

## 중동지역 매스 및 서중콘크리트 품질 및 시공관리 적용 사례

Quality Control of Mass and Hot Weather Concrete in the Middle East Countries



전세진\*  
Se-Jin Jeon



최명성\*\*  
Myoung-Sung Choi



유재강\*\*\*  
Jae-Kang Yoo



김용직\*\*  
Yong-Jic Kim



김영진\*\*\*\*  
Young-Jin Kim

### 1. 머리말

최근 몇 년간 국내 건설업체들의 해외 수주 호황이 계속되면서 올해(2008년)에는 사상 최고였던 작년(398억불)의 해외 수주 실적을 돌파할 것이라는 전망이 나오고 있으며, 이에 따라 총 해외 수주액 3,000억불을 눈앞에 두고 있다. 최근 해외 수주의 특징을 살펴보면 중동 산유국들을 중심으로 오일머니를 활용한 산업기반시설 확충과 에너지 수요증가에 힘입어 쿠웨이트, 카타르, 아랍에미리트, 사우디아라비아, 이란 등 중동지역 국가들이 수주 호황을 견인하고 있는 것으로 나타났다. 또한 공중별로는 플랜트 부문이 여전히 주력 분야를 차지하고 있으나 전체 수주에서 차지하는 비중이 다소 감소한 반면 토목건축 분야의 약진이 두드러지고 있다는 특징이 있다. 이에 따라 2000년대 들어 매년 전체 수주의 20% 수준에 머물던 토목·건축 분야의 수주 비중이 최근 35% 이상으로 증가했다.

하지만, 하절기의 최고기온이 50℃에 육박하는 극한 서중환경에 해당하는 중동지역에서 건설되는 토목건축 구조물의 경우 국내와는 자연환경, 재료 수급상황, 제반 규정 등의 시공 조건이 크게 다르므로 시공 초기부터 많은 시행착오를 겪고 그 결과 공기가 연장되거나 비경제적 시공이 되는 경우가 빈번히 발생하고 있다. 특히, 중동지역 프로젝트의 공사시방서는 유럽에서 적용하던 엄격한 기준들을 준용하는 경우가 빈번하여 중동의 열악한 환경하에서 이를 준수하기 위해서는 많은 노력이 필요한 실정이다. 여기에서는 차후 중동지역에서 콘크리트구조물 시공시 이러한 시행착오를 줄이는데 다소나마 도움이 될 만한 정보를 공유하고자 한다. 서중콘크리트의 일반적인 시공 방법론은 기존 자료<sup>1-4)</sup>에서 충분히 언급되었으므로 가급적 배제하고, 구체적으로 대표

적인 중동 국가들의 예를 들어 중동지역의 시공관련 규정들과 국내 규정들의 차이를 살펴보고, 중동지역의 재료 수급상황의 특징들을 알아보고자 한다. 또한, 중동지역 매스콘크리트의 시공시 주의해야 할 점들을 짚어볼 것이다. 마지막으로 여기에서 언급된 기법들을 반영하여 카타르 ○○조선소현장의 드라이 독(dry dock) 구조물에 적용할 예정인 수화열이 저감된 경제적인 배합을 도출한 사례를 소개하고자 한다.

### 2. 중동지역의 시공관련 규정

#### 2.1 온도관련 규정

국내 콘크리트표준시방서<sup>1)</sup>에 따르면 하루 평균기온이 25℃를 초과할 경우 서중콘크리트로서 엄격한 관리를 실시할 것을 요구하고 있는데, 중동지역의 기후로 보자면 2~3개월 정도를 제외하고는 모두 이에 해당되고 있다. 국내 시방서에서는 서중콘크리트 타설온도의 상한치를 35℃로 두고 있는데, 중동지역 공사시방서<sup>5,6)</sup>에서는 이를 30~32℃ 정도로 좀 더 엄격히 제한하는 경우가 많다. 이는 타설온도 자체를 낮추는 것이 수화발열시 내부 최고온도를 낮게 하고 콘크리트 표면의 균열과 관련된 구조물 내부와 표면부의 온도차를 줄이는 데에도 기여하기 때문이지만, 좀 더 근본적으로 배합 온도가 높을 경우 수분증발 및 경화 현상이 촉진되어 슬럼프 손실이 커지고 이는 타설시 작업성을 저하시키기 때문이다.

중동지역의 사례로 볼 때 이러한 타설온도를 확보하기 위해서 기온이 비교적 높지 않은 3~4개월을 제외하고는 기본적으로 프리쿨링을 실시해야 한다. 특히 얼음을 사용할 경우 하절기에는 배합수의 70% 정도까지 얼음으로 치환해야 목표 온도를 만족한다고 보고되고 있으므로 얼음의 대량생산을 위해 배치플랜트에 아이스 플랜트를 함께 설치하는 것이 일반적이다. 중동지역에서는 레미콘의 관리가 소홀할 경우 비빔 이후 타설시까지의 온도 상승량도 무시할 수 없을 정도로 크므로 레미콘 운반거리의 최소

\* 정회원, (주)대우건설기술연구원 토목연구팀 책임연구원  
jsj@dwconst.co.kr

\*\* 정회원, (주)대우건설기술연구원 토목연구팀 전임연구원

\*\*\* 정회원, (주)대우건설기술연구원 건축연구팀 전임연구원

\*\*\*\* 정회원, (주)대우건설기술연구원 토목연구팀 수석연구원

화, 최적 타설계획에 따른 레미콘 대기시간의 최소화 등 타설온도 관리를 위한 다양한 추가 조치가 필요하다.

또한 수화발열시 내부 최고온도를 65℃로 제한하는 경우가 많다.<sup>5,6)</sup> 이는 수화발열에 의한 온도상승량을 제한함으로써 온도균열을 최소화한다는 의미도 있지만 근본적으로는 DEF(Delayed Ettringite Formation) 현상을 막기 위해 마련된 규정이다. 고온하에서 콘크리트가 양생될 경우 성숙도 개념에 의해 단기적인 강도발현은 빠를 수 있지만 DEF에 의한 팽창 현상에 의해 장기적인 강도 및 밀실도가 저하되고 균열이 발생할 우려가 있다. 국내에서는 DEF에 대한 연구가 아직까지는 심층적으로 진행되지 않았지만 해외의 경우 <그림 1>과 같이 실제 DEF에 의한 콘크리트 성능저하 사례가 빈번히 보고되어 많은 연구가 이루어지고 있다. DEF가 발생할 수 있는 임계온도에 대해서는 많은 이견들이 있으며, 한 예로 영국 BS 기준<sup>7)</sup>의 경우 70℃를 기준으로 보고 있다. 최고온도를 제한하는 조치 이외에도 DEF를 방지할 수 있는 몇 가지 방안들이 제안되었지만<sup>8)</sup> 최고온도 제한은 가장 기본적인 조치로 받아들여지고 있다. 하지만, 최고온도 65℃는 중동지역에서 확보 가능한 타설온도를 고려할 때 준수하기 용이하지 않은 규정이다. 예를 들어 타설온도가 25℃를 상회할 경우 최고온도 조건을 만족하려면 단열온도상승량이 40℃ 이하가 되어야 하는데 이는 강도 규정이 만족된다는 전제 하에서 시멘트량을 최소화하고 일정 분량의 혼화재료를 사용해야 도달할 수 있는 수준이다. 그러나 뒤에서 언급하겠지만 중동지역은 혼화재료의 가격이 비싸므로 경제성을 고려할 때 치환율을 무조건 높이기 어려운 측면이 있으며 공사시방서에서 치환율의 상한치를 정해놓은 경우도 있으므로 적절한 치환율을 정하는 것이 매우 중요하다.

한편, 구조물의 내부와 표면부의 온도차를 20℃,<sup>5)</sup> 또는 더 엄격한 경우 15℃<sup>6)</sup>까지 제한하는 경우가 있다. 이는 수화발열에



그림 1. 중동지역의 DEF(Delayed Ettringite Formation)에 의한 균열발생 사례

의해 구조물에 온도구배가 발생할 경우 내부구속 작용에 의하여 표면부에 인장응력이 발생하고 이러한 인장응력이 인장강도 이상 과도할 경우 표면부에 균열이 발생하는 것을 제한하기 위한 조치이다. 또한 구조물의 평균온도와 표면부의 온도차를 제한하는 경우도 있는데 취지는 유사하다고 볼 수 있으며, 내외부 온도차 규정이 만족되면 평균온도와 표면부의 온도차 규정도 만족되는 경우가 많다. 이러한 온도차는 물론 배합의 종류에도 의존하는 바가 크지만 수화열 해석이나 온도 계측을 실시한 사례에 따르면 구조물 두께가 약 1.5 m 이상으로 두꺼워지는 경우 준수하기 용이하지 않은 규정이다. 따라서 이러한 규정의 준수를 위해서는 수화열이 저감된 배합에 추가하여 거푸집의 종류나 탈형 시기, 양생재료의 종류 등 콘크리트 표면의 보온양생을 위한 면밀한 계획이 필요하다. 흔히 중동지역의 높은 외기온도를 고려할 때 보온양생에 특별히 신경쓰지 않더라도 내외부 온도차는 크게 발생하지 않을 것으로 생각하기 쉽다. 하지만 중동지역이라 할지라도 12월~1월의 경우 일평균 외기온도가 20℃ 이하로 저하되는 경우가 많고 때로는 15℃ 이하까지 저하되므로 스템 양생 등 별도의 보온양생이 실시되지 않는다고 가정하면 특정 시기에는 만족하기 용이하지 않은 규정이다.

최고온도 65℃ 및 내외부 온도차 20℃ 규정은 최근 부산-거제간 연결도로 현장의 침매터널에 적용되었던 사례가 있는데<sup>9)</sup> 구조물 두께가 1.3 m 남짓으로 아주 두껍지는 않고 비교적 시공 조건이 유리한 국내에서도 수화열 저감 배합, 프리쿨링, 보온양생 등 각종 노력을 동원해서 규정을 만족할 수 있었다.

## 2.2 타설시간 관련 규정

국내 콘크리트표준시방서<sup>1)</sup>의 경우 일반콘크리트의 비빔에서 타설까지의 제한시간을 외기온도가 25℃ 미만이면 120분, 25℃ 이상이면 90분까지 허용하고 있다. 반면 중동지역에서는 환경에 따른 구분 없이 30분 정도로 국내 일반콘크리트보다 대폭 짧게 규정하고 있다.<sup>6,10)</sup> 또한 이어치기 제한시간(분)의 경우에도 국내에서는 외기온도 25℃ 이하시 150분, 25℃ 초과시 120분으로 규정하고 있는 반면<sup>1)</sup>, 중동에서는 20~30분으로 매우 짧게 제한하는 경우가 많다.<sup>5,10)</sup>

이러한 규정들은 중동지역의 기후 특성을 고려하여 슬럼프 손실 및 콜드 조인트 발생을 최소화하기 위해 마련된 규정이다. 이를 위해서는 레미콘의 운반거리를 고려하여 배치플랜트의 위치를 가급적 현장 근처로 잡아야 하며, 레미콘의 현장 대기시간을 최소화할 수 있는 배차계획이 필요하다. 물론 이러한 사항들은 타설온도 상승을 최소화하여 수화열을 제어하는 데에도 기여한다. 또한 타설시 타설 구획 및 타설 순서, 펌프카의 위치를 면밀

히 선정하여 콜드 조인트가 발생하지 않고 연속적인 타설 작업이 이루어지도록 해야 한다. 지연형 감수제를 사용할 경우 시공성과 작업성을 확보할 수 있는 시간이 다소 연장될 수 있겠지만, 이를 적용한 경우에도 감수제의 성능에 의존하기 보다는 기본적으로 상기의 규정을 준수하도록 노력함이 바람직하다. 2.1절 및 2.2절에서 언급한 규정들을 비교하여 정리하면 <표 1>과 같다.

### 3. 중동지역의 재료 수급 상황

#### 3.1 골재

중동지역의 굵은골재는 국내의 화강암(granite)과는 달리 석회암(lime stone)이나 반려암(gabbro) 계열이 많은 것이 특징이다. 석회암과 반려암은 물성 차이와 더불어 지역적 수급 상황에 따라 단가에도 차이가 있으므로 이를 고려하여 골재를 선택하는 것이 바람직하다. 특히 반려암의 경우 화강암이나 석회암보다 밀도가 매우 커서 무근 콘크리트의 단위용적 중량이 국내 설계시의 2,300 kgf/m<sup>3</sup>을 상회하므로 자중 계산시 반영해야 할 수도 있다. 또한 석회암은 탄산질 계열로 규산질의 화강암과는 열적 특성이 달라 화재와 같은 고온시 강도, 탄성계수, 열팽창계수 등의 변화 거동에 큰 차이가 있으므로 내화설계시 이러한 차이를 고려해야 한다.<sup>11)</sup>

국내에서는 주요 구조물에 20 mm 또는 25 mm 직경의 굵은골재를 사용하는 것이 일반적이지만 중동지역에서는 주요 구조물에도 40 mm 직경의 굵은골재를 사용토록 권장하는 경우가 있다. 대 직경 골재를 사용하면 균열에 대한 저항성도 증가하고 배합시 시멘트량을 일부 저감시키는 효과도 있는 반면 펄핑성이 저하될 우려가 있으므로 실 시공에 앞서 충분한 펄핑 성능 시험이 필요하다.

또한 중동지역에서는 수급 문제로 불가피하게 암석을 파쇄시켜 제조한 부순 모래를 사용해야 하는 경우도 있는데 미립분 함유량이 많으면 워커빌리티 저하에 대응하여 고가의 혼화제 사용량을 증가시켜야 할 수도 있으므로 입도조절을 위한 세척작업이 필요 한지에 대한 검토가 필요하다.

#### 3.2 시멘트 및 혼화재료

같은 보통포틀랜드시멘트라 하더라도 중동지역 시멘트와 국내 시멘트는 구성 성분의 물성 차이에 의해 강도 발현 등 제반 특성에 차이를 보일 수 있다. 강도 발현 특성은 수화열 등에 의한 초기재령 콘크리트의 균열 발생 거동에 큰 영향을 미치므로 국내 콘크리트의 전형적인 강도 발현 곡선과 차이가 있을 경우 이를 반영하여 균열 검토를 수행해야 한다. 또한, 예를 들어 카타르 지역에서 생산되는 시멘트의 경우 보통포틀랜드시멘트라 할지라도 ASTM C150의 Type 2,<sup>12)</sup> 즉 중용열시멘트 또는 약한 내화산염 시멘트로도 인정받아서 해당 기능이 요구되는 구조물에 사용되기도 한다.

플라이애쉬나 고로슬래그와 같은 혼화재료는 콘크리트의 장기 강도를 향상시키고 시멘트를 대체하여 수화발열을 저감시킬 뿐 아니라 조적을 밀실하게 하여 염화물 침투 저항성 등의 내구성을 향상시키는 등 여러 가지 장점이 있다. 국내에서는 이와 같은 혼화재료의 가격도 시멘트보다 저렴하여 한 가지의 혼화재료 뿐 아니라 두 가지를 동시에 사용하는 3성분계 시멘트의 활용도 증가하는 추세이다. 반면 중동지역에서는 혼합시멘트 형태의 기성품으로 제조되기 보다는 대부분 배치플랜트에서 혼합하여 사용하며, 3성분계의 사용도 거의 없는 실정이다. 또한, 중동지역에서는 플라이애쉬나 고로슬래그를 수입하는 경우가 대부분이라 가격도 시멘트보다 고가이다. 특히 플라이애쉬보다 고로슬래그가 더욱 고가인 경우가 많으며 더군다나 일반적으로 플라이애쉬의 치환율은 20~30%, 고로슬래그의 치환율은 40~60% 정도임을 고려할 때 고로슬래그시멘트 배합은 중동지역에서 경제성이 다소 떨어질 것으로 생각된다. 중동지역에서 빈번히 적용되는 2.1절의 수화열 관련 규정들을 만족하기 위해서는 혼화재료의 사용이 필수적일 것으로 생각되지만, 이처럼 혼화재료의 높은 가격을 고려하여 적절한 수준에서 치환함이 바람직하다.

#### 4. 매스콘크리트의 관리

콘크리트 배합의 수화발열 특성은 수화열 해석을 실시하기 위한 기본적인 입력 자료로서 해석의 성패를 좌우하는 요인이다. 국내의 경우 단열온도상승시험기를 이용하여 콘크리트의 수화발열 특성에 해당되는 단열온도상승곡선을 정밀하게 도출할 수 있지

표 1. 시공관련 규정의 비교

	중동지역	국내
타설온도의 상한치(°C)	30~32	서중환경 하에서는 35
수화발열시 내부 최고온도(°C)	65	규정 없음
수화발열시 내부와 표면부의 온도차(°C)	20	규정 없음
비빔~타설까지 제한시간(분)	30	90(외기온도 25°C 이상) 또는 120(외기온도 25°C 미만)
이어지기 제한시간(분)	20~30	120(외기온도 25°C 초과) 또는 150(외기온도 25°C 이하)

만, 중동지역에서는 이와 같은 시험기를 구하기 어려운 경우가 많다. 배합비를 같게 하여 국내의 재료로 단열온도시험을 실시하는 것은 원재료의 차이 때문에 정확도가 떨어질 것으로 생각되며, 원 재료를 국내로 공수하여 실험하는 것도 매우 번거로운 일이다.

이러한 경우 mock-up 시험체를 제작하여 중심부 온도를 계속 함으로써 단열온도상승곡선과 유사한 온도이력을 얻을 수 있는데, 물론 mock-up 시험체가 단열상태를 얼마나 정확히 구현할 수 있는지가 관건이 된다. 단열온도상승시험기와 같은 이상적인 단열상태를 구현하기는 어렵겠지만, 시험체의 크기를 되도록 크게 하고 거푸집 면이나 외기 노출면에 두꺼운 스티로폼과 같은 단열재를 덧대어서 최대한의 단열성능을 확보하도록 노력해야 한다. 기존 사례를 참조할 때 시험체는 한 번의 길이가 최소 1.5~2.0m 정도인 정육면체로 제작하는 것이 바람직하다. 이 때 해석의 정밀도를 높이기 위해서는 중심부의 온도 계측값을 단열온도상승곡선으로 간주하고 수행한 수화열 해석값이 실제의 온도 계측값들을 올바르게 재현하고 있는지 검토하고, 만약 차이가 크다면 중심부 온도에 근거한 단열온도상승곡선의 형태를 실제 단열온도상승시험시의 전형적인 곡선 형태에 가깝도록 수정해 나가는 작업이 필요할 수도 있다. 물론 mock-up 시험체의 크기가 실제 구조물과 유사성이 있다면 2.1절에서 언급한 내부 최고온도나 내외부 온도차의 만족여부, 균열발생 경향을 미리 검증해보는 데에도 활용할 수 있다. 중동지역의 일부 공사시방서<sup>6)</sup>에서는 1×1m의 mock-up 시험체의 중심부 온도 상승량이 30℃ 이하가 되도록 규정한 경우도 있는데 이러한 규정도 단열온도상승량을 제한하려는 취지에서 도입된 것이다.

중동지역에서는 매스콘크리트의 관리 기준으로 2.1절의 온도 관련 규정이 빈번히 사용되고 있지만 보조적인 규정으로 온도균열의 발생확률을 제한하기도 한다.<sup>5)</sup> 일반적으로 균열을 방지하기 위해서는 온도응력을 콘크리트 인장강도로 나누어 산정되는 지수인 crack risk를 0.7 이하로 관리하도록 하고 있는데, crack risk는 국내 콘크리트표준시방서<sup>1)</sup> 온도균열지수의 역수

의 의미임을 고려할 때 이 값은 온도균열지수 1.43에 해당함을 알 수 있다. 국내 기준에서 온도균열지수가 1.5 이상이면 균열이 방지될 수 있다고 언급하고 있으므로 어느 정도 국내 규정과 일맥상통하고 있다. 이러한 crack risk 기준은 국내 부산-거제간 연결도로 현장의 침매터널에도 적용되었던 바 있다.<sup>9)</sup>

## 5. 실구조물의 적용 사례

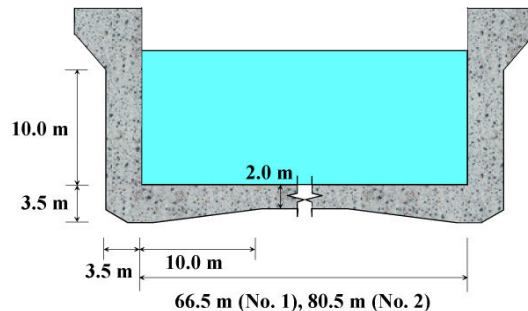
### 5.1 개요

여기에서는 지금까지 언급한 중동지역의 특성을 고려하여 배합설계를 실시하고 실구조물에 대한 적용성을 평가한 사례를 소개하고자 한다. 중동지역 프로젝트의 공사시방서를 살펴보면 공통적으로 미국콘크리트학회(ACI)의 기준보다는 영국의 BS 기준을 다수 참조하고 있다는 특징이 있다.<sup>13)</sup> 국내 설계기준이나 시방서의 경우 ACI 기준을 참조한 경우가 많으므로 국내 기술자나 전문가들이 ACI 기준에는 익숙한 반면 BS 기준에 대해서는 다소 생소하게 느끼고 해외, 특히 중동지역의 프로젝트에서 시행착오를 겪는 경우가 많으므로 콘크리트 재료나 배합설계와 관련하여 BS 기준에 대한 철저한 분석이 요망된다. 중동지역은 영국의 영향으로 국내의 실린더형 공시체 대신에 큐브(정육면체) 모양의 공시체를 사용하며, 유사한 크기라면 실린더 강도가 큐브보다 최대 20% 정도까지 작게 나옴에 주의해야 한다.

<그림 2>는 대상 구조물로서 카타르 지역에 건설되는 대표적인 토목구조물 중의 하나인 OO조선소를 보여주고 있다. 이 프로젝트에서는 여러 가지 종류의 구조물이 시공될 예정이지만 가장 많은 물량을 차지하고 또한 단면이 매시브하여 철저한 수화열 제어가 요구되는 주요 구조물은 2개의 드라이 독(dry dock) 구조물이다. 대상 드라이 독은 중력식 개념으로 설계되어 슬래브의 두께는 2.0~3.5m, 벽체의 두께는 3.5m로 매우 두꺼운 것이 특징이다. 당 현장에서는 수화열 저감, 작업성, 경제성 등을 종합



(a) 전경



(b) 드라이 독의 단면도

그림 2. 중동 카타르의 OO조선소 현장



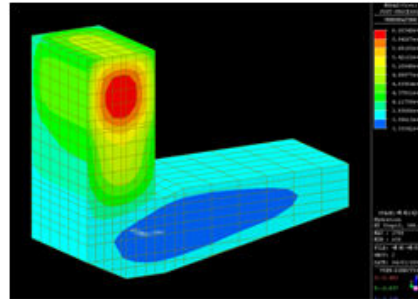
(a) 실내배합 시험



(b) 배치플랜트 시험



(c) Mock-up 시험



(d) 수화열 해석

그림 3. 수화열을 저감한 최적배합의 도출 과정

적으로 고려하여 최적의 배합을 도출하고자 <그림 3>과 같이 실내배합 시험, 배치플랜트 시험, mock-up 시험, 수화열 해석 등을 통해 실 시공에 앞서 다양한 항목에 대한 검증을 실시하였다. 이하에서는 각각의 절차에서 고려했던 사항들을 좀 더 상세히 기술해 보기로 한다.

### 5.2 실내배합 및 배치플랜트 시험

이 프로젝트의 공사시방서<sup>5)</sup>에는 구조물 종류별로 차별화되어 사용되는 배합의 종류가 명시되고 각 배합이 만족해야 할 최소요건이 제시되어 있다. 드라이 독 구조물의 경우 <표 2>를 만족해야 한다.

BS 기준<sup>7)</sup>에서는 목표 내구수명을 확보하기 위한 콘크리트 배

합의 최소 요건을 도표화하여 제공하고 있다는 특징이 있다. 대상 구조물인 드라이 독의 경우 XS3의 노출 등급에 대해 50년의 내구성을 확보하도록 규정하고 있다. XS3는 해수의 염소이온에 의한 철근 부식이 우려되는 구조물이 물보라 지역(비탈대 및 간만대)에 위치한 경우에 해당한다. BS 기준에 따르면 내구성 설계시 노출 등급, 피복두께, 시멘트 종류를 선정하면 이에 대응하여 목표 내구수명을 확보하기 위한 최소 강도, 최대 물-결합제비, 최소 결합재량을 명시하고 있다. <표 2>의 최소 요건들도 이러한 BS 기준상의 내구성 설계에 근거하여 도출된 것이다.

<표 3>은 배합시험에서 도출된 드라이 독의 배합표를 보여주고 있다. 2.2절에서 언급한 중동지역의 엄격한 타설시간 관련 규정을 고려하여 슬럼프의 경시 변화가 적절한 수준이 되도록 혼화제의 양을 조절하였다. 배합의 특징은 수화열에 의한 유해한 영향을 최

표 2. 드라이 독 콘크리트 배합의 최소 요건

콘크리트 규격 <sup>1)</sup>	강도 등급 <sup>2)</sup>	시멘트 종류 <sup>3)</sup>	추가 혼화재료	굵은골재 최대치수(mm)	최소/최대 결합재량(kg/m <sup>3</sup> )	슬럼프 등급 <sup>4)</sup>	최대 물-결합제비
C40/40	C32/40	II-B-V 또는 IIIA	실리카폼 5~7% 또는 super fine ash 5~10%	40	360/450	S3	0.4

- 1) 각각 설계기준강도 40MPa 및 굵은골재 최대치수 40mm를 의미
- 2) 각각 실린더 강도 32MPa 및 큐브 강도 40MPa 의미
- 3) BS 8500-2<sup>14)</sup>를 참조하면 II-B-V는 플라이애쉬 21~35%, IIIA는 고로슬래그 36~65%가 혼입된 시멘트
- 4) BS EN 206-1<sup>15)</sup>을 참조하면 S3는 슬럼프 100~150mm에 해당

표 3. 드라이 독 콘크리트의 배합표

(단위: kg/m<sup>3</sup>)

굵은골재 최대치수(mm)	물-결합제비	물	시멘트	플라이애쉬	실리카폼	잔골재	굵은골재
40	0.395	145	228	133	19	756	1,126

표 4. 콘크리트 배합의 비용 절감 효과

항 목	채택안	원 안	원안의 배합 비용 증가분(%)
굵은골재의 종류	석회암	반려암	1.7
굵은골재 최대치수(mm)	40	20	0.9
혼화재료의 종류	플라이애쉬(35% 치환)	고로슬래그(50% 치환)	8.8
합 계			11.4

소화하고자 강도를 만족하는 범위에서 시멘트량을 최소화하였고 플라이애쉬를 공사시방서 기준이 허용하는 최대한(시멘트량의 35%)으로 치환하였다는 점이다. 고가의 실리카폼은 공사시방서에서 요구하는 최소 수준으로 시멘트량의 5%를 사용하였다. 공사시방서상의 배합강도는 설계기준강도에 12MPa를 더한 52MPa로 규정하고 있으며, 28일 재령의 강도시험결과 61.6MPa로 이를 상회하였다. 또 다른 배합의 특징은 3장에서 언급한 중동 지역의 재료수급 현황을 고려하여 경제적인 배합을 도출했다는 것이다. <표 4>는 배합설계시 경제성을 고려한 항목 및 드라이 독을 포함한 전체 콘크리트구조물에 대한 비용 절감 효과를 보여주고 있다. 이 프로젝트의 전체 콘크리트 물량은 660,000 m<sup>3</sup>(그 중 드라이 독 구조물은 344,000 m<sup>3</sup>)이고 배합 비용이 1,000억원에 가까우므로 배합설계의 변동이 비용에 미치는 효과가 매우 크다.

5.3 Mock-up 시험

도출된 배합이 수화열 관련 제반 기준들을 만족하고 있는지 검토하고 양생방법의 적절성을 파악함과 동시에 40mm의 대직경 골재를 사용한 배합의 펴핑성을 검증하기 위해 <그림 3(c)>와 같은 mock-up 시험을 실시하였다. 실시된 시기는 9월말로 평균외기온도는 34℃였다. 중동지역에서의 시공시 외기온도의 변화를 고려할 때 타설 작업은 이른 아침이나 늦은 저녁에 시작하는 것이 유리하므로, 여기에서는 늦은 저녁에 타설을 시작하였다. 시험체의 크기는 2×2×2m로 정하였으며, 중심부와 표면부의 주요 부위에 thermocouple을 매입하여 수화발열시 온도를 측정하였다. 표면부 온도를 측정하는 thermocouple의 위치에 대해서는 정립된 기준이 없지만 여기에서는 표면으로부터 25mm(1 in.)에 매입하였다. 일부 프로젝트<sup>9)</sup>에서는 10mm로 둔 경우도 있다. 내외부 온도차 조건을 만족시키기 위해 상면에는 50mm 두께의 스티로폼을 덮어 표면을 보온하였고, 거푸집 면은 초기에 좀 더 적

극적인 보온을 실시하기 위해 탈형이 가능한 강도가 확보되면 곧 바로 탈형을 실시하고 치핑 등 필요한 면처리를 신속히 수행한 후 스티로폼을 부착하였다. 시공 속도를 가속화하기 위해 3일간의 비교적 짧은 보온양생 기간을 설정하여 시험을 실시하였다.

한편, 중동지역의 서중환경하에서는 습윤양생의 중요성이 더욱 강조된다. ACI 기준<sup>2)</sup>에서는 대기온도, 상대습도, 콘크리트 온도, 풍속에 따라 수분증발속도를 계산할 수 있는 도표를 제공하고 있는데 증발속도가 일정값(보통 1.0kg/m<sup>2</sup>/h)을 초과할 경우 적극적인 습윤양생 등을 통해 소성수축균열에 대비하도록 하고 있다. 최소 1주일의 습윤양생 기간을 두는 것이 바람직하지만 이는 공정을 고려하여 조절해야 한다. 습윤양생을 위해서는 수분을 지속적으로 공급하는 방법이 바람직하지만 지역에 따라서는 충분한 양생수를 확보하기 어려울 수도 있다. 또한 표면의 수분 공급이 지속적으로 이루어지지 않아 건조가 반복될 경우 오히려 표면에 유해한 영향을 미칠 수 있다. 이처럼 지속적인 수분 공급이 어려운 경우 양생막(curing compound)을 도포하거나 폴리에틸렌 필름을 덮어서 표면수의 증발을 방지하는 것이 대안이 될 수 있다. Mock-up 시험시에는 양생막을 활용하였다. 이상의 양생방법은 실제 시공시 적용할 것으로 예상되는 방법을 그대로 따른 것이다.

<그림 4>는 mock-up 시험체 중심부와 표면부의 온도 이력을 보여주고 있다. 타설온도는 27~30℃로 32℃의 기준을 만족하였으며, 내부 최고온도는 61℃로 65℃의 기준을 만족하였다. 또한, 내외부 온도차 조건 20℃도 만족하였다. 이 지역에는 단열온도상승시험기가 없으므로 수화열 해석시 필요한 단열온도는 <그림 4>의 중심부 온도를 변형하여 사용하였다. 즉, 중심부 온도를 단열온도로 입력하여 mock-up 시험체에 대한 수화열 해석을 실시했을 때 온도계측 결과를 유사하게 재현하고 있는지 검토한 후 중심부 온도를 약간씩 변경해 가며 계측값과 해석값의 차이를 좁혀서 최종적인 단열온도상승곡선을 도출하였다.

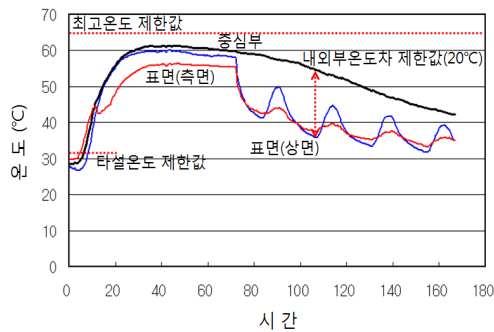


그림 4. Mock-up 시험체의 온도계측 결과

#### 5.4 수화열 해석

<그림 3(d)>와 같이 수화열 해석을 통하여 분할타설 블록에 대한 여러 가지 대안들을 검토하고 그 중 공기를 가장 단축하면서도 각종 온도관련 규정을 만족하는 최적안을 도출하고자 하였다. 다양한 외기온도 조건에 대해 검토하고자 7~8월의 평균온도 38°C, 12~1월의 평균온도 18°C를 고려하였다. 타설온도는 외기온도에 의존하여 적절한 수준의 프리쿨링을 실시하는 이 지역의 통상의 사례를 참조하여 7~8월에는 28°C, 12~1월에는 21°C로 보았다. 내부 최고온도, 내외부 온도차, crack risk에 대한 다양한 검토를 거쳐 <그림 2(b)>의 10 m 높이의 드라이 독 벽체는 3단으로 분할타설하는 안을 도출하였고 중방향 타설길이는 10 m로 설정하였다. 슬래브는 12×10 m 또는 12×20 m씩 분할 타설하는 방안이 모두 가능한 것으로 파악되었다. 슬래브와 벽체 분할타설 블록의 타설간격 및 보온양생 기간은 3~5일 정도가 적절한 것으로 나타났다. 하지만, 중동지역도 시기에 따라 평균온도가 20°C까지 차이가 나므로 평균온도가 낮은 시기에는 보온양생 기간을 연장하든지 타설온도를 좀 더 낮추는 조치가 필요한 것으로 나타났다.

#### 6. 맺음말

중동지역은 극한 서중환경하의 열악한 조건에서도 유럽 기준 등의 영향으로 국내보다 엄격한 콘크리트 온도관리 규정을 적용하는 경우가 많으므로 매스콘크리트의 수화열 제어를 고려한 최적배합을 도출하는 데 주의를 기울여야 한다. 이 지역은 골재의 종류 및 수급상황이 국내와 크게 다르고, 수화열 저감 및 장기성능 향상을 위한 혼화재료의 단가 차이도 크기 때문에 지역적인 상황을 충분히 고려하여 경제적인 배합설계를 실시해야 한다. 극한 환경하에서 실 시공시의 시행착오를 최소화하기 위해서는 실내배합 실험, 배치플랜트 실험, mock-up 시험, 수화열 해석과 같

은 일련의 절차를 거치면서 다양한 항목에 대한 검증을 실시하는 것이 바람직하다. 중동지역에 진출한 국내 건설업체들이 고품질의 콘크리트구조물 건설을 통하여 발주기관의 신뢰를 얻어 나간다면 해외건설시장의 활로를 넓히는데 기여할 것으로 기대된다. □

#### 참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 한국콘크리트학회, 2003.
2. ACI Committee 305, Hot Weather Concreting(ACI 305R-99), American Concrete Institute, 1999.
3. 쌍용양회공업(주), 서중콘크리트의 특성과 대책, 쌍용양회공업(주), 2005.
4. 장석준, 이상태, "사우디아라비아에서의 서중콘크리트 시공," 콘크리트학회지, 6권, 4호, 1994, pp. 37~41.
5. Royal Haskoning, COWI, Tender Documents: Construction of Marine Works for NAKILAT Ship Repair Yard, Port of Ras Laffan, Qatar, 2007.
6. Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering, Tender Documents: Construction of Ship Repair Yard and Drydock Complex at Duqm Port, Oman, 2007.
7. British Standards Institution, Concrete: Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part 1: Method of Specifying and Guidance for the Specifier(BS 8500-1), 2006.
8. Quillin, K., Delayed Ettringite Formation: In-situ Concrete, Information Paper IP 11/01, Building Research Establishment, 2001.
9. Daewoo Engineering and Construction, Busan-Geoje Fixed Link(Tunnels and Ramps): Technical Specifications for Concrete Structures, 2007.
10. Qatar Petroleum, Standard Specification for Civil Works, 1991.
11. ACI Committee 216, Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements(ACI 216R-89), American Concrete Institute, 1994.
12. American Society of Testing Materials, Standard Specification for Portland Cement(C150-07), 2007.
13. Walker, M., Guide to the Construction of Reinforced Concrete in the Arabian Peninsula, CIRIA and The Concrete Society, 2002.
14. British Standards Institution, Concrete: Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part 2: Specification for Constituent Materials and Concrete(BS 8500-2), 2006.
15. British Standards Institution, Concrete. Part 1: Specification, Performance, Production and Conformity (BS EN 206-1), 2000.