

## 화력발전소의 Intake Pump House내 벽체균열 원인분석

### A Cause Analysis for the Cracks on the Intake Pump House Wall in the Power Plant

장 동 일\*, 채 원 규\*\*, 조 광 현\*\*\*, 김 광 일\*\*\*, 오 손 영 현\*\*\*  
D.I. Chang, W.K. Chai, K.H. Cho, K.I. Kim, Y.H. Son

#### 1. 서론

현재 콘크리트 구조물이 구축되는 현장이면 어김없이 균열이 큰 문제로 대두되는 사례가 빈번해지고 있다.

이러한 문제는 예전에도 상당부분에서 발생되었을 것이나, 최근들어 설계 및 시공담당자 뿐만 아니라 감리책임자들이 균열에 대한 반응을 민감하게 한 일련의 사건들이 계기가 되었을 것이다.

또한, 이렇듯 당연했을 세심한 콘크리트 품질관리는 현재의 콘크리트에 요구되는 고성능화 즉 고강도, 고내구성 및 고유동성화의 특성이 품질관리를 어렵게 함으로써 만일에 발생할 수 있는 여러 가지 문제에 대해 충분한 사전분석을 요구하게 되었다.

콘크리트의 균열은 콘크리트 내부의 골재와 시멘트 페이스트사이의 계면에 존재하는 결합에서부터 육안으로 판독이 가능한 단계에 이르기까지 재료적인 측면 뿐만 아니라, 구조적인 측면에서의 여러요인들이 결부되어 발생되기 때문에 그 원인을 정확히 판정하기란 대단히 어렵고, 동일한 구조물에 발생된 균열에 대해서도 분석하는 담당기술자마다 견해가 다를 수도 있을 것이다.

이에 본 논문에서는 벽체구조물에 발생될 수 있는 대표적인 균열형태를 중심으로 그 원인을 분석하고, 그에 대한 사전대책을 생각해보려 한다.

#### 2. 외부구속상태에서의 체적변화에 따른 콘크리트구조물의 거동

외부구속상태하에서 구조물의 균열은 구조체의 수화열에 의한 변형이 외적으로 구속되어 발생하는 응력으로 인한 것이다. 이러한 구조물은 수화열이 잘 발산하는 상대적으로 얇은 부재에서도 발생할 수 있다.

---

\* 한양대 토목공학과 교수

\*\* 신구전문대 토목과 조교수

\*\*\* 한양대 토목공학과 박사과정

## 2.1 균열발생의 원인

벽체구조물은 시간차를 두고 분할타설되는 것이 보통이다. 이미 굳어진 콘크리트가 새로이 타설된 콘크리트의 변형을 제한하여 시공직후에 부재의 길이방향에 수직인 균열이 발생하는 경우가 자주 보고 되고 있다. 이 균열은 먼저 타설된 바닥에 대하여 벽체의 변위가 제한될 때 즉, 수축하려는 거동이 구속될 때 이에 따른 구속인장응력에 의해 발생된다. 이러한 균열의 발생원인은 몇 가지로 살펴볼 수 있는데, 그 하나는 먼저 타설한 바닥 콘크리트와 새로 타설한 벽체 콘크리트와의 수화열 발생의 차이에 의한 것이며, 두번째 이유로 바닥과 벽체사이의 건조 수축의 차이를 들 수 있다.

## 2.2 균열폭과 균열간격에 관한 이론식

현행 콘크리트 표준시방서에서 사용하는 균열폭 계산식은 전단면에 인장력이 작용하는 인장부재의 최대균열폭을 다음과 같이 제안하고 있다.

$$w = 1.06R \sigma_s \sqrt[3]{d_c \cdot A} \times 10^{-5} \text{ (mm)} \text{ ----- (식 1)}$$

한편, ACI 207R에서는 실무에서 사용하기에 적당한 평균 균열간격에 관한 추정식을 제안하고 있다.

부재길이 L에 최대균열폭이 w인 균열이 N개 발생한다면, 최대균열폭과 평균 균열폭의 비는 1.5이므로[Hognestad], 길이 L의 균열폭 합은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^N w_i = N \cdot w / 1.5 \text{ ----- (식 2)}$$

길이 L의 부재의 온도강하  $T_E$ 에 의한 변형에서 콘크리트의 인장변형을  $\epsilon$ 면 균열폭의 합과 같다.

$$\frac{N \cdot w}{1.5} = 12L \left( K_R \cdot C_T \cdot T_E - \frac{f_t'}{E_c} \right) \text{ ----- (식 3)}$$

여기서,  $C_T$ 는 콘크리트의 온도팽창계수이고,  $K_R$ 은 구조물에 대한 외부구속도이다. 위의 식에서  $L \cdot K_R \cdot C_T \cdot T_E$ 는 부재길이가 L인 구조물의 총 체적변화량을 나타낸다. 또한,  $f_t'/E_c$ 는 콘크리트의 인장변형능력(tensile strain capacity)으로 콘크리트의 초기재령에서의 균열에 대해서는 0.0001이, 그리고 계절적인 영향을 겪은 이후에 발생된 균열에 대해서는 0.00015가 추천되고 있다.

이에 따라서 평균균열간격  $L'$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L' = \frac{N}{L} = \frac{w}{18 \cdot \left( K_R \cdot C_T \cdot T_E - \frac{f_{ct}}{E_c} \right)} \text{ ----- (식 4)}$$

한편, 구속도  $K_R$ 은 부재높이 h가 H까지 변화됨에 따라 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_R = [(L/H - 2)/(L/H + 1)]^{h/H} : L/H \geq 2.5 \text{ ----- (식 5a)}$$

$$K_R = [(L/H - 1)/(L/H + 10)]^{h/H} : L/H < 2.5 \text{ ----- (식 5b)}$$

### 3. 구조물의 현황

#### 3.1 재원

본 연구의 대상구조물은 화력발전소의 Intake Pump House의 벽체구조물로서, 5개 BAY(A,B,C,D,E)에 걸쳐 총 33개의 벽체로 구성되었다.

구조물의 상세한 재원은 다음 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Demension of the structure.

Bay	L1	L2	W	H
A	14.115	11.610	1.0 - 2.0	max. 10.1
B	14.215	11.610	1.0 - 1.3	max. 12.4
C	14.215	11.610	1.0 - 1.3	max. 12.4
D	14.215	11.610	1.0 - 1.3	max. 12.4
E	14.115	11.610	1.0 - 1.3	max. 10.1

\* L1과 L2는 CJ를 중심으로 나눈 것임.

본 구조물의 하부(Intake Foundation)는 각 BAY당 폭이 약 32.8m, 높이가 2.5 ~ 2.7m인 매시브한 철근콘크리트 구조물로 되어있고, 타설시 액화질소와 chiller plant를 사용함으로써 충분한 온도 및 양생관리가 이루어져 균열에 따른 상부구조에의 악영향은 없을 것으로 예상된다.

한편, 벽체의 종방향 철근은 평균 D22 @ 20으로 배근되어 있다.

#### 3.2 콘크리트의 타설현황

이 구조물에 사용된 콘크리트에서는 내황산염시멘트(Type V), 굵은골재 최대 치수가 25mm인 쇄석과 잔골재로 해사를 사용하였다.

한편, 콘크리트의 설계기준강도는 450kg/cm<sup>2</sup>으로 일반적으로 시공되는 wall구조물의 콘크리트에 비해서는 매우 높은 고강도콘크리트가 사용되었다.

혼화제는 고성능감수제를 사용하여 높은 작업성을 확보하였고, 압축강도 시험 결과는 재령 7일에 473kg/cm<sup>2</sup>, 재령 28일에 583kg/cm<sup>2</sup> 이었다.

콘크리트의 타설은 매스콘크리트 구조물임을 고려하여 수평시공 조인트를 두고 분할 타설하였으며, 1회 타설높이는 최소 3.1m, 최대 6.35m 였다. 타설시 과다한 콘크리트내부의 온도상승을 고려하여 액화질소와 chiller plant를 이용하여 타설온도를 20℃이하로 제어하였으며, vibrator를 이용하여 충분한 다짐을 실시하였고, 양면 coating 된 18mm 목재거푸집을 타설 후 3일에 탈형을 시작하였다. 탈형 후 10일동안 마대로 측면과 표면에 물을 살포하는 방법으로 습윤양생을 실

시하였다.

Table 2. Mix proportion of the concrete.

$\sigma_{ck}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	W/C (%)	S/a (%)	Slump (mm)					Unit weights (kg/m <sup>3</sup> )				
			0'	15'	30'	45'	60'	W	C	S	G	ADM.
450	37	35.7	205	185	180	160	140	185	500	589	1060	5

#### 4. 균열발생 현황

본 구조물의 균열은 재령이 약 1년 정도된 현재 BAY-A,B,C,D,E의 모든 벽체에 발생되어 있었으며, 하부콘크리트 기초와의 접촉면에서 발달되어 상부로 진전되어 있었는데 모든 균열이 연직으로 발달된 경향을 보였다.

발생시기는 콘크리트를 타설한 후 약 1개월이 초과되는 시점에서 관찰되었으며, 그 후 약 1개월~2개월 사이에 벽체 높이 약 2.5m정도까지 진전된 것으로 조사되었고, 최대균열폭은 벽체길이의 중앙에서 관찰되었다.

또한, 균열은 평균 1.5 ~ 2.0m정도의 간격을 이루고 발생되어 있었으며, 깊이는 UPV시험기로 균열부위와 비균열부위간 음파 전달속도를 측정하여 산정하였다. 다음 Table 3은 대표적인 균열부위의 위치, 균열폭 및 깊이를 나타낸 것이다.

Table 3. Surveyed results of cracks.

Surveyed positions	Crack width (mm)	Crack depth (mm)	Protection to reinforcement (mm)
BAY-A PIT#28	1.05	82	100
BAY-A PIT#27	0.9	70	100
BAY-E PIT#1	0.75	67	100
BAY-E PIT#2	0.95	74	100
BAY-E PIT#5	0.75	88	100
BAY-E PIT#6	0.60	99	100

#### 5. 균열원인분석

해안에 접해있는 현장 특성상 바람, 온도, 습도의 다변성 및 pumphouse의 형상이 해풍의 와류현상 발생의 용이성 등으로 콘크리트 수화반응후 시멘트페이스트에 흡착되어 있는 잔류 배합수가 콘크리트내의 미세공극를 통하여 증발에 따른 구조체의 체적변화가 촉진되었을 것으로 판단된다.

mass concrete 구조물에 균열이 발생하는 것은 내부 및 외부의 구속조건에 의

한 경우가 일반적이다.

본 구조물은 균열의 발견시기가 타설 후 약 1개월 후 임을 고려해 볼 때, 매스 콘크리트에서의 균열발생의 주요 요인중의 하나인 수화열에 따른 콘크리트 내외 부온도차(내부구속상태)에 의한 초기균열의 발생가능성은 액화질소 및 적절한 초기양생으로 매우 적절히 제어되었던 것으로 판단된다.

또한, 모든 구조물은 체적변화에 대해 주변의 타 구조물 및 구조물 자체의 다른 부분에 의해 구속을 받게되는데, 이렇게 구속을 받는 구조물은 구속조건에 따라 내부에 인장응력, 압축응력 및 휨응력이 발생된다.

이러한 구속응력의 개념을 외부구속이 특히 지배적인 본 구조물과 같은 벽체 구조에 직접 적용할 수 있다. 구속인장응력을 발생시키는 외부구속도(degree of external restraint)는  $L/H$ 의 함수로 나타내어지는데(식 5a, 식5b), 본 구조물 중 BAY-E PIT#6 WALL의  $L=L_1=14.115\text{m}$ , 1차타설높이 4.15m를 기준으로 하여 구속도  $K_R$ 를 구하면,  $L/H = 14.115 / 4.15 = 3.40 > 2.5$  이므로,  $h/H=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 으로 각각 변화될 때,  $K_R=1.0, 0.75, 0.56, 0.42, 0.32$ 로 각각 변화하여 구속도가 큰 하부에서 최대의 인장응력과 최대의 구속도가 발생된다.

따라서, 이러한 외부구속에 의한 균열은 구속부를 시점으로 발생되어 상부로 발달하게 되는데, 본 구조물에 발생된 균열의 경향은 외부구속에 의한 건조수축 균열의 대표적인 경향을 잘 보여주고 있다고 할 수 있다.

또한, 외부구속에 따른 수축인장응력을 제외한 기타 내부구속 및 휨하중 등을 무시하고, 대상구조체의 이론적인 전체 체적변화량 및 평균 균열간격을 (식 1)~(식 5)를 이용하여 계산하면,

$$\text{계산 체적변화량 } 2.35 \text{ mm} < \text{실측 체적변화량 } 2.60\text{mm}$$

$$\text{계산균열간격 } 2.02 \text{ m} > \text{실측 균열간격 } 1.57\text{m}$$

이다.

또한,  $L=L_2=11.610\text{m}$ 인 구간에 대해서도 동일한 방법으로 계산하면,

$$\text{계산 체적변화량 } 1.94 \text{ mm} < \text{실측 체적변화량 } 2.2 \text{ mm}$$

$$\text{계산 균열간격 } 2.91 \text{ m} > \text{실측 균열간격 } 2.5\text{m}$$

이다.

이상과 같은 방법으로 계산치를 BAY-A, B, C, D에 대해서도 최대균열폭부위를 중심으로 계산하여 다음 Table 4에 비교하였다.

현장조사된 결과들 중, 최대균열폭부위를 중심으로 계산치와 실측치를 비교해 본 이상의 결과에서, 전체 체적변화량이 실측치가 계산치보다 크게 발생되어 있고, 그 간격도 보다 조밀한 것으로 나타났다.

또한, 순수한 건조수축에 따른 체적변화량의 계산치와 다양한 영향인자들에 따라 발생되었을 실측치사이의 차이는 근소한 결과를 보이고 있는데, 이는 본 구조물의 균열은 건조수축이 지배적으로 작용되어 발생되었음을 미루어 짐작하게 하는 것이라 할 수 있다.

Table 4. Calculated and surveyed values.

BAY	PIT #	L1	w (mm)	N	Total volume change (mm)		Average crack space (m)	
		L2 (m)			Calculated	Surveyed	Calculated	Surveyed
					values	values	values	values
A	27	14.115	0.9	3	1.89	1.9	3.88	1.75
		11.61	0.8	5	2.34	2.4	2.83	2.5
B	21	14.215	1.0	5	2.02	2.8	2.33	1.75
		11.61	0.6	6	2.33	3.6	2.36	2.1
C	15	14.215	0.6	4	1.88	1.8	2.9	2.0
		11.61	0.9	6	2.43	3.2	2.37	2.24
D	9	14.215	1.2	3	1.94	2.1	3.88	1.17
		11.61	0.8	6	2.4	3.1	2.36	2.2
E	6	14.115	0.6	7	2.35	2.6	2.02	1.57
		11.61	0.9	4	1.94	2.2	2.91	2.5

## 6. 결론

이상의 자료검토 및 대상 구조물에 대해 계산치 및 실측치 등을 토대로 본 구조물의 균열의 원인에 대해 다음과 같이 결론 지을 수 있다.

본 구조물의 균열은 Intake Foundation이 벽체의 자유로운 체적변형을 구속함으로써 발생된 건조수축균열인 것으로 판단할 수 있다.

이러한 균열이 재령이 1년정도이고, 1회 타설높이가 최소 3.1m인 본 구조물에 있어서, 높이 약 2.5m정도까지 진전되어 더 이상 발전되는 양상은 아닌 것으로 판단되었다. 또한, 전체 체적변화량이 실측치가 계산치보다 크게 발생되어 있고, 그 간격도 보다 조밀한 것으로 나타났다.

이러한 현재 구조물의 재령, 실측 및 계산 균열폭, 균열간격, 진행높이를 종합하여 볼 때, 현재 발생되어 있는 균열은 비진행성인 것으로 판단할 수 있다.

또한, 조사된 대부분의 균열깊이가 철근피복두께를 넘지않고 있기 때문에 철근과 콘크리트 사이의 부착성능의 저하에 따른 구조내력의 저하는 우려되지 않는다고 사료된다.

## 참고문헌

1. “매스콘크리트 온도해석시스템 개발,” 현대건설 기술연구소 최종보고서, 1995.
2. “콘크리트표준시방서,” 건설교통부, 1996.
3. ACI Committee 207, “Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete,” ACI Manual of Concrete Practice, 207.2R, 1994.