

매스콘크리트 구조물에서 파이프쿨링을 고려한 수화열 해석

Thermal Analysis Associated with the Application of Pipe Cooling System to a Massive Concrete Structure

김 상 철* 이 두 재** 김 재 권*** 강 석 화**** 김 진 근*****
Kim, Sang Chel Rhee, Doo Jae Kim, Jae Kwon Kang, Sock Hwa Kim, Jin Keon

ABSTRACT

Pipe cooling has been popularly used in the mass concreting work to reduce temperature of the structure since it is known to be the easiest way to apply and has been the customary usage. But wrong application of the system results in the harmful effect on the structure by crack formation due to thermal shocks and improper cooling schemes. Thus, this study aims at the suppling of effective cooling methods through parametric study. For this, circulating method, velocity of water supply and circulating duration were selected as critical factors affecting the effectiveness of cooling system.

As a results of thermal analysis, it was found that too much thermal gradient in the vicinity of the pipe creates localized radial or circumferential cracks. The duration of circulating cooling may be recommended to be as short as several days which may safely reduce the concrete temperature to below a final stable value. It was also found that pipe cooling is more effective to decrease the degree external restraints than internal one.

1. 서 론

매스콘크리트 구조물에서 수화열에 의한 온도증가를 억제시킬 수 있는 방안은 여러가지가 있겠지만, 그 중에서 재료적으로 저열성시멘트를 사용하여 근본적으로 수화발열량을 억제하여 온도균열을 제어하는 방법과 배합수나 사용골재를 냉각시키는 프리쿨링공법, 콘크리트에 파이프를 배관하고 이 파이프에 냉각수를 통과시켜 강제적으로 콘크리트의 온도를 낮추는 파이프쿨링공법 등이 현재 가장 많이 적용되고 있는 방법들이라 할 수 있다. 중용열 포틀랜드시멘트, 고로슬래그시멘트나 플라이애쉬시멘트,

* 정회원, 동아건설산업(주) 책임연구원, 공박

** 동아건설산업(주) 주임연구원

*** 동아건설산업(주) 기술용역단장

**** 정회원, 동양중앙연구소 건설재료연구실장, 공박

***** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

혹은 화학적 성분을 변화시킨 저열성시멘트를 사용함으로써 매스콘크리트 구조물의 수화열을 저감시킨 효과에 대해서는 이미 여러 연구결과에서도 밝힌 바와 같이 많은 성과가 있었으며, 특히 무기질 혼화재 사용은 산업폐기물의 재활용 측면에서 큰 관심사가 되는 부분이다. 또한 프리쿨링공법은 콘크리트 타설온도가 타설후 콘크리트 온도변화에 영향을 크게 미치기 때문에 가능한 한 콘크리트의 타설온도를 낮추어줌으로써 구조물에서의 온도균열 발생 및 내재하게 될 온도응력을 저감시킬 수 있는 공법으로 구조물에 미치는 악영향에 대해서 많은 고려가 없어도 큰 문제가 발생하지 않는 시공방법이라 할 수 있다.

이와 반면에 파이프쿨링공법은 일반적인 인식으로 온도저감을 위한 매우 유효한 수단으로 알려져 있어 많은 대형 구조물에 적용되고 있으면서도 통수온도나 냉각기간을 적절히 조절하지 못하므로써 의외의 균열발생이라는 부작용이 발생하는 경우가 종종 있었다. 따라서 본 연구에서는 파이프쿨링을 실시하지 않았을 때와 실시하였을 때의 결과를 비교하므로써 파이프쿨링의 기여도를 조사하고, 파이프쿨링에 사용되는 각 조건들을 변수로 하여 해석하므로써 온도저감계획 수립을 위한 효율적인 파이프쿨링방법을 제시하고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 수화열 해석을 위한 제원 및 모델링

2.1 수화열 해석을 위한 조건

일반적으로 매스콘크리트에 있어서 콘크리트 내부에 발생하는 수화열 및 온도응력은 시멘트의 열적특성치와 외부 환경조건에 따라서 그 크기가 다르게 나타난다. 본 해석에서 사용될 조건으로는 서중콘크리트이면서 매스콘크리트 구조물의 슬래브를 타설하는 것을 목표로 하였다. 따라서 타설온도는 콘크리트 경화전에 수분증발, 유동성 저하와 건조수축 발생 등으로 콘크리트 경화전에 균열이 발생하거나 이상응결 현상이 발생하지 않는 범위에서 서중콘크리트 타설의 기준온도인 25℃로 하였다. 또한, 대상 슬래브 크기는 부산 광안대교의 하부기초저판에서 구조해석을 통해 전단력이 가장 적게 발생하는 부분을 따라 분할한 크기인 18.8m×20.6m×2.0m를 대상으로 하였으며, 사용시멘트는 수화 발열량이 작은 D사에서 생산하고 있는 3성분계 혼합형 저발열시멘트를 사용하는 것으로 하였다. 사용된 혼합형 시멘트의 물리적 특성과 배합비는 표 1, 2와 같다.

프로그램 수행을 위해서 필요로 하는 콘크리트의 재료적 특성에 대해서는 단열온도상승시험을 통해 최대상승온도(K) 및 반응속도(α)를 산출하였고, 콘크리트의 탄성계수 및 압축강도는 숙성도 개념에 입각하여 산출하였으며 여기서 계산된 압축강도를 이용하여 콘크리트의 인장강도를 계산하였다.

표 1 배합비

W/C (%)	S/A (%)	배 합 비(kg/cm ²)					
		W	C	S	G	고성능 감수제	AE제
47.5	46	166	349	795	958	2.62 (C×0.75%)	0.332 (C×0.095%)

표 2 시멘트의 물리분석결과

시멘트	비중	블레인 (cm ² /g)	주 도	응결(h:m)	
				초결	종결
저발열시멘트	2.78	3,929	27.5	03:08	06:40

2.2 유한요소 해석 및 쿨링조건 변수 설정

콘크리트 블록은 3차원 solid 요소로 하고 파이프는 3차원 solid 요소사이에 선요소를 사용하여 solid 요소사이에 위치할 수 있도록 입력하였다. 파이프와 콘크리트와의 열 교환은 프로그램상에 유수대류에 의한 열의 소산량과 수화열 발생량의 열적 평형조건을 고려한 내부유동기법을 도입하여 파이프쿨링을 고려한 해석이 가능토록 하였다.

일반적으로 해석결과는 매쉬의 영향을 받으므로 모든 방향에 대하여 가능한 한 동일한 크기의 매쉬를 만들도록 하였으며 매쉬크기는 타설높이에 대해서는 0.33m씩, 길이가 긴 방향에 대해서는 0.33m씩, 상대적으로 길이가 짧은 방향에 대해서는 0.5m씩으로 나누었다.

유한요소 해석에 사용된 냉각수 유입방향은 그림 2와 같이 최대온도를 발생하는 중앙부에서 부터 냉각수가 유입되어 외곽부로 유출되는 방법과 이와는 반대로 외곽부로부터 냉각수가 유입된 후 중앙부에서 유출되는 방법에 대해 해석하였다. 파이프의 배관은 타설고가 2m이므로 파이프쿨링을 좀더 효과적으로 수행하기 위하여 2단 배관으로 하였고, 1단 배관은 콘크리트 하단으로부터 66cm, 나머지 2단은 콘크리트 상단으로부터 66cm떨어진 곳에 위치하도록 배관하였다.

파이프는 X-L pipe, 직경 1 inch(2.54cm)를 기준으로 하고, 유속은 현재 현장에서 많이 적용하고 있는 0.2~0.6m/sec의 범위에서 구조물의 중앙부에서 냉각수를 유입하는 경우는 유속을 0.3, 0.4, 0.6m/sec인 3가지 경우를 변수로 하여 해석을 실시하였고, 반대로 구조물 외곽부에서 중앙으로 냉각수를 유입시키는 경우는 0.6m/sec인 경우에 한해서 해석을 수행하였다. 유수 온도는 구조물의 온도충격을 주지 않는 범위에서 해석을 통해 20℃로 정하였다. 또한, 통수기간은 파이프쿨링을 적용하지 않은 경우에 대해 수화열해석을 실시하고 이 때 최대온도 도달시점(타설 후 3일)에서 통수를 중단할 경우 다시 온도의 급상승을 방지하는 차원에서 1일간 여유를 두어 타설시점에서 총 4일간 통수시킨 경우와 타설 후부터 연속적으로 1개월간 연속통수하는 경우에 대해 해석을 하였다.

표 3 유한요소 모델링에 사용한 입력데이터

입력 항목	지발열시멘트 (타설온도25℃)	압 반
단열온도 상승식	K (°C)	36.7
	α	1.009
열전도율 (kcal/m · hr · °C)	2.3	2.5
비열 (kcal/kg · °C)	0.25	0.18
외기대류계수 (kal/m ² · hr · °C)	9 (상부)	-
	5 (측면)	-
초기온도 (°C)	25	10/25
28일 압축강도 (kg/cm ²)	240	-
28일 탄성계수 (kg/cm ²)	2.3×10 ⁹	3.0×10 ⁹
열팽창계수 (/°C)	1.0×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁵
포아송비	0.17	0.17

표 4 파이프 쿨링 입력변수

입력항목	입력값
냉각수 유량(m ³ /hr)	0.55, 0.75, 1.1
냉각수 유속(m/sec)	0.3, 0.4, 0.6
유수대류계수(kcal/m ² · hr · °C)	320
냉각수 유입온도(°C)	20
냉각수의 비열(kcal/kg · °C)	1.0
파이프관의 직경(m)	0.0254

해석결과는 가장 균열발생의 소지가 큰 위치에서 출력하여야 하므로 해석을 통해 온도의 경우는 절점에서, 온도응력의 경우는 요소에서 각 위치별 값들을 비교한 후 최대치가 발생하는 위치

를 선정하여 그림 1과 같은 위치에서 온도와 온도응력을 출력하였다. 특히, 파이프쿨링을 실시할 경우에는 파이프 근처에서의 온도구배에 의해 유해한 응력이 발생할 수도 있기 때문에 파이프와 직접적으로 접하는 부분(절점과 요소)에 대해서 온도 및 온도응력을 비교·검토하였다. 그 결과 중앙부에서 냉각수를 유입할 경우는 그림 2와 같이 a, b, c, d에서의 온도 및 온도응력값이, 냉각수를 외곽부에서 중앙부로 유입시키는 경우는 a, b, e, f, g, h지점에서의 온도 및 온도응력값이 비교대상으로 선정되었다.

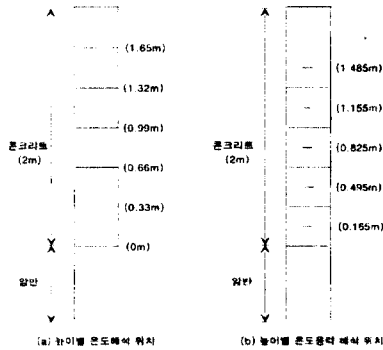


그림 1 해석프로그램 출력 위치

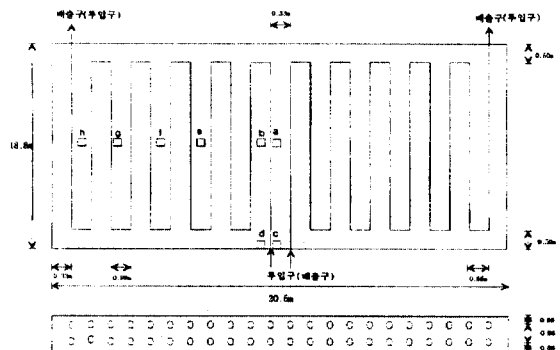


그림 2 해석프로그램 출력위치 및 파이프 배관 위치도

3. 결과 분석

3.1 파이프쿨링효과 및 통수기간에 대한 영향평가

냉각수 온도 20℃, 유속 0.3 m/sec으로 중앙에서 외곽으로 통수한 경우 표 6과 같이 최고온도크기는 47.9℃이고, 그 발생시기도 2일로 통수기간에 관계없이 같은 값을 나타내어 표 5의 파이프쿨링을 실시하지 않은 경우의 최고온도 56.2℃보다 9℃정도 온도저감효과가 있는 것으로 나타났다. 온도균열지수를 비교해 보면 표면균열의 온도균열지수는 30일간 통수할 경우 0.97, 4일간 통수하는 경우는 0.95로 온도에서와 마찬가지로 거의 같게 나타났다.

표 5 타설불력에 대한 온도 및 균열지수
(타설온도 25℃, 파이프쿨링 미실시)

최대온도		균열지수			
발생량	발생시기	표면부	발생시기	중앙부	발생시기
56.2℃	3일	0.93	2일	1.05	30일

표 6 타설불력에 대한 온도 및 균열지수
(유속 3m/sec, 냉각수온도 20℃)

냉각수 기간	유속 (m/sec)	최대온도		내부구속(표면균열)						외부구속 (관통균열)	
				표면부			중앙부			중앙부	
		발생량	발생 시기	균열 지수	시기	위치	균열 지수	시기	위치	균열 지수	시기
30일	0.3	47.9	2			0.97	1일	a	0.72	10일	
4일	0.3	47.9	2	1.41	2일	o	0.95	1일	a	1.7	30일

그러나 구조물에 구조적인 문제를 야기시킬 수 있는 외부구속에 의한 균열지수는 파이프쿨링을 4일

간 시행한 경우가 30일간 시행한 경우보다 오히려 높은 균열지수를 나타내고 있다. 이는 최고온도에 도달한 이후에도 계속하여 통수할 경우 온도하강구배가 급속하게 되어 균열발생확률이 상승하게 된 것에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 매스콘크리트 구조물에서 파이프쿨링을 통해 발생하는 수화열을 강제적으로 낮추는 경우 통수기간은 최대온도가 발생된 후 단수에 따른 온도의 재상승을 방지하는 차원에서 일정시간만 연장통수하는 것이 바람직하며 최고온도 이후에도 계속적인 통수는 오히려 구조물에 악 영향을 미칠 수 있다는 것을 본 결과에서 나타내고 있다.

3.2 유속 및 통수방향에 대한 영향평가

표 7에서 유속의 영향을 살펴보면 유속이 증가하여도 온도가 극소량 저하되어 최대온도의 크기에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 냉각수의 유입방향을 외곽부에서 중앙으로 유입시키면 중앙에서 외곽부로 유입시키는 것보다 최대온도가 다소 증가되는 양상을 나타내고 있다. 이와 같은 결과의 원인을 살펴보면, 일반적으로 최대온도는 구조물의 중심부에서 발생하며 냉각수가 외곽부에서 중앙부로 통수되는 동안 냉각수 온도가 상승하게 되어 중앙부에서 직접 유입되어 냉각되는 경우보다는 효율성이 다소 떨어지게 된 것에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 외곽부에서 유입되었을 때와 중앙부에서 유입되었을 때와의 최대온도차이가 단지 1.8℃ 밖에 차이가 나지 않으므로 유출되는 냉각수의 온도는 그리 크지 않음을 알 수 있다. 그러나, 만약 냉각 파이프 배관 길이를 증가시키게 되면 유입 및 유출되는 수온차가 심하게 될 것으로 판단되는 바, 본 계획에서 결정한 파이프 배관길이(149.5m, 4개)는 냉각 효율성 측면에서 적절한 것으로 판단된다.

표 7 타설블럭에 대한 온도 및 균열지수(타설온도 25℃, 파이프 쿨링실시)

a) 최대온도

통수방향	유속 (m/sec)	최대온도		
		발생량	발생시기	발생위치
중앙 → 외곽	0.3	47.9	2일	b
	0.4	47.9	2일	b
	0.6	47.7	2일	b
외곽 → 중앙	0.6	49.5	2일	b

b) 온도균열지수

통수방향	유속 (m/sec)	내부구속(표면균열)						외부구속(관동균열)	
		표면부			중앙부			중앙부	
		균열지수	시기	위치	균열지수	시기	위치	균열지수	시기
중앙 → 외곽	0.3	1.41	2일	c	0.95	1일	a	1.7	30일
	0.4	1.41	2일	c	0.95	1일	a	1.7	30일
	0.6	1.44	2일	c	0.95	1일	a	1.7	30일
외곽 → 중앙	0.6	1.41	8일	h	1.1	1일	a	1.6	30일

균열발생확률적 측면에서 살펴보면, 냉각수의 유속과 유입방향에 따라 다소 차이는 있으나 표면부의 경우는 균열지수가 1.41~1.44(균열발생확률 10%)로 나타났다. 그러나 파이프쿨링을 적용하지 않은 경우와는 달리 파이프쿨링을 적용하였을 경우에는 외부구속에 의한 균열개념이 아닌 콘크리트가 경화되는 과정에서 발생하는 표면균열이 파이프와 접하는 콘크리트 주변에서, 즉 구조물 내부에서 표면균열이 발생되고 있다. 이 값들은 오히려 구조물 바깥쪽 표면부에서의 균열발생확률보다 상당히 높아 균열발생확률이 46%(균열지수 0.95)로 나타나고 있다. 이는 냉각수가 중앙부에서 유입되게 되면 콘크리트 내부온도와 냉각수와의 급격한 온도차로 인해 오히려 균열발생 확률이 높아져 불리하게 작용할 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 냉각수를 외곽부에서 유입하여 중앙부에서 유출되게 할 경우에는 중앙부에 도달하는 동안 냉각수의 온도가 상승한 상태가 되므로 온도구배가 앞서의 경우보다 작아지기 때문에 온도격차에 따른 온도충격을 상당량 경감시킬 수 있다. 따라서 외곽부에서 중앙부 방향으로 냉각수

를 통수시킨 결과 표 7(b)에서와 같이 균열지수 1.1(균열발생확률 30%)로 균열발생확률이 상당히 저감되었다.

관통균열과 관계되는 외부구속 측면에서 검토하여 보면, 파이프쿨링을 적용하였을 시 균열지수가 1.6~1.7로 나타나 균열발생확률(4%)이 감소되었다. 표 5의 파이프쿨링을 적용하지 않은 경우와 비교하였을 때 파이프쿨링적용시 표면균열 제어측면에서는 효과가 그리 크지 않지만, 외부구속에 의한 균열제어 측면에서는 파이프쿨링이 매우 효과적이라는 것을 알 수 있다. 또한 통수의 방향적 측면에서 외부구속에 의한 균열발생은 외곽부에서 중앙부로 유입시키는 경우가 중앙부에서 외곽부로 통수시키는 경우에 비해 다소 불리한 것으로 나타나지만 그 차이가 크지 않고, 또한 실질적으로 표면균열이 본 블럭에서는 균열발생의 위협적이면서 지배요소로 작용하고 있으므로 외곽부에서 중앙부로 통수시키는 것이 추천된다

4. 결 론

(1) 통수기간이 30일인 경우와 4일인 경우를 비교하면 최고온도 발생량과 발생시기는 동일하나, 온도 균열지수는 4일간 통수한 경우에 온도균열지수가 상대적으로 커 균열방지효과가 큰 것으로 나타났다. 따라서 통수기간은 해석을 통해 최고온도 및 발생시기를 구하고 타설 후부터 그 기간까지 통수하며 단수시 큰 온도상승방지 차원에서 여유적으로 6시간~1일정도 연장통수하는 것이 유리하다.

(2) 파이프쿨링시 냉각수의 유속은 온도균열지수에 크게 영향을 미치지 않고, 냉각수의 유입방향에 따라 균열지수에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(3) 파이프쿨링은 표면균열보다는 외부구속에 의한 관통균열제어 측면에서 큰 효과가 있으며, 파이프가 지나가는 배관주변에서는 균열이 발생될 우려가 있다. 따라서 콘크리트 초기재령시 가능한 한 냉각수 온도와 콘크리트 내부와의 온도차이가 많이 발생하지 않도록 주의하여야 하고 특히, 배관방향에 대해서는 세심한 계획이 있어야 한다.

참고문헌

1. 김진근, 이종대, “크리이프를 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력해석”. 대한토목학회논문집, 제14권, 제4호, 1994.7, pp. 771~781
2. 김진근, 김국한, “크리이프, 건조수축을 고려한 매스콘크리트에서의 수화열에 대한 온도응력 해석”, 한국콘크리트학회 논문집, 제4권, 제3호, 1992.9, pp101~111
3. 김진근, 김국한, 양주경, “온도저감공법을 고려한 콘크리트의 수화열 해석기법에 관한 연구”, 제7권, 제6호, 1995.12, pp 176~185
4. 강석화, 정한중, 박철림, “매스콘크리트의 외부구속응력에 관한 검토”, 한국콘크리트학회, 제8권, 제5호, 1996.10, pp. 111~122