25 침매터널의 Mock-up 시험체



그림 22 배처플랜트 생산성실험

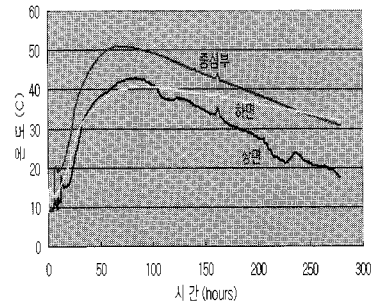


그림 26 하부슬래브의 수화열계측 결과

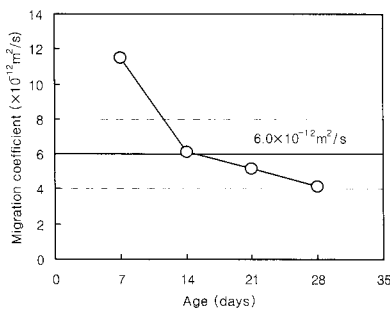


그림 23 염화물 확산계수 측정결과

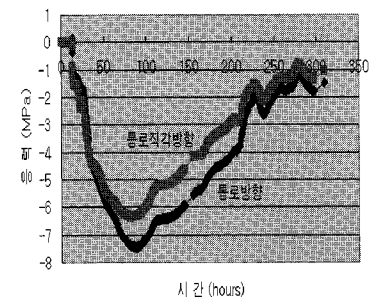


그림 27 하부슬래브 상면의 응력계측 결과

2.3.1 콘크리트 제조

상기의 배합설계과정을 통해 도출된 교량 및 침매터널 구조물용 콘크리트 배합을 이용하여 실제 콘크리트 제조 및 시공과정에서의 고내구성 해양콘크리트 생산시스템에 대하여 살펴보자.

GK Project의 경우 시방서에서 수화열 등에 의한 초기 균열을 방지할 수 있는 여러 가지 기준들이 제시되어 있다. 그 주요 기준들은 균열위험도, 최대 상승온도, 온도차 관리가 있다. 균열위험도(Crack risk)는 “온도응력/인장강도”로 정의되며, 국내 콘크리트표준시방서에 제시된 온도균열지수의 역수로 볼 수 있다. 기본적으로 균열을 허용하지 않는 본 침매터널이 만족해야 할 균열 위험도는 0.7로서, 온도균열지수로는 1.43에 해당된다. 이에 반해 교량 구조물의 경우 균열폭 규정(일반적으로 0.2mm)을 만족하도록 하고 있다. 참고로 국내 기준에서는 온도균열지수가 1.5이상이면 균열 방지, 1.2~1.5이면 균열을 제한하는 수준으로 보고 있다.

다음으로 최대 상승온도기준이 있다. 이는 수화열에 의해 콘크리트 내부 온도가 크게 상승했을 때 DEF(Delayed Ettringite Formation) 등의 현상에 의해 물성이 저하될 우려가 있으므로 최대 상승온도를 제한한 것이다. 강도나 염소이온 확산계수 관련 물성검증 실험이 수반되면 65℃, 실험이 수행되지 않을 경우 50℃로 온도를 제한하고 있지만, 기존 연구에 의하면 65℃이상에서도 건전성을 유지하고 있는 경우가 많이 보고되고 있다. 본 침매터널 배합의 물성검증 실험 결과 제반 기준들이 만족되고 있으므로 최소 65℃까지는 허용되는 것으로 나타났다.

마지막으로 온도차 관리기준이 있다. 이는 균열 위험도에 의한 관리에 부가하여 다각도의 안전성을 확보하기 위한 것이다. 먼저 내부구속 균열 제어에 관련된 사항으로 단면 내외부 온도차 제한을 통해 표면부 응력을 제어하고 있다. 이를 위해 단면 최대온도와 최소온도 차를 20℃이하로 제한하고, 단면 평균온도와 표면부 온도 차를 15℃이하로 제한하고 있다. 한편, 외부구속 균열 제어와 관련하여 신타설 및 구타설 콘크리트의 평균온도 차는 15℃이하로 두고 있다.

위의 관리기준들을 만족하는 최적의 콘크리트 생산을 위해 GK Project에서는 제조단계에서 콘크리트 타설온도를 조절하고, 시공단계에서는 합체를 일체타설로 시공하고 다양한 양생법을 적용하여 외기온도를 조절해서 관리함으로써 상기의 기준들을 만족시키는 시스템을 적용하였다.

제조측면에서 보면 타설온도는 봄, 가을의 경우 온수를 사용하여 15~20℃로 조절하였고, 동절기의 경우에도 역시

온수를 하여 15℃ 내외로 관리하였다. 하절기에는 일반적인 Chilling system으로는 콘크리트온도를 낮추기가 어려워 Ice plant를 활용한 프리쿨링을 실시하여 배합온도를 20℃ 남짓까지 저감시켜 생산하였다.

2.3.2 콘크리트 시공

본 GK Project구조물은 엄격한 온도관리기준에 따라 설계되고 제조됨과 아울러 이 기준들을 만족하기 위해 시공법에서도 선진사례를 참고하였다. 침매터널의 경우 덴마크의 Øresund 침매터널의 사례를 바탕으로 한 segment타설시 분할타설 없이 연속타설을 통한 일체제작으로 시공하였다. 타설 층의 분할이나 타설시간 간격을 최적화하여 타설 층간의 외부구속에 의한 관통균열의 발생을 방지하였고, 또한 폴드 조인트 발생 가능성을 최소화하였다. 균열저감을 통한 고내구성 해양 콘크리트생산을 위해 시공단계에서 분할타설 없는 연속타설과 함께 보온양생을 위한 외기온도관리시스템을 적용하였다. 수화열해석 결과 봄, 가을, 겨울의 경우 초기에 외기온도를 타설온도보다 10℃이상 상승시킬 경우 앞서 언급한 침매터널의 관련 제반 기준들이 만족되는 것으로 나타났다. 이를 위해서 그림 28과 같이 타설 후 천막으로 부재를 밀폐시키고 스팀 보일러로 천막 내부의 외기온도를 조절하는 방식을 취하였다. 건조수축의 제어측면을 고려하여 단순한 온풍기보다는 스팀 기능을 겸하여 적절한 습기를 공급해 줄 수 있는 장치를 사용하였다. 한편, 타설 시간이 긴 관계로 봄, 가을, 겨울에는 타설 중에도 온풍기로 외기온도를 적어도 타설온도 정도로 상승시키는 것이 유리하다. 하절기의 경우 외기온도 조절 없이 프리쿨링 만으로도 제반 관리 기준이 만족되는 것으로 나타났다.

타설온도 및 외기온도의 조절과 아울러 거푸집 탈형시기의 결정은 초기온도균열 억제에 위해 상당히 중요하다. 표

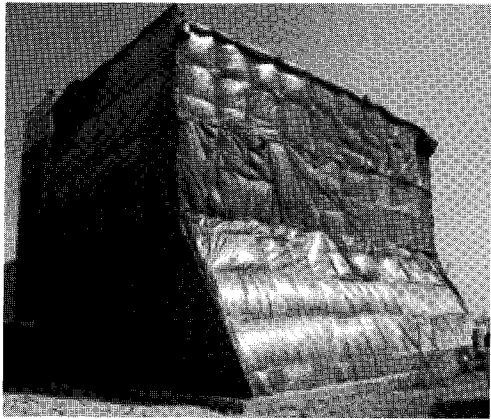


그림 28 천막을 이용한 외기온도조절 시스템

면 균열의 경우 그림 29와 같이 타설 후 초기에 균열 위험성이 큰 시점(A)이 존재하다가 다시 안전성을 확보해 가지만, 거푸집 탈형 후 외기에 노출되면 다시 위험성이 커지는 경향이 일반적이다. 따라서, 탈형 후의 B점이 관리치 이하로 내려가지 않도록 탈형 시기를 조절하는 것이 바람직하다. GK Project 침매터널 구조물의 경우 거푸집 탈형 및 다음 세그먼트로의 이동에 관련된 시공성과 더불어 수화열 관리 측면을 복합적으로 고려한 결과 균열제어를 위해 타설 5일 이후 거푸집을 제거하는 것이 가장 안정한 것을 알 수 있었다.

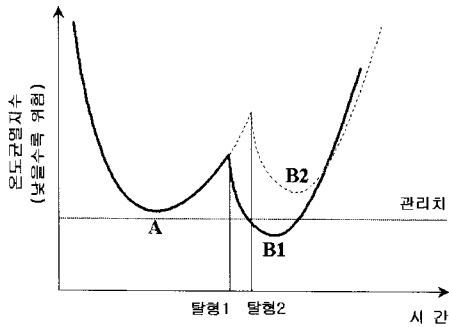


그림 29 거푸집 탈형 시기의 영향

이상에서 연속타설을 통한 일체타설시 타설온도, 외기온도 및 거푸집 탈형시기의 조합을 통해 계절별 최적의 시공 방안을 도출하였고 그 관리방안을 계절별로 도시화하면 그림 30과 같다.

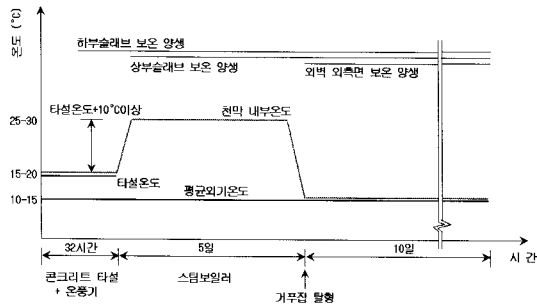


그림 30(a) 봄, 가을 온도 관리 방안

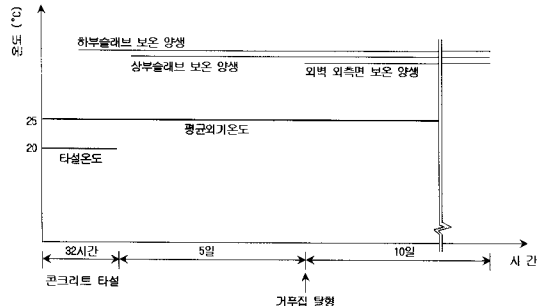


그림 30(b) 여름 온도 관리 방안

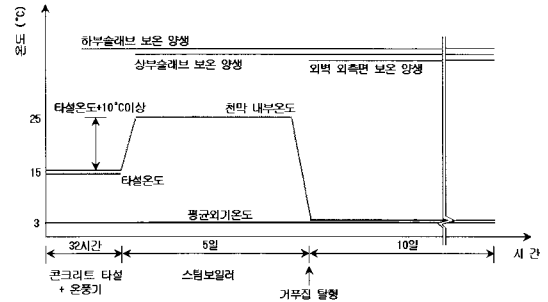


그림 30(c) 겨울 온도 관리 방안

2.4 고내구성 해양콘크리트 계측

앞서 살펴보았듯이 GK Project의 경우 수화열 및 이로 인해 발생하는 균열을 효율적으로 제어하기 위해 다양한 기법들이 동원되었다. 콘크리트 배합 측면에서는 소요의 내구성 확보와 더불어 수화열을 최대한 저감할 수 있도록 (단열온도 상승) 고로슬래그, 플라이애쉬 등의 혼화재료가 적절히 사용되었다. 수화열 관리에 있어 중요한 또 다른 요소인 콘크리트 타설온도를 최대한 저감하기 위해 아이스 플랜트를 이용한 프리쿨링을 실시한 결과 하절기에도 타설 온도 20°C 정도로 유지할 수 있었다. 또한 단면 온도차 기준을 만족하기 위하여 표면의 보온성을 강화한 양생을 실시하였다.

이러한 제반 사항들이 계획대로 적용되어 수화열 제어 효과를 올바르게 발휘하고 있는지 파악하고, 시공 중 발생하는 문제점들에 대한 즉각적인 대응을 위해 침매터널의 경우 제작되는 모든 세그먼트에 대하여 수화열 측정을 실시하였다. 아울러 모든 계절에 있어 침매터널 시방서에 명시된 각종 기준들이 모두 만족되고 있었으므로 수화열에 대한 제어가 올바르게 실시되고 있음을 확인할 수 있었다.

수화열과 관련된 계측 항목 및 계측기는 표 5와 같다. 그림 31은 시험체에 설치된 계측기를 보여주고 있으며, 무선랜을 사용하여 타설 현장이 아닌 사무실에서 실시간으로 계측결과를 확인하고 필요시 시공 관리에 즉시 반영할 수 있도록 조치하였다.

표 5 시험시 계측 항목

계측 항목	계측기	비고
온도	Thermocouple	온도 계측
응력	유효응력계	응력을 직접 측정
	무응력계+ 변형률계(매립형)	계산을 통해 응력을 간접 측정

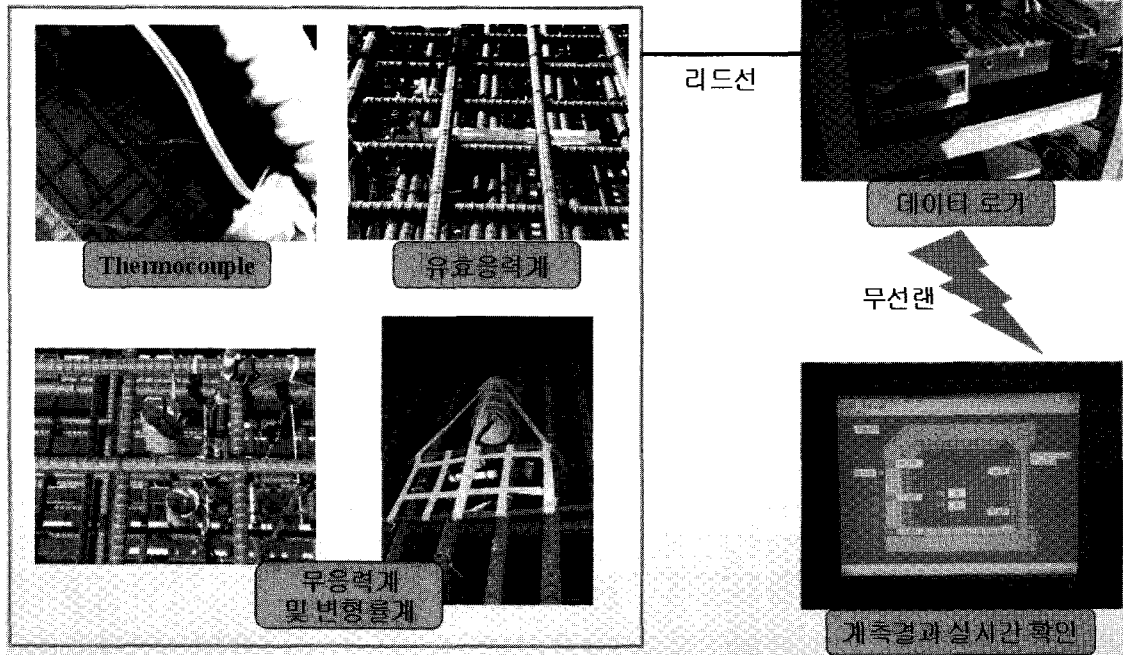


그림 31 계측기 설치 및 계측

그림 32는 대표적인 하부슬래브의 온도 계측결과이다. 모든 부위에서 최대 내외부 온도차 20℃ 기준을 만족하고 있으며, 또한 최대온도 제한치인 65℃도 만족하고 있음을 알 수 있다. 그림 33은 주요 부위에서의 온도 계측값을 해석값과 비교하였다. 해석값은 계측값을 비교적 정확히 유추하고 있으므로 해석 시 물성에 대한 가정이나 구조해석 모델링이 적절히 이루어졌다고 판단된다. 한편, 그림 34는 무응력계 또는 유효응력계로 측정된 응력을 보여주고 있다. 인장이 발생하는 부위도 인장강도 이하를 유지하고 있음을 알 수 있다.

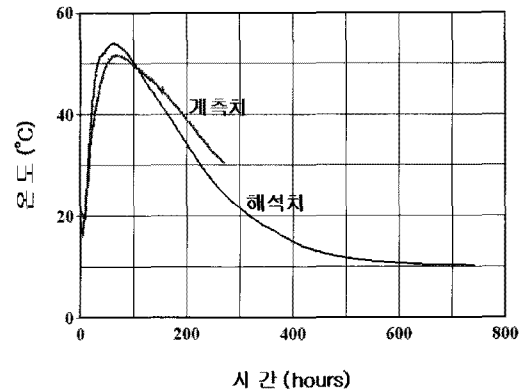


그림 33 하부슬래브-벽체 한치의 계측값 VS 해석값

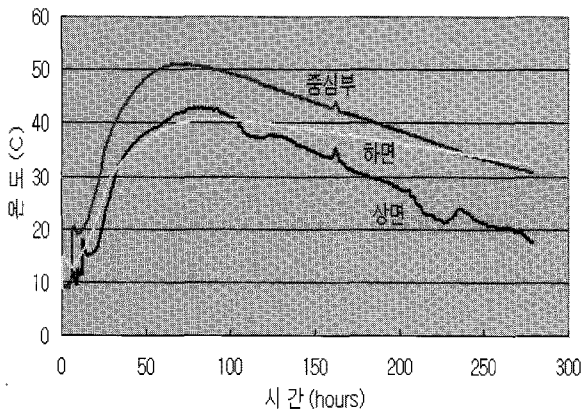


그림 32 하부슬래브 온도계측 결과

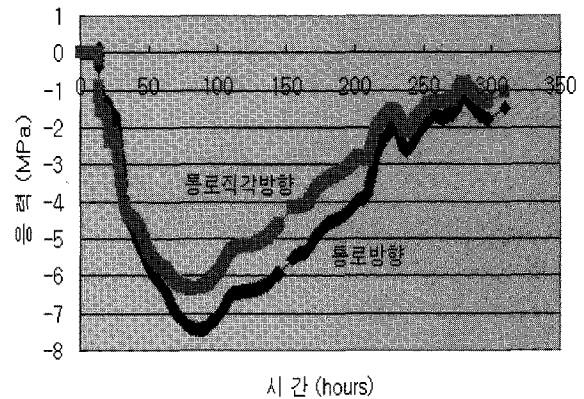



그림 34 하부슬래브 상면의 응력계측 결과

3. 결론

부산-거제간 연결도로 프로젝트에 적용된 고내구성 해양 콘크리트의 설계, 제조 및 시공기술에 대하여 기술하였다. 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 기존 콘크리트 배합설계 과정은 구조물의 구조적 내력을 만족하는 설계기준강도를 기준으로 콘크리트의 품질관리 수준이나 환경조건 등에 따른 할증률 등을 부여하는 단계로 수행되었다. 그러나 본 프로젝트에서는 유럽의 선진화 기법인 DuraCrete 모델을 적용하였는데, 이는 구조물이 노출되어 있는 환경조건을 대상으로 구조물의 주요 성능저하 요인을 도출하고, 그 결과를 바탕으로 구조물이 목표로 하는 사용기간까지 충분히 저항할 수 있도록 콘크리트를 설계하는 것이다. 따라서 GK Project에서는 주요 성능저하 요인으로 염해환경을 대상으로 하였고, 내구수명 100년을 만족하는 콘크리트를 개발하였다.
- (2) 선진 내구성 설계를 통한 구조물별 목표수준을 만족하는 고내구성 해양콘크리트 제조를 위해 GK Project

에서는 다양한 기술을 적용하였다. 사전 실내실험단계에서는 다양한 실험들을 통해 요구 성능별 배합을 선정하였고, 이를 현장 실내시험 및 배치플랜트 생산성실험을 통한 현장 적용성 시험을 실시하였다. 그리고 실제 타설을 위한 시공성 및 최종 품질평가를 위해 실대부재를 이용한 적용성 평가 및 계측을 실시하였고, 이를 통해 안정적인 품질확보를 위한 개선방안에 대해서도 다양한 검토를 실시하였다.

- (3) 국내 최초로 건설되는 침매터널은 유럽 등지에서 주로 사용되는 드라이독 방식으로 침매합체를 제작한다. 100년 내구수명 확보와 더불어 수심 50m에 위치하기 때문에 수압에 대한 높은 수밀성을 요하게 되고, 합체의 일체성을 확보하기 위해서 시공조인트 없이 일체 시공한다. 이를 위해 내구성 및 다양한 제반조건을 만족하는 최적의 콘크리트 배합설계를 하였고, 균열발생을 제어하기 위해 재료설계에서부터 시공단계별 수화열 해석을 통한 균열제어 기술을 적용하였다. 아울러 시공 중에도 실시간 계측시스템을 구축하여 효율적인 시공관리시스템을 적용하고 있다. 

[담당 : 김명한, 편집위원]