

매스콘크리트에서 최적의 타설 단면 결정을 위한 해석적 연구

Analytical Study for the Determination of Optimized Block Size in Mass Concrete

김진근*
Kim, Jin Keun

김상철**
Kim, Sang Chel

이두재***
Rhee, Doo Jae

김국한****
Kim, Kook Han

Abstract

Thermal stress induced by hydration heat may produce cracks in mass concrete structure, which can result in structural problems as well as bad appearance. To minimize crack occurrence in massive structure, thus, the study put an emphasis on the determination of optimized lift height and block size. In the parametric study different sizes and lift heights were used to measure the magnitudes of hydration heat and thermal stresses for 3 different types of concrete fabricated with 1 pure cement and 2 blended Portland cements.

As a result of analysis, it was found that the magnitude of hydration heat and the occurrence of thermal cracks depend on the restriction conditions and material characteristics, especially adiabatic material parameters. It was also found that optimized lift height and block size can be determined from an appropriate combination of the degree of inner and outer structural restrictions.

1. 서 론

콘크리트는 경화과정중 화학적 반응을 통해 수화열이 발생하는데, 특히 매스콘크리트 구조물의 경우는 콘크리트 자체가 마치 절연체처럼 작용하여 내부에서 발생한 수화열이 외부로 방출되는데는 상당한 시간이 소요된다. 이로 인해 매스콘크리트 구조물의 내부온도는 상승하게 되며, 여기에 구조물이 내·외적으로 구속을 받게 되면 콘크리트 구조물내부에는 인장응력이 발생하게 된다. 이때 발생한 온

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 정회원, 동아건설산업(주) 책임연구원, 공박

*** 동아건설산업(주) 주임연구원

**** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

도응력이 콘크리트의 허용 인장강도보다 크게 되면 콘크리트에는 균열이 발생하게 된다. 이 균열이 일시적이고 구조적으로 안정하다면 문제점이 없겠으나, 일반적으로 온도응력에 의해 발생한 균열은 관통균열로 진행되는 경우가 많다. 따라서 시공단계부터 사전에 수화열에 의한 온도해석을 실시하여 균열에 대비한 적절한 대책 수립이 필요한 것으로 판단된다.

본 연구는 FEM 프로그램을 이용한 해석적인 방법으로 광안대로 현수교 구간의 매스콘크리트 구조물에 기초케이슨 및 앵커블럭에 대해 균열을 최대한 방지하기 위한 최적의 시공방법, 즉 최적의 1회 타설고와 분할크기를 찾아내는 것에 주목적으로 하였다.

2. 수화열 해석을 위한 재료적 제원 및 모델링

2.1 수화열 해석을 위한 재료적 특성

광안대로 하부기초 케이슨 구조물은 당초 Type A 시멘트를 사용하는 것으로 설계되어 있었으나, 설계상의 시멘트는 내해수성에 우수하지만 수화발열이 많이 발생하여 온도균열이 예상되므로 이에 대한 대체시멘트로서 혼합형 저발열시멘트인 2성분계 시멘트 (Type B)와 3성분계 시멘트 (Type C) 사용에 대해서 함께 검토하였다. 본 연구에서 수화열 해석에 사용한 각각의 시멘트별 물성치는 표 1과 같다.

매스콘크리트에 있어서 콘크리트 내부에 발생하는 수화열 및 온도응력은 사용된 시멘트에 따른 콘크리트별 열적 특성치와 외기 환경조건에 따라서 그 크기가 서로 다르다. 따라서, 본 프로그램은 이러한 재료적 특성 및 외기의 상태를 입력하도록 되어 있으며, 프로그램 수행을 위해 필요로 하는 콘크리트의 재료적 특성은 단열온도상승시험을 실시하여 최대상승온도 (K) 및 수화반응속도 (α)를 산출하였고, 콘크리트의 탄성계수, 압축강도 및 인장강도는 콘크리트 숙성도 개념에 입각하여 산출하였다. 각각의 시멘트 종류별 콘크리트 배합은 표 2에 나타난 배합비에 기준하여 실시하였고, 그 시험결과를 토대로 수화열 해석을 위해 사용된 열적 특성치는 표 3과 같다.

표 1 시멘트 종류별 물성

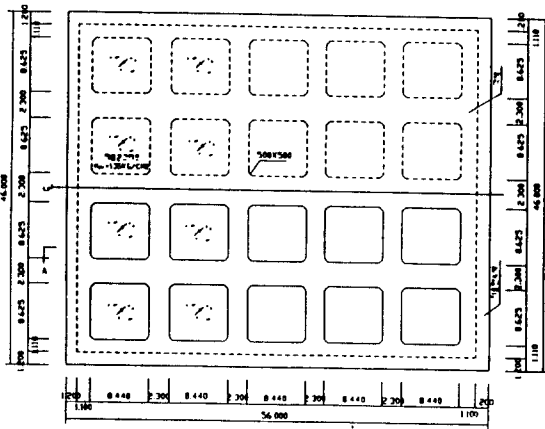
종 류	비 중	분말도 cm^2/g	응 결 시 간		안 정 도
			초 결	종 결	
Type A	3.17	3190	5:00	8:40	0.01
Type B	3.05	3830	4:50	6:40	0.03
Type C	2.85	4080	5:25	8:45	0.02

표 2 시멘트 종류별 콘크리트 배합비

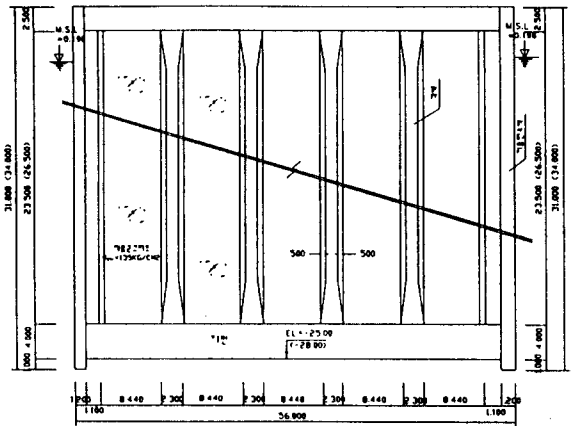
설계강도 (kg/cm^2)	시멘트 종류	W/C (%)	S/A (%)	배합비 (kg/m^3)					
				물	시멘트	세골재	조골재	AE제	SP
240	Type A	43	49	155	360	877	947	0.1188	2.52
	Type B	50	45	162	324	809	1025	0.0972	2.268
	Type C	50	45.6	160	320	817	975	0.128	2.7

표 3 해석프로그램에 사용한 시멘트별 입력 데이터

입력 항목		Type A	Type B	Type C	암 반
단열온도	K (°C)	51.5	43.8	34.1	-
상승식	α	1.05	0.63	0.45	-
열전도율 (kcal/m · hr · °C)		2.3	2.3	2.3	2.5
비열 (kcal/kg · °C)		0.25	0.25	0.25	0.18
외기대류계수 (kcal/m ² · hr · °C)		9 (상부) 5 (측면)	9 (상부) 5 (측면)	9 (상부) 5 (측면)	-
초기온도 (°C)		20	20	20	20
28일 압축강도 (kg/cm ²)		240	240	240	-
28일 탄성계수 (kg/cm ²)		2.3×10^5	2.3×10^5	2.3×10^5	3.0×10^5
열팽창계수 (1/°C)		1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
포아송비		0.17	0.17	0.17	0.17



(a) 평면도



(b) 단면 A-A

그림 1 앵커블럭 기초의 일반도

2.2 유한요소 모델링

그림 1은 앵커구체 하부기초 케이슨을 도시한 것으로 저판 크기 53.6m×43.6m×4m (가로×세로×높이)에 대해 표 4와 같이 저판을 6 종류로 분할타설하였을 때와 타설고 1, 2, 4m로 증가하였을 때에 대해서 수화열 해석을 실시하였다. 일반적으로 해석 프로그램은 매쉬의 영향을 받으므로 가능한 모든 경우에 대해 동일한 크기의 매쉬로 분할가로방향에 대해서는 1m 씩, 세로방향은 0.3m 씩, 높이방향으로는 콘크리트와 암반에 대해서 각각 0.33m, 1m 씩으로 분할하였다. 그림 2는 본 해석에 사용된 유한요소 매쉬를 나타낸 것이다.

해석 출력위치는 위치별로 수화열 해석을 실시하여 균열이 발생할 가능성이 가장 높은 위험 위치를 그림 3과 4와 같이 선정하였다. 각 분할크기별 출력위치는 구조물 크기에 관계없이 온도응력은 그림 3에 나타난 매쉬 요소에서 출력하여 각 재료별로 비교하였고, 온도의 경우는 그림 4와 같이 절점에서 출력된 값을 사용하여 비교·검토하였다.

표 4 시멘트 종류별 분할갯수와 타설높이

시멘트 종류	분할갯수	타설높이	비고
Type A, Type B, Type C	4개(21.8m×26.8m)	2m	Type C에 대해서는 해석을 수행하지 않았음
	9개(14.5m×17.9m)	1m,2m,4m	
	16개(10.9m×13.4m)	2m	
	25개(10.8m×8.7m)	1m, 2m	
	36개(9m×7.5m)		
	49개(7.8m×6.3m)		

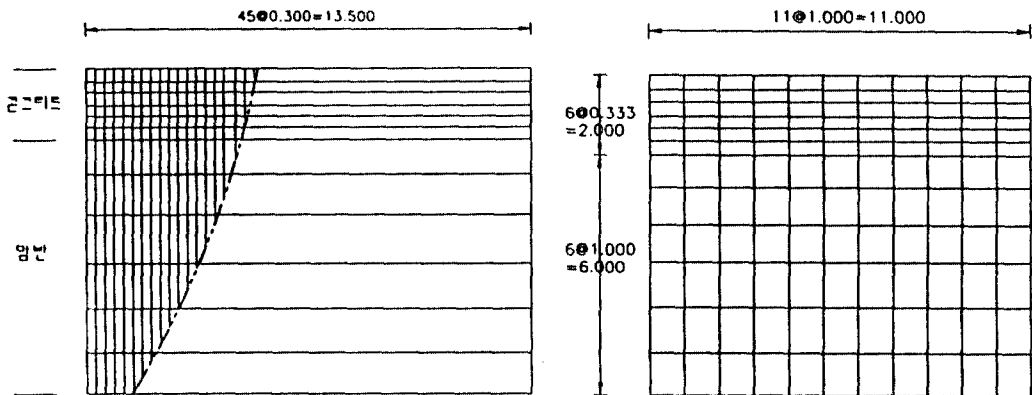


그림 2 유한요소 매쉬

3. 결과분석

3.1 시멘트 종류에 따른 비교

시멘트 종류에 따라 단열온도 상승곡선은 서로 다르며, 이로 인해 콘크리트 구조물에서 발생하는 수화열에 의한 최대 온도크기 및 온도응력값은 서로 다르게 나타난다. 따라서 그림 5와 같은 해석결과를 각각의 콘크리트별로 서로 그 크기를 정량적으로 비교하기 위해 온도발생량에 대해서는 최대온도 및 그 발생시기를, 온도응력에 대해서는 최대균열지수로 나타내었다. 표 5는 이상의 결과를 정리한 것으로 표에 나타난 해석결과에 따르면 단열온도 상승값이 큰 시멘트에서 균열발생 확률이 높은 것으로 나타났다.

3.2 분할갯수에 따른 비교

분할갯수가 증가하게 되면 이에 따라 시공속도도 늦어질뿐 아니라 시공 줄눈수가 증가하게 되어 차 후 줄눈메우기등의 번거로운 작업이 늘어나게 되며, 구조적으로도 불안정하게 된다. 따라서 가능한 균열이 발생하지 않는 범위에서 분할갯수를 줄이는 것이 경제적이라 하겠다. 본 연구에서는 시공성 확보 및 그에 따른 발생 온도크기를 평가하기 위하여 시멘트 종류별로 표 4에 기준하여 케이슨 저판을 분할하였다. 해석결과 최대온도의 발생량은 분할갯수가 작을수록, 타설고가 낮을수록 작게 나타나는 경향

을 나타내었다.

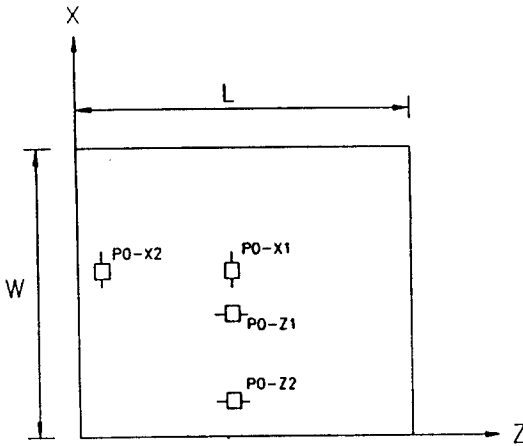


그림 3 해석프로그램 출력위치

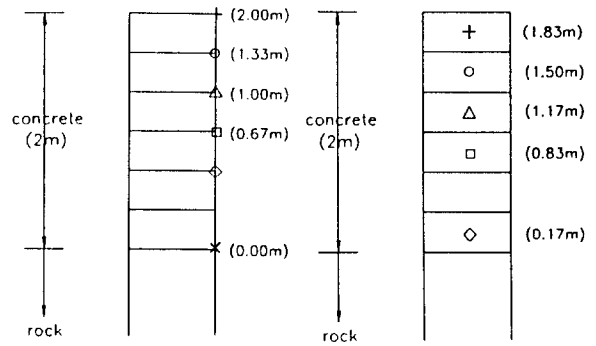
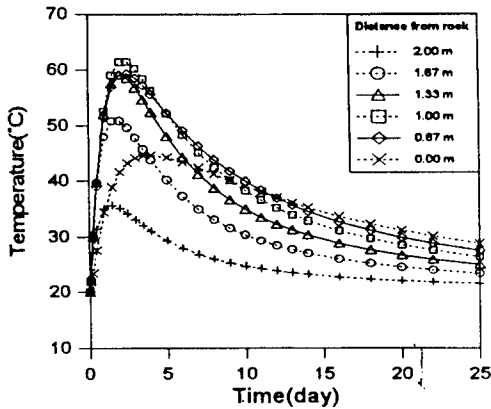
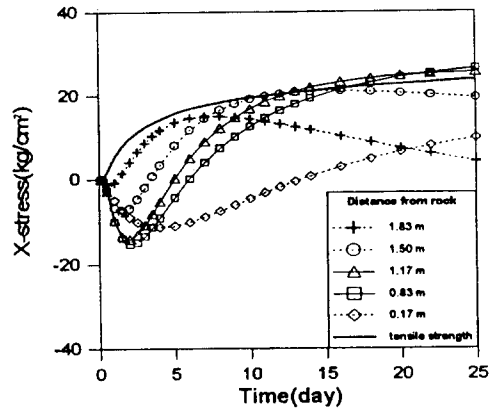


그림 4 높이별 해석프로그램 출력위치



(a) 단면 PO-Z 온도결과



(b) 단면 PO-X 온도응력결과

그림 5 온도 및 온도응력결과(Type A, 9분할, 2m)

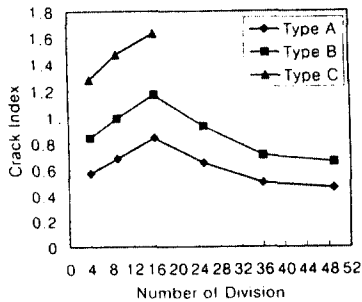
3.3 타설높이에 따른 비교

타설높이가 변함에 따라 수화열의 외부 발산 효과는 달라지며, L/H (블럭길이에 대한 높이의 비)에 의한 내·외부구속상태도 변하게 되므로 해석을 통하지 않고 수화열 발생크기로서 균열의 발생여부를 판단하기는 쉽지 않다. 일반적으로, 콘크리트의 1회 타설 높이가 줄어들게 되면 수화열 및 온도응력은 감소한다. 그러나 이러한 응력의 저감효과는 비교적 내부구속이 지배적인 경향을 보이는 구조물에 적용되며, 상대적으로 외부구속이 큰 구조물에서는 타설높이를 줄일수록 L/H 비가 증가되어, 이로 인해 외부구속도가 더욱 증가하므로 균열이 발생할 가능성이 더욱 높게 된다.

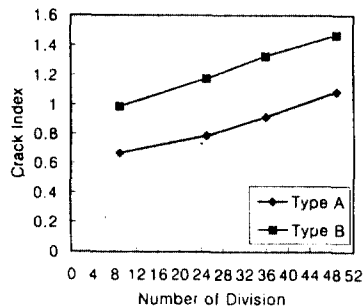
타설높이에 따른 수화열 효과를 알아보기 위하여 분할갯수를 9개로 하고 Type A와 Type C로 구

표 5 전체해석 결과표

시멘트종류	분할갯수	타설높이	최대온도		최대온도균열지수			
			발생량	균열시기	균열지수	발생시기	발생지점	
Type A	4개	2m	61.45°C	2.5일	0.57	25일	PO-Z1	
	9개	1m	50.14°C	1.5일	0.67	25일	PO-Z1	
		2m	61.45°C	2.5일	0.68	25일	PO-Z1	
		4m	70.21°C	4.0일	0.47	3.0일	PO-X2	
	16개	2m	61.40°C	2.5일	0.84	25일	PO-Z1	
	25개	1m	48.63°C	1.5일	0.79	12일	PO-Z1	
		2m	61.46°C	2.5일	0.65	2.0일	PO-X2	
	36개	1m	48.63°C	1.5일	0.92	12일	PO-Z1	
		2m	61.46°C	2.5일	0.50	2.0일	PO-X2	
	49개	1m	48.63°C	1.5일	1.09	12일	PO-Z1	
		2m	61.46°C	2.5일	0.46	2.0일	PO-X2	
	Type B	4개	2m	51.27°C	3.0일	0.84	25일	PO-Z1
		9개	1m	41.23°C	2.0일	0.99	22일	PO-Z1
			2m	51.27°C	3.0일	0.99	25일	PO-Z1
4m			60.09°C	5.0일	0.63	4.0일	PO-X2	
16개		2m	51.20°C	3.0일	1.17	3.5일	PO-X2	
25개		1m	39.98°C	2.0일	1.18	12일	PO-Z1	
		2m	51.30°C	3.0일	0.93	3.0일	PO-X2	
36개		1m	39.98°C	2.0일	1.33	12일	PO-Z1	
		2m	51.30°C	3.0일	0.71	3.0일	PO-X2	
49개		1m	39.98°C	2.0일	1.47	12일	PO-Z1	
		2m	51.30°C	3.0일	0.66	2.5일	PO-X2	
Type C		4개	2m	41.99°C	4.0일	1.28	25일	PO-Z1
		9개	1m	34.37°C	2.5일	1.50	25일	"
			2m	41.99°C	4.0일	1.47	25일	"
	4m		50.21°C	6.0일	0.89	7.0일	PO-X2	
	16개	2m	41.90°C	4.0일	1.63	4.0일	PO-X2	



(a) 타설높이 2m



(b) 타설높이 1m

그림 6 분할갯수와 균열지수의 상관관계

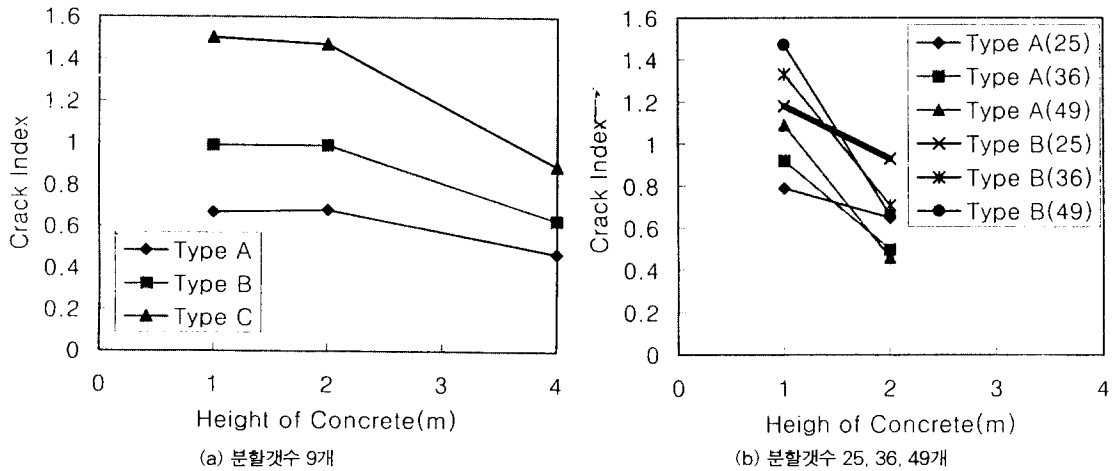


그림 7 타설높이와 균열지수의 상관관계

성된 콘크리트에 대해서 해석을 실시한 결과, 타설높이가 증가할수록 콘크리트의 최대온도와 그 발생 시기가 증가하며, 온도가 완전히 떨어지는데는 상당한 시간이 요구되었다. Type A 시멘트를 사용한 콘크리트에 대해 타설높이 2m와 4m를 비교하였을 때, 낮은 타설고에서 균열발생 확률이 저감하는 것을 알 수 있었다. 그러나, 1m와 2m의 결과를 비교하면 외부구속도의 영향으로 타설높이가 낮아짐에도 불구하고 낮은 타설고에서 균열발생 확률이 높게 나타났다. Type B와 C의 경우는 4m에서 2m로 타설높이를 줄였을 때 균열발생 확률이 줄어 들었으나, 2m에서 1m로 타설고를 감소한 경우에는 균열 저감 효율에 그다지 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

3.4 경제적 타설높이 및 분할갯수 결정

그림 6과 7은 타설높이와 분할갯수에 따른 균열지수를 나타낸 것으로 타설높이 2m의 경우 16개로 분할하였을 때가 가장 최적의 결과를 나타내고 있다. 이 결과는 분할갯수 16개를 중심으로 하여 분할갯수가 16개 이하에서는 외부구속도가 주된 영향인자로 작용하고, 16개 이상일 경우에는 내부구속이 주된 영향을 미치고 있기 때문에 가장 높은 균열지수를 나타내는 것으로 판단된다.

그림 7에서 타설높이별 균열발생 확률을 평가하여 보면 분할갯수가 36개, 49개일 경우에는 타설높이가 줄어들수록 균열발생 가능성이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 분할갯수가 36개나 49개이면 타설높이를 2m로 하였을 경우 주된 균열 발생 원인은 내부구속이므로, 타설높이를 줄이면 외부구속 조건은 다소 상승하지만 내부구속 조건을 상대적으로 크게 감소하기 때문에 균열발생 가능성이 저감된 것으로 판단된다. 따라서 내·외부 구속조건이 적절히 평형을 이루고 있을 때에 가장 경제적인 타설높이와 분할크기가 결정될 수 있는 것으로 본 연구를 통해 알 수 있었다.

4. 결 론

- 1) 일반적으로 알려진 것처럼 동일한 타설고, 타설 블럭크기에서 단열온도상승값이 큰 시멘트로 제작한 콘크리트는 균열발생 확률이 가장 높다.

- 2) 타설높이가 일정한 경우 타설블럭수에 상관없이 각 시멘트별 최대온도의 차이는 그리 크지 않으나, 균열의 발생 확률은 시멘트 종류에 대한 의존성이 높다. 균열의 발생위치는 내해수성 시멘트로 제작한 Type A형인 경우는 타설블럭의 크기에 상관 없이 거의 중앙부에서 발생하며, 혼합형 저발열 콘크리트 (Type B와 Type C형)인 경우는 블럭크기에 따라 균열의 발생위치가 변화한다.
- 3) 타설높이가 증가함에 따라 콘크리트의 최대온도와 발생시기는 증가하며, 일반적으로 알려진 바와는 달리 타설높이를 줄인다고 반드시 균열 발생 확률이 감소되는 것이 아니고, 사용된 시멘트의 종류와 내·외부의 지배적 구속조건에 따라서 타설고의 크기는 영향을 받는다. 4) Type C형의 시멘트를 사용하고, 타설고 2m로 하부 케이슨기초 저판을 9개로 분할 타설하였을 때 가장 시공성과 경제성이 우수한 것으로 나타났다.

본 연구에서 결정된 타설고와 타설블럭을 기준으로 하여 좀 더 상세한 해석을 수행하고, 사용한 프로그램의 검증 및 시멘트의 시공성을 검토하기 위하여 차후 모형타설 시험을 실시할 예정이다.

참 고 문 헌

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, pp. 101-111
3. 김진근, 김국한, 양주경, "온도저감공법을 고려한 콘크리트의 수화열 해석기법에 관한 연구", 제7권, 제6호, 1995.12, pp. 176-185
4. 강석화, 정한중, 박칠림, "매스콘크리트의 외부구속응력에 관한 검토", 한국콘크리트학회, 제8권, 제5호, 1996.10, pp. 111-122