

수화열 발생인자가 지하철 콘크리트 구조물의
내구설계에 미치는 영향
Effect of the factor developing the Heat of Hydration on
Durability Design in the Subway Concrete Structure

임영수*
Lim, Young-Su

김은겸**
Kim, Eun Kyum

성기환***
Sung, Ki Han

ABSTRACT

With the recent continuous expansion of subways, newly created subways tend to have lower locations and wider sections. Furthermore, since box structures and evacuating tunnels are classified into a category of mass-concrete, the thermal-stress, emitted from the inside, causes cracks to structures from the inception of constructing.

In this paper, thermal-stress analysis and durability evaluation of box structure were carried out to investigate relationship between durability and parameter causing the heat of hydration. Through the examination, this paper tries to find out satisfactory solutions to regulated thermal crack and ensure the required duration period.

The results of this paper showed that to control thermal crack and guarantee the required duration period it was more effective to use low-heat-portland cement and moderate-heat-portland cement. As cement volume due to reduction of water-cement ratio increased, the possibility of thermal cracks occurrence increased but results of durability evaluation was different depending on evaluation method. The results showed that the appropriate water-cement ratio to control the heat of hydration and satisfy the required durability was 45~55%.

And it was showed that during placement of concrete blocks ambient temperature affect the heat of hydration, thermal crack and long-term durability largely and when concrete was placed at low temperature to control thermal crack, it need to try to guarantee the required duration period. Henceforth, by studying not only internal and external conditions, such as the relative humidity and the unit weight, but also methods, to evaluate durability, in accordance with domestic situations, more reasonable design of durability should be achieved.

1. 연구배경 및 목적

최근 지속적인 지하철 노선건설로 인해 신설되는 지하철은 건설심도가 깊어지고 단면도 커지는 경향을 띠며 박스구조물 및 개착터널 구조물의 경우 베스콘크리트의 범주로 분류되어 내부에서 발생된 큰 수화열로 인해 시공초기 단계부터 구조물에 균열을 발생시키고 있다. 또한 수화열에 의한 온도균열은 보통 그 폭이 크고 구조물을 관통하는 경우가 많아 구조물의 장기적인 내구성능의 저하를 초래하게 된다. 물-시멘트 비, 시멘트의 종류, 외기온도 등 수화열에 영향을 미치는 인자들은 구조물의 내구년한과도 직접적인 관련을 가지고 있으므로 수화열은 별개의 문제가 아니라 구조물 내구성과 함께 고려되어야 할 사항이다.

국내의 경우 구조물 설계에 있어 강도 및 안전성의 요건은 명확히 규정되어 있으나 내구성 및 내구년한에 대한 설계기준은 아직 미흡한 실정이며 대개 정성적 평가방법이 대부분이다. 본 연구에서는 정량적인 내구성 평가의 기준으로 최근 국내에 소개된 “내구저수-환경저수 산정법”과 일본 토목학회 부록에 제시되어 있는 “내구년계기간 산정법”을 내구성 평가에 적용하여 수화열의 발생에 영향을 미치는 인자와 내구성과의 상관관계를 검토함으로써 수화열 발생을 억제하고 최적의 내구성을 확보하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

* (주)서영기술원 기술, 서울산업대학교 철도전문대학원 공학석사, 정회원

** 서울산업대학교 교수, 정회원

*** (주)철학ENG 차장, 비회원

2. 연구내용

본 연구에서는 수화열의 발생에 영향을 미치는 인자와 내구성과의 상관관계를 검토하기 위한 목적으로 서울지하철 9호선 907공구에서 시공중인 박스구조물을 대상으로 온도응력해석 및 내구성 평가를 실시하였다. 박스 구조물은 실제 시공과정을 고려하여 3단 분할 타설로 모델링 하였고 각 타설단계에서의 수화열로 인한 최대온도, 최대인장응력 발생지점을 파악하였다. 이러한 지점을 기준으로하여 수화열 발생인자인 시멘트 종류, 물-시멘트비, 외기온도 등을 달리한 조건에서 수화열 해석을 실시하여 온도균열에 미치는 영향을 검토하였고 동일한 조건에서 “내구저수-환경저수 산정법”과 “내구한계기간 산정법”을 이용하여 내구성 평가를 실시함으로써 각 영향인자에 따른 인장 균열저수와 내구 안전성과의 관계를 살펴보았다.

2.1 수화열해석

콘크리트의 온도균열은 상대적으로 부체지수가 큰 구조물에서 발생하지만 외부구속이 강한 벽체구조물의 경우 단면폭이 비교적 크지 않더라도 큰 구속도로 인하여 균열 가능성이 매우 크다. 또한, 각 학회나 협회의 규정에 의하면 토목구조물의 경우 1m이상, 건축구조물의 경우 0.8m이상 일 때 온도균열 대책이 필요한 메스콘크리트로 정의하고 있으며, 특히 외부구속도가 큰 벽체구조물의 경우는 0.5m이상인 구조물을 메스콘크리트의 범주에 포함하고 있다.

메스콘크리트에서의 균열발생은 온도상승시에는 단면내의 온도차에 의해 발생하는 내부구속응력이 주로 문제가 되지만, 최대 온도에 도달한 후 온도감하시에는 외부 구속과 내부 구속에 의한 두 가지의 응력이 겹쳐진 복합응력이 문제가 되며, 각각의 성분의 대소에 따라 온도균열의 발생시기 및 발생양상도 달라진다.

본 논문에서는 단순히 어느 시점에 있어서의 인장응력과 인장강도를 비교하여 온도균열의 발생 여부를 판단하는 것보다는 온도균열지수로 구조물을 관리하는 것이 여러모로 합리적이며 경제적이기 때문에 온도균열 지수에 의한 균열평가를 수행하였다.

온도균열지수는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\text{온도균열지수, } I_{cr}(t) = \frac{\sigma_c(t)}{\sigma_{cr}(t)} \quad (1)$$

여기서, $\sigma_c(t)$: 제령 t일에 있어서의 콘크리트의 인장강도

$\sigma_{cr}(t)$: 제령 t일에 있어서 수화열에 의하여 발생한 인장응력

외국에서의 시공사례에 의하면 온도균열지수와 균열의 발생확률은 그림 1과 같으며, 구조물의 중요도, 기능, 환경조건 등에 대응하여 시공시 지침으로 삼을 적절한 온도균열지수를 선정할 필요가 있다. 경험에 의하면 일반적인 월근콘크리트 구조물의 경우 온도균열지수 값에 따라 표 1과 같이 나눌 수 있다.

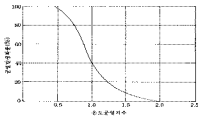


그림 1 온도균열지수와 균열발생확률

표 1 온도균열지수에 따른 균열의 발생여부 및 종류

분류	온도균열지수
균열을 방지하고 싶은 경우	1.5이상
균열발생을 가능한 한 제한하고 싶은 경우	1.2이상 1.5미만
균열발생을 허용하지만, 균열폭이 과도하게 되지 않도록 제한하고 싶은 경우	0.7이상 1.2미만
유해한 균열발생	0.7미만

2.2 내구성 평가

수화열 발생인자를 고려한 내구성 평가방법으로 현재 국내에서 가장 많이 적용하는 “내구저수-환경저수 산정법”과 일본토목학회의 내구설계지침의 부록에 제시된 “내구한계기간 산정법”을 이용하여 내구성 평가를 수행하였다.

내구지수-환경지수 산정법의 개념은 그림 2에서 보느냐와 같이 구조성능평기와 같은 개념으로 외부의 열화인자에 대한 열화발생정도를 정량적으로 평가한 환경지수와 구조물이 설계단계에서부터 준공에 이르기까지의 재료, 설계, 시공분야의 내구저항성을 정량적으로 평가한 내구지수의 비교를 통해 안전·불안건을 평가한 것이며 식 (2)의 기본식으로 평가하게 된다.

$$D_T \geq E_T \quad (2)$$

여기서, D_T 는 구조물 및 해당부재의 내구지수

E_T 는 구조물 및 해당부재가 노출된 조건의 환경지수

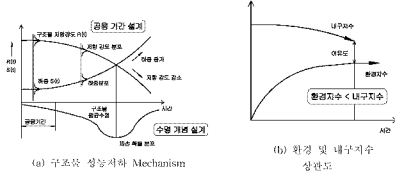


그림 2 내구성평가 개념

내구한계기간 산정법 설계개념은 식 3과 같이 콘크리트 구조물의 기본 및 표준사양을 검토하여 설계조건을 설정한 후 이에 따른 염해 및 탄산화에 대한 설계내구년한(T_d)을 계산하여 T_d 가 목표내구년한(T_a) 이상이면 목표하는 내구년한 동안 구조물이 내구성을 유지하는 것으로 간주한다.

$$T_d \geq T_a \quad (3)$$

여기서, 목표내구년한(T_a)은 해당 콘크리트 구조물의 중요도, 규모, 종류, 공용기간, 유지관리수준 및 경제성 등을 고려하여 설정된 구조물이 내구성을 유지해야하는 기간을 말하며 일본 토목학회 및 콘크리트 공학협회에서 제시한 목표내구년한을 적용하여 본 연구에서는 목표내구년한을 100년으로 결정하였다. 설계내구년한(T_d)은 구조물의 공용개시 후부터 철근이 부식되기까지의 기간과 부식후 부식에 따른 팽창압력에 따라 콘크리트에 균열이 발생하기까지의 기간을 합하여 정의되며 본 연구기간은 염해보다 유동인구의 호흡으로 인한 이산화탄소의 증가로 인해 탄산화가 예상되어 탄산화에 대한 설계내구년한을 평가하였다.

2.3 해석조건 및 변수

본 논문에서 해석에 사용된 프로그램은 열전달 해석과 열응력 해석을 통한 수화열 해석이 가능한 MIDAS/CIVIL을 이용했으며 그림 3과 같이 실제 9호선 실시설계에서 설계된 박스구조물에 대하여 해석을 수행하였다. 구조물의 종방향 타원길이는 15m로 가정하였고 구조물의 대칭성을 고려하여 실제 해석에 이용된 해석 모델은 그림 4와 같다.

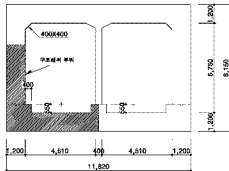


그림 3 해석 구조물 단면

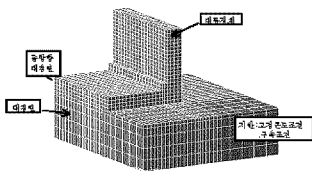


그림 4 해석 구조물 모델링

수화열 해석모델의 재료물성치는 표 2와 같고 내구성평가 조건은 표 3에 나타내었다. 해석변수는 표 4에서 보는바와 같이 6가지 시멘트의 종류별 수화열 해석 및 내구성평가를 수행하였으며, 보통포틀랜드시멘트와 중용열포틀랜드시멘트에 대해서는 물-시멘트비(W/C)의 변화와 타설온도를 변화시켜 수화열 해석 및 내구성평가를 수행하였다.

표 2 해석에 적용된 재료 물성치

구분	콘크리트	지바 (봉화합)
비열 (kcal/kg ^o C)	0.25	0.25
비중 (kg/m ³)	2500	2100
열전도율 (kcal/m hr ^o C)	2.3	2.0
91인 양수장도 (kg/cm ²)	270	-
91인 탄성계수 (kg/cm ²)	2.7734×10 ⁷	2.0×10 ⁷
열팽창계수	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵
프라이머	0.18	0.2
내구계수 (kcal /m ² hr ^o C)	상부	10
	중부	10
	(합계거푸집)	7

표 3 내구성 평가 조건

재료부분	설계 및 시공부분
시멘트 종류	해석변수
혼합상도	무채회소취수 1.2m
완제품용	최근의 순간적 105mm
완제품 최대취수	철근간수 1년
잔류재 조립률	순회목 5.3cm
완제품 조립률	2.65
완제품 조립률	가외철근비 0.4%
완제품 조립률	6.75
혼화제	기포증진수제
혼화제	콘크리트 타설속도 25m ³ /h
혼화제	1.673kgf/m ³
혼화제	67kgf/m ³
영화물량	0.3kgf/m ³
	양생관리 습윤양생 1.5m
	양생일수 해석변수

표 4 해석변수

시멘트	시멘트량 (kgf/m ³)	물-시멘트비 (%)	타설외기 온도 (°C)	압축강도발현계수		발열함수		해석변수	
				a	b	K	a		
보통포틀랜드시멘트	350	50	20	10	4.5	0.95	53	0.66	■
				20			51.5	1.294	★
				30			50.5	1.737	■
중용열 포틀랜드시멘트	350	50	20	6.2	0.93	52.8	0.936	●	
						47.9	0.833	●	
						44	0.804	★	
						40.8	0.756	●	
						38.2	0.717	●	
저열 포틀랜드시멘트	350	50	20	20.22	0.778	37.18	0.337	★	
고리시멘트	350	50	20	6.2	0.93	50	1.082	★	
플라이애쉬B종	350	50	20	8.1	0.91	50	0.837	★	
내화산염포틀랜드 시멘트	350	50	20	4.0	0.85	45.3	0.969	★	

★ 시멘트의 종류별 해석변수
 ● 물-시멘트비(W/C)에 따른 해석변수
 ■ 타설외기온도에 따른 해석변수

3. 수화열 해석 및 내구성 평가 결과

본 연구에서 이용된 Box구조물의 경우 내·외부의 온도차에 의해 온도응력이 발생하게 되는데 온도상승시에는 표면에 인장력이 그리고 중앙부에는 압축력이 발생하며, 온도강하시에는 그 반대로 표면에 압축력이 중앙부에는 인장응력이 발생하게 된다. 시간에 따른 온도변화는 타설 후

약 40시간 전·후에 최대 온도를 나타내었고 그림 5에서와 같이 3단계 타설시 벽체 중앙부(N11644) 지점이 가장 높은 온도가 발생하였다. 그림 6을 보면 최대인장응력은 3단계 타설시 구조물의 표면부(N11842)에서 발생하였다.

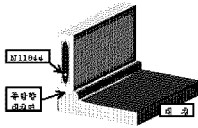


그림 5 타설 후 40시간 경과후 온도분포

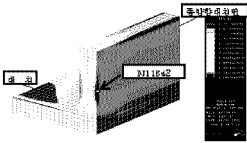


그림 6 타설 후 40시간 경과후 인장응력분포

3.1 시멘트 종류에 따른 변화

시멘트 종류에 따른 수화열 해석 결과는 그림 8~10에 나타내었고 온도균열지수 및 내구성 평가 결과를 종합하여 안전율 개념으로 표 6에 제시하였다. 지역포틀랜드시멘트가 온도균열을 제어하고 소요의 내구년환을 확보하기 위해 가장 바람직한 것으로 나타났으며 중용열포틀랜드시멘트도 비교적 적절한 것으로 평가되었다. 하지만 시멘트 종류에 대한 선정은 온도균열을 포함한 내구성평가에 의해서만 결정되는 것이 아니기 때문에 구조물의 강도 또는 경제성 등 기타여건을 고려하여 종합적으로 판단하여 결정해야 할 것이다.

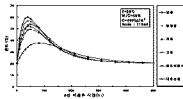


그림 8 시멘트 종류에 따른 시간-온도 관계

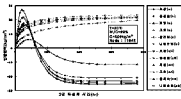


그림 9 시멘트 종류에 따른 시간-인장응력 관계

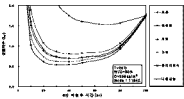


그림 10 시멘트 종류에 따른 시간-온도균열지수 관계

표 6 시멘트 종류에 따른 온도균열지수 및 내구성에 대한 안전율

구분	온도균열지수	내구지수 - 환경지수 산정법 (D_T/E_T)	내구한계기간 산정법 (T_S/T_0)
보통포틀랜드시멘트	0.54	0.76	1.00
중용열포틀랜드시멘트	0.81	0.97	1.04
지역포틀랜드시멘트	1.37	1.11	1.43
고로시멘트	0.61	0.87	0.79
플라이애쉬	0.7	0.92	0.68
내황산염포틀랜드시멘트	0.7	0.92	0.76

3.2 물-시멘트비에 따른 변화

물-시멘트비의 변화에 따른 온도균열지수와 내구성평가로부터 구한 안전율을 표 7에 나타내었고 그림 11에 도시하였다. 물-시멘트비가 증가함에 따라 온도균열의 발생 가능성은 감소하는(균열지수 증가) 것을 살펴볼 수 있고 내구지수산정법에 의한 내구성 평가 결과는 큰 변화가 없으며 내구한계기간산정법에 의한 안전율은 크게 감소함을 볼 수가 있다. 이는 내구지수산정법은 온도균열지수나 온도균열폭등을 고려한 반면 내구한계기간산정법의 경우 온도균열에 대한 영향이 직접 반영되지 않기 때문이며 이를 감안하여 두 결과로부터 적절한 값을 선정하여 설계에 적용하여야 한다. 하지만 이러한 상이한 결과를 고려하더라도 수화열을 제어하고 소요의 내구년환을 만족하기 위한 물-시멘트비는 45~55%사이의 값이 적절하며 다른 설계 및 시공조건과 함께 고려하여 최종적인

값을 선택하여야 할 것으로 판단된다.

표 7 물-시멘트에 따른 온도균열지수 및 내구성평가

구분	W/C	온도균열지수	내구지수-환경지수 산정법		내구한계기간 산정법	
			D_f/E_T 비교	비고	T_s/T_d 비교	비고
중용열	W/C=40%	0.61	0.94	N.G	1.97	O.K
	W/C=45%	0.71	0.95	N.G	1.52	O.K
포틀랜드시멘트	W/C=50%	0.81	0.97	N.G	1.04	O.K
	W/C=55%	0.90	0.96	N.G	0.64	N.G
	W/C=60%	0.99	0.97	N.G	0.35	N.G

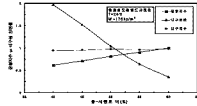


그림 11 물-시멘트비에 따른 온도균열지수 및 내구성 안전률

3.3 타설외기온도에 따른 변화

각기 다른 외기온도 조건에서 타설된 구조물의 수화열 해석결과를 표 8 및 그림 12에서 보는 바와 같이 저온타설이 수화열에 유리하며 보통포틀랜드시멘트의 경우 외기온도 10℃일 때 온도균열지수 0.7이상을 확보할 수가 있었다. 내구성 평가방법 중 온도변화에 대한 영향은 온도균열지수로만 평가한 내구지수산정법의 경우 온도균열지수의 결과와 마찬가지로 저온으로 갈수록 유리하게 나타났다. 내구한계기간산정법에서는 온도 변화에 대한 영향을 적절 고려하며 고온에서 유리하게 평가되는 상반된 결과를 보였다. 이에 수화열을 제어하기 위한 저온 타설시에는 내구성 확보에 대한 세심한 고려가 요구된다.

표 8 타설외기온도에 따른 온도균열지수 및 내구성평가

타설시 외기온도	온도균열지수	내구지수-환경지수 산정법		내구한계기간 산정법		
		D_f/E_T 비교	비고	T_s/T_d 비교	비고	
보통 포틀랜드시멘트	10℃	0.72	0.86	N.G	0.82	N.G
	20℃	0.53	0.76	N.G	1.00	O.K
	30℃	0.46	0.73	N.G	1.11	O.K

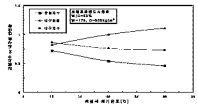


그림 12 외기온도에 따른 온도균열지수 및 내구성안전률

4. 결론

본 논문에서는 수화열의 발생양상을 변화시키는 영향인자가 구조물에서의 온도균열의 발생과 장기적인 내구성에 적·간접적으로 미치는 영향 및 상관관계를 살펴보기 위해 지하철 Box 구조물에 대한 수화열 해석 및 내구성 평가를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 박스 구조물의 3단 분할 타설시 최고 온도는 구조물 심부에서 발생하였고 벽체 외측부는 최대인장응력이 발생하여 인장균열의 발생가능성이 가장 높게 평가되었다.
2. 수화열에 의한 온도균열을 제어하고 소량의 내구성을 확보하기 위해서는 저용포틀랜드시멘트 또는 중용열포틀랜드시멘트의 이용이 가장 적절한 것으로 나타났으며 보통포틀랜드시멘트의 경우 수화열 제어대책 등을 통해 균열을 적절히 제어할 수 있는 것으로 나타났다.
3. 동일한 물량기준에서 물-시멘트비의 감소는 온도균열의 발생가능성을 뚜렷하게 증가시키며 내구성 평가결과는 평가방법에 따라 다소 상이하게 나타났지만 수화열을 제어하고 소량의 내구년한을 확보하기 위한 물-시멘트비는 45~55%사이의 값이 적절한 것으로 평가되었다.
4. 콘크리트 타설시의 외기온도는 수화열 발생 및 온도균열, 장기적인 내구성에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 수화열을 제어하기 위한 저온 타설시에는 내구성 확보에 대한 세심한 고려가 요구된다.
5. 수화열의 발생에 영향을 미치는 인자들 중 시멘트의 종류, 물-시멘트비, 외기온도는 내구성 평가에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났지만 내구성 평가방법에 따라 다소 상이한 결과를 나타내었다. 향후, 상대습도 및 단위수양등과 같은 내·외부조건들의 영향을 보완하고 국내의

실정에 적합한 내구성 검토방법에 대한 연구를 통해 보다 합리적인 내구성 설계가 이루어질 수 있도록 하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 김은겸, 조선규, 신치범, 박영진, 서동기(1999), "외부구속을 받는 매스콘크리트 구조물의 수화열해석", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, Vol.11 No.2, pp.345-348
2. Fernando A.Brenco et al.(1992), "Heat of Hydration Effects in Concrete Structures," ACI Materials Journal, Vol.89, No.2
3. P.Kumar Metha & Paulo J.M. Monteiro(1993), "Concrete Structure, Properties, and Materials", Prentice-Hall
4. 서울특별시 지하철건설본부(1999), "지하철 구조물 내구성 확보를 위한 연구 용역 보고서"
5. 건설교통부(2003), "콘크리트 구조설계기준"
6. 土木學會(1995), "コンクリート構造物の耐久設計指針(案)"