

액화질소를 이용한 매스콘크리트의 온도제어

Mass Concrete Construction by Using Liquid Nitrogen for Temperature Control



김영석*



변형균**

손영현***

대규모의 공사현장이면 국내외현장을 막론하고 어김없이 매스콘크리트 구조물에 대한 시공방법이 큰 문제로 등장하고 있다. 이것은 온도의 영향을 충분히 고려하지 않고 구조물의 시공이 이루어질 경우 취약부에서 균열이 예상되기 때문이므로, 이에 대한 적절한 대비가 요구된다.

그러나, 매스콘크리트 구조물은 콘크리트 타설 후의 내외부의 온도변화, 그리고 중·장기적인 환경변화에 따른 콘크리트의 변형특성이 매우 복잡하여 설계자 뿐만아니라, 시공담당자들이 그에 대해 충분한 이해를 하고 있지 못하고 있는 것이 현실이다.

매스콘크리트는 콘크리트를 구성하고 있는 재료들 각각의 온도에 의한 타설시의 콘크리트 온도, 외부환경 및 경화되는 과정에서의 열전달조건등 다양한 인

자들에 의해 변형이 발생되는데, 이러한 변형에 대한 내외적구속은 콘크리트 인장강도를 초과하는 인장응력을 발생시켜 구조물에 균열을 유발시킨다.

이러한 문제에 대해 일반적으로 콘크리트 타설 전에 구성재료들의 온도를 낮추어 타설시 온도를 제어하는 프리쿨링 방법, 구조물 내부에 파이프를 설치하여 냉각수를 순환시키면서 콘크리트 타설 후 경화되는 과정에서 온도를 제어하는 포스트쿨링 방법 그리고, 적절한 온도철근을 배근하는 방법등으로 대처를 해왔다.

본 기사에서는 프리쿨링에 의한 매스콘크리트의 온도제어방법을 이용하여 성공적으로 균열을 제어한 사례를 보고하고, 향후 유사한 공사를 수행하는 경우에 조금이나마 보탬이 되도록 하려한다.

* 현대건설(주) 쿠웨이트 SABIA 화력발전소현장, 부장

** 현대건설(주) 방글라데쉬 JAMUNA 다목적교량현장, 차장

*** 현대건설(주) 기술연구소, 대리

1. 개요

현대건설(주)이 1994년 착공하여 2000년에 완공 예정으로 쿠웨이트시내에서 북쪽으로 약 100km지점에 건설중인 화력발전소 공사현장에는 intake pump house foundation, chimney foundation 과 turbine generator foundation등과 같은 많은 매스콘크리트 기초구조물이 있으며, 콘크리트 타설이 예상되는 시기의 외기온도가 최고 40℃ - 50℃이상인 유시될 전망이기 때문에 이러한 구조물들의 시공에 있어서 온도균열제어를 위한 적절한 콘크리트의 타설방안이 필요하게 되었다.

현장 Specificaton중 서중환경하에서의 매스콘크리트 타설관련 주요사항을 간단히 정리하면 다음과 같다.

- 1) 외기온도가 40℃이상인 경우 콘크리트의 타설은 중단한다.
- 2) 외기온도가 30℃이상인 경우 굵은골재는 물을 뿌려야하며, 배합수와 수송관은 직사광선에 노출되지 않도록 충분한 조치를 취해야 한다.
- 3) 타설시 콘크리트의 온도는 20℃를 초과할 수 없다.
- 4) 콘크리트의 타설은 오전시간과 저녁 9시이후에 수행되어야 한다.

상기와 같은 엄격한 Specification 하에서 골재나 배합수만의 온도를 저하시키는 일반적인 프리쿨링방법으로는 콘크리트의 온도상승을 제어하기 힘들 것으로 판단하여, 배치플랜트에서 액화질소와 냉각된 배합수에 의한 콘크리트 생산온도를 낮추는 방안을 도입하였고, 구조물을 적절하게 분할타설하는 방법을 취하였다.

본 기사에서는 기초구조물 중 intake pump house foundation에 대하여 수행된 매스콘크리트 구조물의 온도제어 사례를 중심으로 가능한 자료한 도내에서 서술하려 한다.

Intake foundation은 총 5개의 Bay로 구성되는 pump house내 벽체구조물의 하부 기초구조물로서, 폭이 약 29.4m, 길이가 32.8m, 그리고 높이가 2.5m인 매스콘크리트 구조물이다.

따라서, 본 구조물의 균열제어를 성공적으로 수행한다는 것은 추가적인 보수 및 보강공사 등 원만한 공사진행의 저해요인을 제거한다는 측면에서 중요한 사항임을 쉽게 알 수 있다.

2. 액화질소와 냉각된 배합수에 의한 온도 제어

대상구조물에 사용된 콘크리트에서는 내황산염시멘트(Type V), 굵은골재 최대치수가 25mm인 쇠석과 잔골재로 해사가 사용되었다. 콘크리트의 설계기준강도는 450kg/cm² 그리고, 배합강도는 550kg/cm² 이었다.

혼화제는 고성능감수제를 사용하여 높은 작업성을 확보하였고, 압축강도 시험결과는 재령 7일에 473kg/cm², 재령 28일에 583kg/cm² 이었다.

다음 Table 1은 본 구조물에 사용된 콘크리트의 배합비를 나타내고 있다.

Table 1 Mix proportion of the concrete

αck (kg/cm ³)	W/C	S/a (%)	Slump(mm)						Unit weights(kg/m ³)				
			0'	15'	30'	45'	60'	W	C	S	G	ADM	
450	0.36	35.7	20.5	185	180	160	140	187	520	553	995	5	

위의 배합비에서도 알 수 있듯이 단위시멘트량(520kg/m³)이 상당히 높고, 현장의 콘크리트 공사 specification 상의 온도규정을 일반적인 방법으로는 만족시키기 어려웠을 뿐만아니라, 1차적으로 고려되었던 Ice plant와 Ice breaker 설비가 없었기 때문에 콘크리트의 온도를 낮추기 위하여 현장에서 구입이 비교적 용이한 액화질소를 이용하였으며, 기존에 설비가 완비되었던 배합수 냉각설비를 사용하였다.

액화질소는 운반탱크의 배출구와 flexible한 호스로 연결된 주입용 파이프를 통하여 골재가 운반되는 conveyer belt부와 배치플랜트의 mixer에 직접 주입하였는데, 이로써 콘크리트 배합과정에서 콘크리트와 충분히 혼합되도록 하는 1차적인 온도저하효과와 배치플랜트 믹서에서 믹서트럭으로 콘크리트를 배출할 때, 믹서트럭내로 들어가게 함으로써 운반시 믹서트럭 내에서의 2차적인 온도저하효과를 기대할 수 있었다.

다음 Fig. 1은 액화질소를 이용하여 1차적으로 배

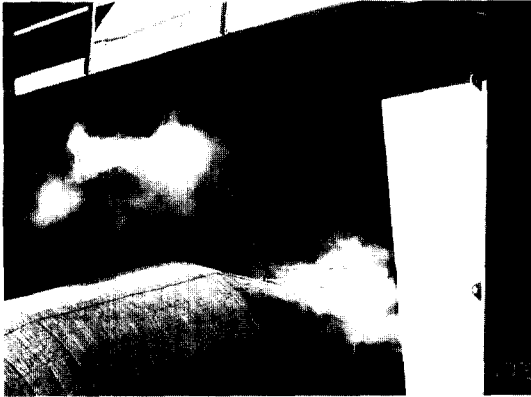


Fig. 1 Pouring concrete into the agitator truck after cooling

치플랜트 믹서에서 콘크리트의 온도강하시킨 후 박서트럭으로 콘크리트를 배출하는 장면을 보이고 있다.

한편, 냉각설비를 가동하기 전 배합수의 온도는 평균 20℃ 이상을 유지하고 있었으나, 냉각설비를 가동 후의 온도는 4℃ 정도로 대폭 감소되는 효과를 얻었는데, 이로 인하여 콘크리트의 온도가 약 4℃ 정도 저하되는 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대되었다.

한편, 약 80℃에 가까운 온도로 운반되는 시멘트는 사일로내에서 30℃ 이상의 고온으로 저장되고 있으나, 시멘트가 콘크리트의 온도상승에 미치는 영향이 골재와 배합수에 비해 상대적으로 크지 않기 때문에

Table 2 Test result using liquid nitrogen and chilled water

	Water	Cement	Fine Agr.	Coarse Agr.	Liquid Nitrogen	Chilled water	Air Temp (°C)	Calculated Temp (°C)	Measured Temp (°C)
단위중량 (kg/cm ³)	187	520	553	995	사용없음	488현	37.7	29.4	32.9
재료온도 (°C)	20.8	35.2	27.0	34.5					
단위중량 (kg/cm ³)	187	520	553	995	488주	488현	35.0	25.1	27.5
재료온도 (°C)	20.8	35.2	27.0	34.5					
단위중량 (kg/cm ³)	187	520	553	995	488주	488주	35.0	22.1	22이하
재료온도 (°C)	10	35.2	27.0	34.5					

시멘트에 대해서는 특별한 온도저감방안을 고려하지 않았으며, 단지 정기적으로 시멘트의 온도를 기록하여 콘크리트의 온도제어의 기초자료로 활용하였다.

다음 Fig. 2은 콘크리트의 온도제어를 위한 전체 시스템의 개략도이다.

다음 Table 2는 액화질소를 이용하여 시험한 결과를 나타낸 것이다.

여기서, 액화질소 사용전·후의 계산온도는 ACI 207.4R [Cooling and Insulating Systems]를 참고로 하여 다음과 같이 계산하였다.

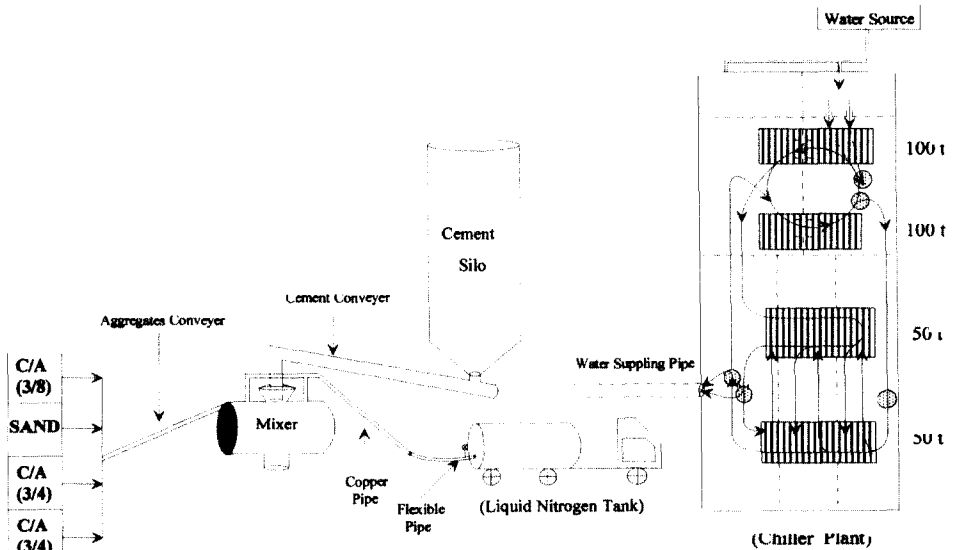


Fig. 2 Cooling scheme by liquid nitrogen and chiller plant

1) 액화질소 사용 전

$$T_c = \frac{0.22 \times (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w}{0.22 \times (W_a + W_c) + W_w}$$

2) 액화질소 사용 후

$$T_c = \frac{0.22 \times (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w - 48.8 W_{LN2}}{0.22 \times (W_a + W_c) + W_w}$$

여기서,

$T_a, W_a, 0.22$: 골재의 온도(°C), 단위량(kg/m³), 비열(kcal/kg°C)

$T_c, W_c, 0.22$: 시멘트의 온도(°C)와 단위량(kg/m³), 비열(kcal/kg°C)

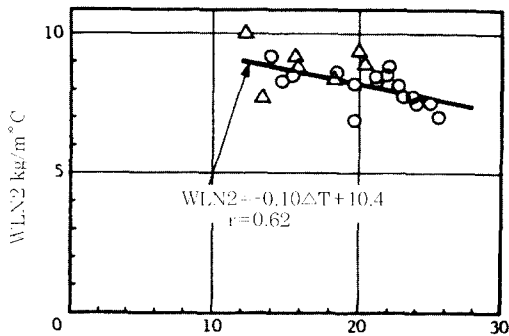
T_w, W_w : 배합수의 온도(°C)와 단위량(kg/m³)

$W_{LN2}, 48.8$: 액화질소 단위량(kg/m³), 증발열(kcal/kg)이다.

한편, 콘크리트 온도 1°C를 낮추는데 필요한 액화질소의 량을 산정하여 실제 사용량과 비교하였다.

그 결과, -180°C인 액화질소의 증발열(heat of evaporation)이 48.8 kcal/kg 이고, 비열(specific heat)이 0.2482 kcal/kg°C 일 때, 콘크리트온도 1°C를 낮추는데 6.85 kg/m³의 액화질소가 계산상 필요한 반면, Table 2의 결과에서는 1°C를 낮추는데 약 10.33kg/m³가 사용되었는데, 이것은 실제 액화질소 투입때에 외부에 유출된 량이 그 효과를 발휘하지 못하고 공기중으로 증발되어 버리기 때문이다.

이것은 그 효과를 발휘하지 못하고 기화되어 버리는 액화질소 량이 많아질 경우, 경세성 및 온도제어 효과에 큰 영향을 미치게 되므로 향후 액화질소를 이



Temperature reduction in mixed concrete, ΔT, °C

Fig. 3 WLN2 versus temperature reduction

용할 경우, 그에 대한 대책이 필요하다는 점을 시사하는 것으로 볼 수 있다.

한편, 참고로 기존의 문헌에 따르면, 아직 굳지않은 콘크리트의 온도감소량 ΔT와 1m³의 콘크리트를 1°C 낮추는데 필요한 액화질소의 량과의 관계를 다음 Fig. 3와 같이 나타낼 수 있는데, 그 량은 약 7 ~ 10kg/m³/°C 정도의 범위에서 결정되고 있음을 알 수 있다.

또한, 액화질소의 투입방법에 따른 콘크리트의 온도감소효과를 Table 3에 나타내었는데, 액화질소를 믹서트럭에 직접 투입하는 경우, 평균투입량 약 14kg/m³/°C 로 5~15°C의 온도를 감소시킬 수 있는 반면, 배치플랜트 믹서에 직접 투입하는 경우는 평균 투입량 약 10kg/m³/°C 로 1~5°C의 온도를 감소시킬 수 있는 것으로 나타나고 있어 액화질소를 사용하여 프리쿨링을 수행하는 경우 전자의 방법을 이용하는 것이 보다 효과적임을 알 수 있다.

Table 3. Comparison of WLN2

Precooling methods	WLN2(kg/m ³ /°C)							
	4	6	8	10	12	14	16	18
Directin injection into agitator truck	(5-15°C) [Redacted]							
Directin injection concrete mixer	[Redacted] (1-5°C)							

() : Range of temperature reduction in concrete

3. 블록분할을 위한 온도이력해석

배치플랜트에서 콘크리트 타설전 액화질소와 냉각된 배합수에 의한 콘크리트의 온도상승을 제어하는 한편, 대상구조물과 같이 매시브한 구조물을 일체로 타설할 경우 콘크리트 경화과정에서 빈번히 발생되고 있는 콘크리트 내외부 온도차에 의한 균열을 방지하기 위하여 3가지 경우의 블록분할에 의한 타설방안을 마련하고, 이에 대해 유한요소프로그램인 ADINAT(a finite element program for automatic dynamic incremental nonlinear analysis for temperature)를 이용하여 온도이력 해석을 수행하였고, 각각의 경우가 갖는 특징을 비교 분석하여 1회타설 블록분할방법을 결정하였다.

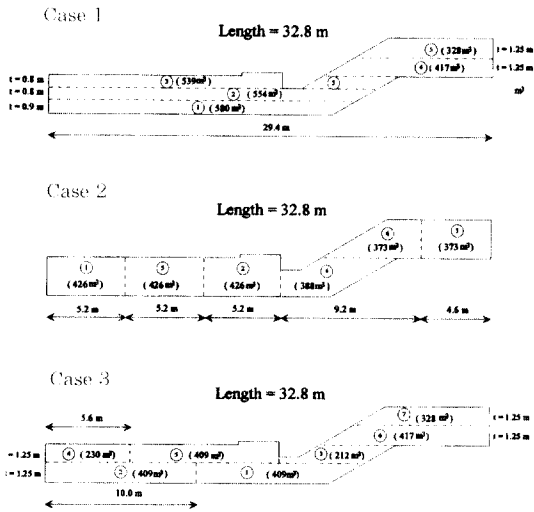


Fig. 4 Foundation dimensions and concrete placement methods

다음 Fig. 4은 Intake foundation의 제원 및 제안된 블록타설방안을 나타낸 것이다.

온도이력해석시 열전달을등을 포함한 입력특성치는 콘크리트 표준시방서를 참고하였으며(Table 4, Table 5), 유한요소모델은 8-node quadrilateral plane stress 요소를 사용하였다.

Table 4 Thermal properties of concrete and rock

	Unit weight (kg/m ³)	Thermal conductivity (kcal/inh ² C)	Specific heat (kcal/kg ² C)	Heat capacity (kcal/m ³ C)
Concrete	2350	2.3	0.30	705
Rock	1600	1.3	0.45	720

Table 5. Coefficient of heat transmission

Form stripping (days)	Concrete-Air (kcal/m2hoC)	Concrete-Wood-Air (kcal/m2hoC)
7	4.5	7.0

온도이력해석은 specification에서 규정하고 있는 콘크리트 타설시 한계 외기온도 40℃, 콘크리트 타설 온도의 한계치 20℃에 대하여 각 case에서 가장 큰 단면을 대상으로 단면내부와 외부의 온도이력을 검토하였다.

Fig. 5에는 전술한 해석조건에 대한 intake foundation에 대한 내부의 온도이력(a)과 내외부의

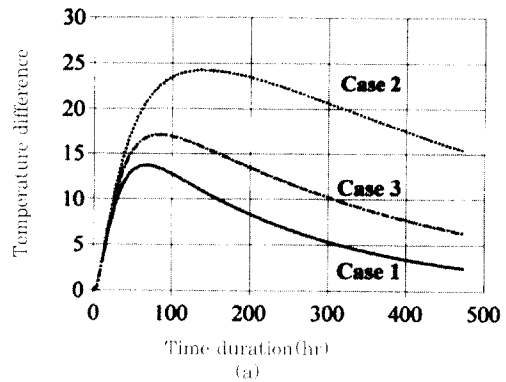
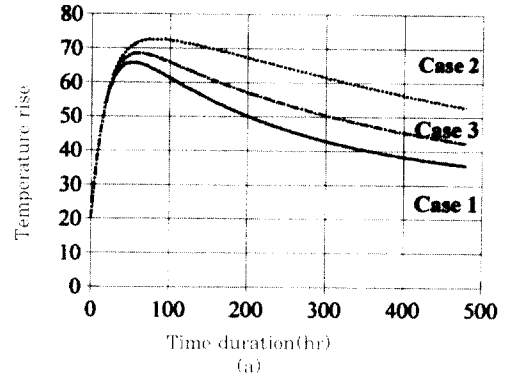


Fig. 5 Internal and external temperature difference and temperature rise

온도차(b)를 도시하였다.

그림에서 보는 바와 같이 내부의 최대상승온도는 Case 1, 2, 3에서 각각 66°C, 73°C, 69°C 까지 도달할 것으로 나타났으며, Case 2의 경우를 제외하고, 나머지 Case 1과 3의 경우는 내외부의 최대 온도차가 20°C 를 넘지 않을 것으로 예측되었고, Case 1의 경우가 가장 낮은 온도차를 보일 것으로 예측되었다.

또한, 각 타설방안이 갖는 특징을 분석하여 다음 Table 6과 같이 정리하였다.

따라서, 본 구조물 시공에서는 수평시공이음만을 고려하는 Case 1의 경우를 채택하여 시공하였다. 그러나, Case 1의 경우는 Table 6에서의 분석결과에 나타낸 것처럼 해안에 접해있는 본 현장의 특성상 바람, 온도, 습도의 다변성에 따른 열충격(thermal shock) 등에 의한 표면균열의 발생확률이 매우 높기 때문에 표면균열방지를 위한 충분한 습윤양생을 실

Table. 6 Comparison with different placing methods

	Case 1	Case 2	Case 3
블록 수	5	6	7
조인트 면적(m ²)	수평 : 1817.1	수직 : 301.8 수평 : 167.3	수직 : 1157.8 수평 : 82.0
수화열에 의한 온도균열	낮다	높다	중간
소성수축에 의한 표면균열	높다	낮다	중간
체적변화에 의한 조인트 균열	없다	높다	중간
균열에 따른 철근부식	낮다	높다	중간
예상공사기간	4~5주	3주	5~6주
장 점	-순쉬운 온도제어 -간단한 거푸집 작업	-빠른 공성 -적절한 콘크리트 용적	-순쉬운 콘크리트 타설 -비교적 쉬운 온도제어
단 점	-다량의 콘크리트 타설량 -표면양생에 특별한 주의 -넓은 수평조인트	-조인트부 균열가능 -부등침하 가능 -콘크리트 타설의 어려움 -수직조인트부 표면처리 및 철근이음	-최장 공사기간 요망 수직 및 수평조인트 처리 -철근이음

시하였다.

양생은 vibrator를 이용하여 충분한 다짐을 실시한 후, 양면 coating 된 18mm 목재거푸집을 타설 후 7일에 탈형을 시작하였다. 탈형 후 10일동안 마대로 측면과 표면에 물을 살포하는 방법으로 습윤양생을 실시하였다.

4. 결론

이상과 같이 intake pump house foundation의 콘크리트 타설시 수행된 프리쿨링방법 및 온도이력해석에 의해 성공적인 온도제어 및 균열제어를 이룰 수 있었다.

근래 구조물이 매시브해지는 경우가 많아지고 있을 뿐만아니라, 기초구조물, 교각, 벽체구조물등과 같은 다양한 구조물에서 콘크리트 온도특성과 환경변화에 의한 영향으로 균열이 빈번히 발생되고 있는

한편, 고도의 산업화에 따라 건설되는 구조물들의 중요도 및 요구되는 내구년한 또한 높아지고 있다.

따라서, 이러한 구조물들에 대해 여러가지의 프리쿨링방법과 파이프쿨링방법에 의해 콘크리트의 온도상승을 제어하고, 유한요소해석프로그램을 이용하여 콘크리트의 온도를 실측치에 가깝도록 예측하여 대처하는 등의 균열을 최소화하려는 작업이 활발히 수행되고 있다.

본 보고에서 소개한 액화질소에 의한 프리쿨링방법은 액화질소가 매우 고가라는 점에서 그 이용이 일반화되기에는 어려운 점이 없진 않지만, 향후 이 방법에 의해 배스콘크리트 구조물의 온도제어가 이루어질 경우 일조가 되었으면 하며, 그 사용 효율을 높이는 것이 경제성과 직결된다는 점을 고려하여 가능한 범위에서 사전에 배치플랜트 주변의 액화질소 주입설비를 면밀히 검토해야 할 것이다. □