

54층건물구조계산을 하면서 ③

Structure Calculating of the 54 Story Building

李 昌 男
건축사사무소센구조

말뚝과 저내력 Pier

사무동기초는 경암반에 지지되는 Pier로 시공했으나 전 시동의 그 많은 기초까지 같은 공법으로 시공할 수는 없었고 또한 그럴 필요도 없었다. 그러나 앞에 설명한바대로 전시동의 일부 기둥은 축력이 무려 1,100ton 이나 되어서 큰 기초가 필요했다.

처음에는 전시동 기초를 위하여 말뚝 지정으로 설계 하였고 말뚝 1본의 내력은 80ton이었다. 그러나 이것 또한 벽에 부딪치고 말았다. 600mm ϕ 말뚝을 제작할 능력이 있는 업체가 국내에 3곳 뿐인데 주문 생산에서 납품까지의 기간이 너무 길다는 얘기이다.

따라서 이것도 Pier로 설계변경 하였으나 Reverse Circulation Drill의 확보 문제로 손쉽게 뚫을수 있는 100t/m² 지내력 지반까지만 내려 정착시키는 저내력 Pier 로 계산 하였다. 이 또한 수배 가능한 장비에 맞추는 설계가 되고 만 것이다.

전시동 기둥의 축력도 가지각색이어서 여러가지 직경의 Pier가 필요 하였으나 이 역시 Pier 철관 제작비를 고려하여 1.5^m, 2.4^m 두 종류로 7 종류의 바탕 면적이 확보 되도록 확공 설계하였다.

Mat 기초와 내수판

K.T.C. 설계의 초기 단계에서 Pier장비 수배가 벽에 부딪쳤을때 거론된 방법이 Mat기초이었으나 그 선택이 보류 된 것은 부동침하와 공사비 증액 때문이었다. K.T.C의 경질지반 Level은 책상면처럼 고르지 않을뿐더러 지하 2층 바닥면의 토질 또한 균질하지 않다. 거기에서 사무동의 하중은 그림 4와 같은 사다리꼴이어서 부동침하의 가능성이 더 많았다. 일반적으로 Mat기초는 가장 비싼 기초구조 방식이다. 필자가 경험한 바로는 독립 기초의 바닥 면적이 건물 전체 바닥면의 1/3을 차지해도 독립기초 쪽이 경제적이었다.

별로 큰 지내력이 필요하지 않은 현장에서의 지내력 판정에는 다음과 같은 3단 논법적인 해석이 쓸모가 있다. 메운지 얼마 되지 않은 대지에서는 예외이겠지만 원지반에서 지하실을 파고 Mat기초로 시공 할때는 지내력 시험을 생략할 수도 있다. (Boiling, Heaving 현상이 일어나는 경우는 예외)

지하실 공사를 위하여 파낸 흙은 옛날부터 거기에 있었으므로 파낸 흙 밑의 지반은 그 파낸 흙보다 가벼운 구조

물을 안전하게 지탱할 수 있다는 논리이다. 더 적극적인 방법으로는 건물을 짓기 전 건물 무게보다 무거운 높이의 흙을 연약지반 위에 장기간 쌓아 두어 충분히 침하시킨 후 흙을 제거하는 것이다.

또 하나의 요소는 지하 수압의 이용이다. 토질에 관계없이 Mat기초바닥면이 지하수위 아래에 있으면 지하수위에서 1m 내려갈 때마다 어김없이 1t/m²의 수압이 증가하게 된다. 즉 지하수위 아래 10m에 Mat기초가 있다면 최소 10t/m²의 반력이 확보되는 셈이다. 10t/m²라면 무려 10여개 층의 하중에 해당되는데 지하수위가 높은 대지에서의 기초설계에서 항상 부딪치는 문제이다.

지하수위가 높으면 지하실 바닥은 내수부재로 설계 하여야 하는데 기둥 축력이 크지 않을때는 이 내수부재가 기초의 역할까지 하게 되어서 별도의 기초가 없어도 되는 것은 즐거운 일인데 기둥 축력에 비하여 지하 수압이 너무 크면 건물에 말썽이 일어나게 된다.

집이 위로 떠오르는 현상이다.

이에 관한 구체적인 설명은 위의 De-Watering과 Rock Anchoring에서 다루기로 하고 수압으로 인하여 건물이 떠오르지는 않는 범위의 기초구조 방식에 관한 이야기를 해 보기로 한다.

지하 1층 지상 3층인 건물에서 기둥 배열이 10m \times 9m로 구분된 평면이 있다. 기초 설계용 기둥 축력이 450ton 이고 지내력이 50t/m²라고 하면 독립 기초가 3^m \times 3^m 정도의 크기로 설계 될 것이다.

기초가 만약Mat라고 하면 10 \times 9=90m²내압판의 지반 반력은 450 \div 90=5t/m²로 지내력 50t/m²의 1/10에 해당 하는 값이다. 만약 내수부재 설계용 지하 수압이 5t/m²라면 위의 3^m \times 3^m의 독립 기초는 없어도 건물이 평형을 유지할 것이다. 또한 지하 수위가 떨어져서 내수부재에 하중이 작용하지 않는다면 전 중량이 독립 기초로 옮겨갈 것이다. 바꾸어 말하면 지하 수위의 이동에 따라 하중이 독립 기초에서 내수부재로 옮겨 다니는 것이다.

지하 수압이 5t/m²과 0t/m²이 아닌 그 사이의 수치일 때 독립 기초와 내수부재의 기능은 어떻게 될까? 형님 먼저 아무먼저 하면서 하중을 분담하는 형식이 될 것이다.

그러면 이 현상을 적극적으로 이용하여 공사비를 줄일 수는 없을까? 지하 수압으로 치켜 올려주는 량 만큼은 제외하고 나머지만을 독립기초 설계용 하중으로 사용해도 될 것인가? 라는 의문이 들게 된다.

만약 지하 수위가 설계치와 다름없이 계속 고정적으로 유지된다면 아무런 문제가 없을 것이다. 그러나 날씨가 가물어 지하 수위가 내려가서 올려 미는 힘이 없어진다면 어떻

“모든 재료는 하중을 받을 때 변형을 일으킨다. 힘 센놈이 약한 자들에게 어려운 일을 떠 맡기고 자기는 뒤에서 호령만 하는 인간 사회와는 다르다”

게 될 것인가 하는 것이 걱정거리이다.

이런 염려 때문에 기초는 기초대로 전 하중을 지탱하도록 설계하고 내수부재는 또한 장마철 지하 수압에 견디도록 계산하는 것이 일반화 되었다.

그러나 내수판과 그 밑의 흙 사이는 비어 있는 것이 아니라 서로 닿아 있으며 수위가 올라가면 흙의 입자사이의 공간으로 물이 스며들게 된다.

지하실 바닥 내수부재의 콘크리트 공사를 위해서는 물을 빼야 하고 그렇기 때문에 콘크리트는 흙과 밀착되는 것이다. 기초 바닥면과 내수판 바닥이 같은 Level일때는 그 조건 또한 다를 바 없다. 같은 지내력을 갖는 땅인데 기초 밑은 50t/m²를 지지하고 나머지 내수부재 밑은 5t/m²만 부담하도록 누군가가 교통 정리를 해 주어야 할 것이다. 이것이 부재의 변형이다.

모든 재료는 하중을 받을 때 변형을 일으킨다. 힘 센놈이 약한 자들에게 어려운 일을 떠 맡기고 자기는 뒤에서 호령만 하는 인간 사회와는 다르다.

힘 센 기초와 약한 내수판은 서로 자기 능력에 맞는 분량을 분담하는 교양과 미덕을 발휘한다.

내수판이 힘에 겨워 좀 구부러지면 기초가 모르는채 하는 것이 아니라 능력껏 버텨주 준다. 그러다가 힘이 모자라다면 “조금”주저앉아 버리고 힌숨 돌린 내수판에 짐을 “조금”넘겨 준다.

이렇게 상호 보완작용으로 상부구조물을 지탱하게 되는 것이다. (“조금”씩 침하 하면서).

그런데 말뚝 지정이나 암반에 지지된 Pier와 연약 지반에 시공한 내수판도 위와 같이 사이 좋게 서로 도울 것인가 하는 의문이 아직 남아 있다. 물론 지하수위가 내려 갔을 때 내수판 밑의 흙이 수압에 대응할만한 내력을 발휘해 주지 못하면 “갑자기”주저앉아야 하는데 말뚝이나 Pier가 그것을 막을 여력이 없으면 그 또한 “갑자기”항복하고 말 것이다.

문제는 이때 그 침하량이 허용 범위를 초과하지는 않는다는 보장이 있어야 한다. 앞에서 “조금씩”이라는 말과 “갑자기”라는 어휘의 차이가 구조방식 결정에 근본적인 요인으로 작용하는 것이다. 따라서 이의 판단은 전문 지식이 있는 자에게 맡겨야 할 것이다.

메운지 얼마 안되는 지반에 집을 지을때 기초는 경질 지반에 앉히면서 내수부재는 메운 땅에 앉히는 특수한 경우 (일반적으로는 메운 땅 위로 지하 수위가 이동하여 고정되는 예는 드물다)에는 지하 수위가 영구히 변하지 않는다는 보장이 있어야 내수부재를 기초의 일부로 취급할 수 있다.

K.T.C.의 기초는 그 물량이 엄청나게 크기 때문에 이런 여러가지 사항을 검토한 끝에 기초와 내수판이 기둥 하중을 공동 지지하는 방식으로 설계 하였다.

이는 후에 설명할 De-Watering 즉 지하 수위를 인공적으로 낮춘 것과 지질상태 및 하중의 크기를 종합 검토하여 채택한 공법인데 지하 수위는 De-Watering으로 내려 놓은 그 밑으로도 더 내려갈 가능성이 충분히 있는 대지임을 밝혀둔다.

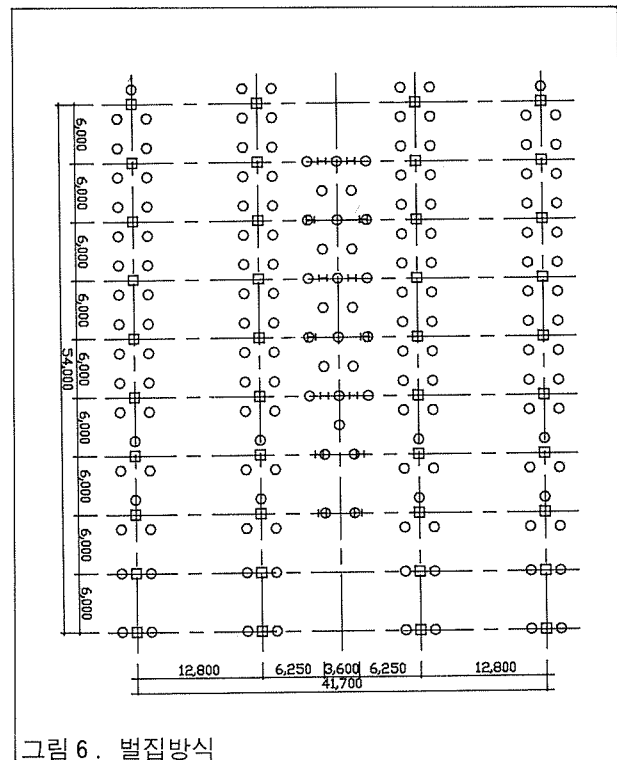
부동침하

K.T.C.는 그 평면 범위가 광활하여 Pier의 길이 차이가 크다. 한편 경질 지반이 노출된 부위의 기초는 Pier기초가 아닌 독립 기초이고, Pier로 시공 하기에는 석연치 않고 직접 독립기초로의 설계도 불가능한 부위는 독립 기초를 경질 지반까지 파고 내려 시공하도록 하였다. 그러므로 기초 종류는 크게 나누어도 3 종류나 된다.

이렇게 같은 건물에 여러가지 기초를 혼용하면 부동 침하가 일어나지 않는가 라는 질문이 많다. 같은 종류의 기초를 고집한 나머지 경질 지반에도 말뚝을 막으라고 고집하는 설계자를 본 일이 있다.

모든 기초는 하중을 받고 다소간의 침하를 일으키기 마련인데 여러 종류의 기초를 혼용할 때는 그 침하량이 될수록 같도록 유도하는 것이 바람직하다.

실상 모든 기초가 동등하게 침하하면 그 값이 크더라도 경계 부위의 처리만 해결되면 아무런 피해가 없다. 다만 부동 침하를 방지하는 가장 확실한 방법은 어느 기초도 침



“Pier 나 대형 말뚝같이 큰 지지력을 가진 지정은 되도록 기둥 중심 가까이 배열하는 것이 유리하다는 것은 실무에서 항상 확인되는 일이다.”

하량이 적도록 제한하는 것이다. 그 확실한 방법은 역시 모든 기초의 지지반이 “경질”로 통일되도록 하는 것인데 K.T.C.의 세종류 기초는 모두 이에 해당된다.

구조관계 교과서에는 같은 건물에 두 가지 이상의 기초 방식을 혼용함을 금하라고 하는데 여기 설명한 내용은 그것과 차원이 다른 것이다.

기초와 지정의 궁합

창호지 문구멍은 손가락에 침 발라서 뚫어야 운치가 있다. 방패는 창을 막는데 쓰며 대전차포는 탱크를 부수는데 쓰인다. 기초는 건물의 가장 중요한 부분의 하나인데 이는 그 지정과 어울리는 한쌍의 부부와 같아야 한다.

3,000ton 하중을 지탱하는데는 암반까지 파고 내려가 독립 기초를 설치하거나 Pier지정이 적합하며, 기둥 축력이 적은데도 지하 수위가 높아 내수판이 두꺼워질 때는 Mat 기초가 합리적이다.

연속기초, 복합기초, 독립기초, 이들 모든 기초 방식들은 그들 각각에 타당한 선정 이유가 있어야 하며 조금도 어색하거나 억지가 끼어 들어서는 안된다.

Pier나 대형 말뚝같이 큰 지지력을 가진 지정은 되도록 기둥 중심 가까이 배열하는 것이 유리하다는 것은 실무에서 항상 확인되는 일이다.

Pier는 Pier대로 건물 밑에 보기 좋게 균등 배열하고 그 위에 다시 Mat기초를 두도록 중용하는 실력자의 영향권에서 벗어나기가 구조계산 보다 더 어려웠다.

기초의 두께, 콘크리트 강도

기초의 두께와 콘크리트 강도를 결정하는데도 또 한번의

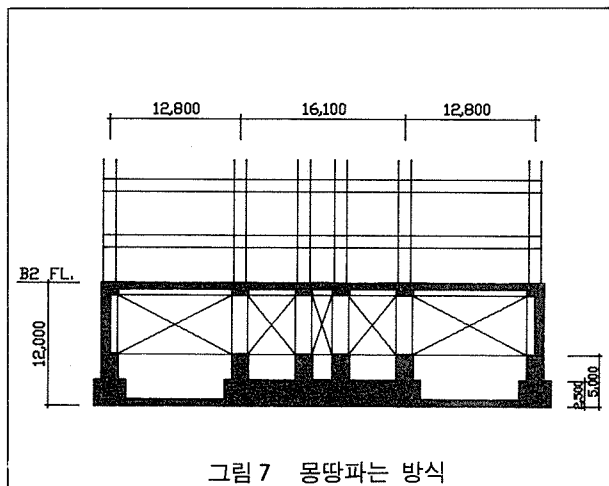


그림 7 몽땅파는 방식

홍역을 치루었다.

나무는 가지가 무성할수록 뿌리가 굵고 깊어야 한다. 54층이나 되는 건물의 단면을 그려 놓으면 역시 기초가 두꺼운 것이 얇은것 보다는 안전해 보인다. 그렇다고 해서 근거도 없이 필요 이상의 자재와 공사 기간을 낭비할 수는 없는 노릇이다. 크다고 작은 것보다 힘이 센가? (나는 작아도 센 구조인데...) 기초 덩어리가 아무리 두꺼워도 Pier가 보장되는 것은 아니며 Pier의 크기와 내력이 결정된 이상 그 위의 모든 자재는 “짐”이 된다. 도면에서 보기 좋으라고 기초를 두껍게 설계해야 하는, 구조상 비합리적이고 근거 없는 것을 감수해야 하는 입장이었다.

54층이나 되는 건물의 기초 두께는 적어도 3.5m가 필요하고 콘크리트 강도는 $F_c=300\text{kg/cm}^2$ 가 되어야 한다는 것이다.

이렇게 기본에 맞추어 어떤 테두리를 마련해 놓고 거기에다 모든 잔 가지들을 엮어 나가려 하는 Engineer의 태도는 투시도부터 그려놓고 평면을 조작하는 건축 설계와 같은 것이다.

결국 콘크리트 강도는 Pier를 $F_c=210\text{kg/cm}^2$ 기초를 사무동은 $F_c=240\text{kg/cm}^2$, 전시동은 $F_c=210\text{kg/cm}^2$ 로 계산하였고 기초 두께는 건축과 설비 공간에 이용하는 것으로 합리화시켜 총 두께 3.5m로 결정 하였다. 구조상으로는 2.1m 정도가 적당한 두께였다.

아쉬웠던 이야기들

Pier 시공장비 수배가 벽에 부딪혔던 초기단계(새 장비 도입 기간이 약 7개월 소요)에서는 가능한 여러가지 기초 방식이 거론되었다. 그 중에서 도랑파는식(Ditch Method)이 제안 되었는데 실력자들의 외면을 받아 구체적인 검토도 이루어지지 못한채 쓰레기통에 던져지는 신세가 되고 말았다.

사무동의 주요 기둥은 그림 3에서 보는 바와 같이 4열로 나란히 배열되어 있다. 이 방법은 3m ϕ Pier 시공 장비는 없고 1.5m ϕ Pier만 가능하여 건물 밑에 벌집처럼 1.5m ϕ Pier를 박은 후 Mat 기초로 설계하지는 안과, 그럴바에는 건물 밑을 몽땅 파서 건물 자체를 내리지는 두 가지 안중의 하나가 선택될 찰라에 궁여지책으로 생각해낸 P-inch Hitter였다.

벌집식 방법은 Mat기초 항목에서 가장 비싼 공사방식이라는 설명을 했었고 남은 것은 몽땅 파는 방식인데 불행히도 N.S의 기본 안이 지하 2층 이하는 용도가 없다는 것이다.

역지로 용도를 생각해봐도 정화조 밖에 없는데 그 또한 일부분에 지나지 않는다. 사무동 Tower주위는 4방이 전

“우리 나라의 대형 토목 공사는 거의가 관청에서 발주하는 것인데 특별한 Know-How로 설계한다 해도 머릿속에서 짜낸 Idea값은 인정하려 하지 않는다는 것이다.”

부 지하2 층으로 둘러 쌓여 있어서 그보다 더 깊이 파기 위하여는 흙막이 공사가 필수적인데다 경질지반 Level 이 균등하지도 않다. (약 12m를 더 파고드 그 밑을 Grouting 으로 지반개량 하여야 함) 그렇기 때문에 설사 몽땅 파더라도 또한 Mat기초가 필요하며 주위 지하실의 안전을 위하여 외벽은 토압, 수압에 견디는 본격적인 지하실 공사가 필요했던 것이다. 결론적으로 이 몽땅 파는 방식은 필요 없는 깊은 지하실을 기초 때문에 만들어야 하는 것이었고 그 공사 기간과 공사비는 입이 벌어질 정도였다. (약 13 억원으로 Pier기초의 2 배) 그러면 몽땅 파는 대신 필요한 부분만 도려내는 공사 방법은 없을까?

서울 지하철 공사의 대부분은 Open cut 로 시공했다. 흙막이 공사도 연습 많이 했으며 주위 건물이 있는데도 잘해냈다. 그 방법과 다른 것은 폭이 좁다는 것과 평행하여 4 줄로 판다는 것이다. (그림 8 참조) 지내력 100t/m² 되는 Level까지 파 내려가면 폭이 약 4.5m면 되는데 총 길이 240m를 파는것은 어렵지 않다는 것이 국내 우수건설업체 기술자들의 말이었다. 나란히 파는 도랑간의 간격이 좁아서 불안하면 그림 8 에 표시된대로 공사 순서를 ZIG-ZAG 로 하면 될 것이다. 중앙의 기둥들은 구할 수 있는 Pier 장비로의 공사를 해도 될 것이다.

그러나 이러한 Idea가 건설업자의 거센 반발을 유발한다는 것은 우리나라의 공사입찰 및 감사 제도의 모순이 시정되지 않는 한 당연한 일이다.

작업량이 많고 비싼 중장비를 사용한 공사 시행을 해야 공사비가 올라가며 감사에도 무난히 통과된다. 공사비가 올라가면 건설업자의 수입이 늘어난다. 물론 이 도랑파는 방식의 단점도 없지는 않다. 좁은 공간에서 작업을 해야 하는 불편함과 어쩌면 위험성이 있다. 총알이 빗발치는 월남에도 돈 벌러 갔던 노동력이 얼마든지 있는데 충분한 공사비를 보장해 줄수 있는 제도가 있다면 얼마든지 가능한 방법이다.

전시동 그 넓은 면적에 시공하는 기초는 더구나 좋은 방식이 있었다.

Dynamic Compaction Method라는 것인데 간단히 말하면 쇳덩어리를 Crane으로 들었다가 땅을 내리 쳐서 다지는 가장 원시적인면서도 확실한 방법이다. 지내력이 약하다는 것은 흙의 입자 하나 하나가 약하거나 이 입자 사이에 공간이 있기 때문인데 무거운 추로 내려 치면 다져지는 것은 당연한 일이다. 물론 흙의 종류와 함수량, 필요한 지내력, 또한 다져야 할 깊이에 따라 추의 무게 및 높이 등이 전문 Engineer에 의해서 계산 되어야 한다.

흙이 다져지는 깊이 H는 추의 무게 W에다 낙하고 D를 곱하여 제곱근한 값이다. 즉 $H = \sqrt{W \times D}$ 인데 예를 들어 10ton 추를 10m높이에서 떨어 뜨리면 무려 깊이 10m 까지 다져 진다는 뜻이다.

이러한 작업은 무슨 재료가 필요한 것도 아니며 특별한 시공 기술이 필요하지도 않는다. 그런데도 불구하고 널리 쓰여지지 않는 원인을 토질 전문가에게 물어 보았다.

우리 나라의 대형 토목 공사는 거의가 관청에서 발주하는 것인데 특별한 Know-How로 설계한다 해도 머릿속에서 짜낸 Idea값은 인정하려 하지 않는다는 것이다.

급히 서두르는 공사 현장에서 메운지 얼마 안되는 땅에 집을 지으려면 말뚝을 박아 기초지정으로 삼고 최하층 바닥은 흙에 지지되는 것이 아니라 떠있는 것으로 간주한 설계가 불가피한데 도무지 이 Dynamic Compaction Method를 하겠다고 나서는 업자가 없다. 그 이유가 돈 못 받는 일이기 때문이란단다.

잘 아는 약방 친구에게서 아주 좋은 약을 소개 받았다. 불과 몇백원 짜리인데 피곤해서 부르튼 입술, 무좀, 간단한 피부병에 효과가 매우 좋은것을 필자 스스로가 임상 실험을 통하여 확인 하였다. “베타딘”이다. 물론 나는 약장사가 아니다. 그 친구 말에 의하면 이 옥도정기는 값이 너무 싸고 잘 알려진 소독약이라 즉효약이라는 사실을 알려 주면 약장사가 안 된다는 설명이다.

다른 사람이 흉내내기 힘든 공법이나 제약기술 이어야 돈 버는데 이용된다는 뜻이다. *

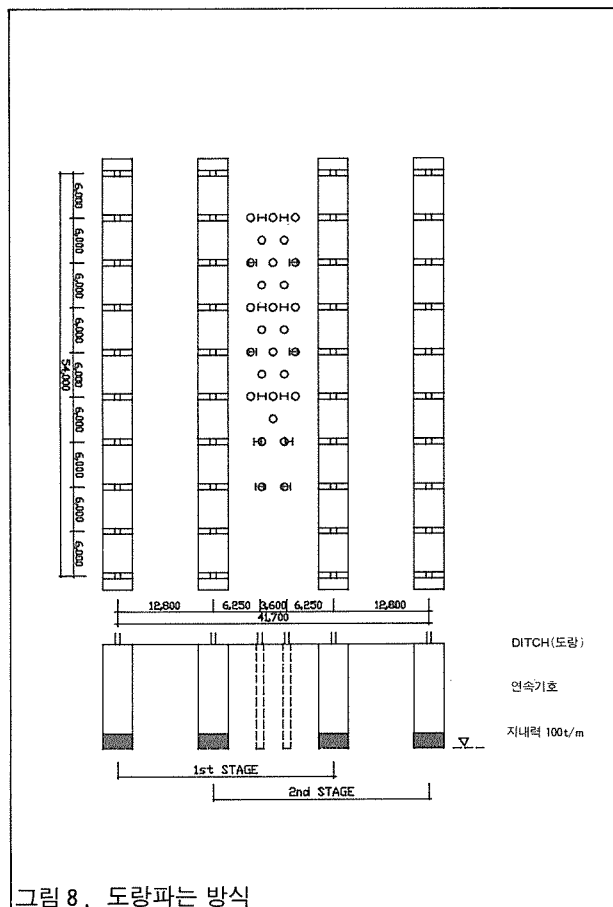


그림 8. 도랑파는 방식