

초고층 건물의 전면기초(MAT 기초) 해석 및 설계

Analysis and Design of Mat Foundation for High-Rise Buildings

홍 원 기*1

Hong, Won-Kee

황 대 진*2

Hwang, Dae-Jin

권 장 혁*3

Kwon, Jang-Hyuk

Abstract

Types of foundation of high rise buildings are primarily determined by loads transmitted from super structure, soil bearing capacity and available construction technology. The use of deep foundation of the buildings considered in this study due to the fact that rock of enough bearing capacity is not found down until 90~100m. When a concentration of high soil pressure must be distributed over the entire building area, when small soft soil areas must be bridged, and when compressible strata are located at a shallow depth, mat foundation may be useful in order to have settlement and differential settlement of variable soils be minimized. The concept of mat foundation will also demonstrate some difficulties of applications if the load bearing demand directly carried down to the load-bearing strata exceeds the load-bearing capacity. This paper introduces both the analysis and design of mat type foundation for high rise buildings as well as the methodology of modelling of the soil foundation, especially, engineered to redistribute the stress exceeding the soil bearing capacity. This process will result in the wide spread of stresses over the entire building foundation.

요 지

초고층 건물의 기초는 지반의 지지력, 경제성, 시공성 등이 고려되어 먼저 그 형태가 결정되게 된다. 이 논문에서 고려된 빌딩에서의 깊은 기초의 적용은 심도 90~100m까지 암반의 충분한 지내력이 확보되고 있지 않은데 기인한 것이다. 지반의 지지력이 전반적으로 그다지 크지 않으면서 상부 구조물이 어느 특정기둥에 상당한 축력을 미치게 되는 경우 이곳에는 상대적으로 많은 침하가 예상되게 된다. 이러한 경우 전면기초(MAT 기초)로 처리하면 지반에 미치는 큰 응력을 주위 지반으로 분산시켜 경제적이며 바람직한 설계가 가능하여 진다.

이때 약한 부분의 지반은 전면기초를 통하여 지지력의 여유가 있는 지반과 연결되게 되므로

*1 정회원, 전영(주) 엔지니어링 사업본부 부장

*2 정회원, 삼성건설(주) 기술연구소 선임연구원

*3 정회원, 삼성건설(주) 기술연구소 주임연구원

전면기초가 이와 같은 휨모멘트나 전단력등을 전달할 수 있도록 설계된다면 기초의 부등침하를 방지할 수 있게되어 상부 구조물을 부등침하로 부터 안전하게 보존할 수 있게 된다.

본 논문은 이와같이 실제 계획, 설계중인 초고층 건물의 순수전면기초 해석 및 설계로서 일반 실무에도 연결될 수 있는 설계기법과 하중이 지반의 지내력을 초과하는 경우 응력의 재분배를 고려한 모델링 기법을 소개하고자 한다.

1. 서론

초고층 건물의 기초는 지반의 지지력, 경제성, 시공성 등이 고려되어 먼저 그 형태가 결정되게 된다. 특히 지반의 지지력이 전반적으로 그다지 크지 않으면서 상부 구조물이 어느 특정기둥에 상당한 축력을 미치게 되는 경우 이곳에는 상대적으로 많은 침하가 예상되게 된다. 이러한 경우 전면기초(MAT 기초)로 처리하면 지반에 미치는 큰 응력을 주위 지반으로 분산시켜 경제적이며 바람직한 설계가 가능하여 진다.⁽¹⁾

이때 약한 부분의 지반은 전면기초를 통하여 지지력의 여유가 있는 지반과 연결되게 되므로 전면기초가 이와 같은 휨모멘트나 전단력 등을 전달할 수 있도록 설계된다면 기초의 부등침하를 방지할 수 있게되어 상부 구조물을 부등침하로 부터 안전하게 보존할 수 있게 된다.

그러나 암반층과 같이 선단지지가 가능한 지지력을 보유한 지반이 땅속 깊은 곳에 나타나게 되는 경우 말뚝과 같은 깊은 기초의 설계는 경제적으로 타당성을 잃게 된다.

특히 초고층 건물과 같이 많은 수의 깊은 말뚝을 요구하는 작업에서는 그 시공성에도 많은 어려움을 겪게 된다. 따라서 깊은 말뚝 대신 전면기초와 같은 얕은 기초로 시공의 난이도 및 경제성에서 큰 이점을 얻을 수 있게 된다. 본 논문은 90층 정도의 초고층 건물 기초를 지지하기에는 그다지 크지 않은 약 150t/m⁽²⁶⁾ 정도의 지내력을 갖는 지반의 전면기초 FEM 해석 및 응력 재분배 기법에 바탕을 둔 설계에 관한 고찰이다.

특히 시간당 100km가 넘는 강풍이 예상되며, 최대 지반 가속도 0.25g 이상의 강진이 예상되는 지역에서의 90층 정도의 초고층 건물의 기초는 상세한 응력해석을 행하여 응력의 흐름을 정확히 파악하는 일이 무엇보다도 중요하다. 특히 횡력과 건물의 사, 활하중에 의해 특정 기둥밑에 작용하는 응력이 약 200t/m²을 초과하는 경우가 나타날 수 있다. 지반의 지지력을 초과하는 부분에 대해서 경제적인 시공을 위해서는 지반 지내력 초과분의 응력 재분배를 유도하여 깊은 말뚝의 시공을 배제하여야 한다. 이때 전면기초의 휨모멘트에 의한 철근배치는 수정되어 재분배되는 응력을 지지력이 초과하지 않은 부분의 지반으로 전달하게 된다.

또한 횡력 및 수압에 의해 기초가 부상하는 경우의 방지를 위하여 지반 스프링을 교정하는 비선형 해석기법 및 인장 말뚝의 해석 및 설계에 관해서도 기술하고자 한다.

미국등 풍하중이나 지진하중이 큰 지역에도 전면기초는 많이 사용되고 있는 실정이며, 이는 전면기초가 갖는 경제성 및 해석의 정확성에 대한 거동파악의 확신에서 가능한 것이다.

본 논문은 이와같이 실제 계획, 설계중인 초고층 건물의 순수전면기초 해석 및 설계로서 일반 실무에도 연결될 수 있는 설계기법을 소개하고자 한다.

2. 건물기초개요, 하중조건 및 전면기초 구조물의 FEM 해석

그림 1이 본 논문에서 해석, 설계하고자 하는 전면기초 위에 건설될 86층 및 68층의 초고층 건물이다. 86층 건물은 6개의 주기둥과 51개의 작은 기둥, 68층 건물은 43개의 기둥에 의하

여 지지되고 있으며 기초 및 건물의 외곽부에는 벽이 시공될 예정이다.

기초에 전달될 하중은 사하중, 활하중 등 수직하중과 지진, 바람의 횡력에 의한 압축력 및 인장력으로 나눌 수 있다. 이와 같은 하중은 column load rundown의 절차 및 건물구조해석 전문 프로그램인 ETABS를 사용하여 계산하였다.⁽²⁾

상부구조물 구조해석 결과 86층의 주기둥에는 10,000 ton의 큰 하중이 집중되어 그 아래 부분 기초에는 상당한 응력이 전달됨을 알 수 있다. 그림2에서 보이듯이 본 논문에서 해석될 전면 기초 구조물의 크기는 140m×86m로서 기둥으로 부터 전달되는 하중에 따라서 각각 4.5m, 3.5m, 및 2.0m두께의 3개지역으로 나누어 고려하였다. 또한 그림2에서는 기초구조물 해석을 위한 FEM Mesh도를 나타내고 있다.

표1은 설계절차에서 고려되어야 할 하중조합의 경우를 나타내고 있다. 모두 11가지의 경우에 대해 해석하였으며 각각의 경우에 대해서 기초구조물의 punching shear 및 모멘트 분포를 점검함과 동시에 지반의 지지력에 대한 검토를 수행하였다.

표 1.

LOAD CASE	내 용
1	DEAD
2	DEAD + LIVE
3	D + L + EX
4	D + L + EY
5	D + L - EX
6	D + L - EY
7	D + WP
8	D + WP + EX
9	D + WP + EY
10	D + WP - EX
11	D + WP - EY

본 해석에 사용될 해석 프로그램은 SAFE⁽³⁾로서 유한요소법에 의한 슬래브 전용 해석 프로그램이다. SAFE는 기초를 슬래브요소로 가

정하고 지반은 등가 스프링으로 치환하여 모델링하게 된다. 지반의 경우 전체표면에 압축력이 작용하게 되는 경우는 지반에도 압축력이 작용하게 되므로 지반 반력 계수를 계산하여 지반 모델링이 가능하게 된다. 그러나 횡력에 의해 기초에 인장력이 전달되는 경우는 지반 스프링을 제거하여 인장력이 주변의 압축력을 받는 부분으로 분포되도록 모델링이 되어야 한다. 즉, 어느 한 절점에 인장력이 발생하게 되면 그 절점 스프링을 제거한 후 반복 수행하여 인장력을 압축 스프링으로 분배시켜 주어야 한다. 이와 같은 반복수행을 인장력을 받는 지반 스프링이 없어질 때까지 반복행해야 하므로 계산 시간량이 상당히 많아지게 된다. 지반은 풍화합으로 구성되어 있으며 지질조사에 의해 암반의 지내력은 약 150ton/m² 정도로 밝혀졌다.

3. 인장말뚝의 설계 및 모델링

인장력이 작용하는 기초구조물의 경우 부상을 방지하기 위하여 인장파일을 설치하여야 한다. 인장파일의 지지력은 다음 3가지 경우의 최소치로서 산정되도록 하였다. 첫째로는 인장파일 자체의 인장 보유내력이다. 그 값은 다음의 식에서 구할 수 있다.

$$F_1 = A_{steel} \cdot f_y \quad (1)$$

여기서 A_{steel} 은 철근의 단면적

f_y 는 철근의 인장항복응력

둘째로는 인장말뚝과 지반사이의 마찰력으로 제한될 수 있으며 마찰력에 의한 인장말뚝의 인장지지력은 다음식에서 구할 수 있다.

$$F_2 = 2 \pi r l \cdot f_s \quad (2)$$

여기서 r 은 말뚝의 반지름

l 은 말뚝의 길이

f_s 는 주변 마찰응력으로 50ton/m²

마지막으로 그림3에 보이는 것처럼 기초 암반의 파괴형상에 따라 인장지지력을 계산할 수 있다.

$$F_3 = V_{soil} \cdot \gamma_{soil} + V_{pile} \cdot \gamma_{pile} \quad (3)$$

여기서 V_{soil} 은 암반파괴면의 체적

γ_{soil} 은 암반의 단위중량

V_{pile} 은 파일의 체적

γ_{pile} 은 파일의 단위중량

이러한 해석결과로 부터 인장말뚝으로 사용될 지름 80cm의 콘크리트 말뚝의 인장저항력은 2500ton으로 선정되었다. 인장말뚝도 역시 스프링으로 모델링되어 FEM해석을 수행하게 된다. 스프링계수는 AE/L 로 계산될 수 있으며 압축력이 작용하는 경우는 인장말뚝 마찰력으로 부터 얻을 수 있는 압축 지지력은 무시하였다. 그림4에서 그림 14까지가 하중조합에 의한 기초구조물 및 지반의 유한 요소해석 결과이다. 앞서 기술된 바와 같이 횡력에 의해 인장력이 작용하는 부분은 반복해석을 통해 순차적으로 인장스프링을 제거하여 압축력을 받는 부분의 지반지지력을 점검할 수 있도록 하였다.

4. 지반응력 재분배를 이용한 소성설계

그림8의 하중 조합의 경우 횡하중에 의하여 지반에 가해지는 응력은 약 $200\text{ton}/\text{m}^2$ 가량이 되는 것으로 계산되었다. 이 경우 이 부분에는 깊은 파일의 시공이 필수적이거나 양질의 암반층이 나타나는 것은 약 70~80m 정도의 깊이로서 파일시공으로는 경제성이나 시공성에 상당한 문제점이 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 과다하게 응력집중이 되는 부분의 응력을 비교적 여유가 있는 부분으로 분포시켜 응력집중현상이 완화될 수 있도록 탄소성 응력 재분배 개념을 암반해석에 적용하였다.⁽⁴⁾ 이 부분의 암반은 $150\text{ton}/\text{m}^2$ 의 응력지까지는 충분한 지내력을 확보하고 있다. 이 부분에 $150\text{ton}/\text{m}^2$ 이상의 응력이 가해 지게 되는 경우 이부분이 전체 기초크기에 비해 그다지 크지 않으며 동시에 기초 구조물이 분배되는 응력을 전달할 수 있도록 설계된다면 지반이 파괴 또는 소성영역으로 들어가기 전 지내력 초과분의 응력이 덜 집중되는 부분으로 분배가 가능하게 된다. 즉, 기초구조물은 탄성 상태에서 설계되는 것이 아니고 지반의 비탄성 거동이 고려되는 비선형, 비탄성 해석의 결과

로 설계할 수 있는 것이다.

사용 프로그램 SAFE는 선형, 탄성프로그램이므로 해석 모델링은 다음과 같은 기법을 거쳐 수정되었다. 먼저 응력이 집중되는 부분의 면적을 산출하여 암반의 지지력을 곱한 것이 전체 응력집중 부분이 소성범위로 들어가기 전에 지지할 수 있는 지내력이 된다. 그 후 소성범위로 들어가게 되면 이 부분의 지반은 더 이상 하중을 지지하지 않게 되며 초과분의 하중은 기초 구조물을 따라 주변의 지반으로 분배되게 된다. 상부구조물에서 전달되는 하중에서 지반이 탄성한계내에서 지지할 수 있는 지내력 만큼을 줄여줌과 동시에 응력이 집중되는 부분의 스프링을 제거하여 준다면 응력집중지역의 하중분배가 FEM해석상 모델링이 가능하여지게 된다. 이때 응력집중 부분에는 스프링이 지지되지 않으므로 상부에서 전달되는 하중은 전적으로 기초구조물을 통해 옆부분으로 이동 분포하게 된다. 그림8은 지반에 작용하는 압축응력이 $200\text{ton}/\text{m}^2$ 로서 지내력 $150\text{ton}/\text{m}^2$ 를 크게 상회하는 것을 나타내고 있다. 이 경우 파일의 사용 대신 전면기초를 사용하기 위해서 비탄성 해석을 수행하였다. 그림8의 응력집중 부분의 스프링을 제거하는 대신 이 부분의 하중을 이부분 지반의 탄성지내력 만큼 감소시켜 유한요소해석을 수행한 결과는 그림15에 나타내었다. 응력집중 부분이 모두 지내력 $150\text{ton}/\text{m}^2$ 범위내로 계산된 반면 주변 암반에는 탄소성 응력분배 해석을 행하지 않은 그림8보다 광범위하게 높은 값을 나타내고 있다. 이는 응력집중된 지역의 지반의 지내력을 초과하는 응력이 주변으로 분포, 이동된 결과로 기초구조물을 지지하고 있는 암반의 모든 부분이 지내력 $150\text{ton}/\text{m}^2$ 범위내로 만족되고 있음을 보여주고 있다.

5. 결론 및 설계에 관한 제안

암반의 모델링을 위한 지반 반력 계수는 $0.0025\text{ton}/\text{cm}^3$ 으로 기초 구조물 모든 절점부분의 침하량을 계산 하였다. 표2에서 보는 바와 같

이 전체적인 절대 침하량은 기초구조물의 두께에 따라 다소 차이는 있지만 86층 주기둥 아래 부분은 약 6~8cm 정도의 침하가 예상되고 있다.

표 2. MAT 두께에 따른 기초침하의 변화

두께 좌표	3.0M, 3.0M	3.5M, 3.0M	4.0M, 3.0M	4.5M, 3.0M	5.0M, 3.0M
(15,35)	7.0550	6.8151	6.7300	6.5966	6.3771
(15,31)	7.1086	6.9372	6.6750	6.6270	6.4051
(23,27)	7.4518	7.1788	6.9272	6.7256	6.4517
(24,22)	6.6741	6.4869	6.3095	6.1721	6.9541
(37,17)	4.1414	4.1493	4.1641	4.2091	4.1588
(37,30)	4.4039	4.5484	4.6361	4.7129	4.6676
(35,52)	4.3834	4.3398	4.2989	4.2892	4.1878
(23,43)	7.6640	7.2650	6.9381	6.6898	6.3850
(23,38)	8.0710	7.6607	7.3128	7.0408	6.7125
(25,37)	7.7354	7.3829	7.0745	6.8306	6.5231
(27,36)	7.3550	7.0780	6.8229	6.6172	6.3386
(25,33)	7.4382	7.1961	6.9542	6.7527	6.4737

그러나 상부구조물 비구조체의 손실을 방지하기 위하여 기초구조물의 상대변위는 그림 14 처럼 3cm 정도로 제한될 수 있도록 설계하였다.

표 3은 86층 및 68층 부분 슬래브의 punching shear에 관한 점검이다.

해석에 고려된 최악의 하중조건에 대하여 슬래브의 압축강도에 따른 슬래브의 punching shear의 내력을 나타내고 있다. 86층의 경우 콘크리트 슬래브 압축강도를 5000psi로 시공한다면 하중조합 사하중 + 활하중 + 풍하중(x방향)에 대하여 전단내력은 0.041 ton/m²를 나타내고 있으며 최소한 기초두께가 4.5m를 초과해야 함을 알 수 있다.

지반의 비탄성 해석개념을 설계에 반영하는 일련의 과정을 소개하였다. 본 건물의 기초설계에서 나타났듯이 약 30% 정도 초과되는 응력을 깊은 파일없이 지반의 탄소성 모델링 기법을 적용해 기초구조물의 광범위한 부분으로 분포시켜 소요 주철근을 설계할 수 있었다. 이때

표 3.

			F' _c = 3000 PSI	F' _c = 4000 PSI	F' _c = 5000 PSI
$V_{allow} = \alpha \sqrt{F'_c}$			0.0324	0.0374	0.0410
LOAD CASE	SHEAR (TON)	THIC (CM)	SHEAR FORCE(TON/CM ²)		
D+L+ EX	9.6	350	0.0274	0.0274	0.0274
D+L- EX	12.0	350	0.0342	0.0342	0.0342
D+L+ EY	13.0	350	0.0371	0.0371	0.0371
D+L- EY	11.2	350	0.0320	0.0320	0.0320

지반의 탄소성개념을 도입하여 해석한 경우의 지반처짐은 그렇지 않은 경우의 해석치 보다 작게 나타나게 된다. 따라서 상부구조물의 비구조체 보호에도 더 효과적인 것으로 판단된다. 초고층 건물의 기초 설계에 있어서 실제적으로 이용될 수 있는 지반 탄소성 모델을 전면 기초 구조물 FEM 해석에 도입하여 설계절차를 소개하였고 향후 초고층 건물시대의 도래를 앞두고 보다 경제적이고 신뢰적인 설계기법과 그 응용예를 소개하였다.

참 고 문 헌

1. 변동균, 신현목, 문제길(1987), 철근콘크리트, 동명사
2. Joseph E. Bowles, Foundation Analysis and Design, 3rd Ed., Mc Grow Hill, pp.349~374
3. Hong, Won-Kee, Dynamic inelastic Analysis of tall Buildings 1993. 4., Proceeding, ASCE Structures Congress of 93. LA, U.S.A.
4. Habibullah, A., "SAFE-Slab Analysis by the Finite Element Method", Computers & Structures, INC., Berkeley, California, 1988
5. American Concrete Institute "Building Code Requirements for Reinforced Concrete, (ACI 318~83)", American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1983.
6. 지질조사보고 China Non-Ferrous-Metal Industry Changsha Survey Institute Hainan Branch 1993.5 (접수일자 1994. 12. 9)

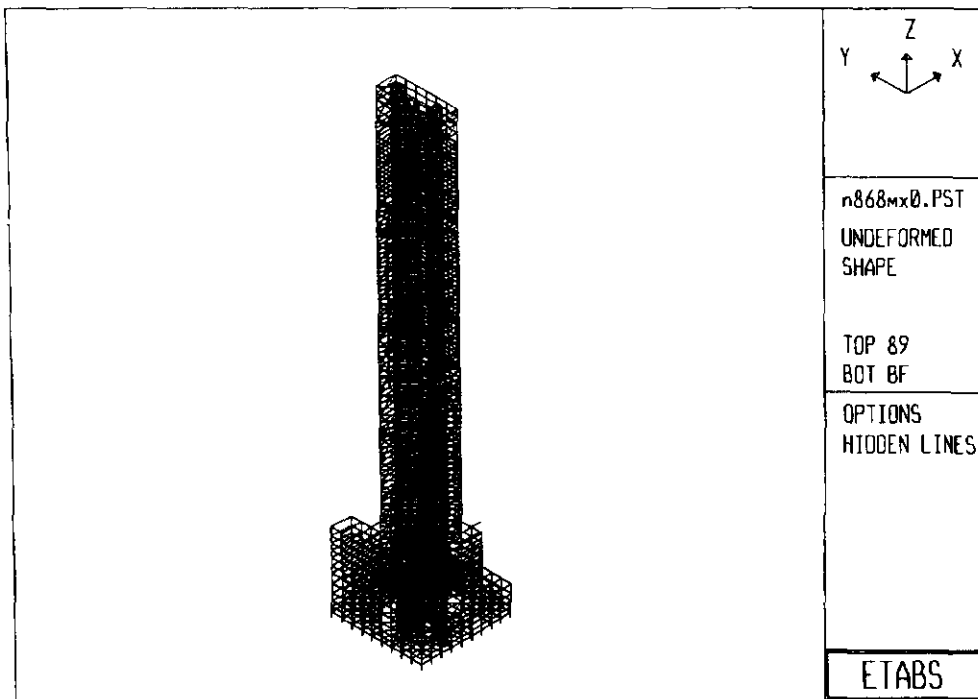
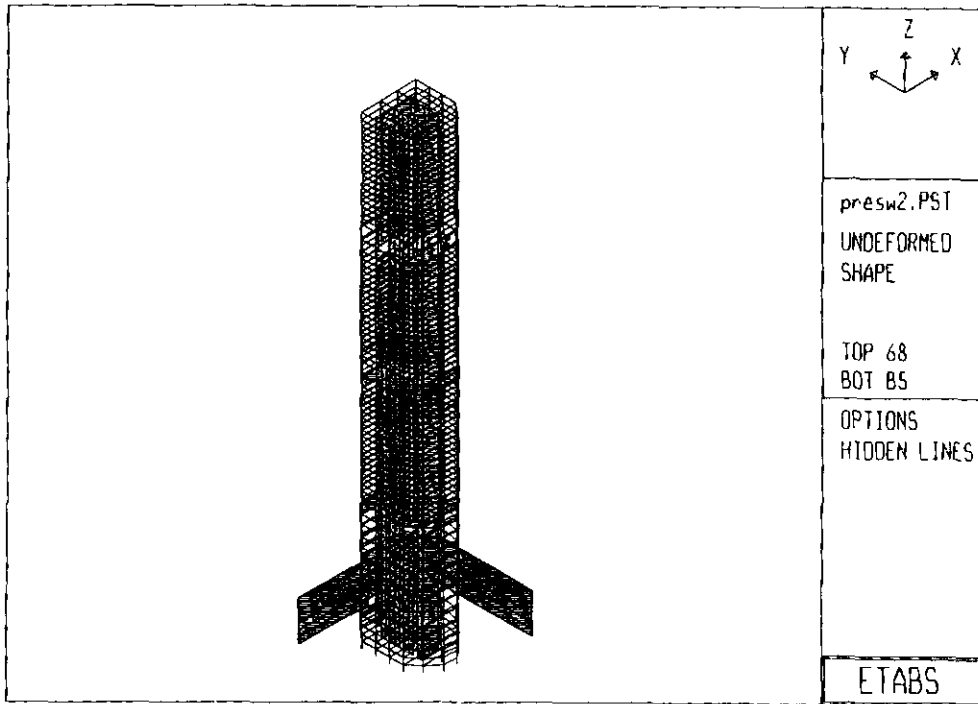


그림 1. 68, 86층 초고층 건물과 전면기초

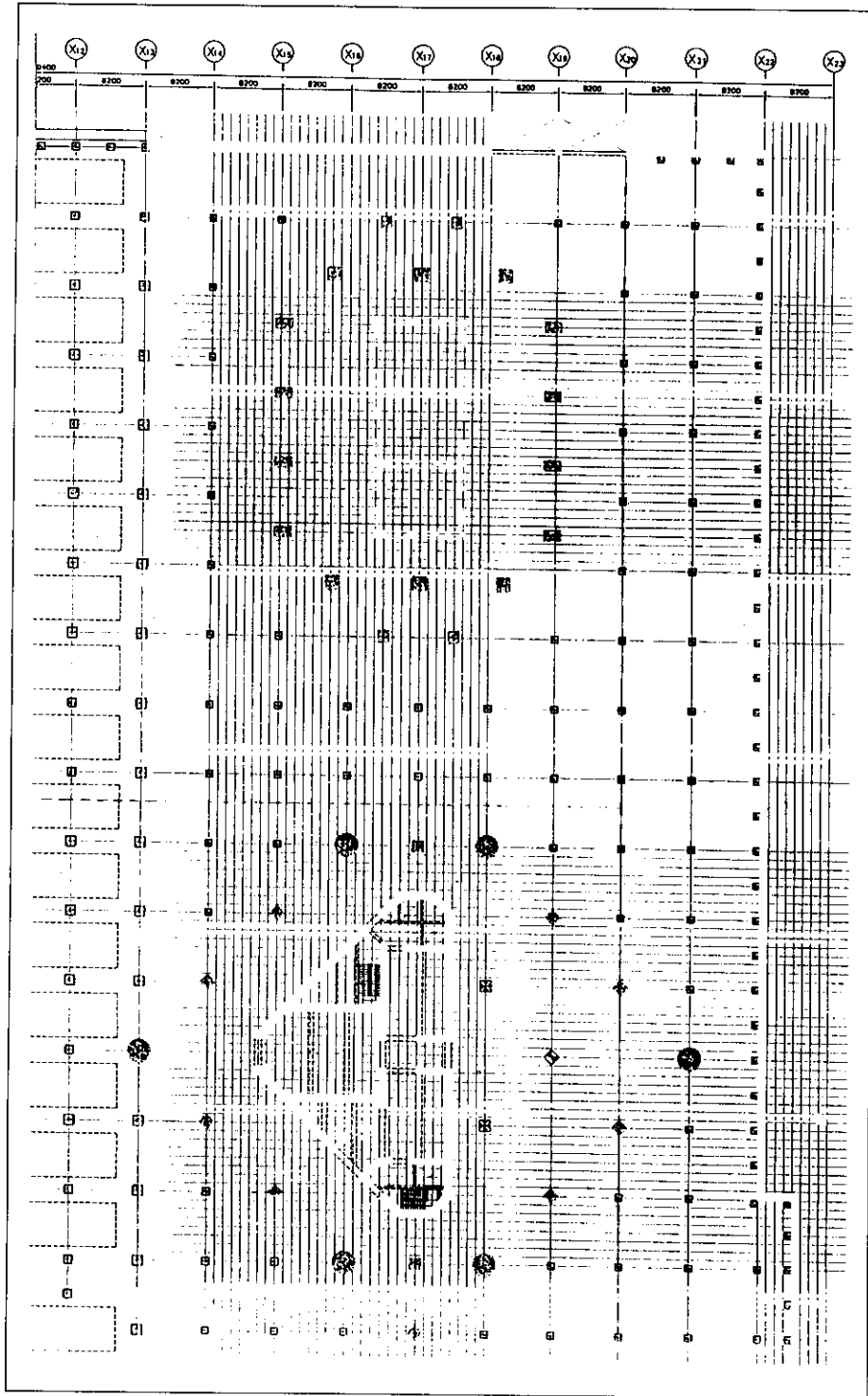


그림 2. 전면기초 건물의 FEM MESH

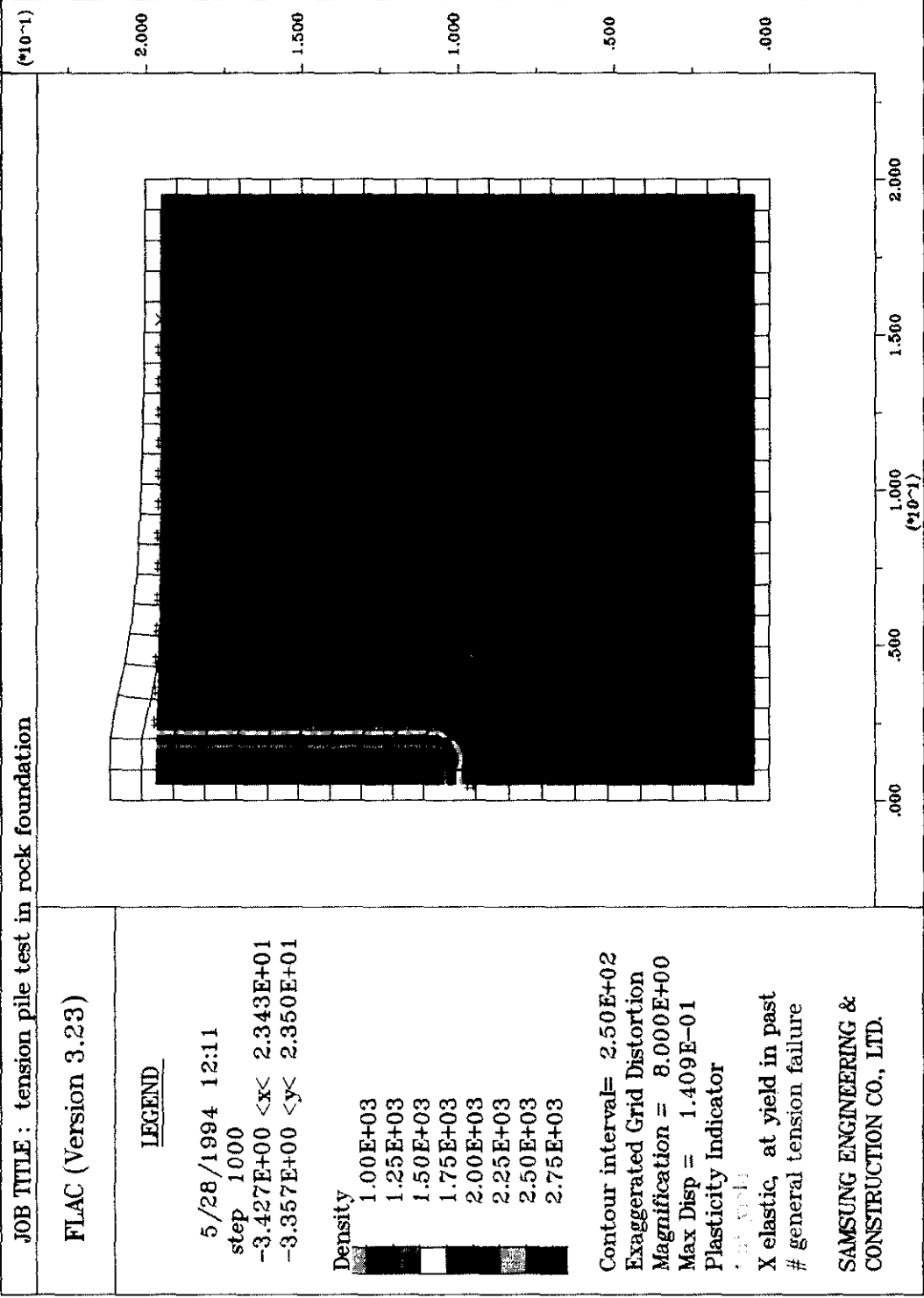


그림 3. 기초 암반의 파괴형상

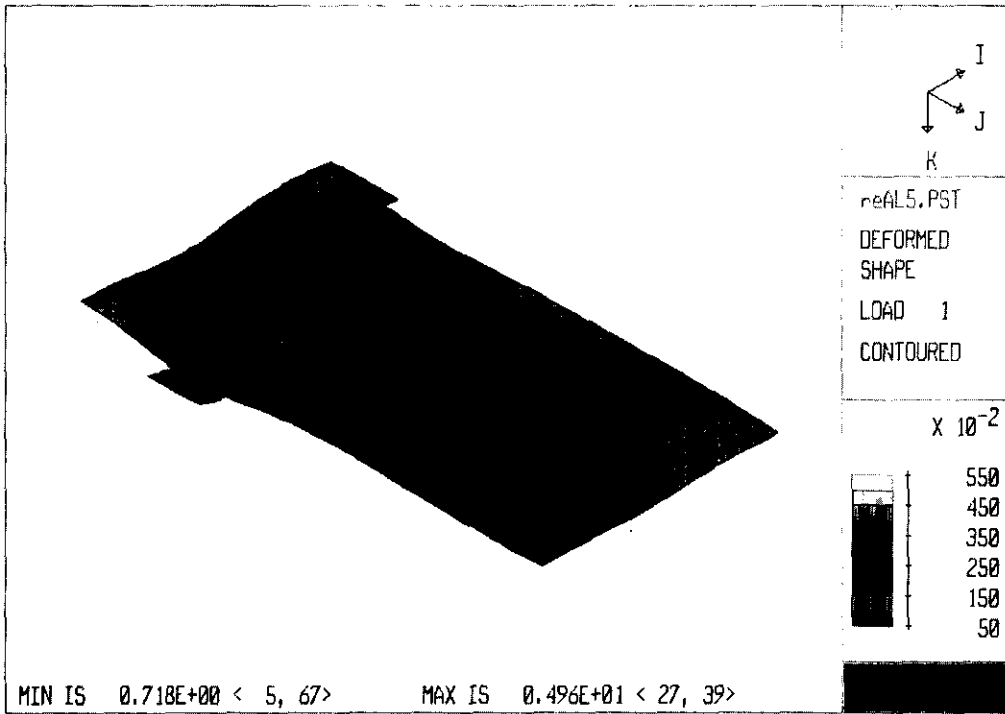


그림 4. (a) Dead load 에 의한 침하

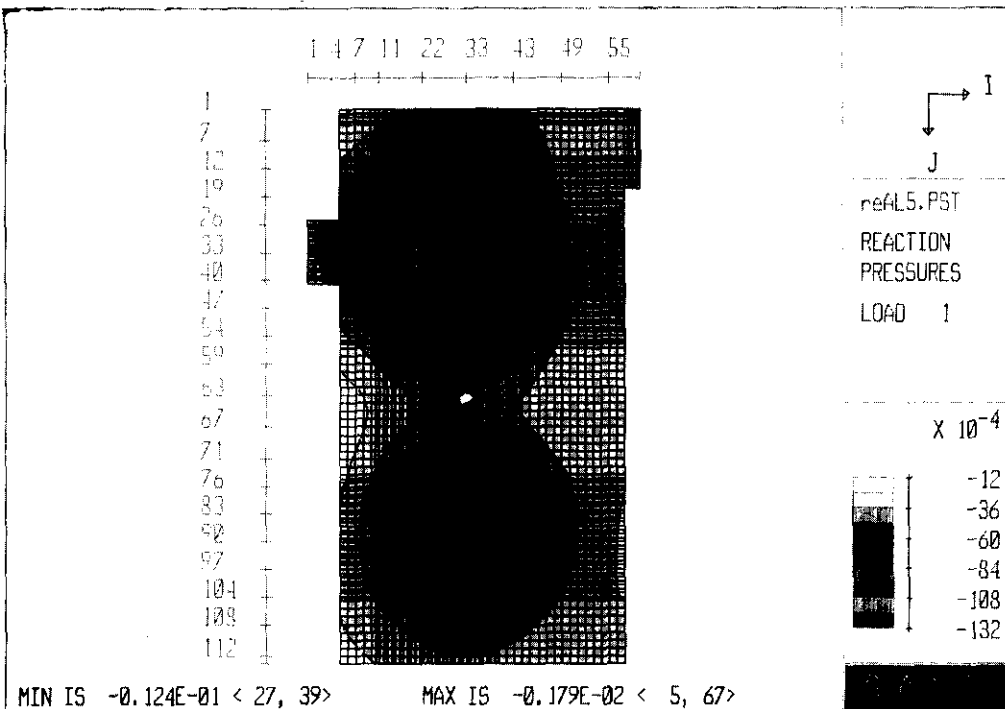


그림 4. (b) Dead load에 의한 pressure

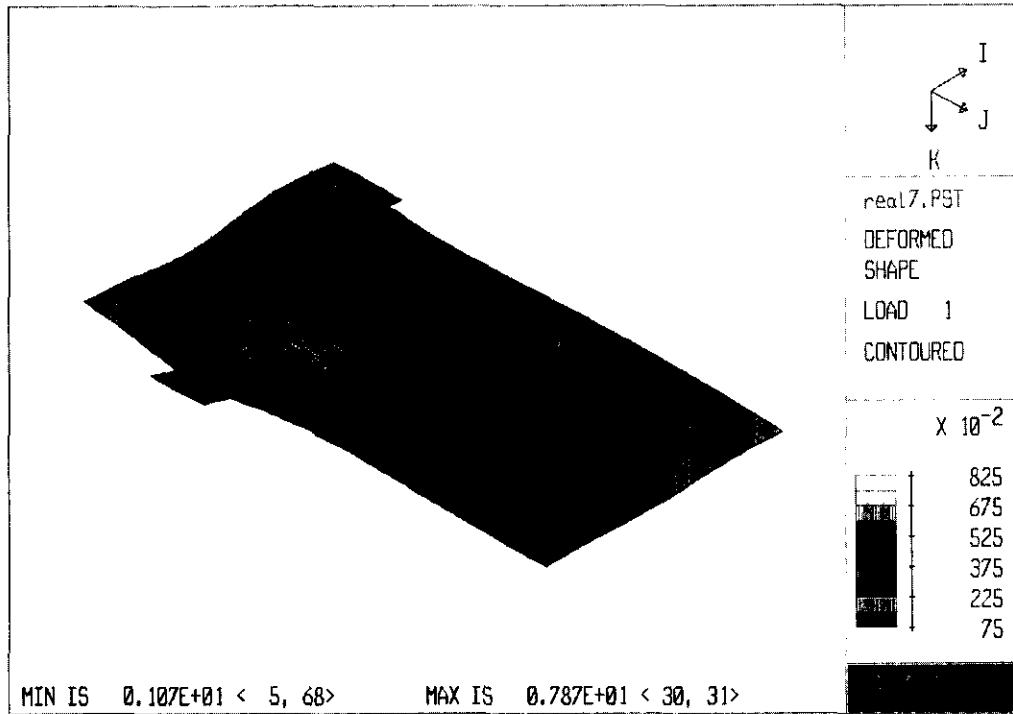


그림 5. (a) Dead load + Live load에 의한 침하

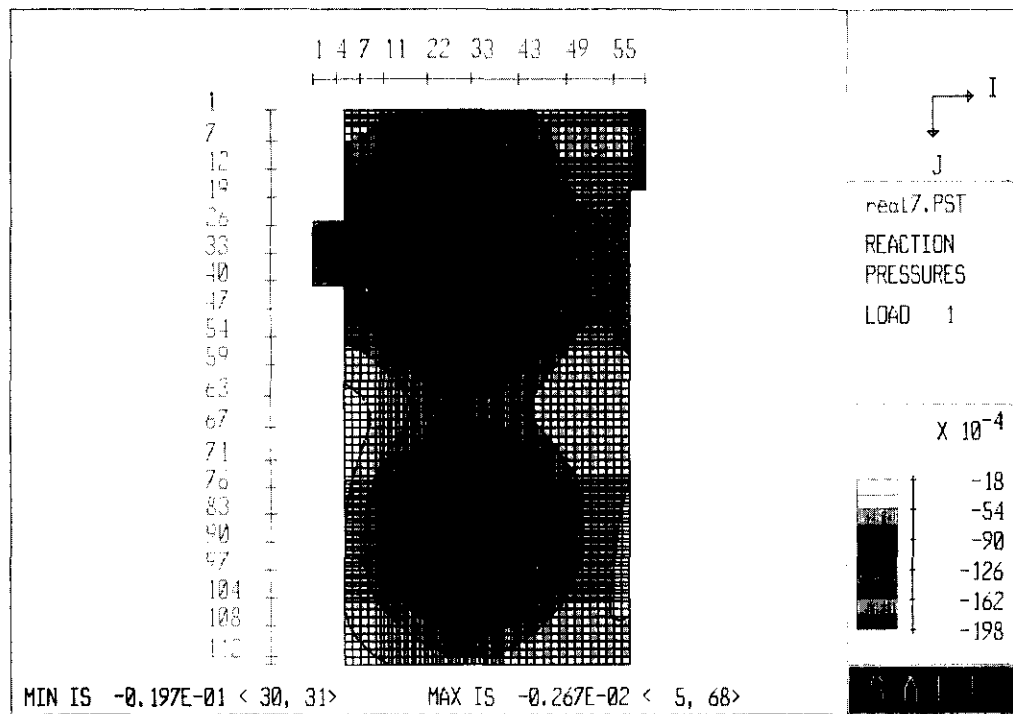


그림 5. (b) Dead load + Live load에 의한 pressure

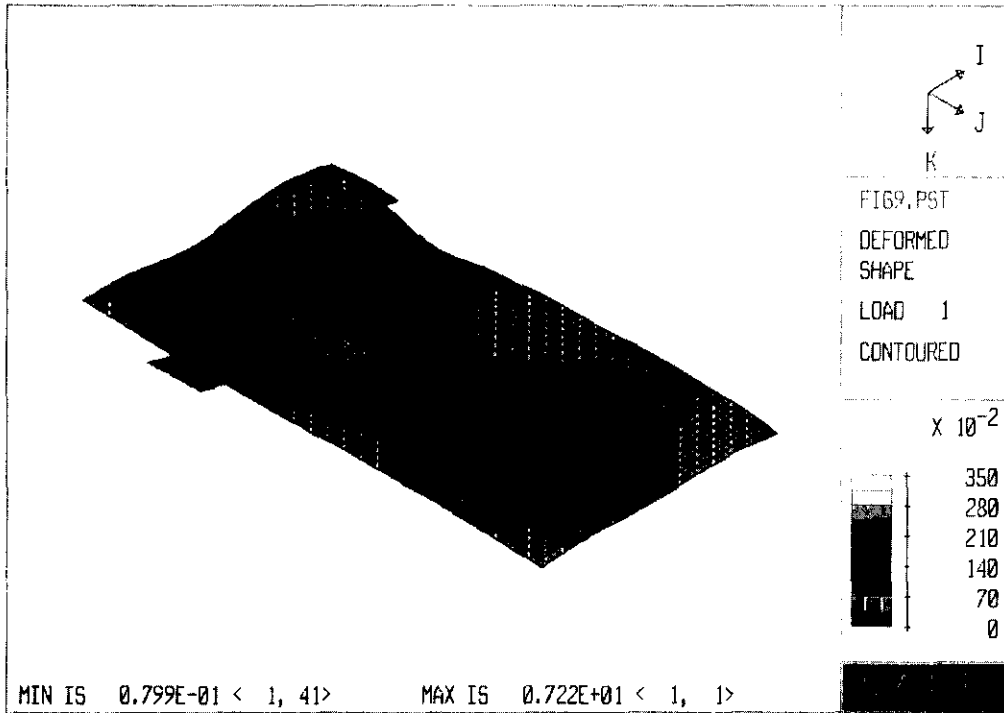


그림 6. (a) Dead load+Live load+EX 방향 load 에 의한 침하

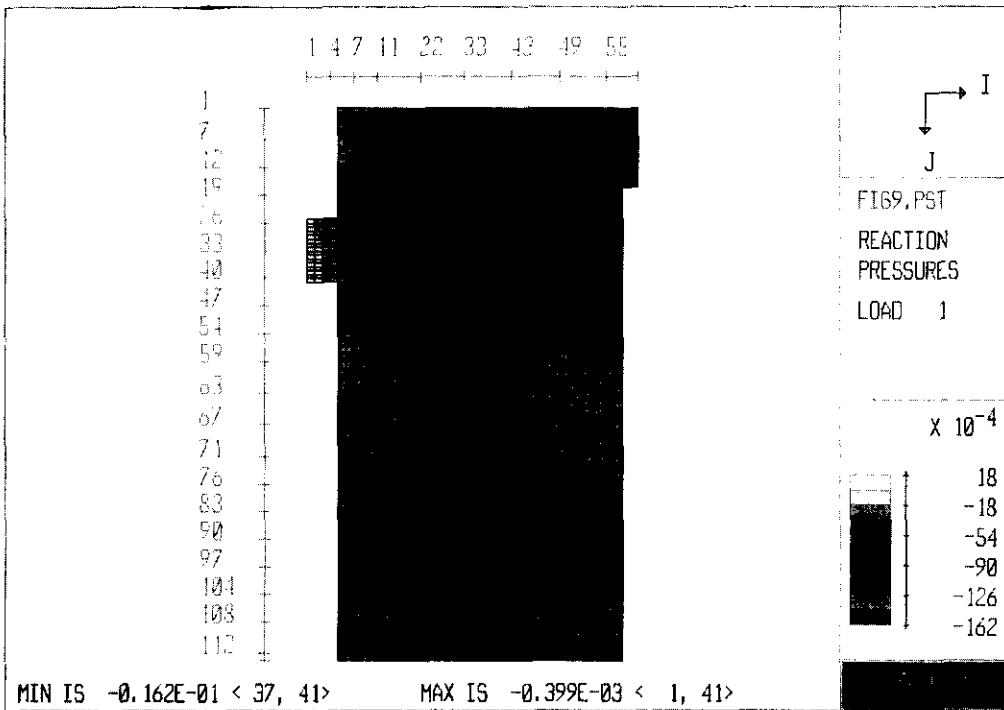


그림 6. (b) Dead load+Live load+EX 방향 load 에 의한 pressure

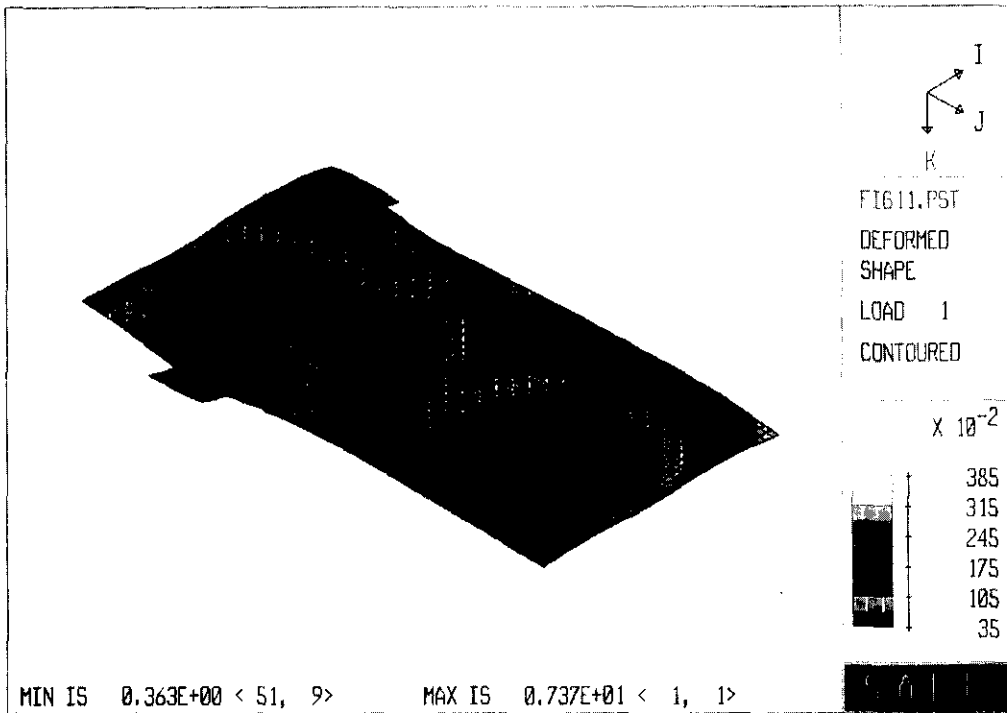


그림 7. (a) Dead load+Live load+EY 방향 load 에 의한 침하

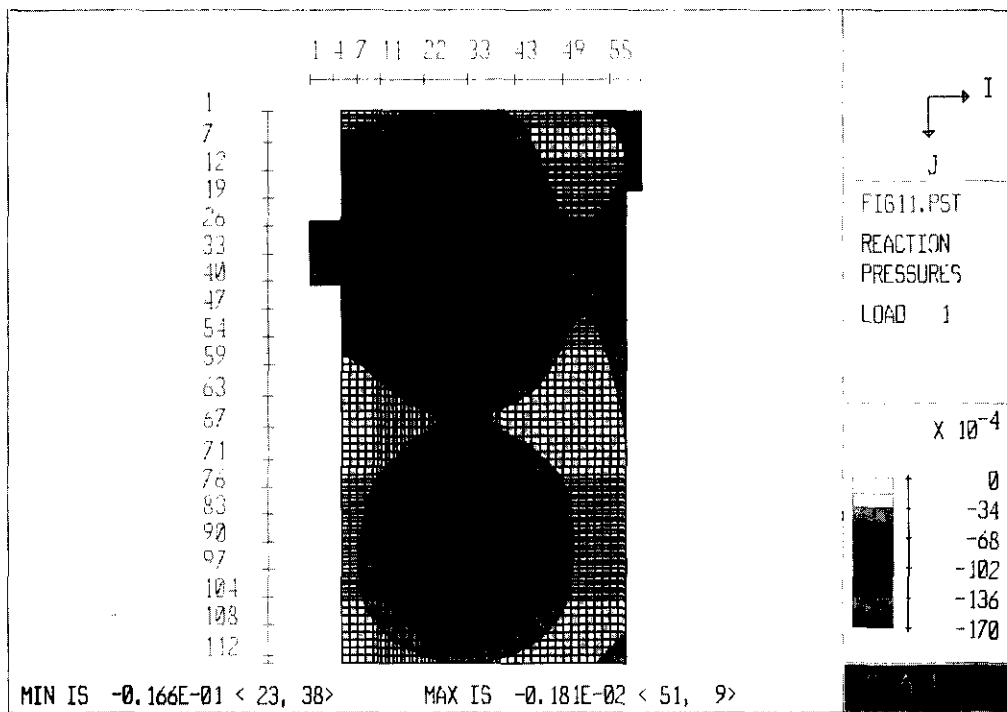


그림 7. (b) Dead load+Live load+EY 방향 load 에 의한 pressure

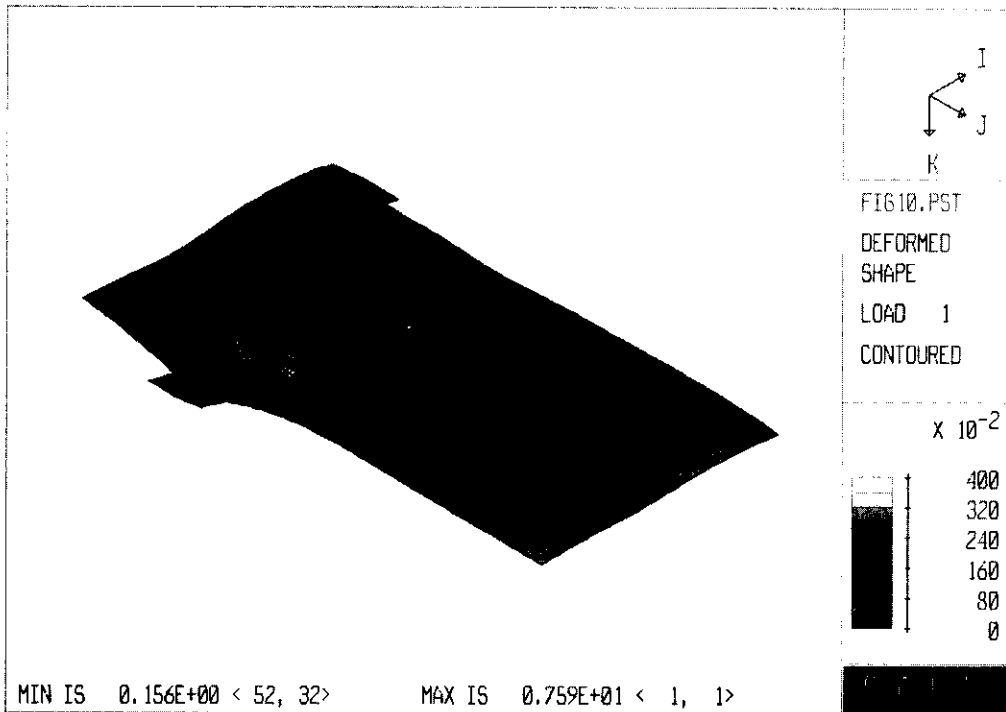


그림 8. (a) Dead load+Live load-EX 방향 load 에 의한 침하

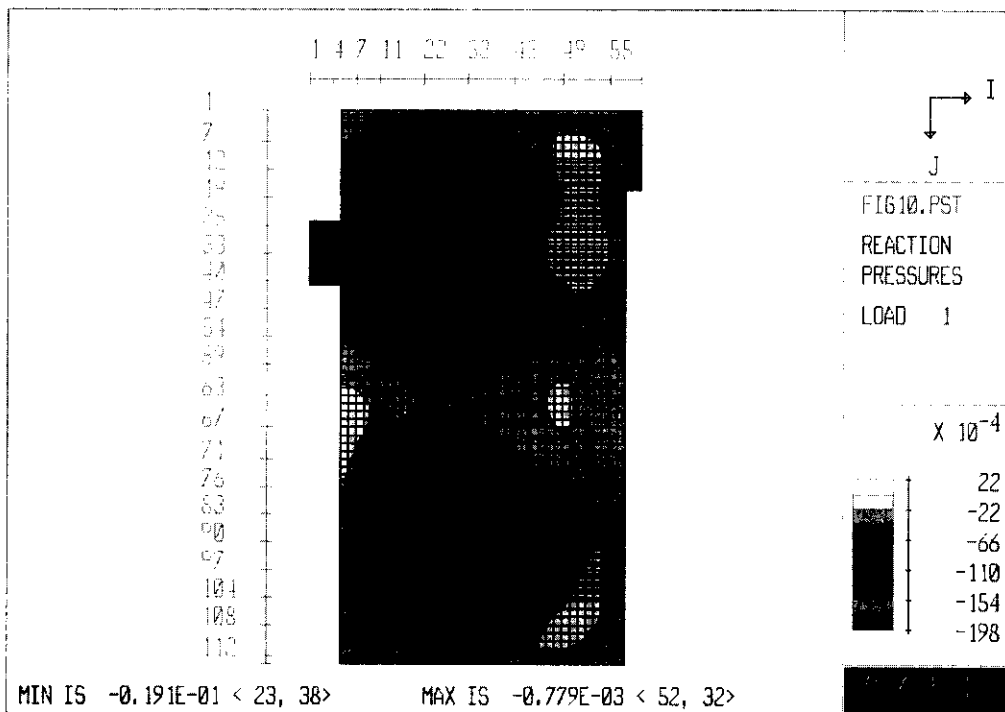


그림 8. (b) Dead load+Live load-EX 방향 load 에 의한 pressure

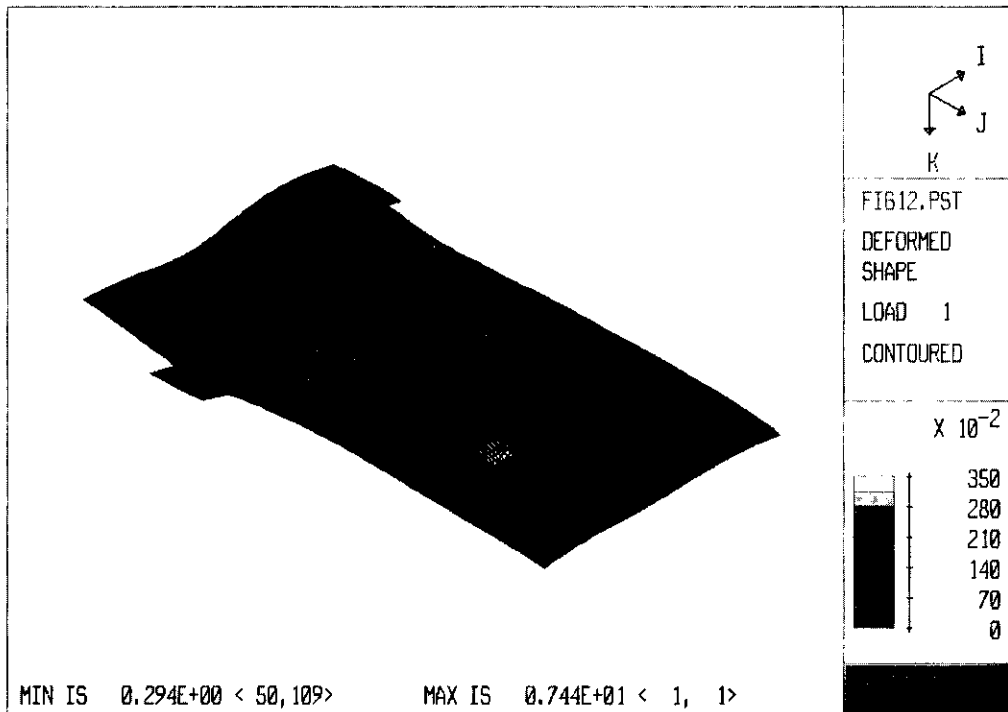


그림 9. (a) Dead load+Live load-EY 방향 load 에 의한 침하

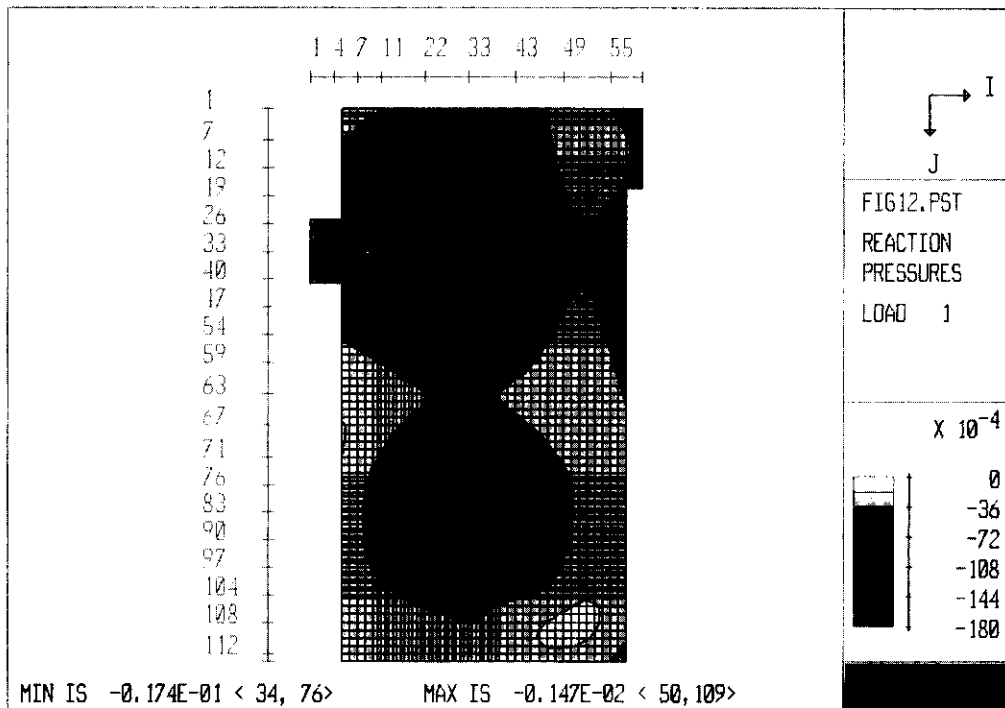


그림 9. (b) Dead load+Live load-EY 방향 load 에 의한 pressure

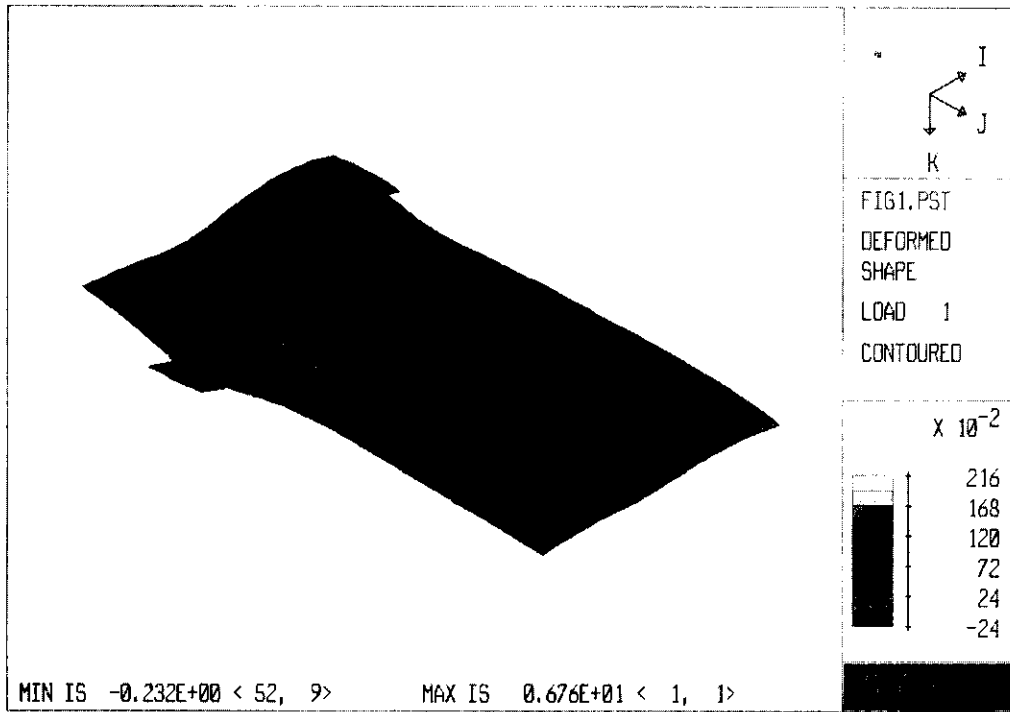


그림 10. (a) Dead load + WP load에 의한 침하

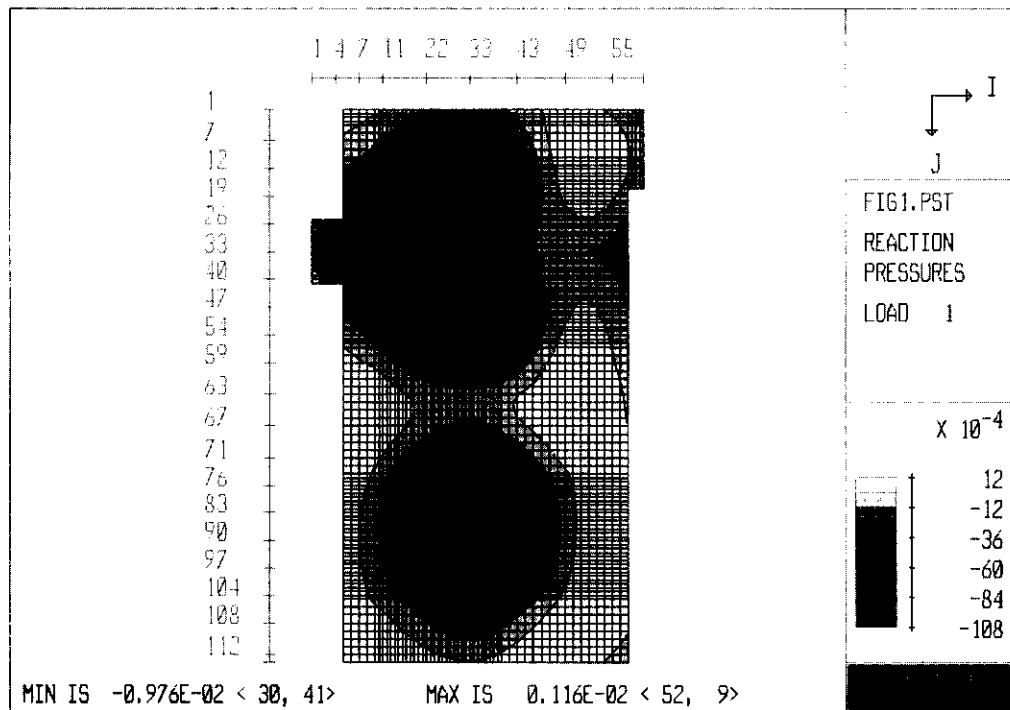


그림 10. (b) Dead load + WP load에 의한 pressure

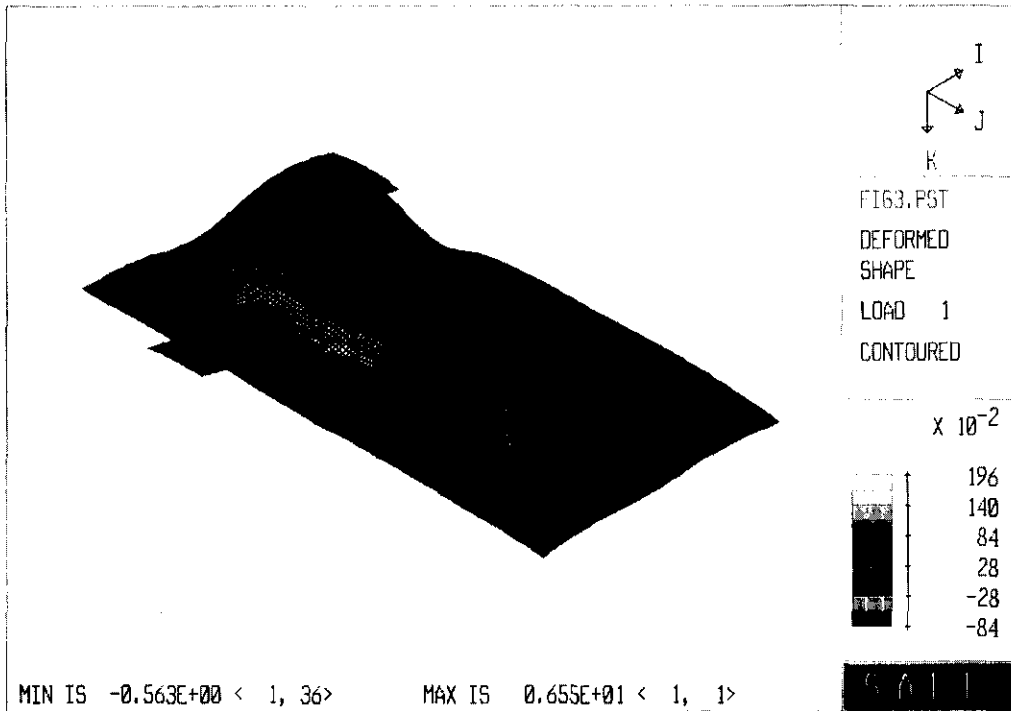


그림 11. (a) Dead load+WP load+EX 방향에 의한 침하

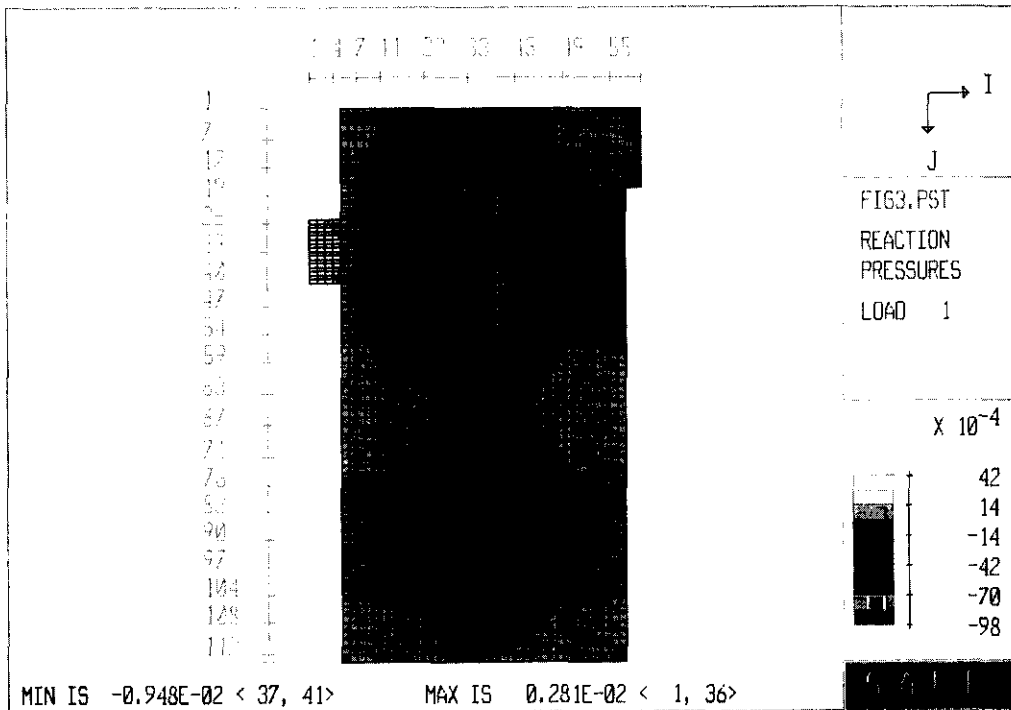


그림 11. (b) Dead load+WP load+EX 방향에 의한 pressure

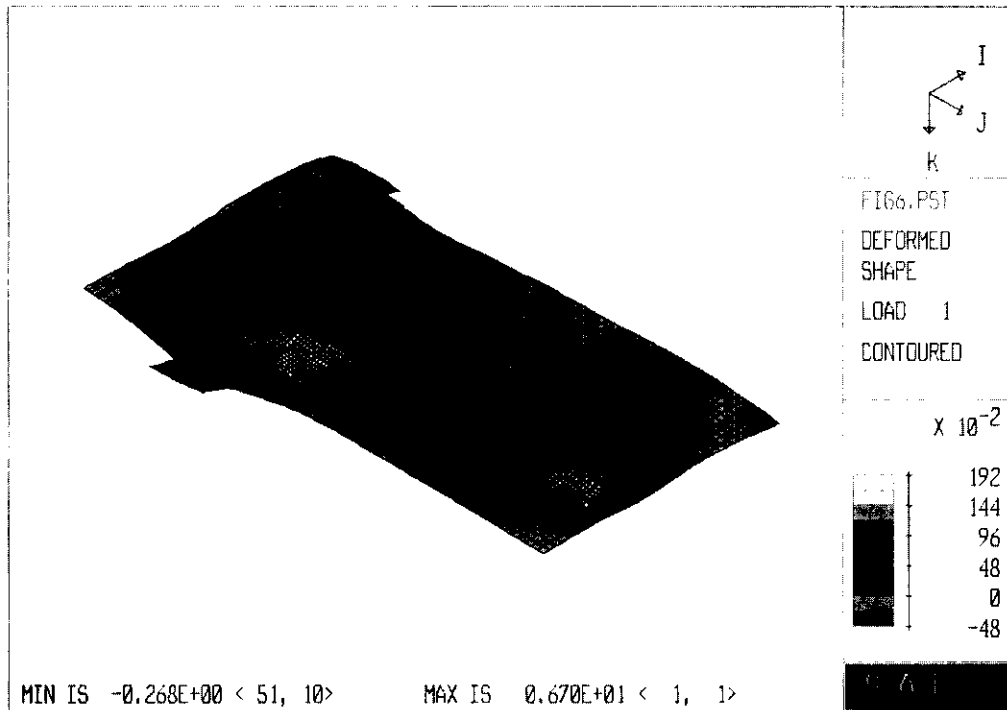


그림 12. (a) Dead load+WP load+EY 방향에 의한 침하

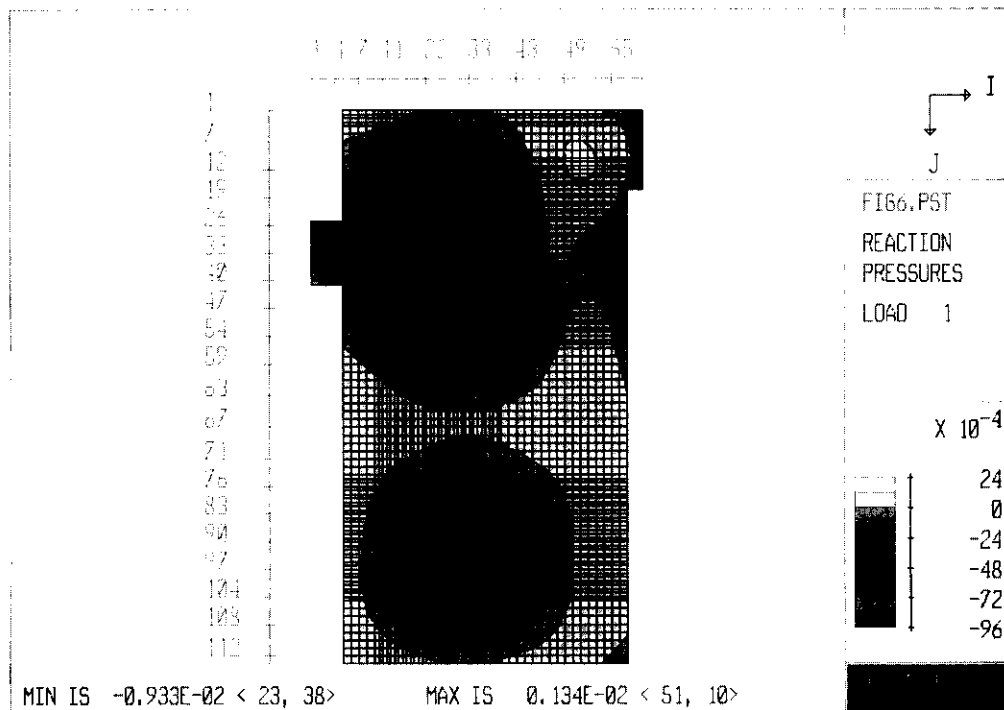


그림 12. (b) Dead load+WP load+EY 방향에 의한 pressure

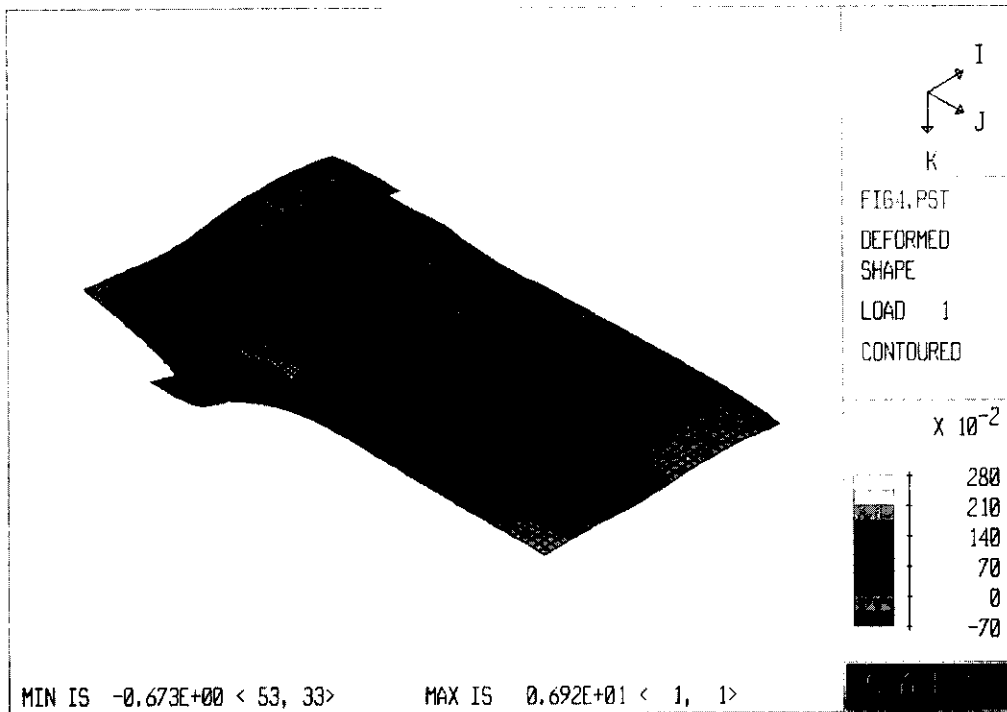


그림 13. (a) Dead load+WP load-EX 방향에 의한 침하

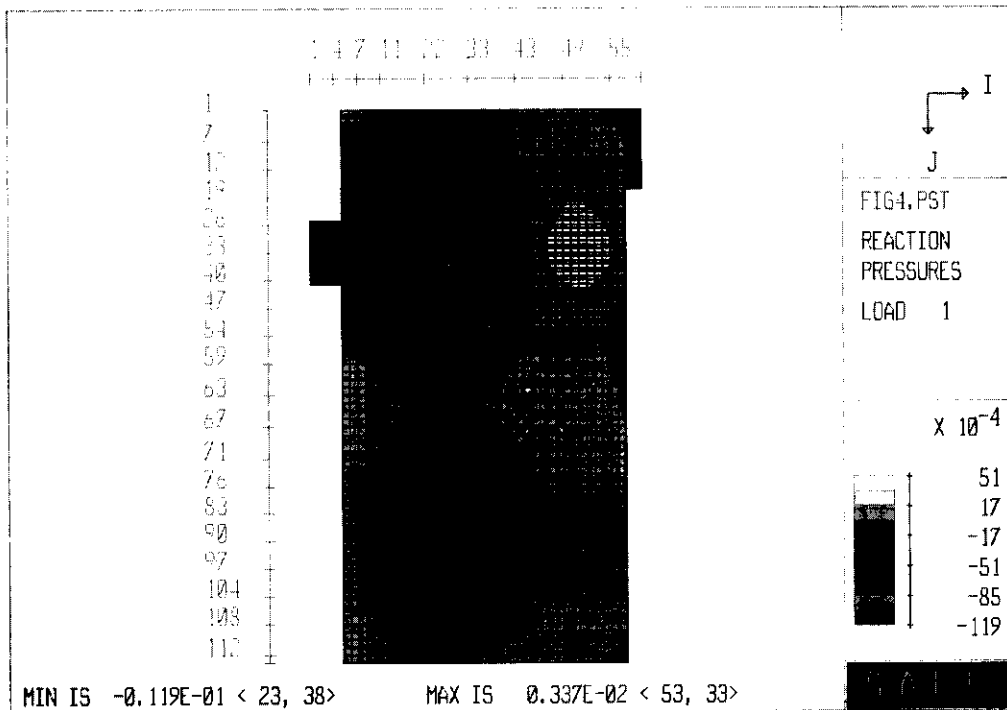


그림 13. (b) Dead load+WP load-EX 방향에 의한 pressure

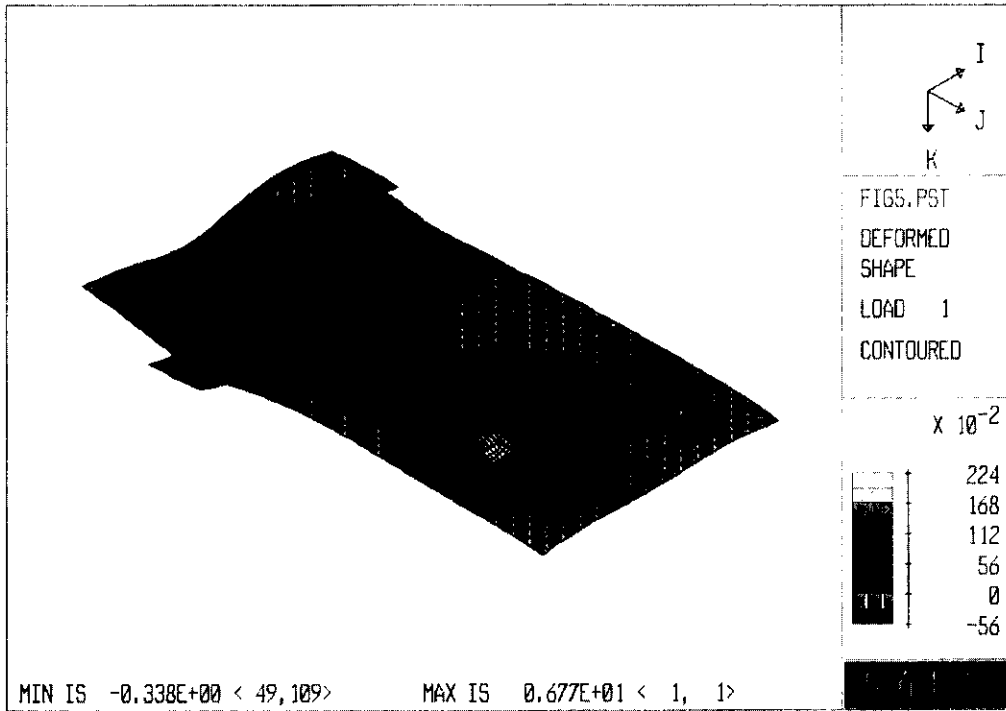


그림 14. (a) Dead load+WP load-EY 방향에 의한 침하

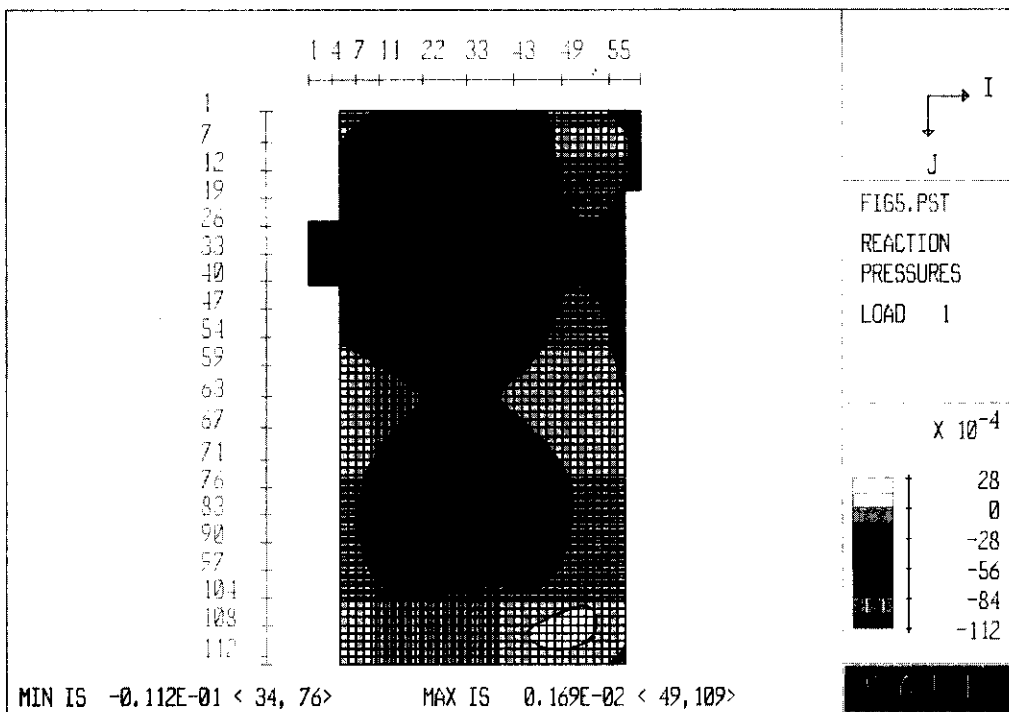


그림 14. (b) Dead load+WP load-EY 방향에 의한 pressure

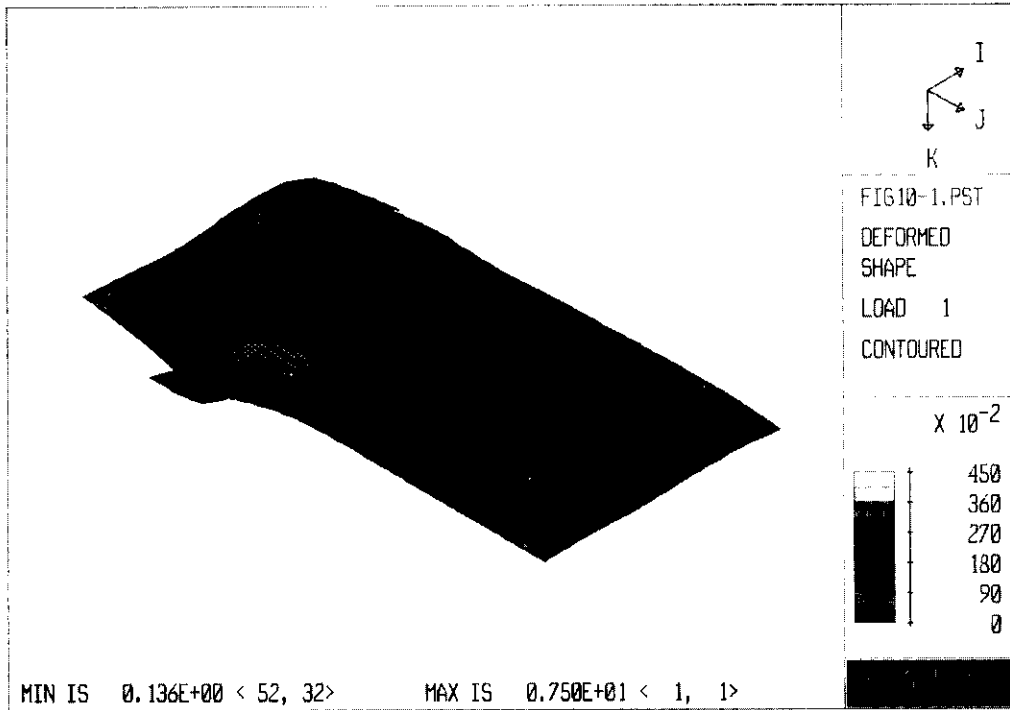


그림 15. (a) 탄소성해석을 수행한 지반 침하도

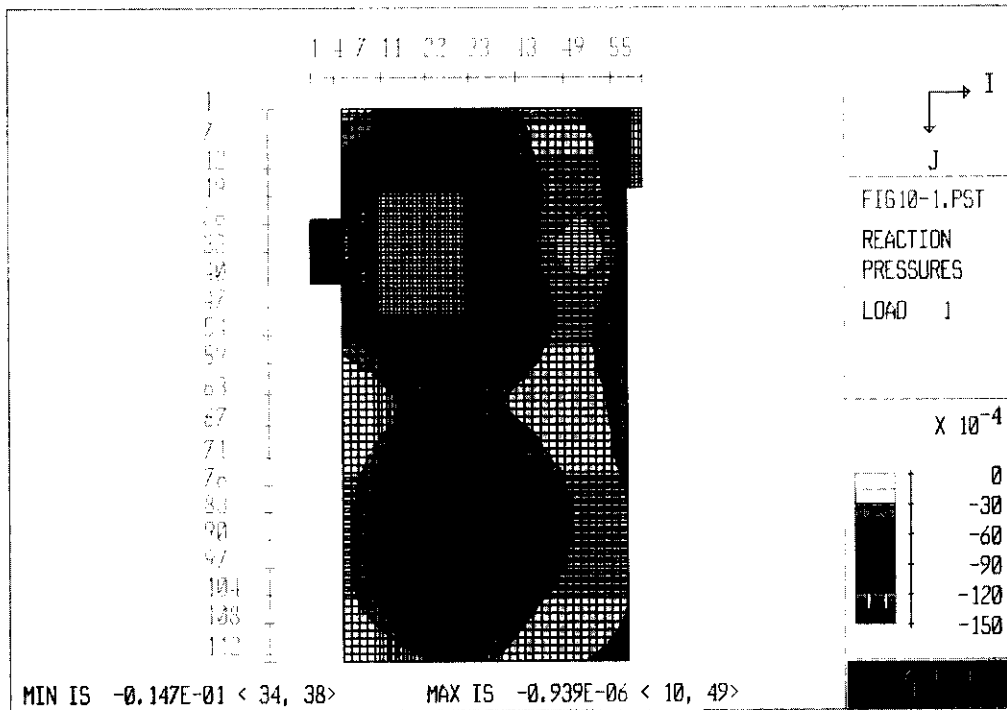


그림 15. (b) 탄소성해석을 수행한 응력도