

수화열을 고려한 침매 터널의 효율적 시공

Efficient Construction of the Immersed Tunnel Considering Hydration Heat

전세진* 최명성** 김영진*** 장영**** 안제상****
Jeon, Se Jin Choi, Myoung Sung Kim, Young Jin Chang, Young An, Jea Sang

ABSTRACT

This study investigates the efficient construction scheme of the immersed tunnel focusing on the hydration heat. In this respect, some alternatives in curing, temperature condition and removing of the forms are compared together to meet the required criteria. It is addressed that the strict construction stage analysis considering the placing scheme of concrete is one of the key factors to trace the realistic structural behavior for the hydration heat.

1. 서론

부산 가덕도와 경남 거제도를 연결하는 부산-거제간 연결도로 민간투자사업에서는 국내 최초로 침매 터널(Immersed tunnel)이 시공될 예정이다. 침매 터널은 완성 후 콘크리트 자체만으로도 내구성 및 수밀성이 확보되도록 계획된 구조물로서 이를 위해서는 부재 제작 단계에서부터 수화열 등에 기인한 초기 균열에 대한 품질관리가 필요하다. 여기에서는 침매 터널의 효율적인 수화열 관리를 위한 시공 방안들을 해석적으로 비교 검토하여 도출하였다. 또한 침매 터널의 수화열 해석시 주의해야 할 몇몇 사항들에 대해 중점적으로 토의해 보고자 한다.

2. 침매 터널의 개요

본 침매 터널(그림 1)은 상·하행선의 2개 튜브를 가진 박스구조물이며, 주요 부위의 두께는 외부 벽체 1.33 m, 상부 슬래브 1.35 m, 하부 슬래브 1.33 m로서 수화열에 대한 검토가 요구되는 매시브한 부재이다. 해외 사례를 살펴볼 때 침매 터널의 시공 방식에는 몇 가지 대안들이 있지만 본 사업에서는 유럽식으로 콘크리트 구체 방식의 세그멘탈 시스템을 적용하고자 한다. 세그멘탈 시스템은 180 m 길이의 합체를 22.5 m 길이의 8개 세그먼트로 분할 제작하여 지수재와 전단키로 연결하는 활절 구조로서 합체 길이 방향으로 최소 철근량만을 가지고도 구조적인 안전성이 확보되는 경제적인 시스템이다.

*정회원, 대우건설기술연구소 토목연구팀 선임연구원

**정회원, 대우건설기술연구소 토목연구팀 사원

***정회원, 대우건설기술연구소 토목연구팀 수석연구원

****정회원, 대우건설 토목사업본부 GK설제팀 대리

침매 터널은 Dry dock에서 프리캐스트로 제작되며, 부력을 이용하여 운송, 침설 후 고무개스킷의 수압 접합을 통해 연결되는 일련의 반복적인 시공 과정을 통해 전 구간의 침매 터널이 완성된다.

3. 침매 터널의 수화열 해석

3.1 개요

침매 터널 세그먼트 1개에 대한 수화열 해석을 실시하였으며, 이 때 횡방향으로는 전체 단면을 포함시키되 종방향으로는 대칭성을 활용하여 1/2만을 모델링하였다. 사전 연구를 통하여 소요 내구성을 확보하고 수화열을 저감할 수 있도록 슬래그와 플라이애시를 적정량 혼입한 최적의 배합이 도출되었으며, 따라서 본 해석에서 배합은 변수로 두지 않았다. 수화열 해석시 요구되는 단열온도 상승곡선은 단열온도시험에서 얻은 값을 사용하였으며 타설 온도로부터 최대 40℃까지 상승하였다. 양생 조건으로서 거푸집이 설치되는 벽체 측면과 상부 슬래브 하면은 거푸집이 일정기간 존치되는 것으로 보았으며, 하부 슬래브 및 상부 슬래브의 상면은 타설 초기부터 적절한 보온 양생이 실시되는 것으로 가정하였다. 대류계수, 외기온도 및

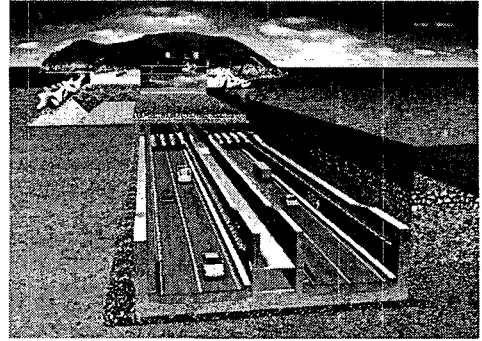


그림 1 침매 터널

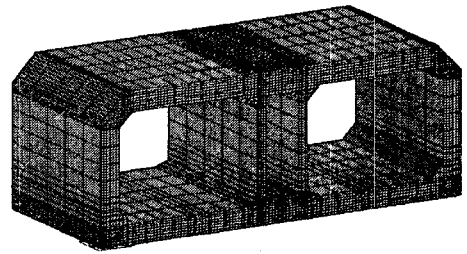


그림 2 침매 터널의 유한요소 모델

타설온도에 대한 것은 뒤에서 따로 언급하며, 밀도는 실측값인 2420 kg/m^3 을 사용하되 그 외의 해석 조건들은 콘크리트표준시방서¹⁾에 제시된 값들을 참조하여 열전도도 $2.698 \text{ W/(m} \cdot \text{℃)}$, 비열 $1155 \text{ J/(kg} \cdot \text{℃)}$, 열팽창계수 $1.0 \times 10^{-5} / \text{℃}$ 를 사용하였다. 크리프의 영향은 콘크리트표준시방서의 유효탄성계수 개념으로 고려하였다. 콘크리트의 설계기준강도는 35 MPa 로 압축강도 및 인장강도의 발현곡선은 역시 시방서를 참조하였다. 강도 발현곡선에서 고려되는 시간은 단순한 물리적인 개념이 아닌 성숙도에 근거한 등가재령의 개념으로 즉, 온도의 영향이 함께 고려되었다. 해석에는 범용구조해석 프로그램 MIDAS²⁾를 사용하였으며, 그림 2는 솔리드 요소를 사용한 유한요소 모델을 나타낸다.

3.2 대류계수 산정

수화열 해석시 입력되는 대류계수 값에 따라 표면 응력의 크기가 큰 폭으로 변하는 경우가 많으며, 따라서 가능하면 실제 거동에 가까운 대류계수 값을 사용하는 것이 중요하다. 콘크리트표준시방서에는 거푸집 종류나 양생 방법에 따른 대략의 대류계수 값과 더불어 복합적인 재료가 거푸집 또는 보온 재료로 사용되었을 경우에 대한 대류계수 산정방법이 제시되어 있다. 침매 터널 제작에 사용되는 시트가 부착된 강재 거푸집에 대해 열전도도를 측정하였으며, 이에 근거하여 엄밀한 대류계수를 산정한 결과 $7.9 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{℃)}$ 로서 시방서상에 제시된 강재 거푸집에 대한 대류계수인 $14 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{℃)}$ 보다 훨씬 낮은 값이 산출되었다. 그 외 콘크리트 면에 대한 대류계수는 $14 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{℃)}$, 양생포를 덮은 경우 $8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{℃)}$ 를 사용하였으며, 이는 최명성 등³⁾을 참조할 때 실제 상황에 대체로 부합하는 값들이다.

3.3 수화열을 고려한 효율적 시공 방안

스웨덴과 덴마크를 잇는 Øresund 침매 터널⁴⁾의 예를 참조하여 외부 구속 등 수화열에 의한 불리한 영향을 최소화하도록 연속 타설을 실시하고자 하며, 이 때 타설 층의 높이 및 시간 간격을 적절히 설

정하였다. 이에 대해서는 3.4절에서 좀 더 자세히 다루도록 한다. 표면 균열의 경우 그림 3과 같이 타설 후 초기에 균열 위험성이 큰 시점(A)이 존재하다가 다시 안전성을 확보해가지만, 거푸집 탈형 후 외기에 노출되면 다시 위험성이 커지는 경향이 일반적이다. 따라서, 거푸집 탈형 시기의 결정은 수화열 관리에 있어 매우 중요하며 탈형 후의 B점이 관리치 이하로 내려가지 않도록 탈형 시기를 조절하는 것이 바람직하다. 여기에서는 거푸집 탈형 및 다음 세그먼트로의 이동에 관련된 시공성과 더불어 수화열 관리 측면을 복합적으로 고려한 결과 타설 후 4일 및 5일 탈형의 대안 중에서 후자가 나은 것으로 판단된다.

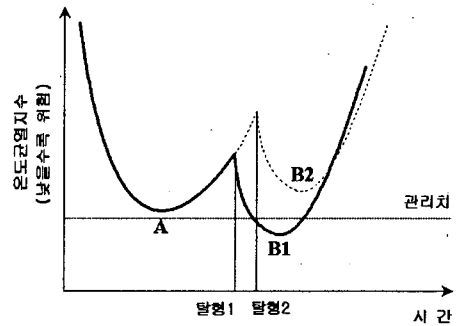


그림 3 거푸집 탈형 시기의 영향

외기온도와 타설온도의 차이는 온도응력의 발현에 있어 결정적인 영향을 미친다. Øresund 터널을 비롯하여 기존의 시공에 있어서는 타설온도를 낮추는 프리쿨링(Pre-cooling) 방식이 선호되어 왔지만 이는 골재 냉각 등을 위한 플랜트를 필요로 한다. 본 시공에서는 역으로 타설온도는 그대로 두되 외기온도를 높이는 방식을 시도하고자 한다. 즉, 부재를 거푸집 시스템에 매달은 천막으로 씌워 부재가 외기와 직접 접하는 것을 차단하고 스팀 온풍기를 사용하여 천막 내부 온도를 높게 유지할 경우 해석상에서 온도응력의 크기가 적절히 저감될 것으로 예측되었다. 천막 내부 온도는 높을수록 유리하지만 몇 가지 대안을 비교한 결과 타설온도 25℃에 대해 소요의 수화열 관리 수준을 만족하는 천막 내부 온도는 35℃ 이상으로 나타났다. 이는 프리쿨링을 통해 타설온도를 10℃ 이상 낮춘 효과와 비슷하지만 프리쿨링에 비해 좀 더 경제적인 방안으로 생각된다. 계절에 따라 타설온도가 달라질 경우에도 타설온도와 천막 내부 온도의 차이를 일정한 수준으로 유지하면 유사한 결과를 얻을 수 있다.

한편 적절한 보온 양생은 부재의 내외부 온도차를 줄여 표면 균열의 발생 가능성을 낮출 수 있어 매우 유리하다. 슬래브의 상면은 타설 초기부터 보온 양생을 실시하기에 용이하다. 하지만, 슬래브의 하면이나 벽체 측면의 경우 거푸집 재질에 따라 거푸집 존치 기간 동안은 거푸집이 어느 정도 보온을 유지해 주지만 탈형 이후가 문제시 될 수 있다. 바깥쪽 벽체의 바깥 측면의 경우 상부 슬래브로부터 양생 재료를 늘어뜨릴 수 있으므로 거푸집 탈형 후 즉시 보온 양생을 실시하는 것으로 하여 균열 발생 가능성을 관리 수준 내로 조절할 수 있었다.

3.4 시공단계별 해석

구조물이 타설 블록들로 나누어 시공될 때 타설 시간 간격이 클 경우 각 블록들의 타설 간격을 엄밀히 고려한 시공 단계별 해석을 실시하는 것이 바람직하다⁵⁾. 본 침매 터널은 엄밀한 타설 계획에 따라 상부 슬래브와 하부 슬래브를 각각 4개 층으로, 벽체는 19개 층으로 나누어 각 층을 280~430 mm 높이로 연속적으로 타설하고자 한다. 각 층의 타설 시간 간격은 상부 슬래브를 제외하고는 21분~91분을 유지하여 콜드 조인트 발생 가능성을 최소화하고자 한다. 총 타설 시간은 약 32시간으로 층에 따라 상당한 타설 시간 차이가 발생함에 따라 엄밀한 단계별 해석을 수행하였으며, 이를 일체 타설한 것으로 가정할 경우와 비교하였다. 그림 4에서 보듯 단계별 해석과 일체 타설 해석 결과는 온도 및 응력의 크기와 경향 면에서 비교적 큰 차이를 나타내고 있다. 일반적으로 콘크리트 구조물을 연속 타설할 경우 타설 층마다 일정한 시간 간격이 발생함에도 불구하고 그 차이가 크지 않을 경우 수화열 해석시에는 일체 타설을 가정하는 경우가 많다. 하지만 본 연구에 의하면 대규모 구조물의 경우 누적된 시간 차이로 인해 일체 타설 가정이 실제 거동과는 다른 결과를 줄 수도 있음에 주의해야 하며, 가능하면 엄밀한 시공 단계별 해석을 실시해야 함을 시사하고 있다. 그림 4는 적절한 단계별 분할 타설을 통해 수화열 및 온도응력을 저감하는 효과를 거둘 수 있음을 명확히 보여주고 있으며, 일체 해석의 경우 인장응력의 크기를 실제보다 과대평가하고 있다.

3.5 수화열 및 온도응력 평가

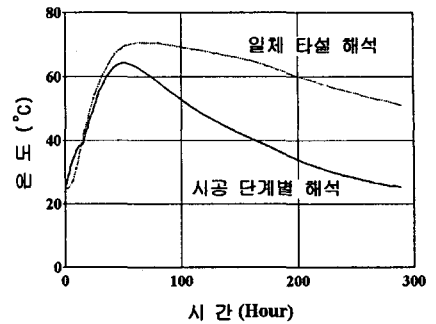
수밀성을 요하는 침매 터널의 특성상 수화열에 의해 발생하는 초기 균열이 제어될 수 있도록 품질관리 기준을 적용하는 것이 중요한 사항이며, 온도응력 평가 측면에서 침매 터널 단면의 표면부가 주요 검토대상이 된다. 그 외에 수화열에 대한 좀 더 철저한 관리를 위해 본 침매 터널에는 온도차에 대한 기준이 추가로 적용되었다. 즉, 단면의 최대 및 최소온도의 차가 20℃ 이하이고, 단면의 평균온도와 표면부(표면에서 10 mm 안쪽을 의미) 온도 차가 15℃ 이하인 것이 권장된다. 또한, 시공 단계별 해석시 구타설과 신타설 콘크리트 간의 평균 온도차는 15℃ 이하가 바람직하다. 이는 온도차와 균열 발생 확률에 대한 해외 사례를 참조한 것이다. 앞서 제시된 시공 방법과 같이 외기온도를 조절해 가며 적절한 보온 양생을 실시할 경우 상기의 조건들이 거의 모두 만족되는 것으로 나타났으므로 수화열을 최적으로 관리할 수 있는 시공 방안으로 판단된다.

4. 결론

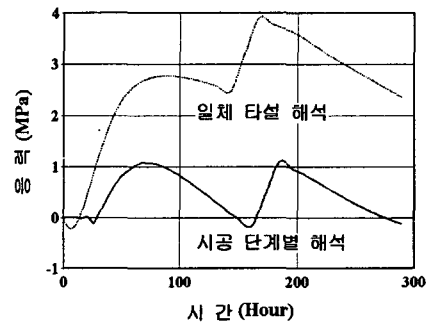
침매 터널은 내구성 및 수밀성 확보를 위해 프리캐스트 부재의 제작 단계에서부터 이에 합당한 품질관리가 필요하다. 본 연구에서는 해외에서 기시공된 침매 터널의 수화열 관리 사례를 참조하여 국내 시공 실정에 적합하면서도 소요의 수준을 만족할 수 있는 효율적인 시공 방안을 도출해 보고자 하였다. 수화열 관리에 대한 몇 가지 대안들을 서로 비교해가며 변수 연구를 수행하였으며 이를 통해 비교적용이하게 소요의 성능을 확보할 수 있는 방법을 제시하였다. 침매 터널은 엄격한 타설 계획 하에서 단계별로 시공되며, 이 때 수화열 해석시 비록 콘크리트 층마다의 타설 간격이 크지 않더라도 엄밀한 시공 단계별 해석을 수행하는 것이 수화열이나 온도응력 등의 구조거동을 올바르게 유추할 수 있는 관건이 됨을 보였다. 본 연구는 차후 침매 터널의 제작시 효율적인 시공 방안을 설정하는데 있어 유용한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 본 시공에 앞서 침매 터널에 대한 실험대형실험이 수행될 예정이며 이 때 주요 부위에 대한 계측을 실시하여 수화열에 대한 해석치와 비교 검토할 예정이다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, “콘크리트 표준시방서”, 2003.
2. “MIDAS/Civil Ver. 6.1 - Analysis for Civil Structures”, 마이다스아이티, 2005.
3. 최명성, 김윤용, 이상균, 김진근, “양생조건·외기온도·비등효과를 고려한 콘크리트 외기대류계수의 결정”, 콘크리트학회논문집, 17권 4호, 2005, pp.551~558.
4. Gimsing, N. J. and Iversen, C., “The Øresund Technical Publications - The Tunnel”, Øresundsbro Konsortiet, 2001.
5. 오병환, 전세진, 유성원, “매스 콘크리트 구조물의 연속 분할타설시 타설블록의 크기 및 타설 순서를 고려한 합리적인 수화열 해석”, 콘크리트학회논문집, 11권 3호, 1999, pp.59~68.



(a) 온도



(b) 응력

그림 4 해석 조건에 따른 비교
(하부 슬래브)