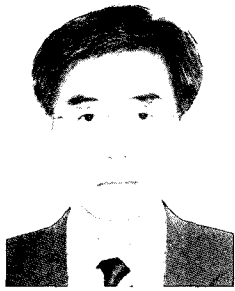


지반-구조물 상호작용을 고려한 동적 해석 프로그램 SASSI

(A System for Analysis of Soil-Structure Interaction)의 소개 및 해석 사례



장 승 진
(주)지암컨설팅 사장

프로그램 SASSI는 U.C. Berkeley의 John Lysmer 교수에 의해 개발된 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석 프로그램으로 많은 설계사들과 기관에서 사용되어오고 있다. 미국에서는 상당수의 원자력시설들(ABWR, SBWR, AP600 등)과 플랜트시설들이 프로그램 SASSI에 의한 해석을 기초로 하여 설계되었으며, 다양한 분야에서 해석 및 설계에 사용되고 있다. 또한 최근 대만 Lotung 지역에서 수행된 실물 크기의 모델에 대한 현장 진동실험에서 프로그램 SASSI에 의한 해석결과는 프로그램 SASSI의 유용성을 보여주고 있다. 현재 프로그램 SASSI는 원자력시설 외에 지하구조물 분야, 장대교량, 플랜트 시설분야 등 다양한 토목구조물에 대한 지반-구조물 상호작용의 해석에 이용되고 있다.

1. 프로그램 SASSI의 개요

지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석 프로그램인 SASSI는 유연체적법 (flexible volume method)를 사용하여 진동수 영역에서 지반-구조물 연계시스템의 운동방정식을 구성하여 해석을 수행한다. 유연체적법은 그림 1에서 보는 바와 같이 전체 지반-구조물 연계시스템 그림 1(a)을 구조물이 놓이기 전의 지반 그림 1(b)과 굴착된 지반을 제외한 구조물 그림 1(c)의 두 부분으로 나누고 각 부분에 대한 운동방정식을 구성한 후 진동수 영역에서 결합함으로써 해석이 이루어진다.

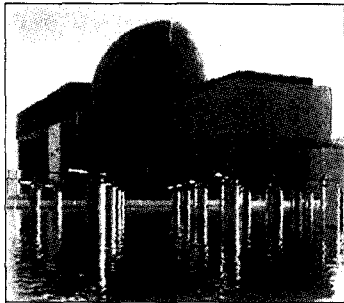


사진 1. 원자력 시설

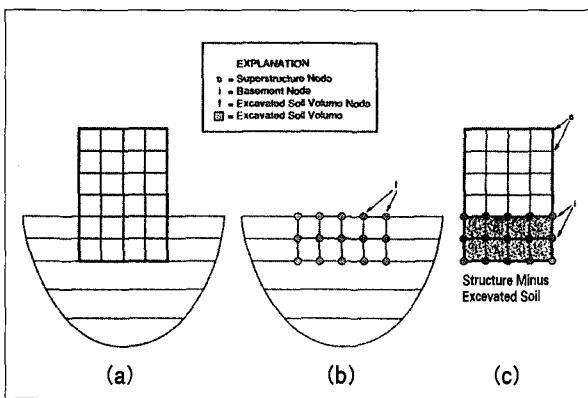


그림 1. 유연체적법의 개념

2. 프로그램 SASSI의 구성

지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석 프로그램인 SASSI는 단계별 해석과정을 필요로 하는 유연체적법을 적용한 프로그램으로 해석단계는 크게 부지응답 해석단계, 임피던스함수 해석단계 및 상호작용 응답 해석단계로 이루어져 있다. 부지응답 해석단계에서는 지반을 암반 또는 균일한 탄성 반무한체 위에 놓인 점탄성 수평층상으로 가정하여 굴착된 체적내의 상호작용 절점에 대한 자유장 운동을 결정하고, 임피던스함수 해석단계에서는 구조물과 기초의 운동에 관련된 임피던스함수를 결정한다. 그리고 상호작용 응답 해석단계에서는 하중벡터와 복합 강도행렬을 구성하고 운동방정식의 해를 구한다. 이를 위하여 프로그램 SASSI는 그림 2와 같이 구성되어 있으며, 각 모듈의 기능 및 내용을 간략히 정리하면 다음과 같다.

- ▶HOUSE : 상부구조물과 굴착된 지반에 대하여 기본적인 질량행렬 및 강성행렬을 구성한다.

▶MORTOR : 구조물 내부의 동하중이나 외부의 동하중에 대하여 하중벡터를 구성한다.

▶SITE : 부지의 응답에 대하여 해석을 수행한다.

▶POINT : 상호작용 절점에 대한 유연도 행렬의 계산에 필요한 점하중에 대한 해를 각 진동수에 대하여 구한다.

▶ANALYS : 프로그램 SASSI의 심장부에 해당되며, MATRIX, LOADS, SOLVE으로 구성되어 있다. MATRIX는 각 진동수에 대한 임피던스함수를 구성하며, LOADS는 하중벡터를 각 진동수에 대하여 계산하고, SOLVE는 복소 강성행렬과 하중벡터로부터 전체 변위의 크기를 계산한다.

▶COMBIN : 두 진동수 세트의 결과를 조합하여 새로운 해석 진동수를 포함시키는 기능을 가지고 있다.

▶MOTION : 변위, 속도 그리고 가속도 응답의 시간이력을 생성하고 또한 전달함수와 응답스펙트럼을 출력한다.

▶RANDOM : 통계운동의 파워스펙트럼이나 응답스펙트럼을 사용하여 구조물의 확률론적 응답을 평가한다.

▶STRESS : 구조물 요소에서의 최대응력과 최대변형을 평가하거나 각 지반요소의 중심에서의 최대변형의 평가를 통하여 지반에서의 최대전단변형의 근사값을 구한다.

프로그램 SASSI는 Fortran 언어로 작성되었으며 초기에는 Graphic User Interface가 없었으나, 최근에는 Graphic User Interface와 몇 가지 기능이 추가되어

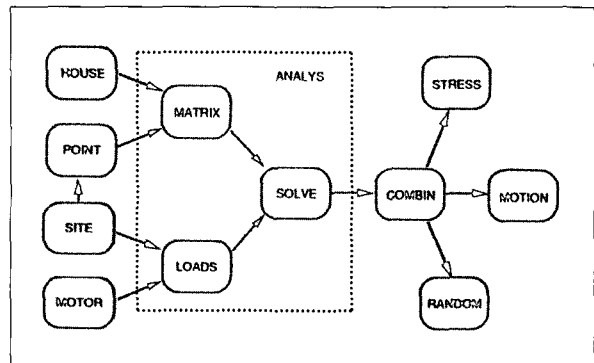


그림 2. 프로그램 SASSI의 구성

SASSI2000, ACS SASSI 등의 이름으로도 사용되고 있다.

3. 프로그램 SASSI의 특징과 적용 분야

지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석 프로그램인 SASSI는 실제적인 적용에 있어서 최대의 융통성과 경제성을 가질 수 있도록 만들어졌다. 주어진 문제에 대하여 대부분의 프로그램 모듈들이 실행되어야 하는 것은 자명한 사실이나, 일부 요소에만 변화를 준 경우에는 모든 프로그램 모듈을 다시 반복 실행할 필요 없이 해당되는 프로그램 모듈만을 다시 실행하면 결과를 얻을 수 있어 효율적인 프로그램이라 할 수 있다. 또한 각 단계에서 결과를 확인할 수 있어 해석 시 발생할 수 있는 오류를 최소화 할 수 있다.

대규모 구조물의 건설이 증가함에 따라 지반조건이 양호하지 못한 지역에 구조물이 건설되는 경우가 증가하고 있다. 지반 상태가 양호하지 못한 지반에 건설되는 구조물의 경우에는 지반-구조물 상호작용이 고려되어야 하며,

프로그램 SASSI는 이러한 지반 상태가 양호하지 못한 지반에 건설되는 구조물의 동적해석에 다양하게 사용되고 있다. 프로그램 SASSI는 개발 초기부터 원자력발전소의 내진해석에 널리 사용되어오고 있으며, LNG 저장시설과 같은 대형 플랜트 시설에 대한 내진해석에도 적용되고 있다. 장대교량의 경우에는 교각 기초부에서의 지반-구조물 상호작용과 입력 지진파의 위상차에 의한 효과가 고려되어야 하며, 프로그램 SASSI는 이를 고려한 해석을 효율적으로 수행할 수 있다. 또한 터널과 같은 지하구조물 및 해양구조물에 대한 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석에도 많이 이용되고 있다.

4. 프로그램 SASSI의 특징과 적용 분야

프로그램 SASSI를 이용하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 장대교량, 지중구조물, 해양구조물에 대한 대표적인 동적 해석 사례들을 소개하면 다음과 같다.

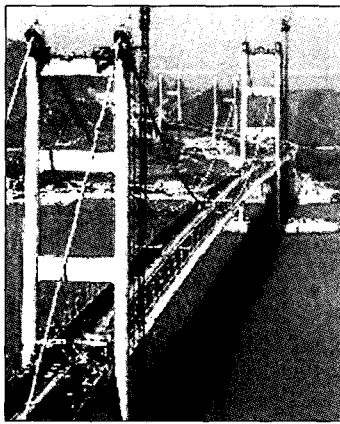


사진 2. 현수교

(1) 장대교량에 대한 동적해석 사례

그림 3과 같이 RCD pile과 케이슨 기초를 갖는 현수교에 대하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석을 프로그램 SASSI를 이용하여 수행하였다. 해석은 인공지진파의 생성, 자유장 해석, 기초의 Impedance 해석 및 내진 해석으로 이루어졌다. 본 해석 사례의 경우 상부구조물에 발생하는 변위는 증가하였으나, 현수교 케이블의 장력 및 주탑의 휨모멘트, 상판의 휨모멘트 등의 응답은 지반-구조물 상호작용을 고려할 경우 감소하였으며, RCD pile과 케이슨 기초에 발생하는 응력은 그림 4, 그림 5와 같이 구

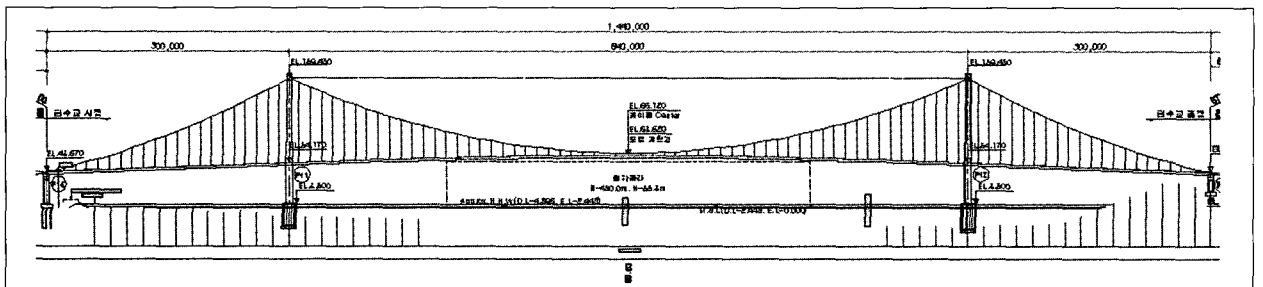


그림 3. 현수교 모델

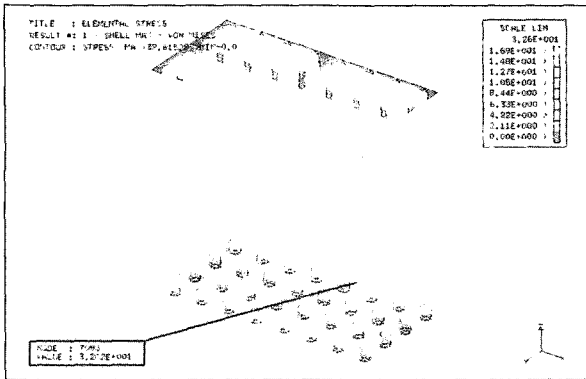


그림 4. RCD pile의 응력분포

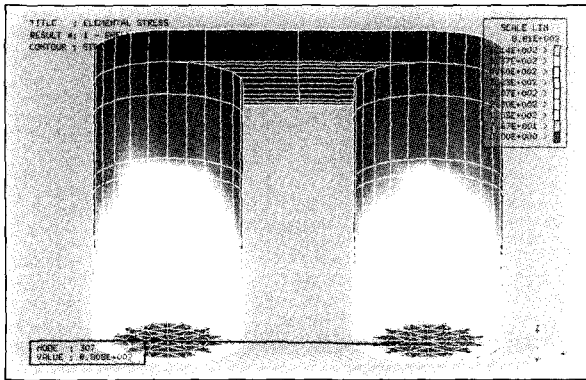


그림 5. 케이스 기초의 응력분포

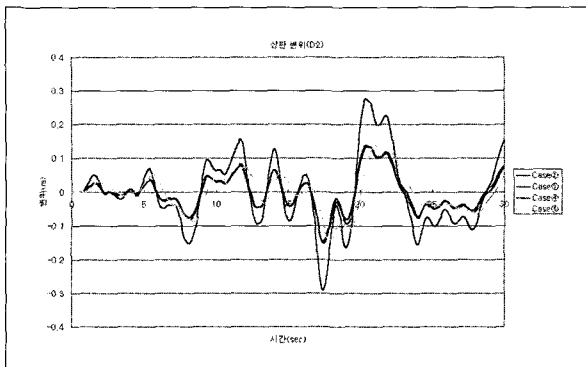


그림 6. 상판 위치에서의 주탑의 변위 시간이력

하여졌다. 또한 지지점간의 이격거리와 각 지점에서의 상이한 지반특성에 따른 파동전달효과를 고려한 동적해석을 수행하여 그림 6과 같은 주탑의 변위 시간 이력을 얻었다.

(2) 지중구조물에 대한 동적해석 사례

고속철도구간에서의 수직구, 터널 및 터널공법 변경구

간(굴착식+개착식)에 대하여 프로그램 SASSI를 이용하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석을 수행하고 구조물에 대한 안전성을 검토하였다. 본 해석 사례의 경우 현재 많이 쓰이고 있는 2차원 응답변위법에 의한 해석결과에 비하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 프로그램 SASSI에 의한 3차원 해석결과가 더 큰 응력값을 보였다 (그림 7, 그림 8).

지반 조건이 상이한 국도상의 터널들에 대하여 프로그램 SASSI를 이용하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석을 수행하고 터널의 안전성을 검토하였다. 터널이 위치하는 지반 조건에 따라 응답변위법에 의한 해석결과와 프로그램 SASSI에 의한 해석결과가 다른 경향을 보였다. 지표면으로부터 가까이 위치하는 터널이나 암반 내에 위치하는 터널의 경우에는 프로그램 SASSI에 의한 해석결과가 작게 나타났으나, 지반조건이 양호하지 못한 위치에 있는 터널의 경우에는 프로그램 SASSI에 의한 해석결

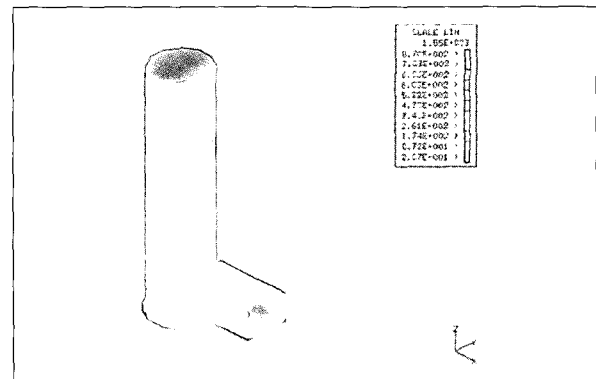


그림 7. 수직구에 발생하는 응력분포

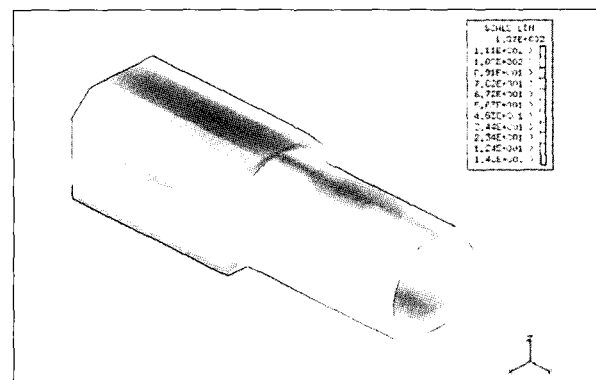


그림 8. 터널공법 변경구간에서의 응력분포

» 강좌 II

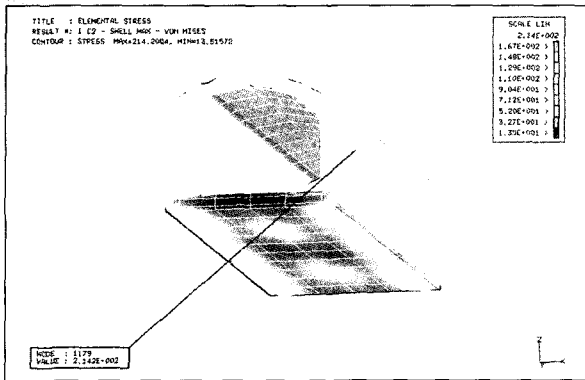


그림 9. 터널에 발생하는 응력분포

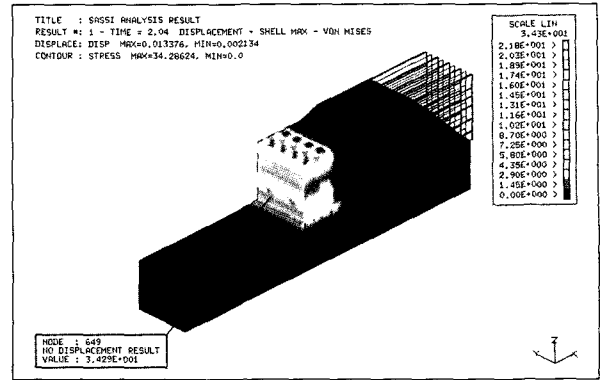


그림 12. 케이스 기초에서의 응력분포

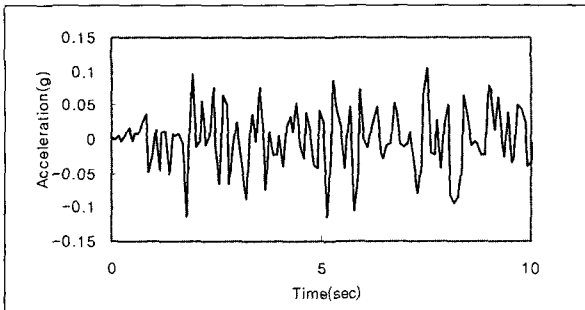


그림 10. 터널 측벽부에서의 가속도 시간이력

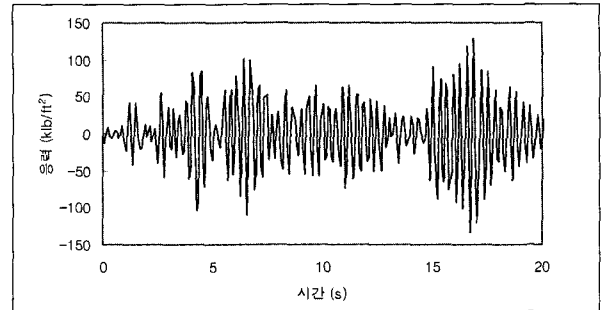


그림 13. 케이스에 발생하는 응력의 시간이력

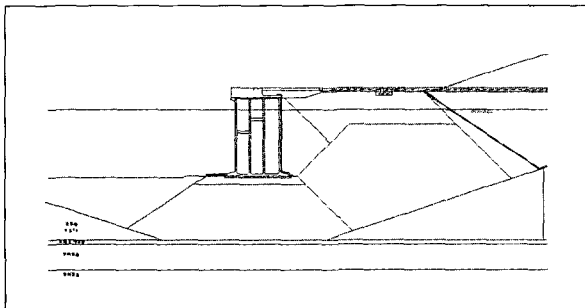


그림 11. 항만 컨테이너 부두의 케이스 기초

과가 더 큰 결과값을 나타내었다(그림 9, 그림 10). 이러한 결과들은 지반조건이 양호하지 못한 지반 내에 위치하는 지중구조물의 경우 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적 해석이 필요함을 보여준다.

(3) 항만구조물에 대한 동적해석 사례

항만 컨테이너 부두 축조 공사에 건설되는 케이스에 대해서 프로그램 SASSI를 이용하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 동적해석을 수행하고 구조물의 안전성을 검토

하였다.

항만구조물로 사용되는 케이스 구조물은 케이스와 케이스를 둘러싼 지반 그리고 유체의 영향을 고려하여 해석을 하여야 한다. 특히 지층 변화를 포함한 지반의 역학적 성질, 상부구조물과의 연결상태를 포함한 케이스의 구조적 특성, 케이스와 주변 지반 사이의 역학적 거동, 유체의 역학적 거동, 하중의 동특성 등이 종합적으로 고려되어야 한다. 본 해석 사례의 경우 인공지진파의 생성, 자유장 해석, 내진해석의 단계로 수행하였다. 케이스와 뒷채움된 지반을 포함한 근역은 Solid 요소로 모델링하였으며, 지반은 반무한체 위에 놓인 수평층상으로 모델링하였다. 케이스 전면에서 작용하는 유체의 영향은 수위를 변화시키며 Westergaard added mass method를 이용하여 부가질량의 형태로 모델링하였다. 해석으로부터 얻은 케이스 기초에 발생하는 응력의 분포와 응력의 시간이력은 그림 12, 그림 13과 같다.