

## 풍화암에 지지된 현장타설말뚝의 3차원 해석

### 3D FE Analysis of Cast-in-situ Concrete Pile embedded in Weathered Rock

김상백<sup>1)</sup>, Sang-Baek Kim, ○ 이활<sup>2)</sup>, Whaol Lee, 권오관<sup>3)</sup>, Ohkyun Kwon, 최용규<sup>4)</sup>, Yongkyu Choi

<sup>1)</sup> 계명대학교 건설시스템공학부 공학석사, Master, Dept. of Civil Engineering, Keimyung Univ.

<sup>2)</sup> 계명대학교 건설시스템공학부 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Keimyung Univ.

<sup>3)</sup> 계명대학교 건설시스템공학부 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Keimyung Univ.

<sup>4)</sup> 경성대학교 건설환경공학부 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Kyung Sung Univ.

**SYNOPSIS :** In this study, the behaviors of a cast-in-situ concrete pile embedded in the weathered rock were analysed by a 3D numerical analysis using PENTAGON 3D and the results were compared with those of the field load test. The load-settlement relation and the load transfer relationship were evaluated from the numerical analysis. As a result, the load-settlement relation at the pile top and the axial load distribution with depth were predicted reasonably. And those results were similar with those of the field load test.

**Key Words :** 3D Numerical Analysis, Cast-in-situ Concrete Pile, PENTAGON 3D, Weathered Rock, load transfer

## 1. 서론

본 연구에서는 ○○대교 공사현장에서 시공된 풍화암에 근입된 대구경 현장타설말뚝에 대하여 수치해석을 이용하여 그 거동을 파악하였다. 실제 말뚝의 거동을 보다 정확하게 파악하기 위하여 상요 수치해석 프로그램인 PENTAGON 3D를 이용하여 수치해석을 실시하였다.

수치해석을 통하여 현장타설말뚝의 하중-침하 관계 및 하중전이 관계를 파악하여 말뚝의 지지거동을 파악하고자 하였으며, 이와 병행하여 현장에서 수행된 말뚝재하실험(부산광역시 종합건설본부, 2000) 결과와의 비교를 통하여 그 신뢰성을 검증하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 현장타설말뚝 조건

본 해석에 사용된 현장타설말뚝은 직경이 1000 mm이고, 길이가 32 m이다. 현장타설말뚝이 위치한 지층구성은 매립층, 모래층, 풍화토층, 풍화암층의 순서로 이루어져 있으며, 시험말뚝은 그림 1에서 보는 바와 같이 풍화암층에 지지되어 있다. 각 지층의 물성치, 전단강도정수, 특성치 등은 본 현장에서 수행된 표준관입시험, 일축압축시험, PMT 등의 결과를 종합하여 산정한 결과이다(부산광역시 종합건설본부, 1993). 해석에 사용된 지반의 대표적 특성치는 다음의 그림 1에 나타나 있다.

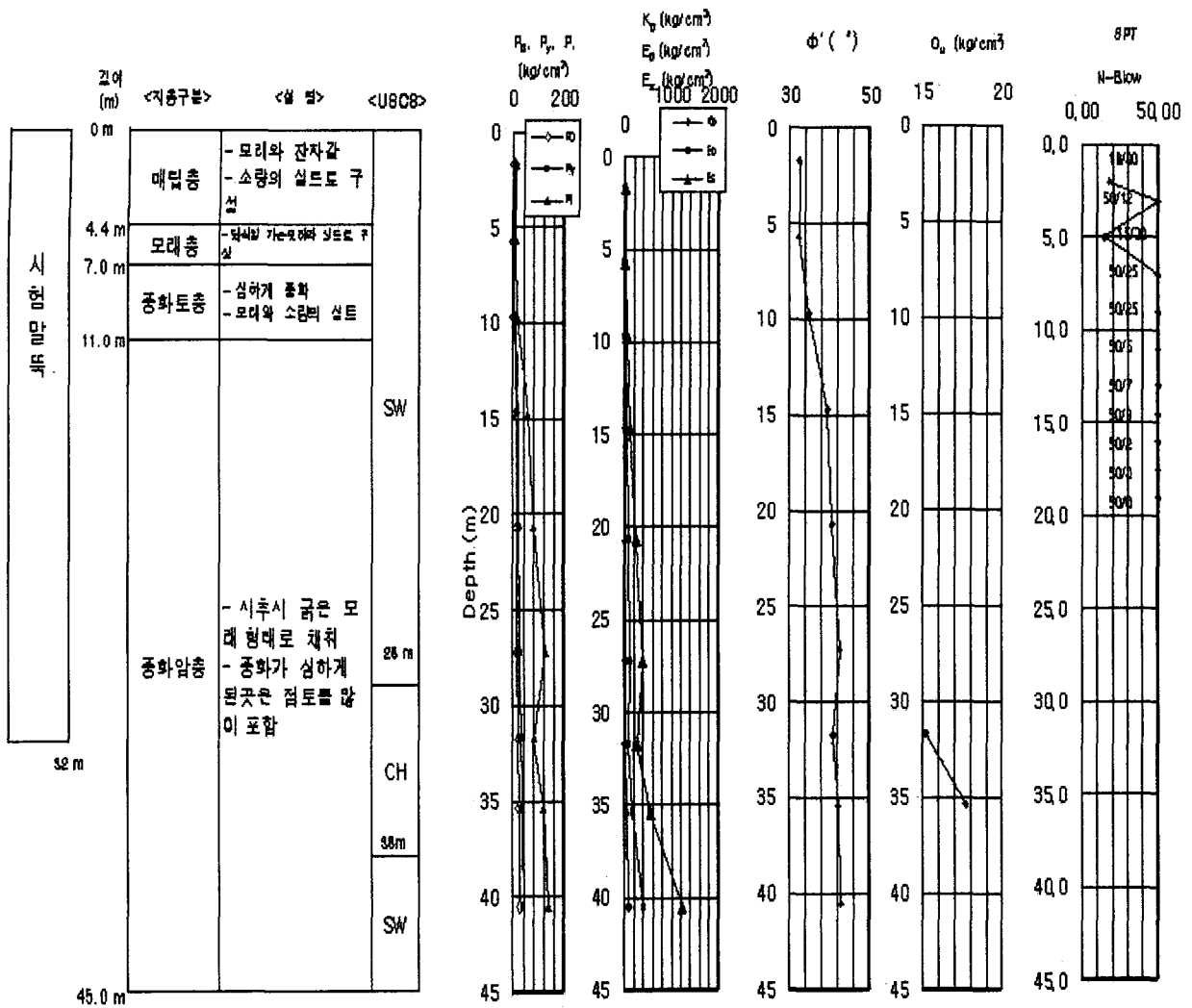


그림 1. 지반특성치

## 2.2 수치해석 모델링

일반적으로 말뚝은 원통형상을 갖기 때문에 유한요소해석시 축대칭 2차원 또는 3차원으로 모델링을 하여야 한다. 본 연구에서는 상용 유한요소 프로그램인 PENTAGON 3D(Emerald Soft, 1998)를 사용하여 3차원 해석을 수행하였으며, 시공과정을 반영하기 위하여 수치해석 모델링시 그림 2와 같이 초기 원지반, 지반굴착, 말뚝설치, 하중재하의 4개 단계로 나누어 모형화하였다. 수치해석에 사용된 모형도는 그림 3에 나타나 있으며, 말뚝과 지반은 육면체 요소로 모형화하였으며, 현장타설말뚝은 선형탄성(linear-elastic) 모델, 지반은 Mohr-Coulomb 탄소성(elasto-plastic) 모델로 모형화하였다. 수치해석에 사용된 말뚝과 지반의 물성치는 그림 1의 결과를 근거로 다음의 표 1에 나타나 있다.

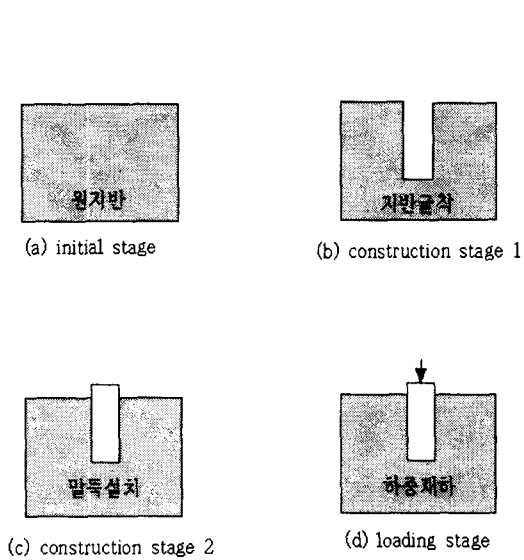


그림 2. 시공 과정을 반영한 수치모형화

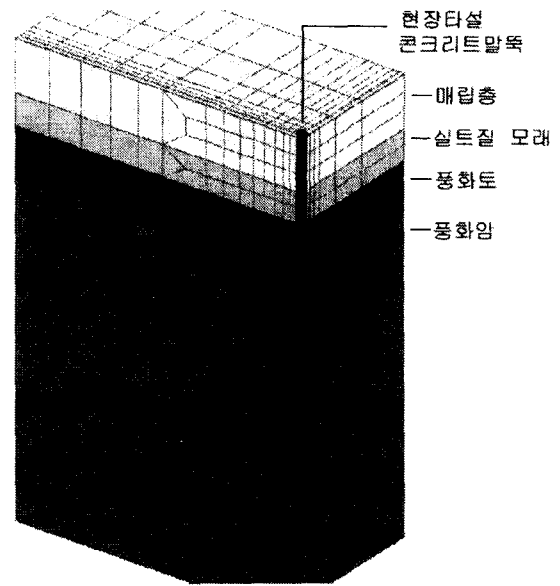


그림 3. 수치해석 모형도

표 1. 수치해석에 사용된 말뚝과 지반의 물성치

물성치	말뚝	매립층+모래층	풍화토층	풍화암층
E (kN/m <sup>2</sup> )	26,950,000	39,200	78,400	1,470,000
K (kN/m <sup>2</sup> )	14,970,000	33,663	65,337	1,225,000
G (kN/m <sup>2</sup> )	11,230,000	1,538	30,155	565,381
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	23.52	18.13	18.52	22.15
c (kN/m <sup>2</sup> )	4410	19.6	39.2	490
$\phi$ (°)	35	32	35	36
Ko	Ko-x	1.0	0.5	0.5
	Ko-y	1.0	1.0	1.0
	Ko-z	1.0	0.5	0.5
온도 계수	0.00001	0.00001	0.00001	0.00001
$\nu$	0.2	0.3	0.3	0.3
비 고	말뚝의 콘크리트 $\sigma_{ck}=8.8$ kN/cm <sup>2</sup> 으로 하여 산정			

### 3. 수치해석 결과 및 분석

풍화암에 근입된 현장타설말뚝에 관한 3차원 수치해석을 실시하여 하중-침하 관계와 깊이별 하중분포 관계에 관한 결과를 도출하고, 이 결과들과 현장재하시험에 의한 결과들을 비교·분석하였다. 그림 4는 수치해석결과 나타난 하중-침하 관계를 도시하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 하중-침하에 관한 수치해석 결과는 항복하중이나 극한하중이 나타나지 않고 거의 일직선으로 나타나는 탄성적 거동을 나타내고 있으며, 말뚝 선단에서의 침하는 거의 발생하지 않고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 수치해석결과 나타난 말뚝머리에서의 하중-침하 관계와 말뚝재하시험에서 측정된 결과를 같이 도시한 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 수치해석 결과는 약간의 차이는 있지만 말뚝재하시험에서 측정된 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 49,000 kN을 재하하여도 말뚝은 탄성변형 거동을 하는 것으로 나타나기 때문에 하중만을 기준으로 허용지지력을 산정하는 것은 곤란하다. 그러므로 본 말뚝의 경우에서와 같이 말뚝머리에서의 침하량이 25.4mm 이상 발생하는 경우에는 허용침하량을 기준으로 하여 말뚝기초의 허용지지력을 예측할 수 있다. 침하량 25.4 mm 기준으로 허용지지력을 산정하는 경우 수치해석에서 나타난 허용지지력은 약 34,300 kN으로 나타났다. 이러한 결과는 본 현장타설말뚝의 설계시 사용된 설계하중 보다 매우 크게 나타났다. 그러나 본 해석에 사용된 지반조건과 같이 매우 양호한 지반에 말뚝 선단을 관입하여 지지하는 경우에는 말뚝의 허용지지력이 말뚝 재료의 허용하중에 의하여 결정될 수 있을 것으로 판단된다.

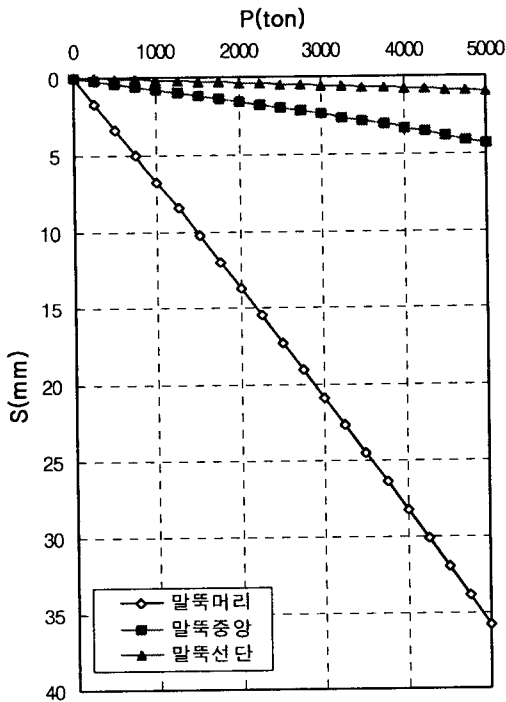


그림 4. 수치해석에 의한 하중 - 침하량 관계

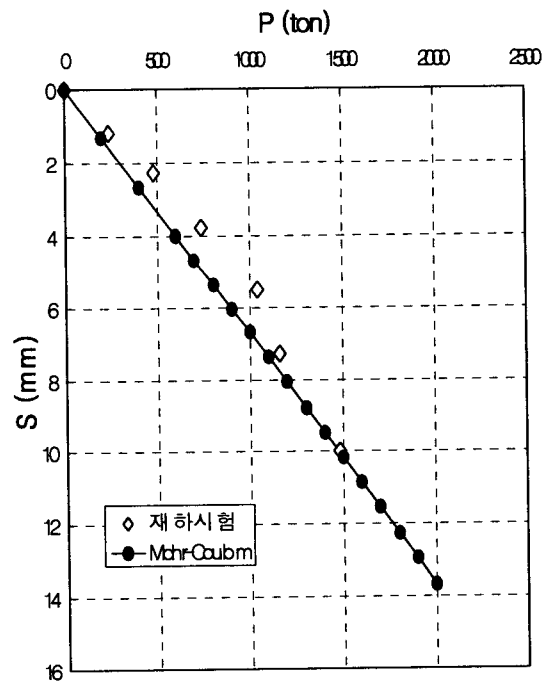


그림 5. 수치해석과 재하시험 결과비교 (TP1)

말뚝기초의 하중전이 거동을 규명하기 위하여 수치해석 결과로부터 말뚝 깊이에 따른 말뚝의 축하중 분포도를 구하였으며, 이 결과가 그림 6에 나타나 있다. 그림 7은 말뚝재하시험에서 측정된 하중단계별

말뚝축하중 분포도를 보여주고 있다. 그림 6과 그림 7로부터 수치해석 결과와 현장재하시험 결과와는 약간의 차이를 보여주고 있다. 수치해석 결과는 지표 근처에서는 말뚝의 축하중이 큰 전이를 나타내지 않고 있으며, 지표로부터 7~17 m사이에서 급격한 하중이 전이되는 양상을 보여 주고 있는 반면에, 현장재하시험 결과는 지표면 부근에서 급격한 말뚝축하중의 급격한 전이가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 수치해석에 사용된 지반의 물성치 평가가 지표면 부근에서 실제 현장의 물성치와 큰 차이가 있는 것으로 판단된다. 지표면 근처에서의 지반 물성치를 보다 현장에 근사한 값을 사용하여 수치해석을 수행하면 재하시험 결과에 근접한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 그림 7의 말뚝재하시험으로 부터 극한하중 14,700 kN 재하시 말뚝의 주면마찰력과 선단지지력은 각각 약 14,500 kN과 200 kN으로 본 말뚝은 전형적인 마찰지지말뚝의 거동을 하는 것으로 나타났다. 수치해석 결과 역시 14,700 kN 재하시 축하중의 대부분은 말뚝의 주면으로 전이되고 말뚝의 선단에는 거의 전달되지 않는 것으로 나타나 현장재하시험과 유사한 결과를 주는 것으로 평가된다.

수치해석과 말뚝재하시험 결과 나타난 말뚝의 축하중전이 분포도를 근거로 말뚝머리 하중을 외주면마찰력과 선단지지력으로 분리하여 각 하중 재하단계에서 각 지층에서 발휘된 평균 마찰응력 분포를 그림 8에 나타내었다. 각 하중단계에서 발휘되는 평균 마찰응력 분포는 비교적 비슷한 경향을 보여주고 있지만 상부 매립토층과 풍화토층에서 약간 차이가 있는 것으로 나타났다. 말뚝재하시험 결과 마찰응력 분포는 말뚝의 상부에서 최대가 되어 하부로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보여주며, 수치해석결과는 최상부 매립층 보다 풍화토층 근처에서 최대가 되고 하부로 갈수록 감소하여 말뚝선단에서는 평균 마찰응력이 매우 작은 값으로 나타났다.

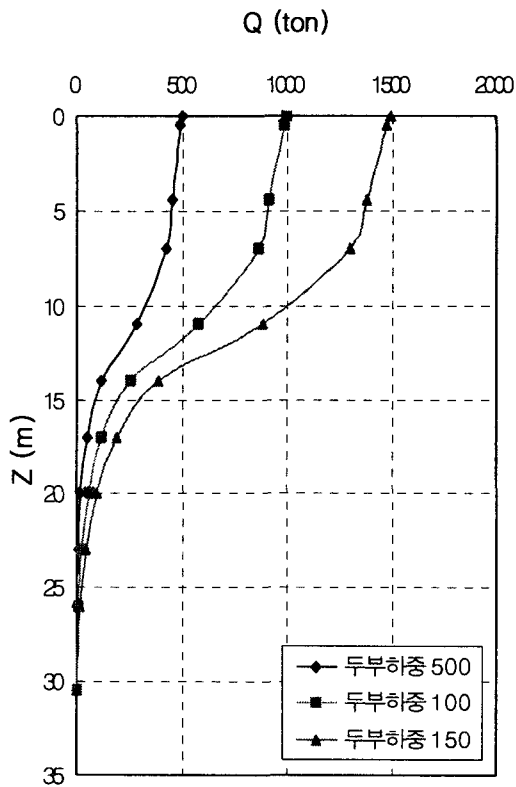


그림 6. 수치해석에 의한 하중단계별 말뚝축하중 분포도

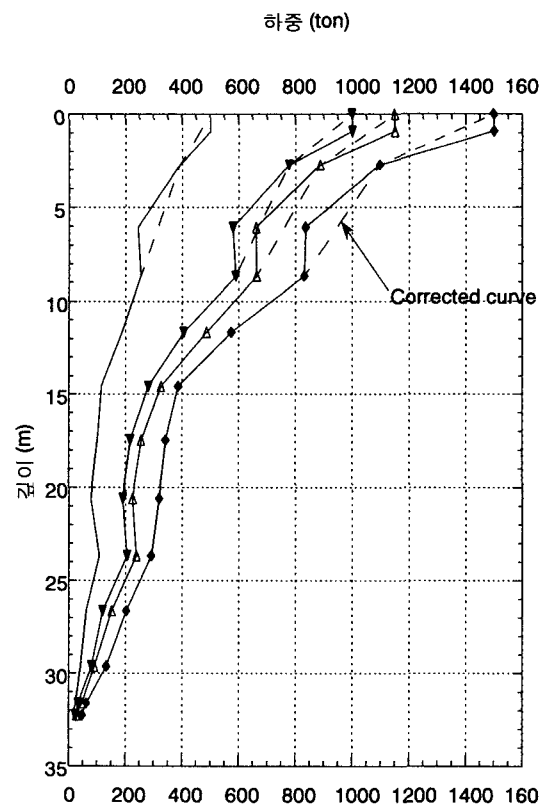


그림 7. 말뚝재하시험에 의한 말뚝축하중 분포도

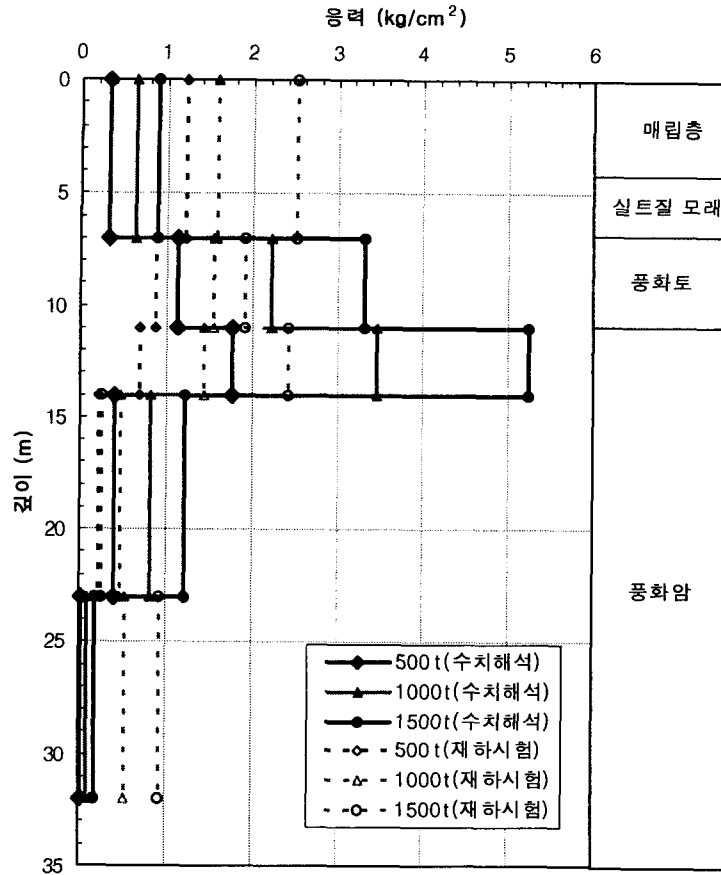


그림 8. 각 지층에서 동원된 평균 마찰응력

#### 4. 결론

본 연구에서는 국내 ○○대교 공사에서 풍화암에 근입된 대구경 현장타설말뚝에 대하여 3차원 수치해석을 실시하여 그 거동을 파악하고, 현장에서 수행한 실대형 현장재하시험 결과와 비교·분석하였다. 현장타설말뚝의 하중-침하 관계곡선은 3차원 수치해석으로 적합하게 산정하였으며, 이 결과는 재하시험 결과와 잘 일치하였다.

현장재하시험과 수치해석 결과로부터 본 말뚝은 마찰말뚝으로 거동하며 축하중은 대부분 상부 15 m 이내에서 대다수 전이되는 양상을 보여주었다.

#### 참고문헌

1. 부산직할시 종합건설본부(1993), "광안대로 건설·기본 및 실시설계 용역 지반조사보고서." 1993. 12.
2. 부산광역시 종합건설본부(2000), "광안대로 말뚝재하시험 결과 보고서", 2000. 1.
3. 최용규, 정성기, 권오균(1998), "개단강관말뚝의 하중전이실험에 관한 연구." 대한토목학회논문집, 제 18권 제 III-2호, 1998. 3, pp 241-250.
4. 최용규(1999), "국내 말뚝기초 설계관행의 개선을 위한 제언-말뚝기초의 지지력 관점에서-." 대한토목학회논문집, 제 19권 제 III-3호, 1999. 5, pp 467-477.
5. Emerald Soft (1998), "PENTAGON 3D Manual."