

초고층 건물의 전면기초(MAT 기초) 해석 및 설계 ANALYSIS AND DESIGN OF MAT FOUNDATION FOR HIGH-RISE BUILDINGS

홍원기¹⁾, 황대진¹⁾, 권장혁²⁾

- 1) 삼성건설(주) 기술연구소 선임연구원 Senior Researcher, Institute of Technology, Samsung Engineering & Construction
- 2) 삼성건설(주) 기술연구소 연구원 Researcher, Institute of Technology, Samsung Engineering & Construction

SYNOPSIS ; 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 cannot be justified 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.

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 경제적이거나 바람직한 설계가 가능하여 진다.

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

그러나 압반층과 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 얇은 기초로 시공의 난이도 및 경제성에서 큰 이점을 얻을 수 있게 된다. 본 논문은 90층 정도의 초고층 건물 기초를 지지하기에는 그다지 크지 않은 약 150 m^2 정도의 지내력을 갖는 지반의 전면기초 FEM 해석 및 응력 재분배 기법에 바탕을 둔 설계에 관한 고찰이다.

특히 시간당 100km 가 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, 환하중에 의해 특정 기둥 밑에 작용하는 응력이 약 200 m^2 을 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 관해 시도 기술하고자 한다.

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

본 논문은 이외같이 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 키 작은 기둥, 68층 건물은 43개의 기둥에 의하여 지지되고 있으며 기초 및 건물의 외곽부에는 벽이 시공될 예정이다.

기초에 전달될 하중은 사하중, 환하중등 수직하중과 지진, 바람의 횡력에 의한 압축력 및 인장력으로 나눌 수 있다. 이와 같은 하중은 column load rundown의 절차 및 건물구조해석 전문 프로그램인 ETABS를 사용하여 계산 하였다.

상부구조물 구조해석 결과 86층의 주기둥에는 10000 ton의 큰 하중이 집중되어 그 아래부분 기초에는 상당한 응력이 전달됨을 알 수 있다. 그림 2에서 보이듯이 본 논문에서 해석된 전면 기초 구조물의 크기는 140m \times 86m로써 기둥으로 부터 전달되는 하중에 따라서 각각 4.5m, 3.5m, 및 2.0m두께의 3개지역으로 나누어 고려하였다. 또한 그림 2에서 는 기초구조물 해석을 위한 FEM Mesh도를 나타내고 있다.

표 1은 설계절차에서 고려되어야 할 하중조합의 경우를 나타내고 있다. 모두 11가지의 경우에 대해 해석하였으며 각각의 경우에 대해서 기초구조물의 punching shear 및 모멘트 분포를 짐작함과 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 SAFE로서 유한요소법에 의한 슬래브 전용 해석 프로그램이다. SAFE는 기초를 슬래브요소로 가정하고 지반은 등가 스프링으로 치환하여 모델링하게 된다. 지반의 경우 전체표면에 압축력이 작용하게 되는 경우는 지반에도 압축력이 작용하게 되므로 지반의 subgrade계수를 계산하여 지반 모델링이 가능하게 된다. 그러나 횡력에 의해 기초에 인장력이 전달되는 경우는 지반스프링을 제거하여 인장력이 주변의 압축력을 받는 부분으로 분포되도록 모델링이 되어야한다. 즉, 어느 한 질점에 인장력이 발생하게 되면 그 질점 스프링을 제거한 후 반복 수행하여 인장력을 압축 스프링으로 분배시키 주어야 한다. 이와 같은 반복수행은 인장력을 받는 지반스프링이 없어질 때까지 반복수행해야 하므로 계산 시간량이 상당히 많아지게 된다. 지반은 풍화암으로 구성되어 있으며 지질조사에 의해 암반의 지내력은 약 150ton/m² 정도로 밝혀졌다.

3. 인장파일의 설계 및 모델링

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

$$F_1 = A_{steel} \cdot f_y$$

여기서 A_{steel} 은 철근의 단면적
 f_y 는 철근의 항복응력

둘째로는 인장파일과 지반사이의 마찰력으로 제한될 수 있으며 마찰력에 의한 인장파일의 인장지지력은 다음식에서 구할 수 있다.

$$F_1 = 2\pi r l \cdot f_s$$

여기서 r 은 파일의 반지름
 l 은 파일의 길이
 f_s 는 50 ton/m²

마지막으로 기초 암반의 파괴형상에 따라 인장지지력을 계산할 수 있다.

$$F_3 = V_{soil} \cdot \gamma_{soil} + V_{pile} \cdot \gamma_{pile}$$

여기서 V_{soil} 은 암반파괴면의 부피
 γ_{soil} 은 암반의 단위중량
 V_{pile} 은 파일의 체적
 γ_{pile} 은 파일의 단위중량

이러한 해석결과로부터 인장파일로 사용될 지름 80cm 의 콘크리트 파일의 인장지지력은 3000 ton으로 산정되었다. 인장파일도 역시 스프링으로 모델링되어 FEM해석을 수행하게 된다. 스프링계수는 AE/L로 계산될 수 있으며 압축력이 작용하는 경우는 인장파일 마찰력으로 부터 얻을 수 있는 압축 지지력은 무시하였다. 그림 3에서 그림 13까지가 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 짐작할 수 있도록 하였다.

(그림3) ~ (그림13)

4. 지반응력 재분배를 이용한 소성설계

그림 9의 하중 조합의 경우 횡하중에 의하여 지반에 가해지는 응력은 약 200ton/m² 가량이 되는 것으로 계산되었다. 이 경우 이 부분에는 깊은 파일의 시공이 필수적이나 양질의 암반층이 나타나는 것은 약 70-80m 정도의 깊이로서 파일시공으로는 경제성이나 시공성에 상당한 문제점이 있는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 과도하게 응력집중이 되는 부분의 응력을 비교적 이유가 있는 부분으로 분포시켜 응력집중현상이 완화 될 수 있도록 탄소성 응력 재분배 개념을 암반해석에 적용하였다. 이 부분의 암반은 150ton/m² 의 응력지지까지는 충분한 지내력을 확보하고 있다. 이 부분에 150ton/m² 이상의 응력이 가해 지게되는 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 응력을 응력이 될 집중되는 부분으로 분배가 가능하게 된다. 즉, 기초구조물은 탄성상태에서 설계되는 것이 아니고 지반의 비탄성 거동이 고려되는 비선형,비탄성 해석의 결과로 설계할 수 있는 것이다.

사용 프로그램 SAFE는 선형, 탄성프로그램이므로 해석 모델링은 다음과 같은 기법을 거치 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 따라주변의 지반으로 분배되게 된다. 상부구조물에서 전달되는 하중에서 지반이 탄성한계내에서 지지할 수 있는 지내력을 만큼을 줄어준과 동시에 응력이 집중되는 부분의 스프링을 제거하여 준다. 이 때 응력집중 부분에는 스프링이 지지되지 않으므로 상부에서 전달되는 하중은 전적으로 기초구조물을 통해 일부분으로 이동 분포하게 된다. 그림9는 지반에 작용하는 압축응력이 200ton/m² 로서 지내력 150 ton/m² 를 크게 상회하는 것을 나타내고 있다. 이 경우 깊은 파일의 사용 대신 전면기초를 사용하기 위해서 비탄성 해석을 수행하였다. 그림9의 응력집

중 부분의 스프링을 제거하는 대신 이 부분의 하중을 이부분지반의 탄성 지내력 만큼 감소시켜 유한요소해석을 수행한 결과는 그림14에 나타내었다. 용력집중 부분이 모두 지내력 150ton/m² 범위내로 계산된 반면 주변 압반에는 탄소성 용력분해 해석을 행하지 않은 그림7 보다 광범위하게 높은 값을 나타내고 있다. 이는 용력집중된 지역의 지반의 지내력을 초과 하는 용력이 주변으로 분포, 이동된 결과로 기초구조물을 지지하고 있는 압반의 모든 부분이 지내력 150ton/m² 범위내로 만족되고 있음을 보여 주고 있다.

5. 결론 및 설계에 관한 제안

압반의 모델링을 위한 subgrade계수는 0.0025ton/m³으로 기초 구조물 모든 결점부분의 침하량을 계산 하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 전체적인 절대 침하량은 기초구조물의 두께에 따라 다소 차이는 있지만 86층 주기둥 아래부분은 약 6-8cm정도의 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	5.9541
(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 손상을 방지하기 위하여 기초구조물의 상대변위는 그림14 치된 3cm정도로 제한될 수 있도록 설계하였다.

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

(표 3)

			F _c '=	F _c '=	F _c '=
			3000	4000	5000
			PSI	PSI	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

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 0.041ton/m²를 나타내고 있으며 최소한 기초두께가 4.5m를 초과해야 함을 알 수 있다. 모멘트를 지탱할 장 방향, 단방향의 철근의 설계도 같은 방법으로 수행될 수 있으며 86층 주 기둥부분은 32mm주철근을 약 250mm ~ 300mm의 간격으로 설계하였 다.

지반의 비탄성 해석개념을 설계에 반영하는 일련의 과정을 소개하였다. 본 건물의 기초설계에서 나타났듯이 약30%정도 초과되는 용력을 깊은 파 인없이 지반의 탄소성 모델링 기법을 적용해 기초구조물의 광범위한 부분 으로 분포시켜 소요 주철근을 설계할 수 있었다. 이때 지반의 탄소성개념 을 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 이용 될 수 있는 지반 탄소성 모델을 전연기초 구조물 FEM해석에 도입 하여 설계진차별 소개하였고 향후 초고층 건물시대의 도래를 앞두고 보다 경제 적이고 신뢰적인 설계기법과 그 응용예를 소개하였다.

6. Reference

1. 민동찬, 신현국, 문제진(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, Misigan, 1983

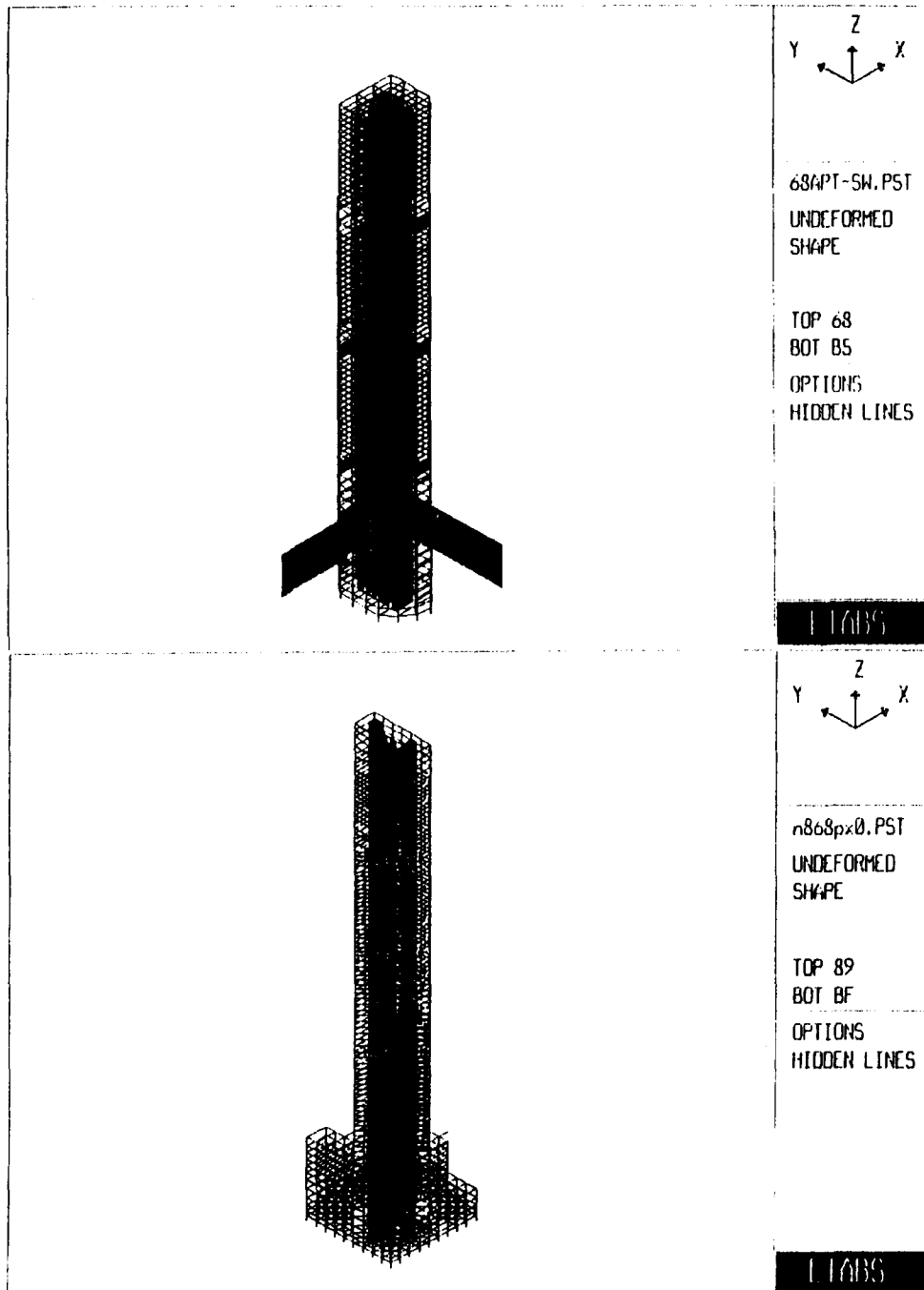


그림 1. 86, 68의 초고층 건물과 전면기초

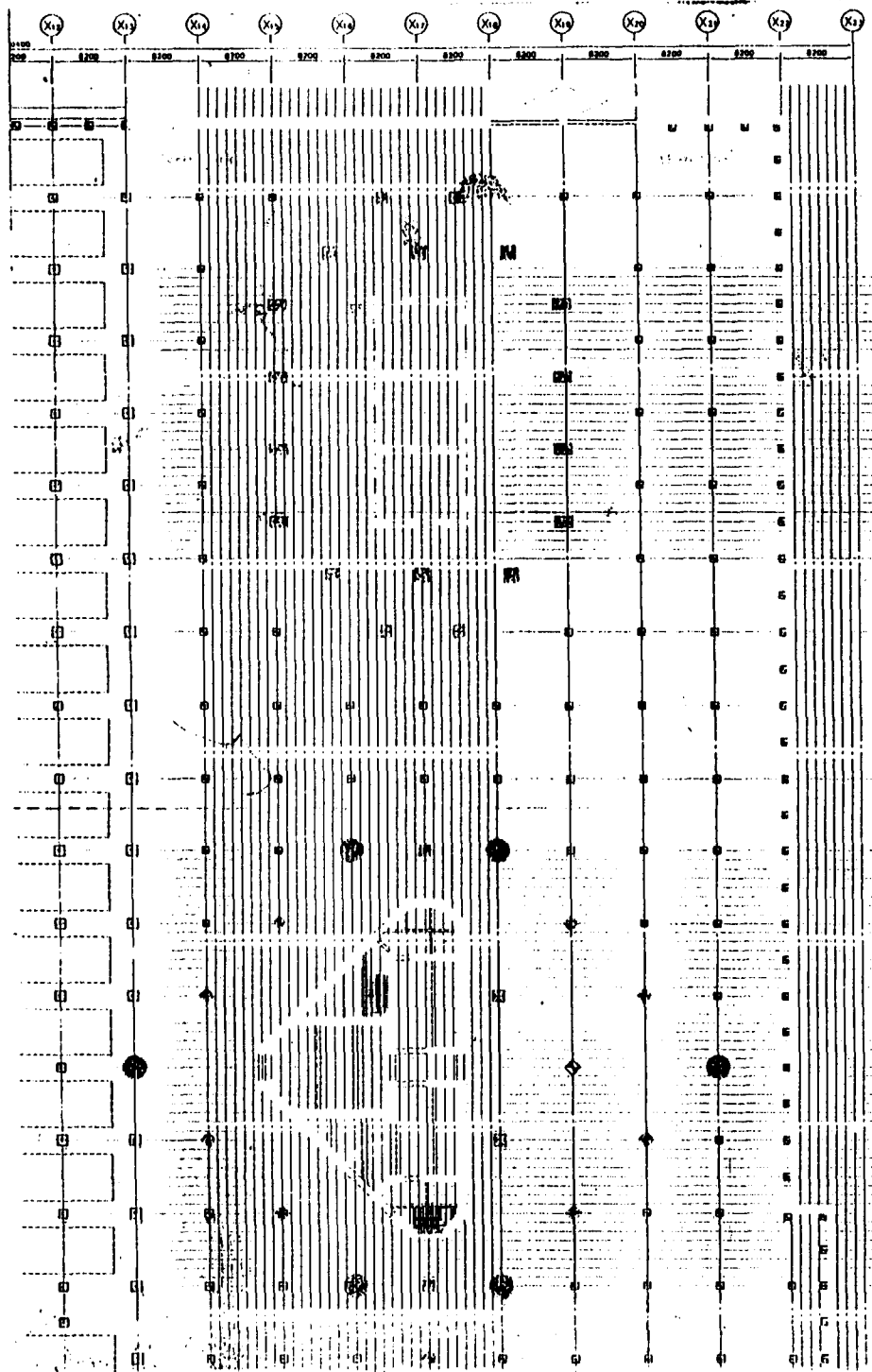


그림 2. 전반기초 구조물의 FEM MESH

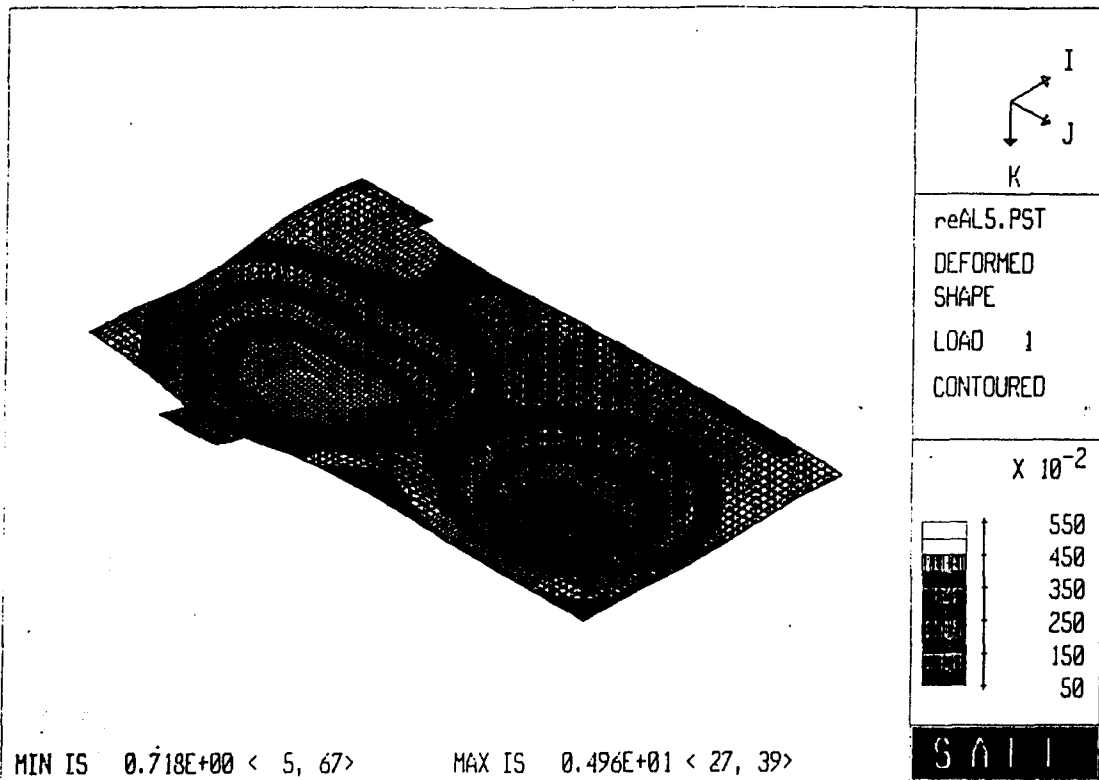
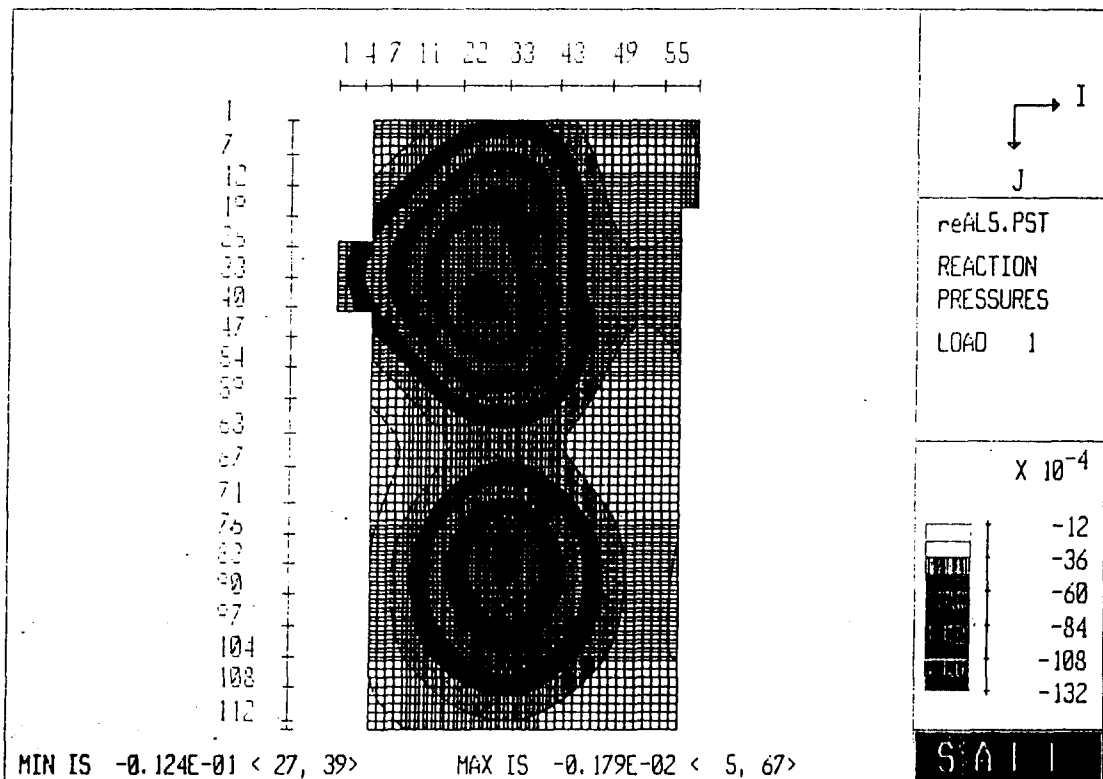


그림 3. (a) Dead load에 의한 침하



(b) Dead load에 의한 pressure

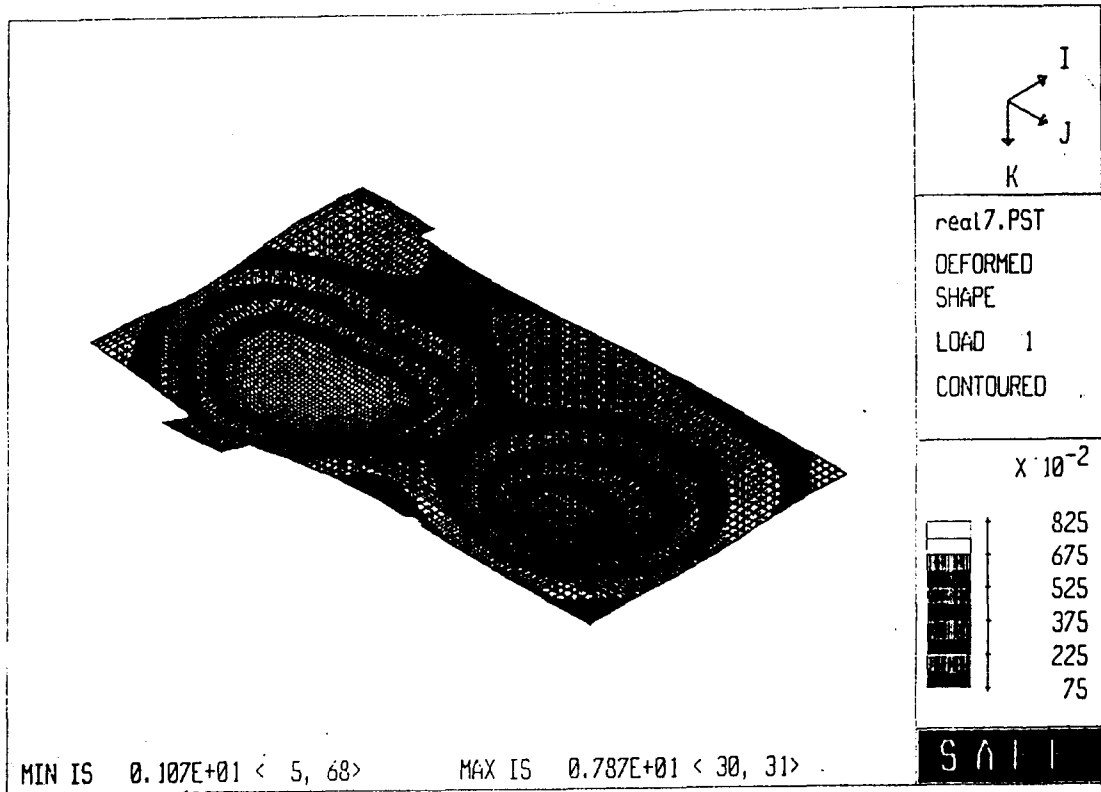
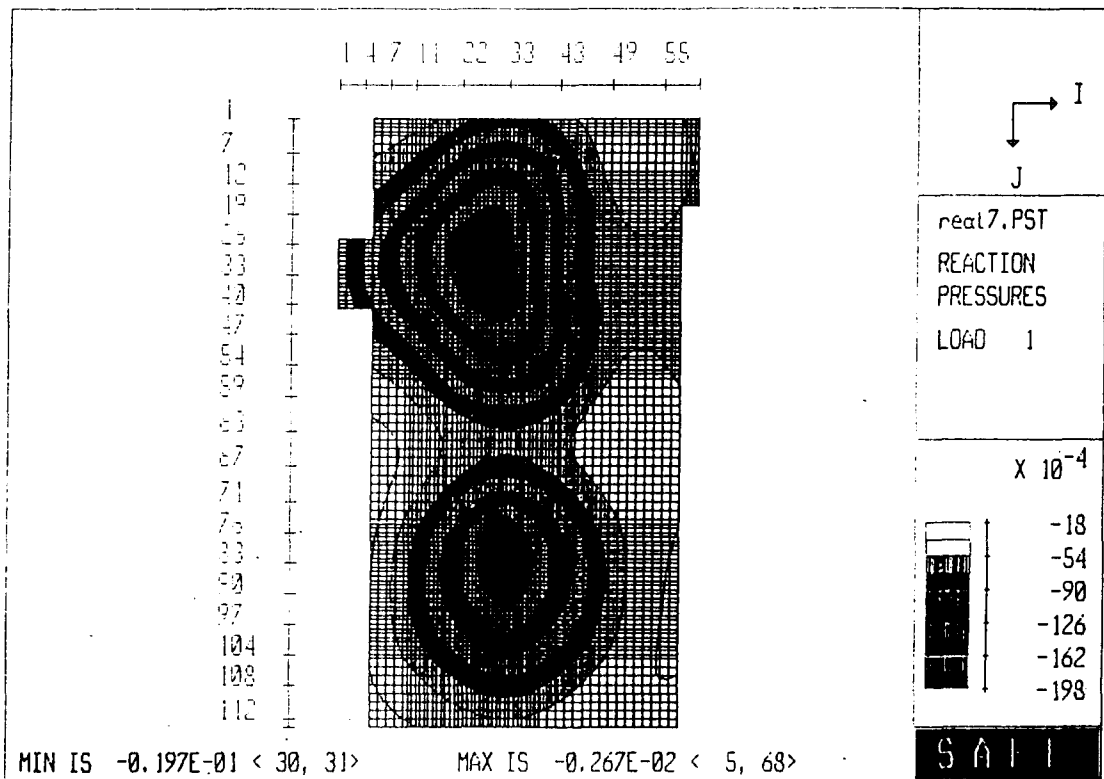


그림 4. (a) Dead + Live load에 의한 침하



(b) Dead + Live load에 의한 pressure

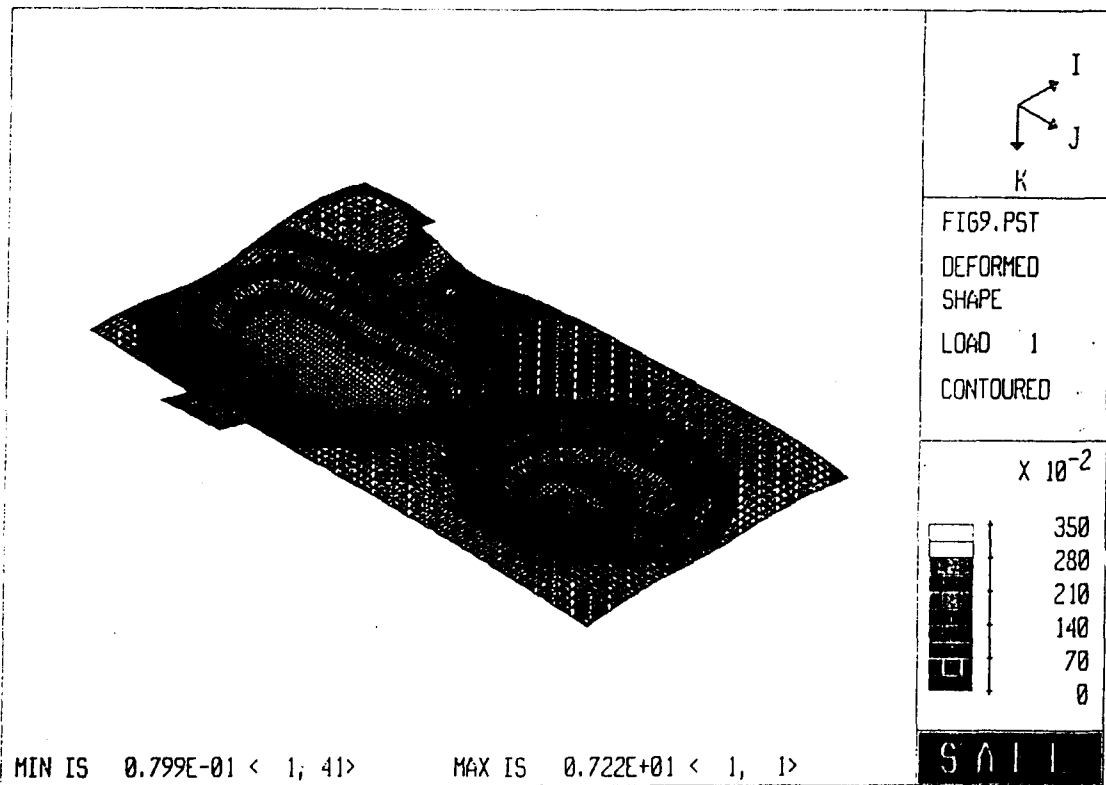
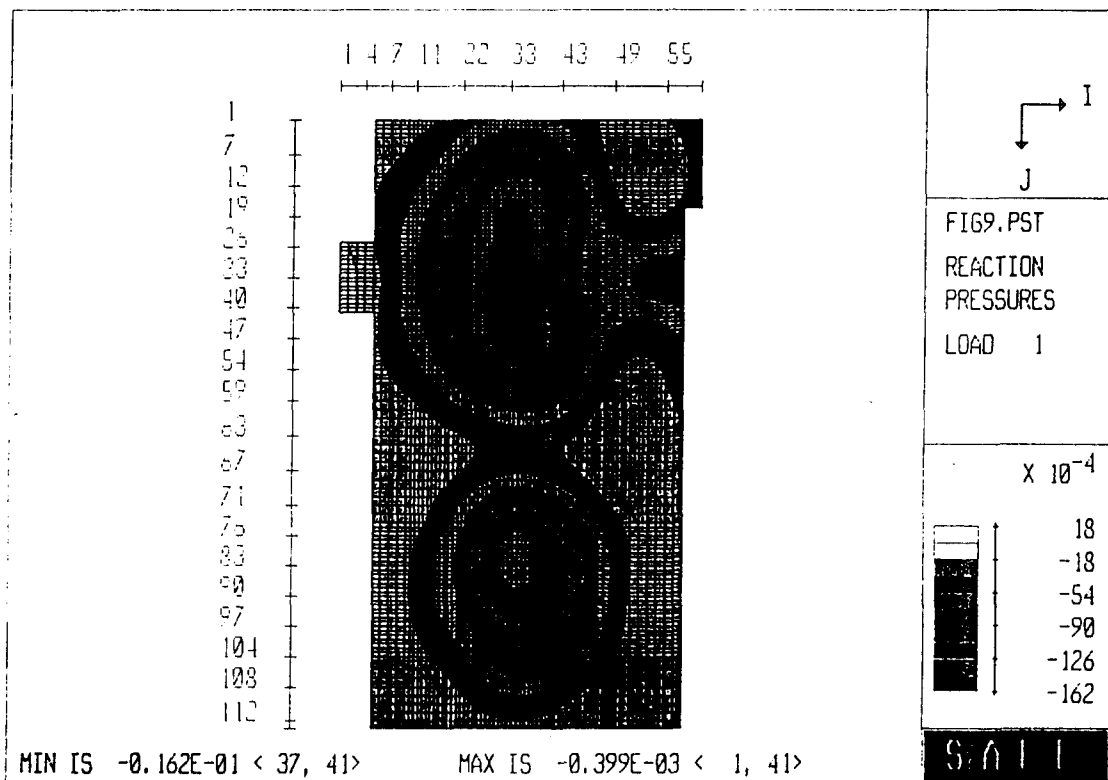


그림 5. (a) Dead + Live + EX load에 의한 침하



(b) Dead + Live + EX load에 의한 pressure

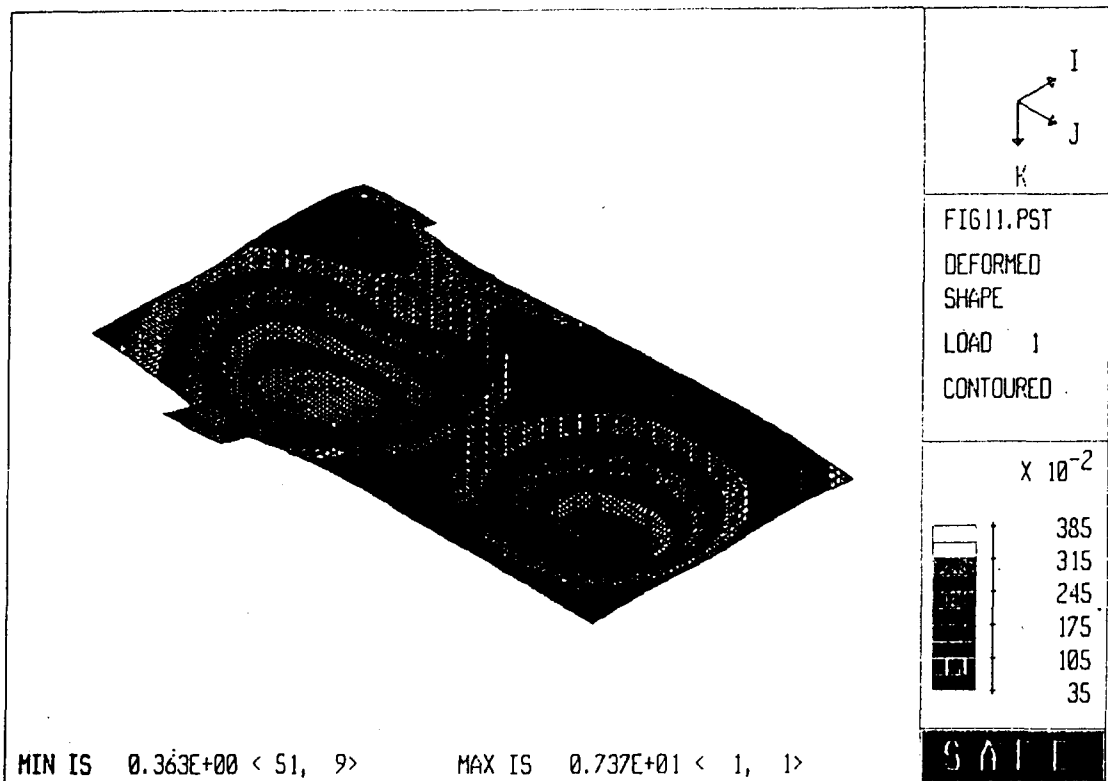
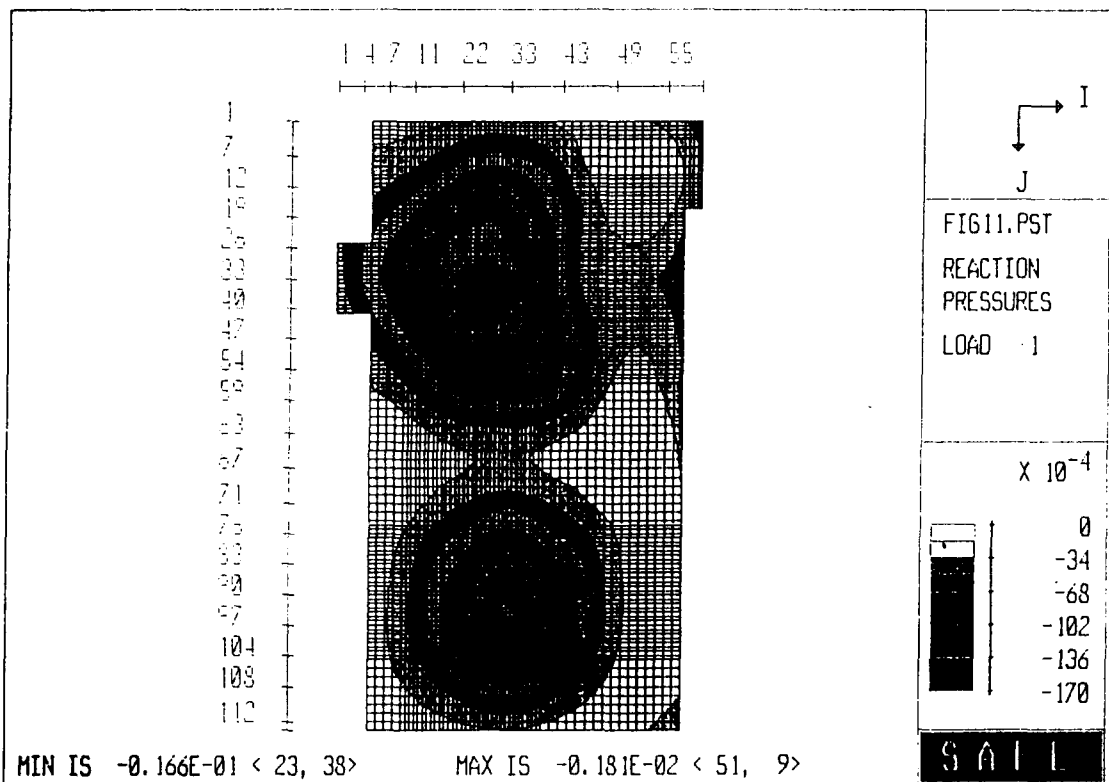


그림 6. (a) Dead + Live + EY load에 의한 침하



(b) Dead + Live + EY load에 의한 pressure

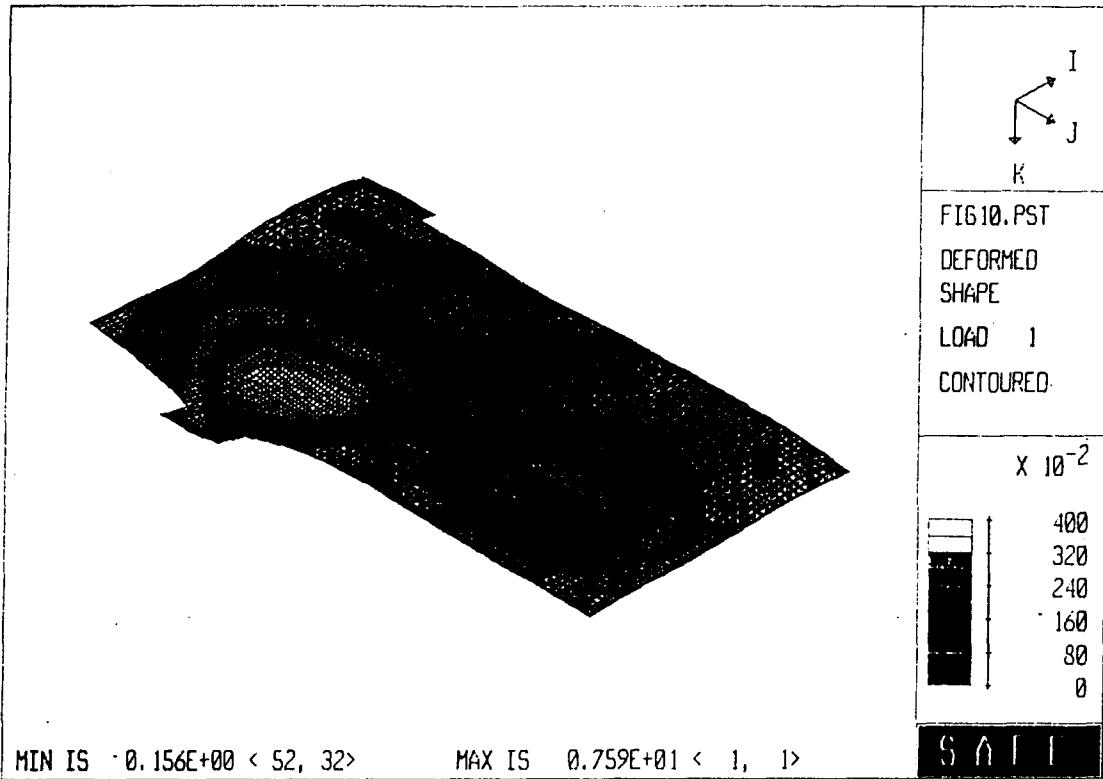
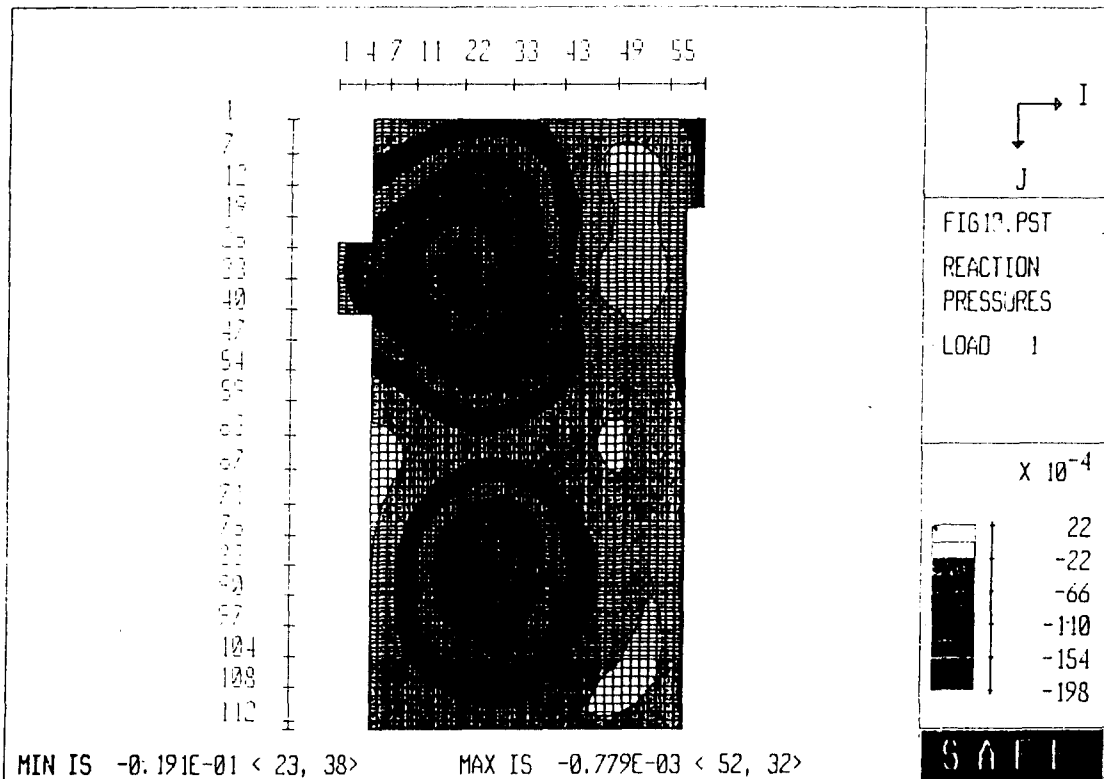


그림 7. (a) Dead + Live - EX load에 의한 침하



(b) Dead + Live - EY load에 의한 pressure

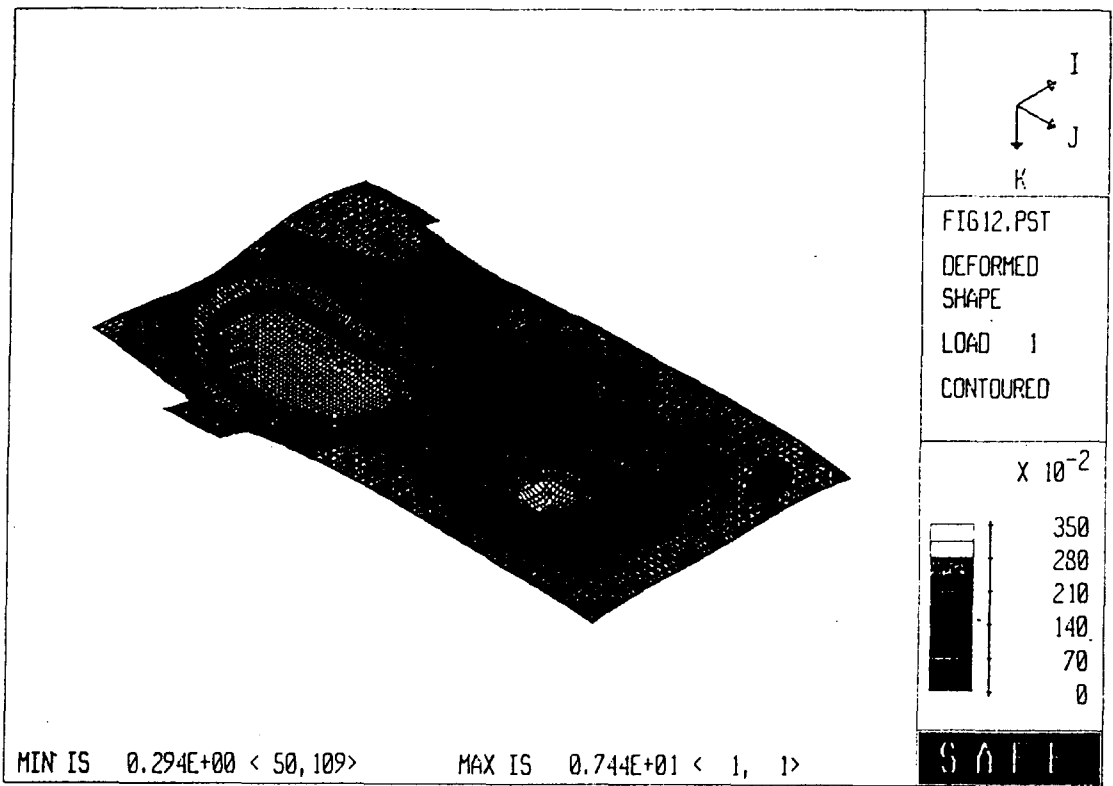
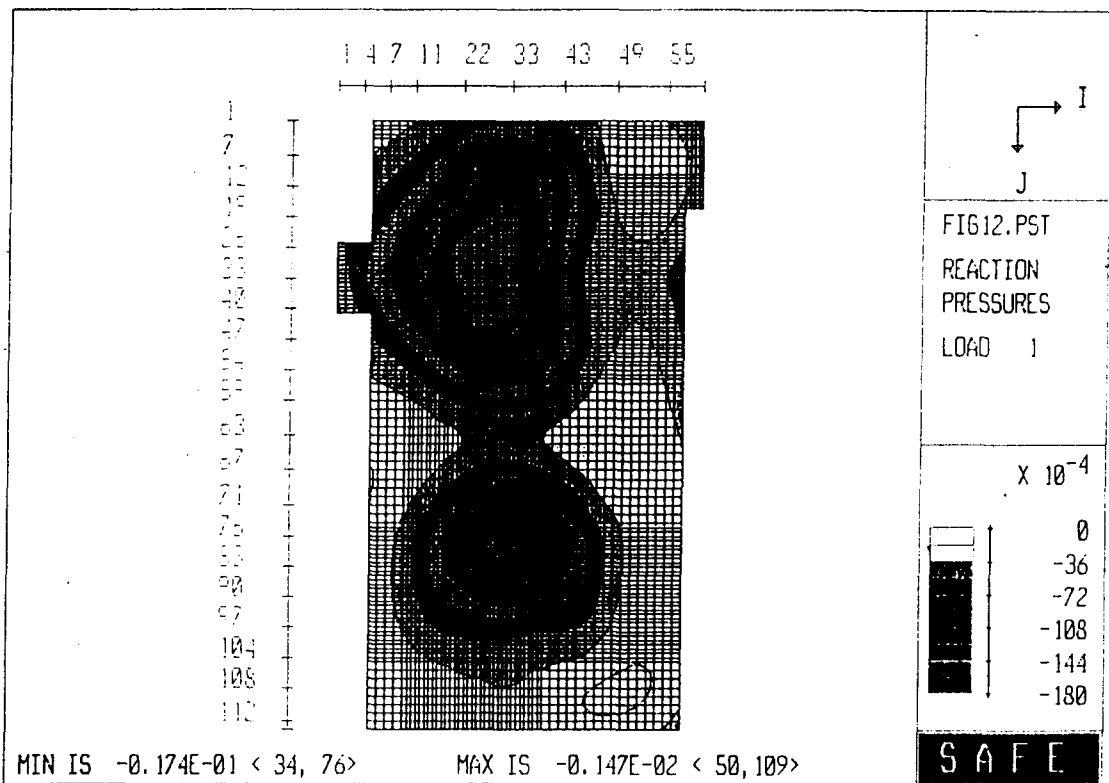


그림 8. (a) Dead + Live - EY load에 의한 침하



(b) Dead + Live - EY load에 의한 pressure

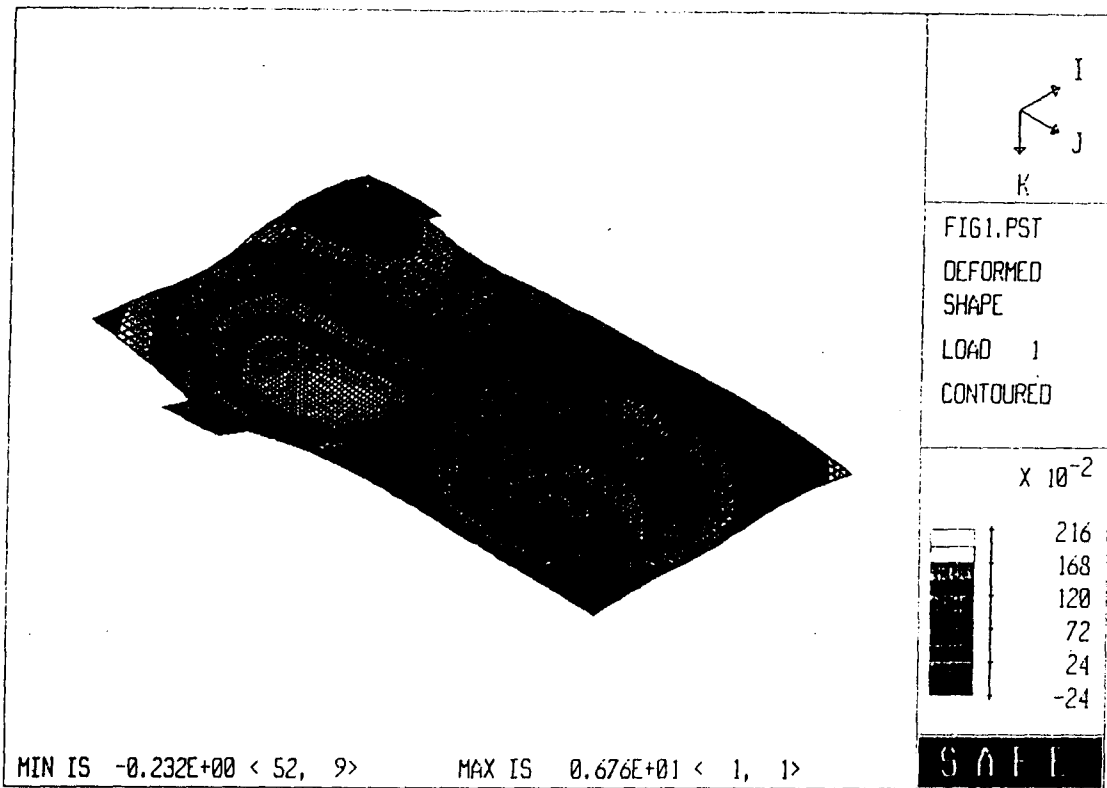
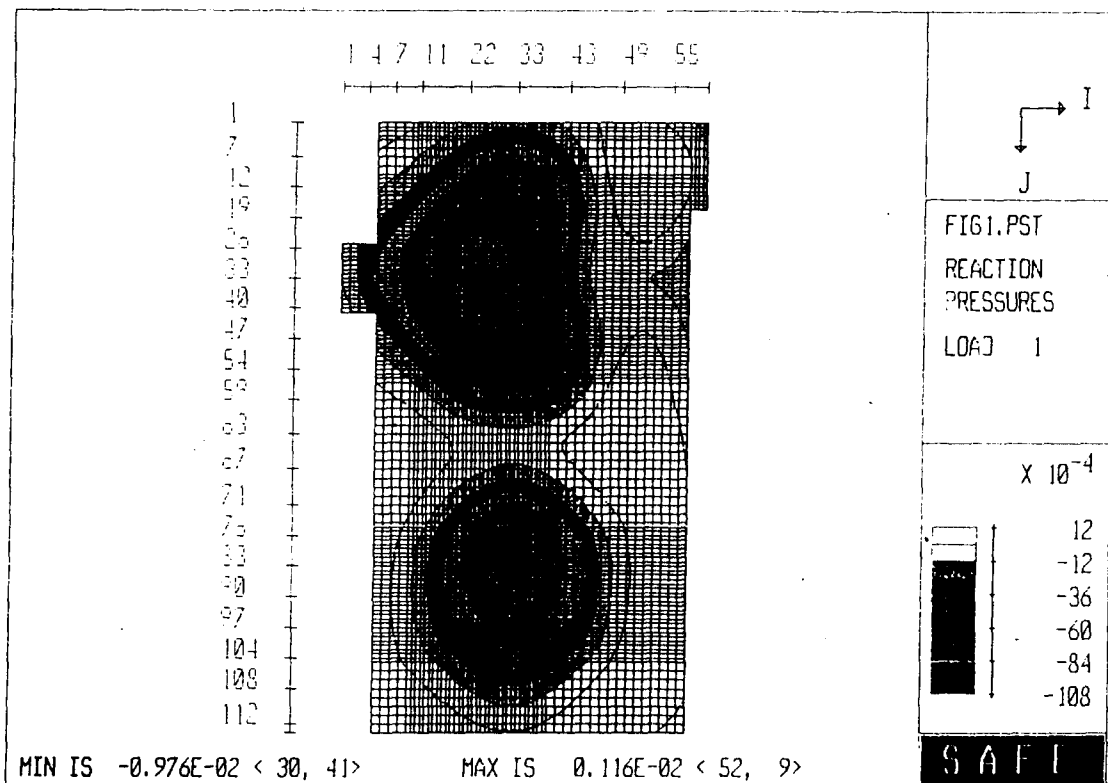


그림.9. (a) Dead + WP load에 의한 침하



(b) Dead + WP load에 의한 pressure

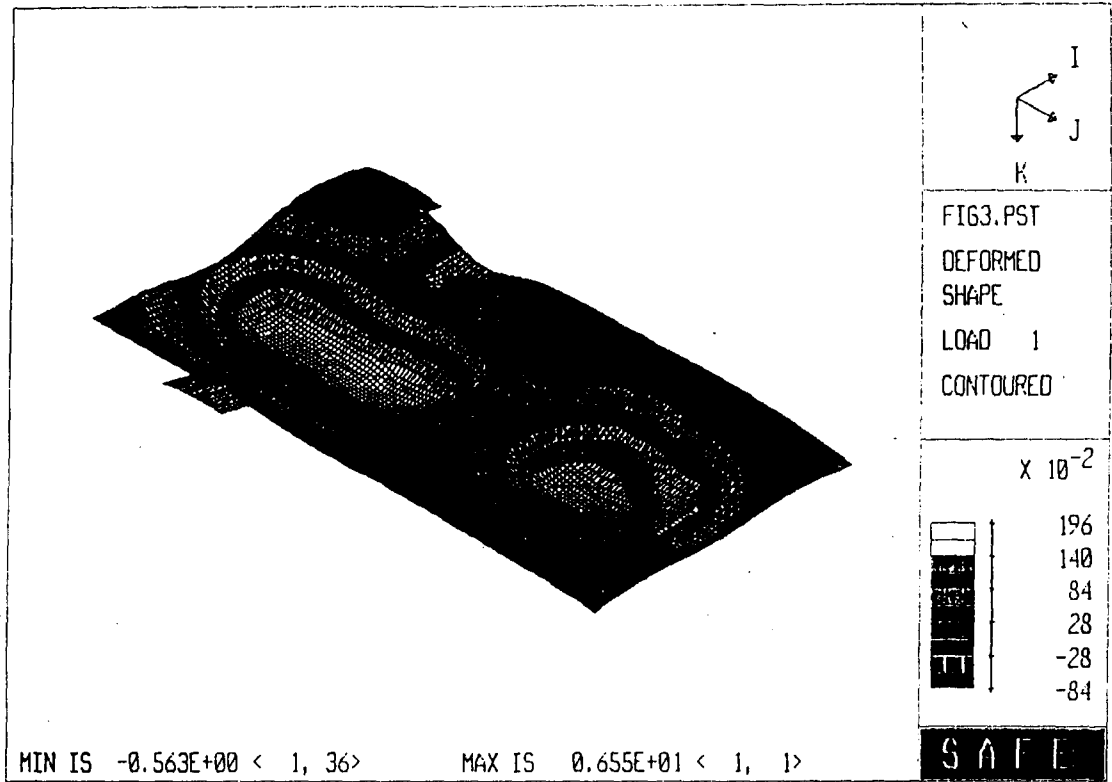
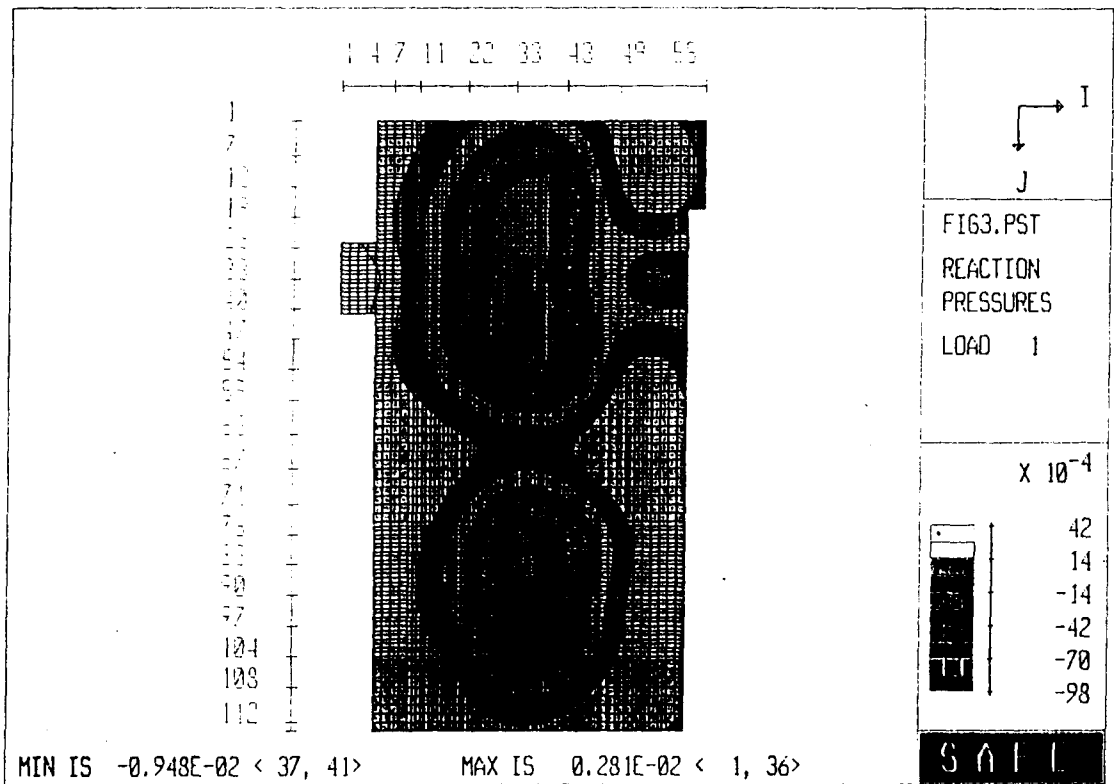


그림 10. (a) Dead + WP + EX load에 의한 침하



(b) Dead + WP + EX load에 의한 pressure

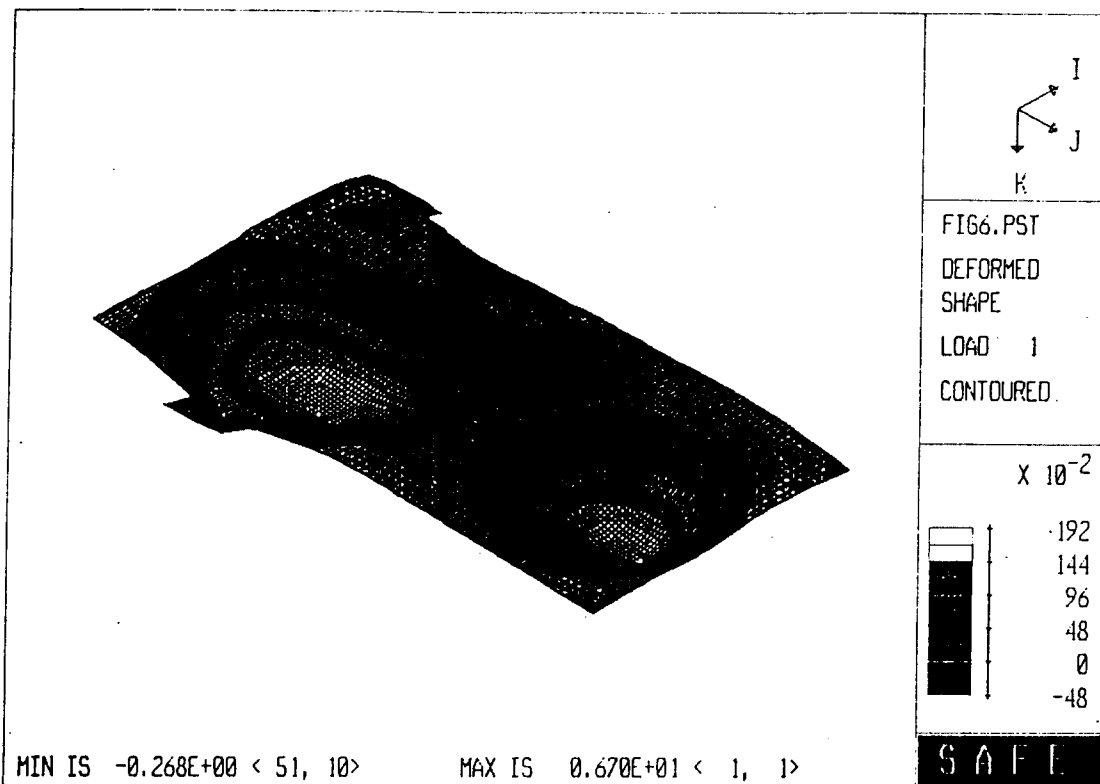
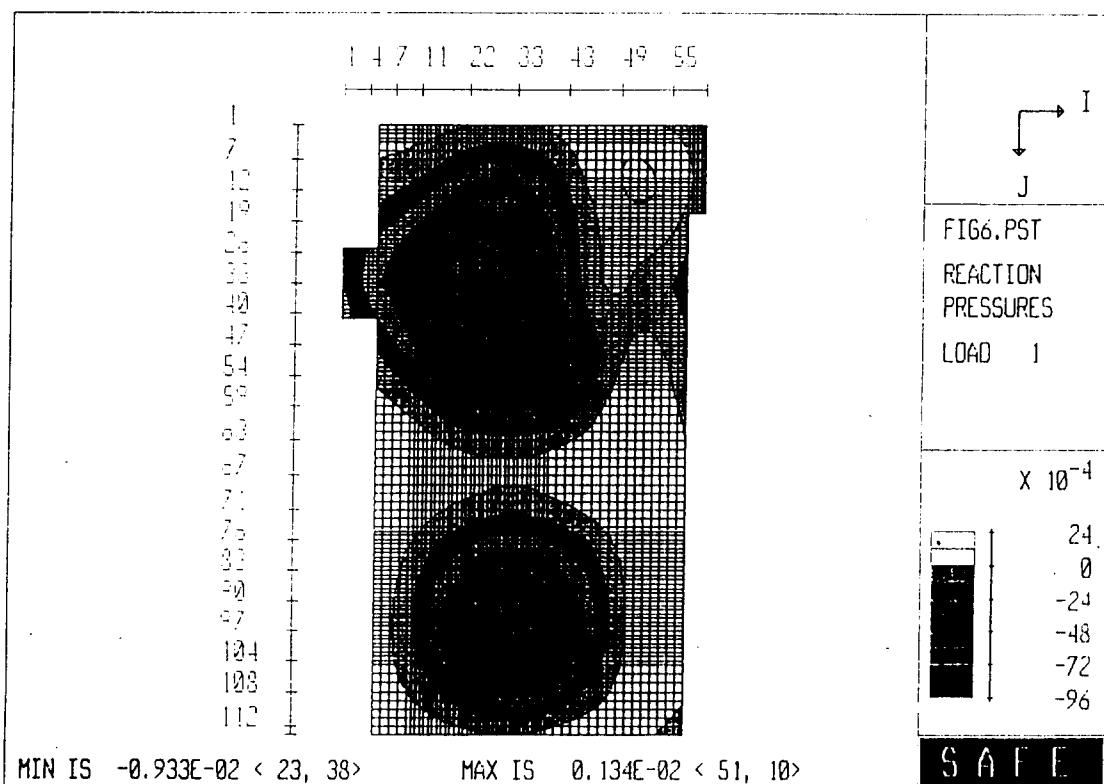


그림 11. (a) Dead + WP + EY load에 의한 침하



(b) Dead + WP + EY load에 의한 pressure

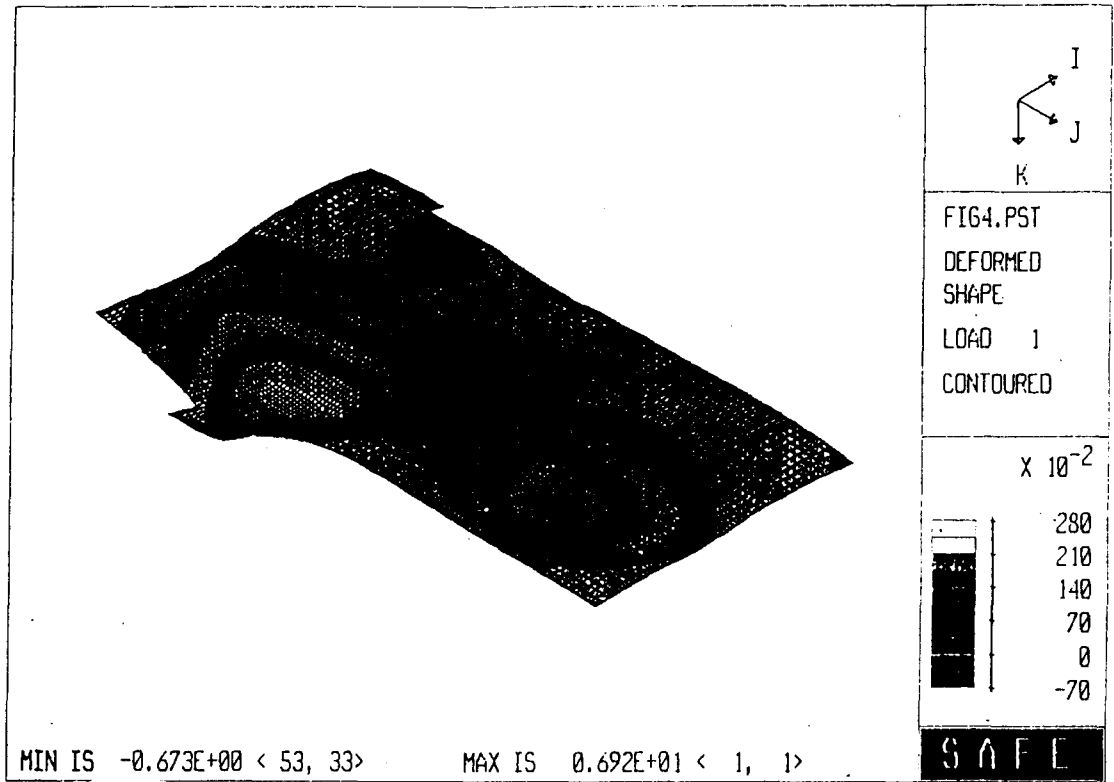
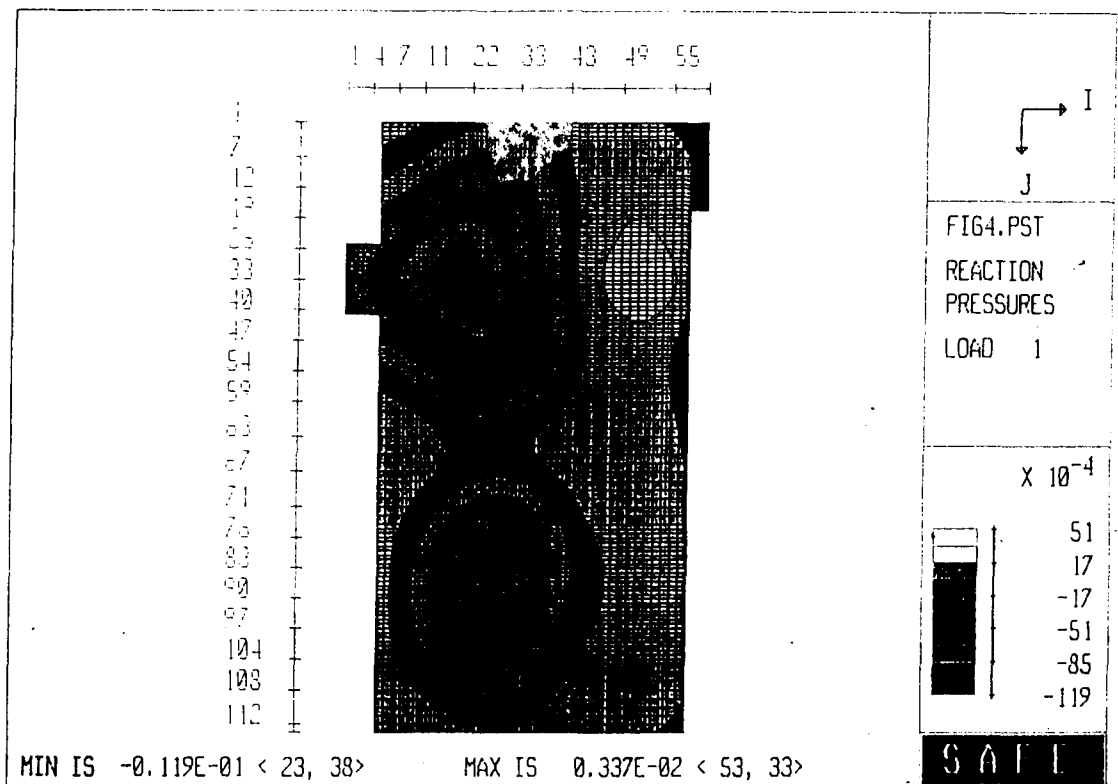


그림 12. (a) Dead + WP - EX load에 의한 침하



(b) Dead + WP - EX load에 의한 pressure

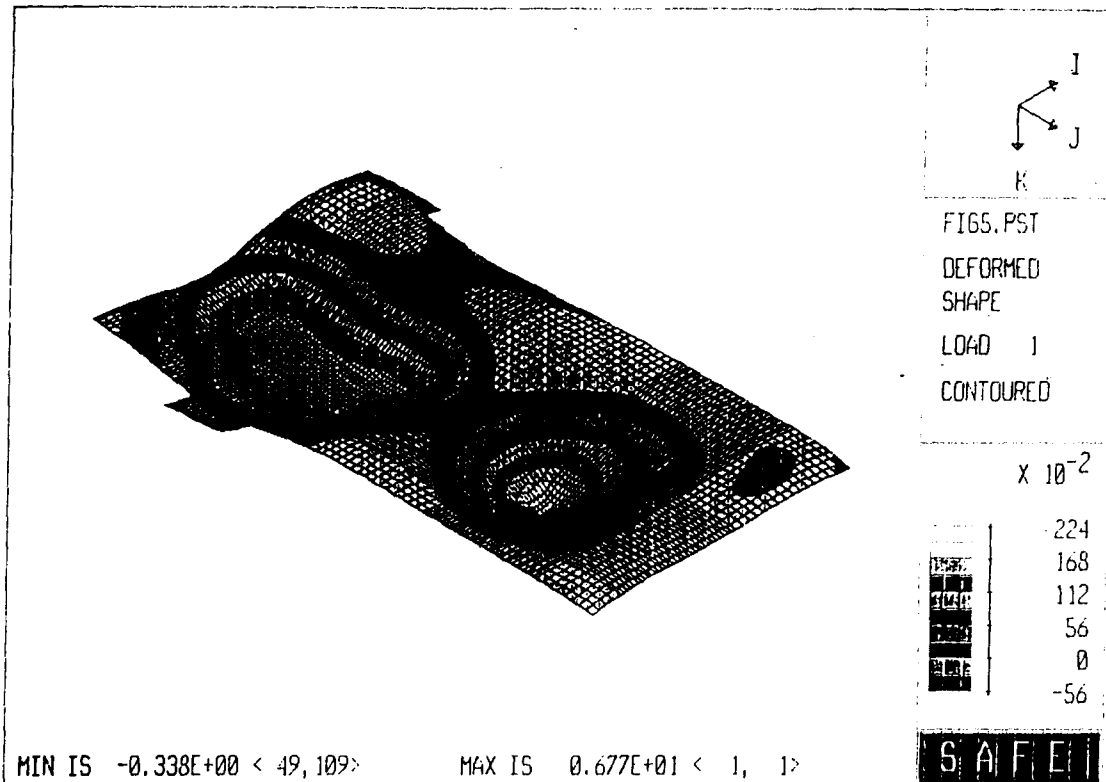
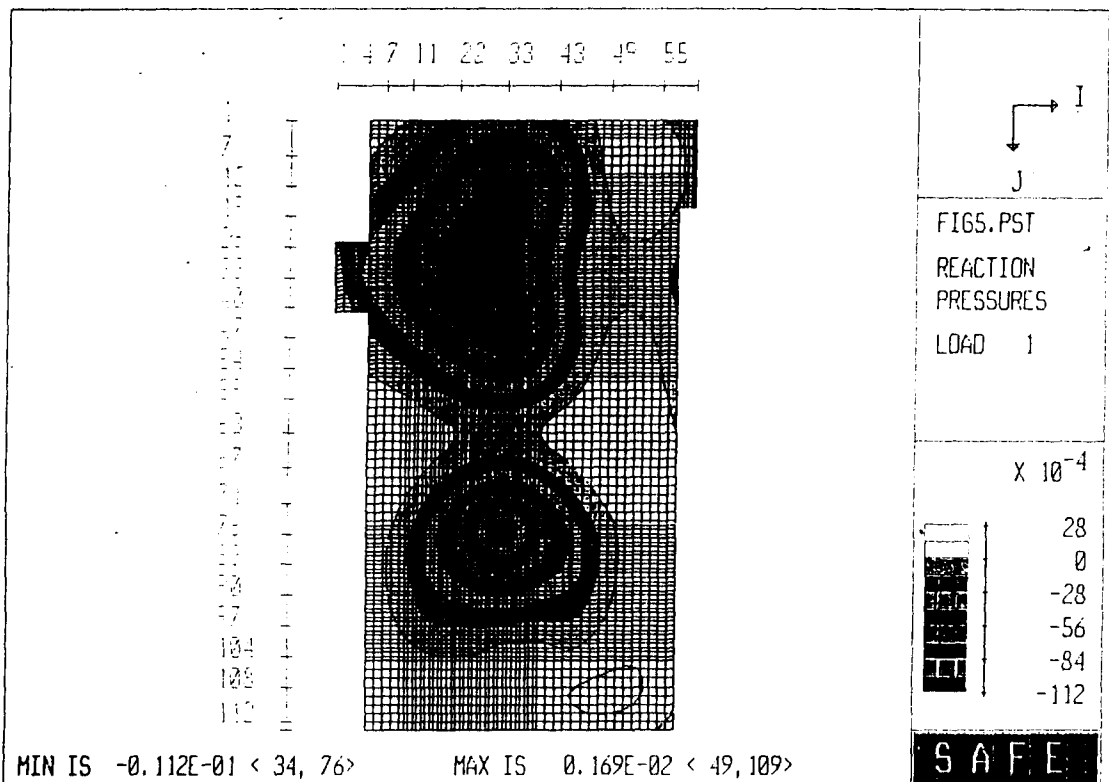


그림 13. (a) Dead + WP - EY load에 의한 침하



(b) Dead + WP - EY load에 의한 pressure

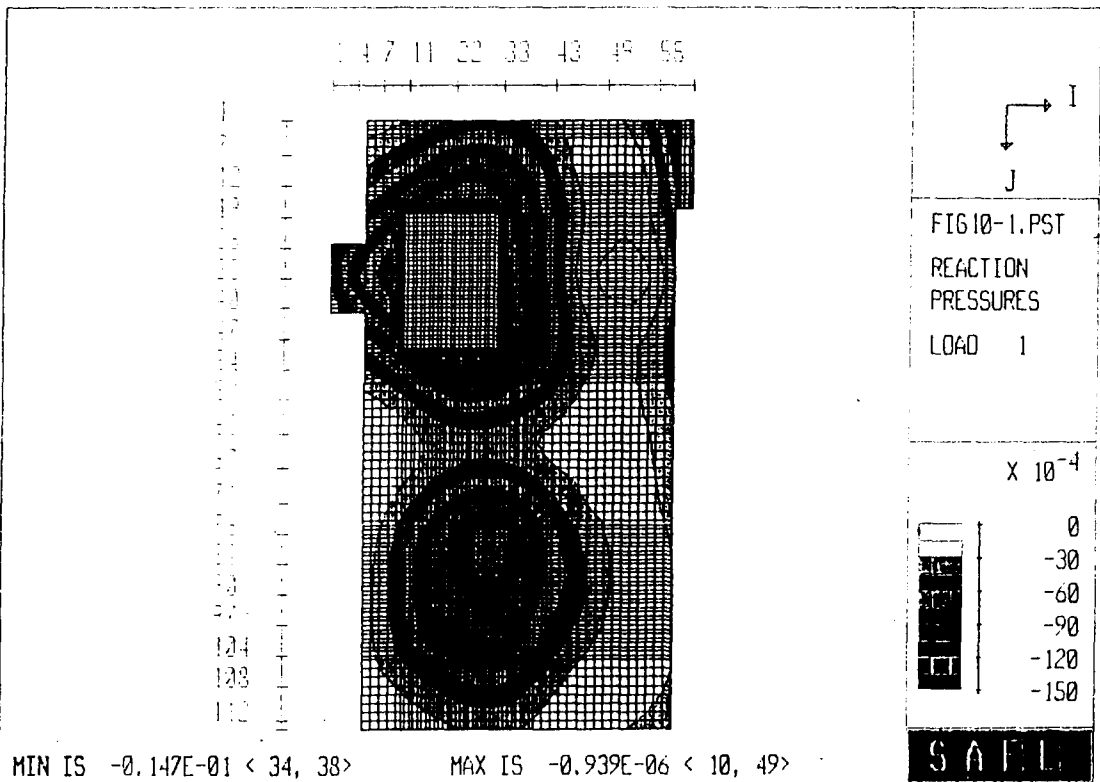
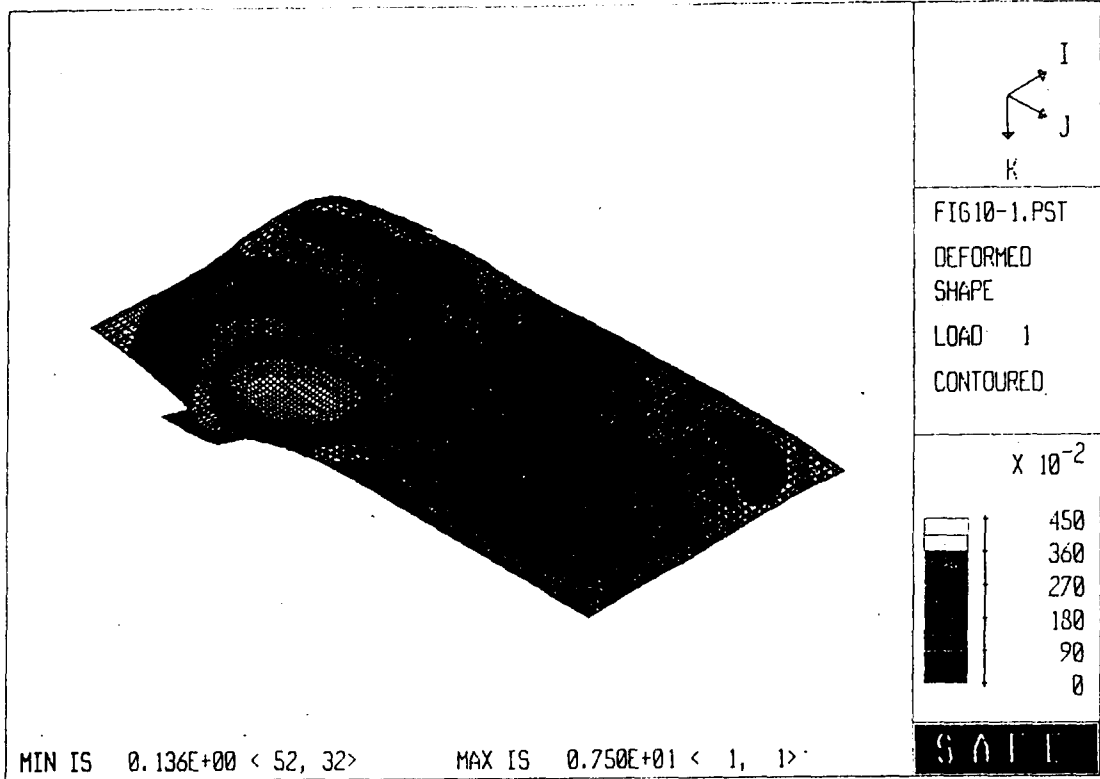


그림 14. 탄소성해석을 수행한 지반침하 및 응력도