

터널 라이닝의 비파괴 평가를 위한 전문가시스템 개발

Development of an Expert System for Nondestructive Evaluation of Tunnel Lining

김문겸* 허택녕** 이재영*** 김도훈****
Kim, Moon-Kyum Huh, Taek-Nyung Lee, Jae-Yung Kim, Do-Hoon

ABSTRACT

In this study, an expert system is developed to evaluate a safety of tunnel structures. Using a dynamic finite element analysis module, this expert system predicts dynamic responses of a concrete lining surface which a transient force is applied on and estimates the condition between the concrete lining and surrounding ground. The evaluation parameter values of the module are multi-reflected wave frequency and amplitude of the dynamic responses. The multi-reflected wave frequency represents the depth of concrete lining, and the other parameter, the amplitude of the frequency, is utilized for detecting the internal flaws. A comparison of the dynamic responses between numerical and experimental model test verifies an effectiveness of this system. By this expert system, the safety of tunnel structures and the detection of internal flaws of concrete linings are estimated quantitatively.

1. 서론

본 연구에서는 터널의 안전성을 파악하고자 하며, 특히 기존의 주관적인 안전성평가방법을 보완하기 위하여 유지관리의 전문가시스템을 도입함으로써 보다 객관적인 평가의 결과를 얻고자 한다.

터널의 역학적 거동에 위해를 주는 각종 결함은 유지·보수 측면에서 많은 문제를 야기하고 있으며, 이러한 결함은 다양한 인자에 의해 좌우된다. 또한, 터널의 역학적 결함을 찾아내어 보수·보강을 하기 위한 안전진단은 대부분 정량적인 표현보다는 경험에 의한 판단을 제시하고 있다⁽¹⁾. 따라서, 결함에 의한 구조물의 변상에 대하여 컴퓨터 시스템의 도움을 받는 전문가 시스템을 통하여 누구나 쉽고 동일한 보수·보강의 방안을 제시할 수 있도록 한다. 특히, 터널라이닝의 배면에 발생된 공동을 탐지하기 위한 모형실험의 결과를 이용하여 라이닝 배면의 상태를 예측할 수 있도록 하였다.

* 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 토목전공 교수
** 국립장원대학교 공과대학 토목공학과 조교수
*** 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
**** 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

2. 터널의 유지관리와 안전진단을 위한 비파괴평가

2.1 터널의 변상

터널구조는 지반 내에 건설되는 대표적인 구조물로서 지반의 물리적 특성, 터널의 기하형상, 지보공의 형식, 지하수위 및 환경적 영향에 의하여 구조의 건전성이 큰 영향을 받는다. 따라서 공용기간이 증가함에 따라 차량이동으로 인한 진동, 소음, 매연 및 지하수위의 변화 등과 같은 주변환경에 의하여 라이닝 콘크리트는 산화 또는 중성화되어 가고, 철근과 강재는 부식되어 간다. 특히 콘크리트와 같은 다상의 취성복합재료는 타설후 경화과정을 거치면서 초기단계부터 재료내부에 수많은 미세균열을 갖게 되므로 계절적인 온도변화, 습도, 작용하중의 변화, 화학적인 변화 등이 수반되며, 시계균열이 상호결합, 성장, 발전하여 구조물의 강성저하, 처짐, 균열, 골재노출, 박리, 박락, 철근부식 등을 유발하는 원인으로 작용하게 된다.

구성재료가 열화되면 구조물의 내하력, 사용성 및 안전성이 크게 저하되므로, 장기적인 측면에서 터널구조의 사용성을 증대시키고 효과적인 유지관리 방안을 마련하기 위해서는 각종 열화현상, 손상정도 및 내하력을 정기적으로 점검함으로써 최적의 보수·보강대책을 수립하여야 한다. 이를 위하여 지반-터널구조의 상호작용에 영향을 미치는 암반체의 물성, 절리상태, 콘크리트 라이닝의 강도와 두께, 지하수위의 위치 등을 정확히 추정하여야 하며, 특히 터널구조의 건설공법과 시공시기를 고려하여 암반굴착, 숏크리트, 콘크리트 라이닝, 락볼트의 시공단계별로 발생 가능한 터널구조의 변상정도를 재료적 또는 구조적 측면에서 충분히 검토하여야 한다.

일반적으로 터널구조에 발생하는 변상은 터널아치부와 측벽의 균열, 표면박리, 누수, 배수불량, 노반침하, 터널단면의 면형과 축소, 줄눈부의 이동, 라이닝 배면의 공동, 라이닝 콘크리트의 내구성 감소 등으로 분류된다. 이중 균열과 누수현상은 가시적으로 판단 가능한 변상이므로 현장조사를 통하여 발생위치, 간격, 방향성, 범위, 빈도 등을 철저히 파악하여 터널단면의 응력해석을 위한 기초자료로 활용하여야 한다. 한편 터널구조의 응력 및 변형해석을 위해서는 시공시 암반굴착에 의한 지반내의 응력집중현상, 콘크리트 라이닝과 락볼트의 응력이완작용 및 암반체의 절리에 따른 이방성 거동 등이 고려되어야 하며, 이를 위해서는 구조해석을 위한 요소의 분할 및 절점위치 결정시 지반조사로부터 실측된 암반체의 재료특성과 절리 특성을 해석과정에 합리적으로 반영하여야 한다. 따라서 효과적인 안전진단을 수행하기 위해서는 축적된 지식과 경험 및 고도의 공학적 판단이 요구된다.

2.2 터널에 발생된 변상에 대한 안전진단

터널 라이닝에 발생된 변상을 확인하기 위해서는 시공도면 및 구조계산서의 검토, 외관조사 및 현황조사, 주변지반의 물리적성질평가, 터널구조의 응력해석 및 구조적 안전성평가 등의 조사가 수행되어지고 있다.

터널의 안전성을 판단하기 위한 기존의 평가방법은 그림 1과 같이 다양하다. 터널라이닝의 변상종류가 다양하듯이 이에 대한 안전진단의 종류도 다양하다. 따라서 터널구조물의 전반적인 안전성을 평가하기 위해서는 많은 인력과 시간이 필요하며 안전성평가의 일관성도 잃기 쉽다.

2.3 비파괴검사에 의한 지하구조물 건전성평가의 효과

본 연구에서는 충격반향탐사법을 이용하여 터널배면에 대한 비파괴시험을 실시함으로써 배면의 상태를 예측하고자 한다. 하지만 다양한 경계조건을 갖는 지하구조물에 비파괴검사를 실시하고 얻은 동적응답은 가진 장비와 측정장비의 성능 및 측정자의 측정기술에 따라 상이한 결과를 준다. 특히, 지반진동 또는 구조물의

진동과 같이 낮은 주파수 범위에서의 결과가 구조물의 기하학적인 조건에 크게 영향을 받지 않는데 반하여 탄성응력파가 라이닝 내부에서 다중반사되어 나타나는 동적응답을 대상으로 하는 주파수의 범위는 대략 1~20 kHz의 고주파 대역이므로 구조물의 기하학적인 조건에도 많은 영향을 받고 있다. 하지만, 일정한 가진력과 가진의 지속시간을 갖는 가진장비의 제작·활용과 측정장비의 표준을 정하여 사용될 경우 이러한 결과의 분산은 줄일 수 있다. 따라서, 본 연구의 결과를 현장에서 직접 적용하여 사용할 경우 측정에 대한 표준안을 작성하는 것이 바람직하다고 사료된다.

비파괴시험을 통하여 주변지반 또는 암반의 물성을 간접적으로 측정할 수 있어, 계측을 통하여 얻은 자료를 지반의 역해석에 필요한 입력자료로 활용할 수 있다. 그러므로, 향후 전문가 시스템에 역해석개념이 추가되어 지하구조물의 안전성 검토에 활용될 경우 매우 큰 효과를 얻을 것으로 사료된다. 또한, 비파괴시험에 의한 재료의 물성추정은 재료의 탄성계수 추정에 국한되고 있으나, 탄성매질 내에서의 전파속도와 압축강도와의 관계를 밝히고자 하는 연구가 선진외국에서 많이 진행중에 있다. 이러한 점을 고려하여 추가적인 연구가 수행될 경우, 기존의 파괴시험을 대체할 수 있는 비파괴시험법의 개발이 가능하리라 사료된다.

3. 전문가 시스템과 신경망이론

전문가 시스템은 잘 알려진 바와 같이 인공지능(Artificial Intelligence) 분야 중에 가장 현실화에 성공한 응용분야라고 평가받고 있는 것으로, "전문가가 가지고 있는 지식을 인위적으로 컴퓨터에 부여하여 비전문가라 할지라도 컴퓨터와 상호 대화 방식을 통하여 원하는 결과를 얻을 수 있는 일종의 자문형(consulting) 컴퓨터 시스템"이다 라고 정의할 수 있다. 즉, 전문가 시스템은 전문가의 지식을 바탕으로 지식베이스(knowledge base)를 구축하고 이로부터 결론을 추론(inference)하는 프로그램으로서 기존의 문제해석적 프로그램과는 개념상 전혀 다르다. 즉, 전문가 시스템에서는 어떤 문제에 대한 전문지식(domain knowledge)이 그것을 어떻게 사용할 것인가를 제어하는 논리 즉, 추론과정으로부터 완전히 분리되어 있기 때문이다.

최근 컴퓨터 및 소프트웨어 기술의 발달로 각 분야의 공학자도 쉽게 전문가 시스템을 구축할 수 있도록 도와주는 여러 가지 전문가 시스템 개발 도구가 상용화됨에 따라 건설산업 분야에서도 활발히 응용되고 있는 추세에 있다.

전문가 시스템의 응용은 특히 반복적인 의사결정과정에 전문가의 판단과 경험이 계속적으로 요구하는 경우에 성공적으로 이루어져 온 것을 알 수 있다. 실제로 건설현장에서는 잦은 설계변경과 입지조건 및 환경조건의 변화에 따라 구조물의 유지관리를 수행해야 할 일이 발생하고 있으며 그 때마다 전문가의 전문지식을 활용하는 데는 상당한 시간적 및 경제적 비용이 수반된다. 따라서 본 연구에서는 전문가 시스템 개발도구의 하나로 세계적으로 널리 사용되고 있는 EXSYS Professional⁽²⁾을 이용하여 그림 2와 같은 지하구조물의 유지관리를 위한 전문가 시스템을 구축하고자 하였다.

전문가시스템을 구성하기 위한 방법으로는 신경망이론과 퍼지이론 등 다수의 이론을 적용하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 그림 3과 같은 신경망 구조를 이용하여 시스템을 구성한다. 이때 추론엔진에 해당하는 층(hidden layer)에는 충격하중에 대한 동적응답을 해석할 수 있는 동적탄성유한요소해석 프로그램(IMPES⁽³⁾)이 모듈화되어 들어가 있다.

3.1 입력 매개변수에 따른 전문가시스템의 적용

탄성파를 이용하여 라이닝의 배면상태를 예측하기 위하여 표면에서 충격가진과 동시에 변위 또는 가속도의 동적응답을 얻게 되며, 푸리에변환을 통하여 주파수 형태의 동적응답으로 변환된다. 이러한 동적응답은 구성재료의 물성과 주변지반조건에 따라 상이한 변화를 보이게 되며⁽⁴⁾, 주파수 형태의 동적응답에서 공진주

파수와 그 강도에 영향을 미친다.

동적응답에 영향을 미치는 입력 매개변수는 라이닝의 제원, 터널의 직경, 라이닝 콘크리트의 물성, 지보재의 유무, 지반조건 등으로 구성되어 있다. 본 연구에 필요한 입력 매개변수는 표 1과 같이 11개로 구분되어 있다.

콘크리트 라이닝의 두께에 해당하는 공진주파수는 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$f_R = \frac{C_p}{2T} \quad (1)$$

여기서, f_R 는 반사된 P파의 공진주파수이며, T 는 라이닝의 두께이다. C_p 는 매질 내에서 전파되는 P파의 속도로 콘크리트의 물성에 따라 다음과 같은 관계를 나타내고 있다.

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2)$$

여기서, E 는 콘크리트의 동탄성계수이며, ρ 와 ν 는 각각 콘크리트의 단위중량과 포아송비이다. 이때 콘크리트의 동탄성계수는 충격반향실험을 통하여 현장에서 제작된 콘크리트 시편으로부터 직접 산정한다⁽⁵⁾. 충격반향탐사법을 수행하기 위해서는 충격에 의한 입력가진을 표면에 적용하여야 한다. 충격하중의 크기와 지속시간이 동적응답의 변화에 크게 작용하기 때문에⁽⁶⁾ 충격하중을 정의하여야 한다. 이때, 본 시스템에서는 최대충격량(F_{max})과 가진의 지속시간(t_c)을 입력 값으로 하여 다음과 같이 정현파의 충격하중을 정의하고 있다.

$$F(t) = F_{max} \sin \pi \frac{t}{t_c} \quad 0 \leq t \leq t_c \quad (3)$$

동적응답의 변화에 영향을 미치는 또 하나의 인자는 지반의 물성이다. 특히, 지반의 물성을 독립하여 작용하는 것이 아니라 콘크리트의 물성에 상대적인 값으로 작용한다. 콘크리트와 지반이 마주하고 있는 경계면에서 파의 반사도 일어나지만 상대적인 물성값에 대응하는 임피던스의 차이에 의하여 파가 투과되기도 한다. 이에 따라, 주변지반으로 에너지가 흡수되고, 동적응답의 공진주파수의 강도를 감소시킨다. 투과 및 반사되는 파의 크기는 다음과 같이 투과계수(T_1) 및 반사계수(R_1)로 나타낼 수 있다.

$$T_1 = \frac{4Z_C Z_S}{(Z_C + Z_S)^2} \quad (4)$$

$$R_1 = \frac{Z_C - Z_S}{Z_C + Z_S} \quad (5)$$

여기서, Z_C 와 Z_S 는 콘크리트와 지반의 임피던스이며, 각각의 임피던스는 매질의 물성과 관계하여 $Z = \rho C_p$ 와 같이 나타낼 수 있다.

3.2 출력 매개변수

동적응답을 분석하기 위한 출력매개변수는 콘크리트 라이닝 두께의 정보를 가지고 있는 공진주파수의 값(f_R)과 라이닝과 접하고 있는 주변지반의 영향에 따라 변화되는 공진주파수의 강도로 구성되어 있다. 공진주파수의 값은 설계된 라이닝의 두께와 예측에 의한 라이닝의 두께를 비교하게 된다. 라이닝의 배면에 공동이 형성되지 않은 경우에는 콘크리트 라이닝과 지반이 일체로 거동함에 따라 구조물이 건전한 단면을 유지

하고 있으며, 출력매개변수인 공진주파수의 경계면에서 파가 일부 투과되기 때문에 공동이 형성된 경우의 공진주파수의 강도에 비하여 낮은 강도를 갖게 된다.

4. 비파괴평가와 전문가 시스템의 적용

4.1 모형실험을 통한 비파괴평가

개발된 전문가 시스템을 적용하여 콘크리트 라이닝 배면의 상태를 예측하였다. 그림 4와 그림 5와 같은 평판모형과 원통형모형을 제작하여 공동이 형성되어 있는 단면과 공동이 형성되지 않은 건전단면에서의 실험결과를 분석하였다. 이때, 콘크리트의 동탄성계수는 모형제작과 동시에 만들어진 콘크리트 시편을 이용하여 비파괴적인 방법을 이용하여 얻을 수 있다⁽⁵⁾. 본 모형제작에 사용된 콘크리트는 슛크리트의 물성으로 제작되었으며, 측정된 동탄성계수는 28.57GPa이다.

모형실험의 결과는 전문가 시스템에 모듈화되어 삽입되어 있는 동적탄성유한요소 해석의 결과와 비교하여 분석하게 된다. 동적해석에 사용된 해석모형은 평판모형을 그림 6과 같이 적층판구조로 해석하였으며, 원통형모형은 그림 7과 같이 구성하여 해석하였다. 각 경우에 있어서 입력 값은 표 2와 같다.

그림 8은 평판모형의 공동유무에 다른 주파수형태의 동적응답과 유한요소해석의 결과를 함께 도시한 것이다. 그림에서와 같이 콘크리트의 두께에 해당하는 공진주파수는 공동이 있는 경우와 없는 경우에 각각 13.4 kHz, 10.3 kHz로 수치해석에 의한 공진주파수 12.1 kHz와 15%범위 내에서 일치하는 것을 알 수 있다. 하지만 공진주파수의 강도는 공동이 없는 경우에 비하여 공동이 있는 경우의 공진주파수 강도가 250% 이상이 값을 가지는 것을 알 수 있다.

동일한 방법으로 원통형모형의 경우에 있어서도 표 3과 같이 공진주파수의 차이는 크지 않으나 공진주파수의 강도는 공동이 있는 경우 큰 변화를 보이는 것을 정량적으로 나타낼 수 있다.

4.2 전문가 시스템 구축의 효과

지하구조물의 유지관리에 다양한 시공, 현장 및 환경조건을 고려하기란 매우 어렵다. 시설 구조물인 경우 시공시 발생했던 문제점을 유지관리에 고려하려면 이에 대한 정확한 이력과 이해가 필요하며, 신설 구조물은 시공단계별로 발생하는 다양한 현장조건에 대처할 방안이 즉각적으로 수립하기 어려우므로 이를 대처할 수 있는 전문가 시스템의 개발은 필수적인 일이다. 또한 계측자료가 있다 하더라도 경험과 지식이 풍부한 전문가의 도움이 없이는 적절한 시공방법과 보수방법을 수립하는 것은 사실상 매우 어렵다. 따라서 전문가 시스템을 활용하면 비전문가라도 효율적이고 경제적인 유지관리가 가능하며 시스템의 보급으로 비용절감의 효과와 더불어 시공기술력을 향상시킬 수 있다. 또한 동일한 업무에 대한 시행착오를 극복하고 신속하게 대처할 수 있는 체계를 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

개발된 전문가 시스템을 이용하여 모형실험을 수행한 결과를 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전문가시스템을 구축함으로써 충격반향탐사법의 결과로부터 터널라이닝배면의 공동탐사에 대한 정량적인 표현이 가능하였다.
- (2) 전문가시스템의 신경망구조에 수치해석 모듈을 삽입함으로써 모형실험을 통한 주파수형태의 동적응답과 수치해석의 결과에 의한 동적응답을 비교하여 주변지반을 고려한 터널라이닝 배면의 상태를 예측할 수

있다.

- (3) 라이닝의 두께는 실험의 결과로 산정된 공진주파수로부터 쉽게 검증할 수 있다.
- (4) 터널구조물의 유지관리에 대한 전문가 시스템의 확장을 통하여 정량적인 평가의 결과를 얻게 됨으로써 비전문가라 할지라도 합당한 보수·보강의 방안을 세울 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Haack, A., Schreyer, J., and Jackel, G., "Report to ITA Working Group on Maintenance and Repair of Underground Structures: State-of-the art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 10, No. 4, 1995, pp. 413-431.
2. *EXSYS Professional / User Manual*, MultiLogic Inc., 1997.
3. 김문겸, 이재영, "터널 라이닝 내부에서 전파되는 탄성응력파를 이용한 수치해석적 비파괴검사", 한국전산구조공학회논문집, 1998, (게재예정).
4. Carino, N.J. and Sansalone, M., "Finite Element Studies of the Impact-Echo Response of the Layered Plates Containing Flaws", *International Advances in Nondestructive Testing*, 15th Editions., McGonnagle, W.J., Ed., Gordon & Breach Publishers, New York, 1990, pp. 313-336.
5. 김문겸, 이재영, 김병찬, "탄성응력파를 이용한 터널라이닝 배면의 비파괴평가에 대한 실험적 연구", 1998년도 봄학술발표회 논문집, 한국구조물진단학회, 1998. 5., pp. 49-54.
6. *Mechanical Vibration and Shock Measurements*, Brüel & Kjær, Denmark, 1984, pp.256-257.

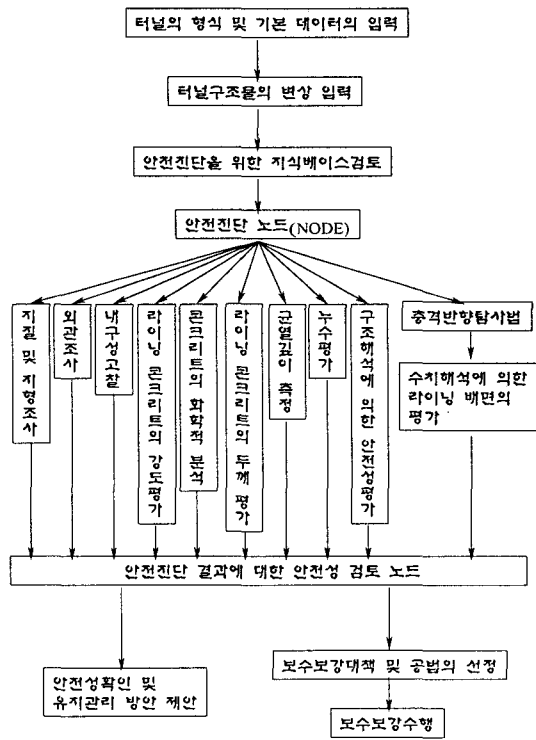


그림 1 터널의 안전성 평가 체계도

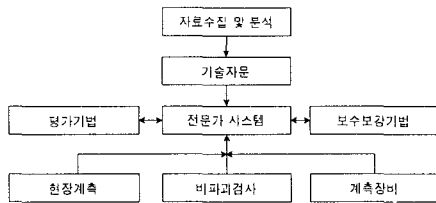


그림 2 전문가 시스템의 구성

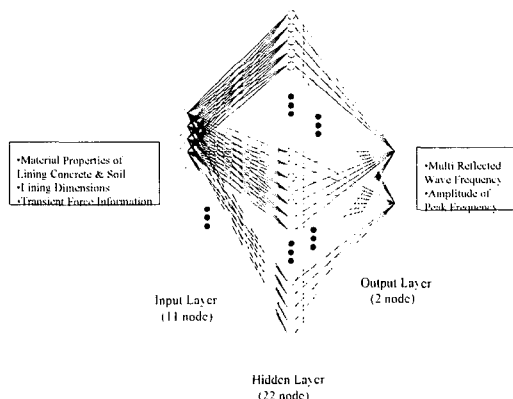


그림 3 비파괴평가를 위한 신경망 구조

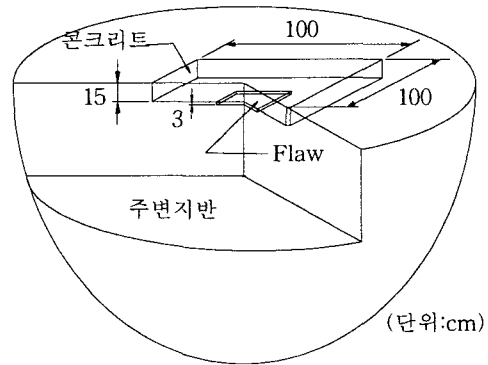


그림 4 평판모형의 개요도

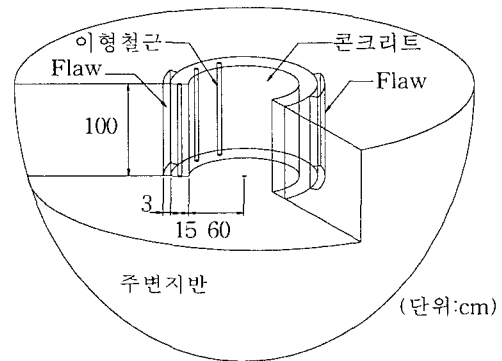


그림 5 원통형모형의 개요도

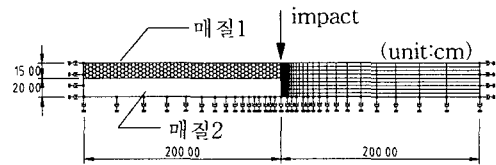


그림 6 적층판 모형

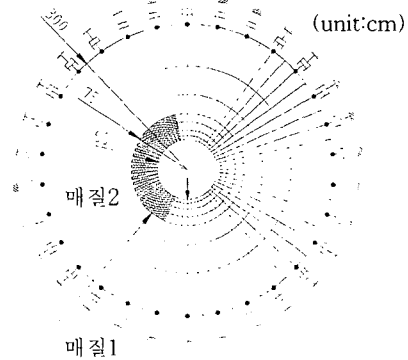


그림 7 원통형 모형

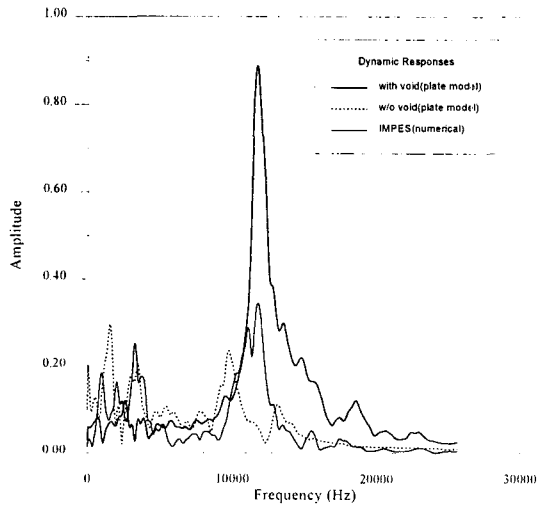


그림 8 공동유무에 따른 동적응답의 변화

표 1 입력매개변수

매개변수		입력값
콘크리트	탄성계수	28.57 GPa
	단위중량	2,300 kg/m ³
	포아송비	0.2
주변지반	탄성계수	1.0 GPa
	단위중량	1,800 kg/m ³
	포아송비	0.3
라이닝의 두께		15 cm
원형라이닝의 직경		60 cm
최대충격하중		4,000 kN
충격하중의 지속시간		0.2 μ sec
지보재의 유무		-

표 2 모형구성재료의 물성치

재료	탄성계수	포아송비	단위중량	임피던스
단위	GPa	-	kg/m ³	kg/m ² s
콘크리트 라이닝	28.57	0.2	2,300	9.2 × 10 ⁶
Soil	1.0	0.3	1,800	1.6 × 10 ⁶

표 3 모형실험과 수치해석의 비교

	배면공동이 없는 경우		배면공동이 있는 경우	
	공진주파수	주파수강도	공진주파수	주파수강도
평판모형	10.3kHz	0.26	13.4kHz	0.89
수치해석	12.1kHz	0.35	-	-
비율	0.851	0.743	1.107	2.543
원통형모형	13.8kHz	0.11	14.2kHz	0.18
수치해석	14.1kHz	0.10	-	-
비율	0.979	1.100	1.007	1.800