

음향파 굴절을 이용한 지진파의 표면파 가림

Seismic Surface Wave Cloaking by Acoustic Wave Refraction

이동우¹⁾ · 강영훈²⁾ · 김상훈^{3)*}

Lee, Dong-Woo¹⁾ · Kang, Young-Hoon²⁾ · Kim, Sang-Hoon^{3)*}

^{1,2)}목포해양대학교 조선해양공학과, ³⁾목포해양대학교 기관공학부

^{1,2)}Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University

³⁾Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University

/ A B S T R A C T /

Recently two seismic cloaking methods of earthquake engineering have been suggested. One is the seismic wave deflection method that makes the seismic wave bend away and the other is the shadow zone method that makes an area that seismic waves cannot pass through. It is called as seismic cloaking. The fundamental principles of the seismic cloaking by variable refractive index were explained. A two-dimensional cylindrical model which was composed of 40 layers of different density and modulus was tested by numerical simulation. The center region of the model to be protected is called 'cloaked area' and the outer region of it to deflect the incoming wave is called 'cloaking area' or 'cloak area.' As the incoming surface wave is approaching to the cloaking area, the refractive index is decreasing and, therefore, the velocity and impedance are increasing. Then, the wave bends away the cloaked area instead of passing it. Three cases are tested depending on the comparison between the seismic wavelength and the diameter of the cloaked region. The advantage and disadvantage of the method were compared with conventional earthquake engineering method. Some practical requirements for realization in fields were discussed.

Key words: Earthquake, Metamaterials, Acoustic cloaking, Refractive index

1. 서론

인류가 지진을 상대하는 방법은 종래에는 주로 건물 하나하나에 독립적으로 진동에 저항하는 기능을 설치하여 지진에 의한 건물의 요동을 최소화하여 대응하는 수동적인 방식이었다[1-4]. 하지만 이런 방법들은 지진에 견디는 기능을 설치하는 비용이 지진의 규모에 선형적으로 증가하지 않고 지수적으로 증가한다. 또한 설정된 규모를 벗어나는 지진에는 어쩔 수 없이 피해를 입게 된다. 더욱이 기존 기술로는 이미 완공된 건물은 지진에 저항하는 능력을 증가시키기가 어렵다. 그런데 최근에 지진파의 파동적 성질을 이용하여 지진파가 건물에 닿기 전에 미리 제어하여 피해를 줄이는 클로킹(cloaking) 혹은 '가림'이라는 방법이 제시되고 있다. 이 방법은 지진을 파동학적인 관점에서 해석하는 것으로서 지진을 막는 공법 중 제진의 일종으로 분류할 수 있다.

모든 파동은 굴절률이 다른 물질을 만나면 굴절하게 된다. 따라서 굴절

률이 다른 물질들을 점층적으로 쌓으면 파동이 굴절되어 특정부분을 비켜나가서 검출이 안 되게 할 수 있는데 이를 통칭하여 가림이라고 한다[5-9]. 가림이론은 21세기에 들어오며 메타물질(metamaterial)에서 시작하였다. 메타물질이란 물질의 구성입자 크기보다 파장이 긴 파동을 이용하여, 자연계에서 흔히 나타나지 않는 성질을 인공적으로 만들어내는 것을 통칭하여 이른다[10,11].

메타물질 연구에서 대두된 가림이론은 전혀 새로운 개념은 아니고 기존의 파동현상에 대한 재해석이다. 예를 들어 자기력선이 초전도체를 통과하지 못하고 휘어져 나가는 것도 자기가림의 일종으로 설명된다[12]. 최근에는 열전달도 단열재를 이용하면 특정부분을 피할 수 있는 가림 현상을 보인다는 것이 보고되었는데 이 역시 단열에 대한 재해석이다[13]. 뿐만 아니라 유체 속에서 미립자가 햇볕에 의하여 산란하는 현상도 어느 특정 공간을 피하여 일어나게 할 수 있다[14].

메타물질 연구의 가림이 종래의 설명과 차이가 있다면 가림을 통하여 파동의 반사파를 최소화 한다는 것이다. 가림은 공간에만 해당되는 것이 아니다. 최근에는 특정 사건이 특정 시간에 일어나지 않도록 하는 공간-시간(space-time) 가림에 대한 연구도 발표되고 있다[15,16]. 이와 같이 가림현상은 모든 종류의 파동에 나타나는 보편적 현상이다.

*Corresponding author: Kim, Sang-Hoon

E-mail: shkim@mmu.ac.kr

(Received April 7, 2015; Revised August 8, 2015; Accepted August 19, 2015)

음향파의 가림 연구는 전자기파에서 먼저 시작되어 음향파로 확장되어 왔다. 전자기파 가림은 대부분 가시광선을 대상으로 공기 중에서 연구되는데 파장이 짧아 응용이 어렵다. 반면에 음향파 가림은 파장이 길고 물속은 물론 땅속 및 고체 속까지 적용이 가능하여 더 많은 응용분야를 가진다. 급격한 압력 차이에 의하여 발생하는 지진파는 탄성파의 일종으로서 파동의 일반적인 성질인 반사, 투과, 굴절, 간섭, 회절 등을 보이므로 가림의 대상이다. 지진파 가림 이전에 탄성파 가림에 대한 연구가 발표되었다[17].

이 지진파 가림은 흔히 지진망토라 하는데 현재까지 두 가지 방법이 알려져 있다. 하나는 공기 중 음향파 가림을 땅속 지진파에 응용한 것으로서, 물체를 둘러싸고 있는 물질의 굴절률을 점층적으로 변화시켜 지진파의 방향을 바꾸어 지진파가 특정지역을 피해 휘어나가게 하는 방법이다[18-20].

다른 하나는 이와는 전혀 별개로 개발된 것으로서 굴절률을 허수로 만들어 지진파가 통과하지 못하게 하는 지진파 암영대를 지하에 인공적으로 조성하는 인공 지진파 암영대법이다[21-23]. 둘 다 메타물질에 기반을 두고 있는 원리인데 아직 본격적인 실험은 이루어지지 않고 있다. 지진파 가림막은 건물자체가 아니라 건물 외곽에 설치하기 때문에 기존의 방법을 대처하는 것이 아니라 상호보완적이다.

지진파 가림의 가설이 처음 소개된 것은 2009년이나 대부분 수식을 이용한 이론적 연구에 머물고, 아직까지 시공에 적용하는 경우 생길 수 있는 문제점에 대하여 충분한 연구가 없었다. 또한 지진파 가림의 전산모사(numerical simulation)는 대부분 공기 중 모형을 대상으로 이루어져 왔다. 따라서 이 논문에서는 기존의 지진파 굴절법의 원리를 땅속에서의 간단한 모형을 통한 전산모사법을 이용하여 구현하고, 이 방법을 시공에 적용하는 경우 필요한 사항들을 제시한다. 나아가 지금까지 알려진 이 방법의 장단점을 비롯하여 현실화를 위하여 해결해야 할 여러 가지 제반사항들을 논의한다.

2. 표면파와 지진파 방진벽

지진파는 전파공간에 따라 진원(hypocenter)에서 3차원으로 퍼져가는 1차파인 체적파(body wave)와, 체적파가 지각 표면에 도달하여 진앙(epicenter)을 중심으로 2차원으로 퍼져가는 2차파인 표면파(surface wave)로 나뉜다. 체적파에는 P파와 S파가 있고, 표면파에는 L파(Love wave)와 R파(Rayleigh wave)가 있다. 지진이 발생하면 먼저 체적파인 P파와 S파가 연이어 오고 나중에 표면파가 온다. P파는 종파고 S파는 횡파이나 표면파는 이 둘이 다 있으며 주파수도 여러 가지가 섞인 혼합파다. 표면파는 지면으로부터 파장 깊이정도만 진행하며, 파장보다 깊으면 지수적으로 진폭이 감소하는 2차원 파동이다[24,25].

표면파는 체적파에 비해 속력은 대체로 느리나, 2차원으로 진행하여 3차원 진행파에 비하여 소멸이 천천히 일어나고, 진폭이 커서 주요 피해요인이다. 지진의 세기를 기술할 때 가장 일반적으로 쓰이는 리히터(Richter) 규모 M은 다음과 같다.

$$M = \log \frac{A}{A_0} \tag{1}$$

A는 지진파 진폭의 최대 크기로서 표면파의 진폭이다. 측정지점의 거리는 표면파의 발생지점인 진앙으로부터 100 km 떨어진 곳에서 측정된 값을 기준으로 한다. A_0 는 배경진폭으로 리히터 규모에서는 $1 \mu m$ 를 사용한다. 따라서 어느 장소에서 측정하든 관계없이 같은 지진에 대한 규모는 동일한 값을 갖는다.

리히터 규모 3이하는 거의 피해가 없으나 6이상은 큰 피해가 발생할 수 있다. 최근 백년 이내에 기록된 지진들 중에서 가장 규모가 큰 것들은 9정도다. 진앙이 바다에 위치하여 지진해일이 동반되면 그 피해는 더 커진다. 2011년 3월에 일본 동북지방에서 발생한 지진은 규모가 9정도였는데 지진보다 지진해일에 의한 피해가 훨씬 더 컸다. 지진의 규모가 로그함수로 정의되므로 지진의 규모가 산술적으로 증가할 때 건설비용은 지수적으로 증가하므로 높은 지진 규모의 건설에는 큰 어려움이 따른다. 이 외에 지진파의 세기를 표시하는 것으로 지진파에 의한 지반의 가속을 지구중력가속도 g의 함수로 표시하는 최대지반가속도(PGA, peak ground acceleration)가 있다.

지진파가 건물에 도달하기 전에 지진파를 약화시킬 목적으로 지진파 가림과 별도로 연구되어 왔던 것이 지진파 방진벽(seismic barrier)이다[26-29]. 방진벽에는 지면에서 수직으로 표면파 파장 정도 깊이까지 설치하는 수직형과, 지면에 수평으로 표면파 파장 정도 길이까지 설치하는 수평형이 있다. 방진벽의 내부는 총탄을 막기 위한 방탄복과 비슷한 구조로서 여러 개의 겹으로 되어 있는데, 기본적으로 지진파 에너지를 소모시켜 방진벽을 통과한 지진파를 약화시키는 장치다.

방진벽에 도달한 지진파는 일부는 반사하고 일부는 투과하는데, 수직형의 경우에는 내부에 흙보다 밀도가 작은 물질을 채워 지진파를 가능한대로 반사시키려는 장치고, 수평형의 경우에는 반대로 내부에 흙보다 밀도가 큰 물질을 채워 표면 가까이로 진행하는 파를 가능한대로 막아보려는 장치다. 형태는 방진벽을 보호하고자 하는 건물 주위로 등글게 설치하는데 가림방법과 유사하다.

3. 가림 이론 및 전산모사

일반적으로 물질의 전기적 성질이 전기유전율과 자기투자율로 결정된듯이 물질의 기계적 성질은 밀도와 탄성계수로 결정된다. 역학적파동은 속력이 밀도 ρ 와 탄성계수 B의 함수로 $v = \sqrt{B/\rho}$ 로 주어진다. 탄성계수는 1차원에서는 영계수(Young's modulus)이고, 2차원에서는 전단계수(shear modulus)이며, 3차원에서는 체적변형계수(bulk modulus)다. 또한 압력(p)과 탄성계수는 밀도가 균일하면 다음 보존식들을 만족한다[24,25,30].

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\vec{\nabla} p \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{B} \vec{\nabla} \cdot \vec{v} \tag{3}$$

\vec{v} 는 유체의 속도다. 굴절률은 속력의 역수로 $n = v_b/v$ 로 주어진다. v_b 는 배경속력이다. 파동은 굴절률이 다른 물질을 만나면 굴절하는데 굴절률이 작은 부분은 피해가고 굴절률이 큰 부분으로 모이는 특징이 있다. 즉 파동이

진행하다가 속력이 늦어지면 가운데로 모이고, 속력이 빨라지면 바깥쪽으로 흩어진다. 따라서 밀도와 탄성계수로 굴절률을 변화시킬 수 있고 속력을 변화시킬 수 있다.

어떤 공간을 외곽에서 안쪽으로 들어가며 매질의 임피던스 $Z = \rho v = \sqrt{\rho B}$ 를 점차 증가시키면 특정지역을 통과하지 못하고 비껴나가게 된다. 이때 굴절률이 점차 변하여 파동이 휘는 지역을 가림막지역(cloaking area, cloak area)이라 하고, 가림막지역 중앙의 파동이 침투하지 못하는 지역을 가림지역(cloaked area)이라 한다. 가림막지역을 형성하는 밀도와 탄성계수 식은 다양한 형태가 가능한데, 밀도와 탄성계수를 조합하여 등각사상(conformal mapping)을 통하여 설계한다. 가림막지역으로 파동이 들어올 때 임피던스가 일치하도록 하고, 가림막지역 내부에서 임피던스를 연속적으로 증가시키면 반사파를 줄일 수 있다. 가림막을 땅속에 설치하고 흙을 덮어 완성하므로 약간의 임피던스 차이가 나타나도 가림막지역이 크게 흔들리지 않는다. 파손된 가림막은 지진 이후에 보수한다.

전산모사를 위해서는 밀도와 탄성계수 식이 필요한데, 속력이나 이의 역수인 굴절률이 밀도와 탄성계수의 함수이므로 이들을 변화시켜도 동일하다. 지진 가림장치를 설치하는 경우 변화시키는 것은 가림막지역의 밀도와 탄성계수다. 음향파 가림의 2차원 전산모사에는 몇 가지 식이 나와 있는데 우리는 가장 일반적인 식을 사용하였다[30-33]. 밀도와 굴절률 n 이 가림막 지역인 $R_1 < r < R_2$ 구간에서 다음처럼 반지름의 함수로 주어진다.

$$\frac{\rho(r)}{\rho_b} = \frac{r}{r-R_1} + \sqrt{\left(\frac{r}{r-R_1}\right)^2 - 1}, \quad (4)$$

$$n(r) = \frac{v_b}{v(r)} = \frac{R_2}{R_2-R_1} \frac{r-R_1}{r}. \quad (5)$$

ρ_b 는 배경밀도이며 v_b 는 배경속력이다. R_1 은 가림막지역의 내경이며 R_2 는 외경이다. 밀도의 방향의존성 함수 ρ_θ 는 반지름 밀도 함수의 역수로 $\rho, \rho_\theta = \rho_b^2$ 를 만족한다.

가림막지역을 통과하는 파동의 속력의 변화와 이에 따른 굴절률의 변화, 그리고 임피던스의 변화를 그래프로 그리면 Fig. 1과 같다. 가림막지역의 맨 외곽에 밀도와 탄성계수가 아주 작은 물질을 배치하고 중앙으로 들어가며 식(4)와(5)처럼 밀도와 탄성계수가 점차 큰 물질로 배치한다. 탄성계수는 판이 아주 얇은 경우 영계수로 선택하기도 하지만[19], 상당한 두께를 가져야 하는 모형에서는 체적계수로 한다.

역학적파동의 속력은 밀도가 작을수록 탄성계수가 클수록 커지는데, 파동이 밖에서 안으로 들어올 때 밀도가 커지는 것보다 탄성계수가 더 빨리 커지므로 속력이 빨라진다. Fig. 1(a)는 시공지역인 $R_1 < r < 2R_1$ 사이에서의 굴절률의 변화(점선)와 이의 역수인 속력의 변화(실선)를 표시한 것으로 파동이 가림지역에 통과하며 속력이 빨라져야 반사파 없이 가림지역을 돌아 반대쪽으로 갈 수 있다.

Fig. 1(b)는 가림막지역의 밖에서 안으로 들어오며 임피던스가 증가하여 가림지역을 보호하는 것을 보인다. 시공은 실선부분만 하지만 가림막지역 외곽도 점선처럼 부드럽게 이어져야 반사파가 덜 생긴다. 전산모사에서 가림막지역의 외경을 $R_2=2R_1$ 으로 하였는데 이는 가림막지역의 최소반경으로 R_2 가 R_1 보다 클수록 임피던스를 일치시켜 반사파를 줄이기에 용이

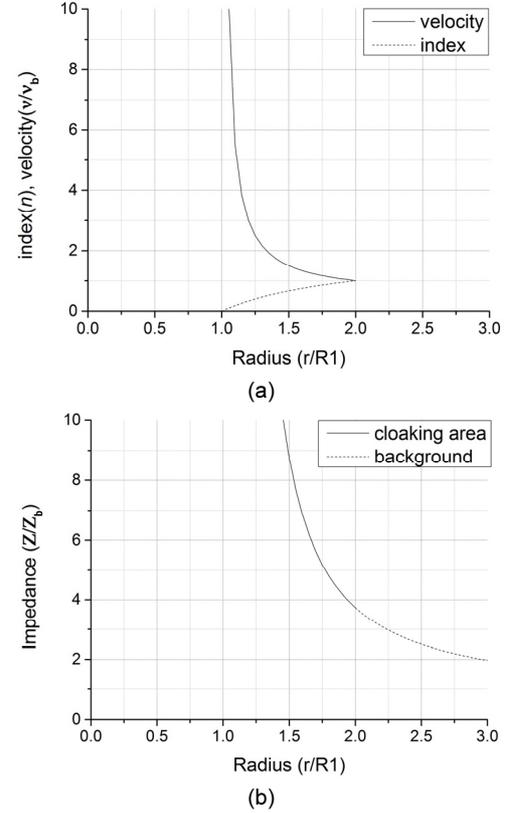


Fig. 1. The physical quantities in the cloaking area. (a) refractive index and velocity, (b) impedance.

하다.

표면파는 여러 파장의 파가 섞여 있는 혼합파지만 파장의 길이가 대략 100 m 또는 그 이상이므로, Fig. 2 모형의 크기는 이에 맞추어 가림지역의 직경을 100 m ($R_1 = 50$ m), 가림막지역의 직경을 이의 2배인 200 m ($R_2 = 100$ m)로 하였다. 그리고 그 사이를 동심원 모양으로 균등하게 40등분하여 밀도와 탄성계수를 조금씩 변화시켰다. 따라서 가림막지역을 구성하는 동심원 모양의 판 1장의 두께는 2.5 m다. 깊이는 적어도 지면부터 기초공사부분까지 이상이다. 배경인 땅속 입력 값으로 밀도는 대륙지각의 평균밀도에 가까운 2.000 kg/m^3 , 압력은 지하 약 50 m에 해당하는 10기압으로 하였다. 속력은 표면파의 평균속력 정도인 $1,000 \text{ m/s}$ 로 하였다. 주파수는 파장이 가림지역 직경보다 긴 5.0 Hz, 비슷한 15 Hz, 짧은 50 Hz의 3가지로 하였다. 전산모사기로 상업용 소프트웨어인 콤솔(COMSOL) 4.4를 사용하였다[33].

Fig. 2는 음향 평면파가 땅속에서 왼쪽에서 오른쪽으로 진행하는 동안의 압력변화를 보여주는 전산모사다. 적색은 압력이 높은 곳이고 청색은 압력이 낮은 곳으로서 그 둘의 색 차이가 파동의 진폭에 비례한다. 그래프는 전산모사에서 파동이 진행하는 경로 중 중앙부분을 수평으로 잘랐을 때 나타나는 파동의 압력변화다. 파장이 가림지역 직경에 비하여 훨씬 긴 5.0 Hz의 경우가 반사파가 거의 없어 가림효과가 가장 잘 나타나며, 가림지역 직경과 비슷한 15 Hz인 경우는 미세한 반사파가 발생하나 가림이 가능하며, 가림지역의 직경보다 상당히 짧은 50 Hz인 경우는 반사파가 많이 발생하여 가림효과가 나타나지 않음을 알 수 있다. 50 Hz인 경우는 가림지역의 압력이 낮아져도 반사파가 발생하면 가림막지역의 구조가 파괴될 수 있다. 이와

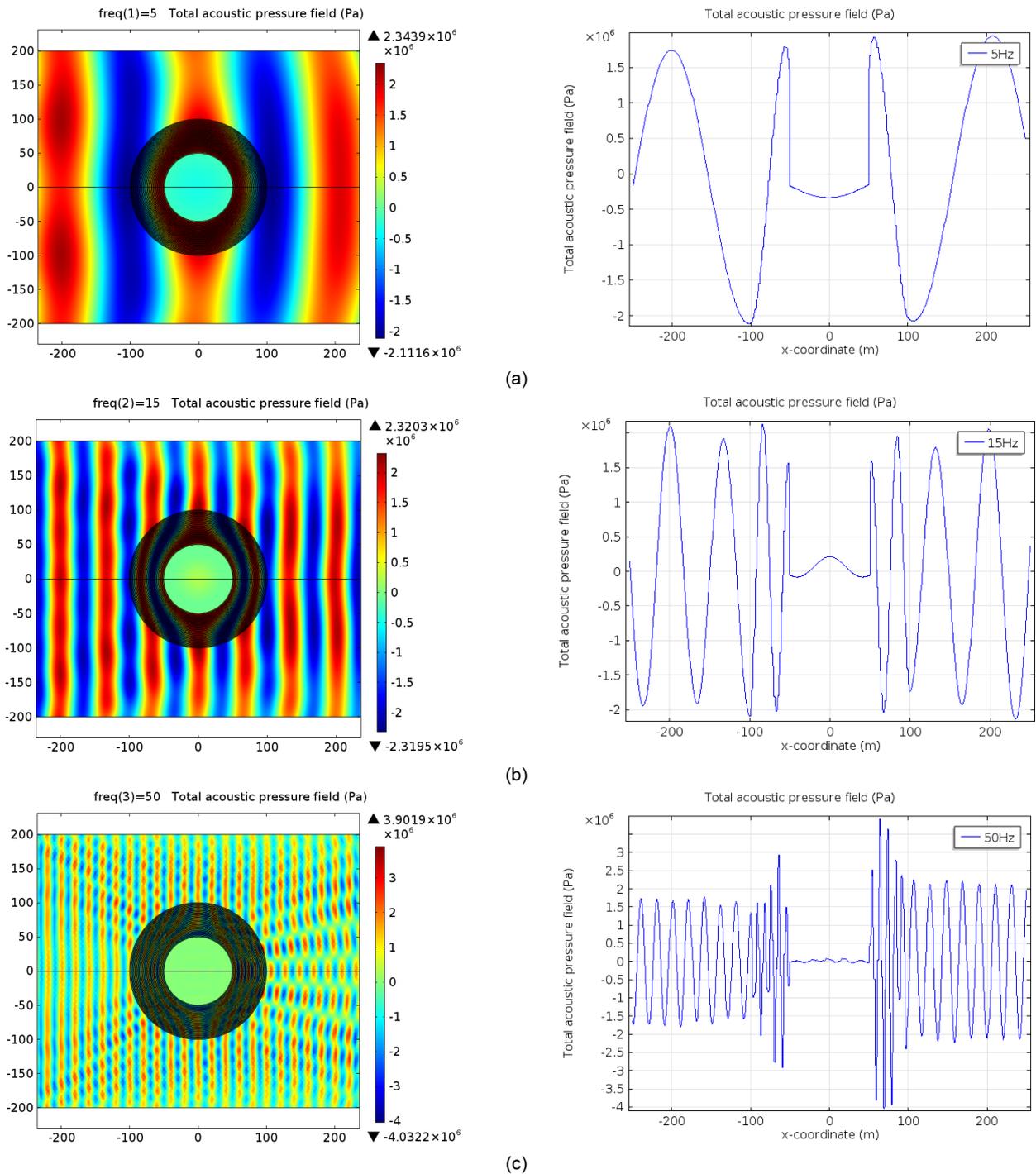


Fig. 2. Pressure distribution by acoustic underground cloaking. The plane waves are coming from the left side. The graphs are the acoustic pressure fields of the center lines. (a) $f=5.0$ Hz, (b) $f=15$ Hz, (c) $f=50$ Hz. The unit is m. COMSOL 4.4 was used for the numerical computer simulation. The unit of y-axis is Pascal [33]

같이 굴절률을 이용한 지진파 가림에는 지진파의 주파수가 가장 큰 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

완벽한 가림효과가 발생하면 파동이 반사파가 전혀 없이 가림지역을 피해 휘어나가게 된다. 파가 휘어지더라도 경로는 두 점 사이를 최단시간에 가는 경로이다. 반사파를 줄이려면 임피던스를 천천히 변화시켜야 하므로, 가림지역의 크기가 지진파 파장보다 작을수록, 가림지역의 크기가 가림 지역보다 클수록, 그리고 가림지역을 많이 나눌수록 반사파가 적어 가림

이 잘 일어난다[31,32]. 하지만 이 조건들은 공사비를 증가시키는 요인이다. 반사파의 세기를 1% 이하로 줄이려면 반사파의 진폭을 10% 이하로 줄여야 하는데, 이론 연구는 가림지역을 40등분 하면 충분한 것으로 알려져 있다[32].

가림지역의 크기가 표면파 파장보다 작아야 하므로 보호가능한 건물의 이론적 최대 크기는 직경이 입력한 표면파의 파장인 100m 정도다. 하지만 파장이 이보다 짧으면 보호영역의 크기는 더 줄어든다. 또한 가림지역 주위

에 설치하는 가림막지역의 직경이 가림지역 직경의 적어도 2배 이상 되어야 하므로 적어도 보호하고자 하는 건물 주위 반경 100 m 이내에 아무것도 없어야 한다[34]. 따라서 건물밀집지역에는 이 방법을 적용할 수 없다.

현재까지 연구되고 있는 지진파 가림 기술은 원통형으로 설치하여 주요 피해요소인 표면파만 막는 것이다. 가림막을 지하로는 기초공사 부분까지만 설치하고, 기초공사부분 깊이가 표면파의 파장을 넘는 경우에는 파장 길이인 100 m 정도까지만 설치한다. 체적파인 S파까지 막을 수 있는 완전한 지진파 가림이 되려면 반구형으로 설치해야 할 것이나, 음향파의 3차원 구형 가림은 2차원 원통형 가림보다 훨씬 복잡하여 현재 국제적으로도 연구 단계다.

최근에 프랑스에서 지진파 가림을 위한 준비실험으로 2012년부터 2년째 걸쳐 땅속에 음향결정(phononic crystal) 구조물을 설치하고, 건설 중장비로 표면파의 일종인 R(Rayleigh)파를 일으켜 파동이 구조물을 피해 가는지를 실험하였다[35]. 결과는 파동이 구조물을 비껴가지 않고 반사하였는데 지진파를 반사하게 되면 건물이 피해를 입기 때문에 성공으로 보기 어렵다[36].

아직은 실험을 위한 연구가 충분히 이루어지지 않은 것인데 지진파 가림 방법의 실효성을 위하여 3단계 실험이 필요하다고 본다. 가장 먼저 재료문제를 해결해야 하는데 자연상태에는 원하는 밀도와 탄성계수를 동시에 만족하는 물질을 찾기가 어렵기 때문에 다공체구조(porous structure)나 복합재료(composite materials)로 만들어야 할 것이다. 굴절을 변화를 만족시킬 수 있는 재료가 준비되면 첫 번째는 실험실 내에서 축소 모형을 통한 가림 실험을 한다. 지진파는 전기 모터를 이용하여 발생시킨다. 이 과정에서 매질에 대한 여러 가지 조건을 변화시키며 결과를 분석한다.

첫 번째 모형실험에서 충분한 데이터가 얻어지면 두 번째 단계로 프랑스 그룹에서 한 것과 유사한 소규모 실험을 실외에서 실시한다. 진동은 건설 중장비를 이용하여 발생시킨다. 두 번째 실험에서 충분한 데이터가 얻어지면 세 번째 단계로 폐탄광 같은 인적이 드문 장소를 빌려, 폭파를 통한 소규모 인공지진을 일으켜 가림방법을 실험하는 것이다.

4. 토 의

지진공학의 여러 방법 중에 최근에 연구되고 있는 지진파 가림방법의 원리를 소개하고 땅속에서의 표면파를 대상으로 간단한 2차원 전산모사를 실시하였다. 이 가림방법은 보호하고자 하는 가림지역 외곽에 동심원 모양으로 가림막지역을 설치한다. 가림막지역은 굴절률을 결정하는 2가지 요소인 밀도와 탄성계수가 점차 변화도록 채워, 이 부분을 통과하는 지진파의 표면파를 굴절시켜 특정지역을 피해가도록 하는 기술이다. 이 방법이 2009년에 처음으로 소개된 후 2012년에 프랑스 연구진에 의해 첫 실험이 이루어졌는데 아직은 만족할만한 결과를 내지 못하고 있다.

실제 땅속과 유사한 조건에서 2차원 원통형 음향파 전산모사를 통하여 가림방법의 원리를 시연하였다. 땅속 주변의 상황이 다양하기 때문에 전산모사에서 이를 구체적으로 반영하는 대신에 상징적이며 대표적인 간단한 값들을 입력하였다. 입력파의 파장이 가림지역보다 큰 경우와, 비슷한 경우와, 작은 경우의 3가지로 나누어 전산모사를 실시하고 서로 비교하였다. 가림방법에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 지진파 파장과 가림지역의 크기와 관계로서, 가림 지역의 크기가 지진파의 파장보다 작을수록 효과가 있었

다. 하지만 실제 표면파는 여러 가지 파장의 파가 혼합되어 있으므로 짧은 파장의 지진파에는 효과가 적다.

지진파 굴절을 이용한 가림방법의 장점은 지진의 규모가 얼마이든 상관없이 가림지역을 보호할 수 있다는 것이다. 따라서 지진에 대한 고규모의 설계가 요구되는 곳에 적용할 수 있다. 또 보호하고자 하는 건물은 그냥 두고 주변 지하에 설계를 하므로 기존 건물의 내진력 보강에 이용할 수 있다. 나아가 지하에 설치하므로 외부에서 보이지 않으며, 또 건물구조에 상관없이 설치가 가능하므로 언제든지 개보수가 가능하다. 따라서 기존의 방법과 동시에 사용할 수 있어서 상호보완적이다.

시공에 적용할 경우 가림막지역을 밀도와 탄성계수가 동시에 특정 조건을 만족하는 것으로 채워야 하는데 이런 구조물을 제작하기가 어렵다. 만일 밀도나 탄성계수 하나만으로 가림방법이 가능하다면 훨씬 실효성이 높을 것이나 가림효과는 떨어진다. 따라서 가림효과의 감소를 최소화하면서 밀도와 탄성계수 하나만으로 가림을 가능하게 할 수 있는 보다 실용적인 방법의 개발이 필요하다.

반면에 이 가림방법에는 단점들도 존재한다. 지진파의 파장보다 작은 소규모 건물에만 적용이 가능하며, 가림지역을 둘러싼 가림막지역의 면적이 보호해야 하는 가림지역보다 훨씬 넓어야 하므로 주변에 아무 것도 없는 경우에만 설치가 가능하다. 건물의 상하수도를 비롯한 외부와의 연결방법을 가림막지역을 피해 더 아래로 설치해야 하므로 건설비용이 추가된다. 더욱이 이 방법은 지진파를 약화시키는 것이 아니고 방향만 바꾸어 휘어나가게 하는 것이므로, 주위의 건물들이 대신 피해를 입을 수 있어, 자신은 보호하고도 주변 건물에 대한 피해보상비가 더 들어갈 수 있다. 따라서 이 방법을 적용하기에 적당한 대상은 인구밀도가 희박한 교외에 위치한 중소형 독립 건물들로서, 원자로, 전망대, 송신탑, 등대, 문화재 등이다. 만일 원자로에 적용하는 경우는 미리 원자로 한 기 한 기를 100 m 이상 충분히 멀리 떨어뜨려 건설해야 한다.

최근의 국제학회 동향을 보면 지진파 가림의 두 가지 방법 중에 두 번째 방법인 인공 지진파 암영대법이 국제적으로 더 많은 관심을 받고 있다 [21-23]. 이 방법은 1985년 멕시코 대지진 때 특정 크기의 건물만 집중적으로 무너진 것과 관련이 있다. 지진파가 통과하지 못하는 지진파 암영대를 인공적으로 조성하는 것인데, 그 원리는 지진파의 속력을 결정하는 두 가지 요소인 밀도와 탄성률 중에 하나를 유효하게 음으로 만드는 것이다. 두 요소들 중에 하나가 유효하게 음이 되면 지진파의 속력이 허수가 되어 지진파가 진행하지 못하고 소멸된다. 이 방법은 보호하는 크기에 제한이 없어 건물 한 채를 단독으로 보호하는 것이 아니라 도시 하나를 전체적으로 보호할 수 있다. 더욱이 건물 주위가 아니라 진앙과 보호하고자 하는 지역 사이의 적당한 지하에 설치가 가능하기 때문에 장소의 제한이 적다. 기존의 지진공학과 상호보완적인 것은 물론이다. 이에 대해서는 별개의 논문을 통하여 연구결과를 발표할 예정이다.

지진파를 가림방법으로 막는다는 가설은 국제적으로 많은 관심을 불러 일으켰다 [34,36]. 종래에 지진의 위험을 토목공학과 소음진동학의 관점에서 대처하던 것을, 파동학의 관점에서 지진파의 방향을 바꾸는 등 지진파가 건물에 도달하기 전에 능동적으로 대처하려는 움직임이 시작되었기 때문이다. 이 연구는 아직은 출발단계이며 이론과 실험 모든 면에서 앞으로 갈 길이 멀다고 본다. 이 방법이 산업현장에서 적용되기 위해서는 실험적으로 성공이 확인되어야 할 것이다. 하지만 만일 이 방법이 성공하여 완성되면 지

진대비설계기술은 전혀 새로운 단계에 진입하여 토목 및 건축 산업이 큰 도약의 계기를 맞을 것이다.

/ 감사의 글 /

본 논문 작성에 음향파 가림법과 관련하여 도움말을 주신 스페인 발렌시아 공과대학의 J. Sánchez-Dehesa 교수님께 감사의 말씀을 전한다. 이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014R1A1A2A16055046).

/ REFERENCES /

1. Villaverde R, Fundamental Concepts of Earthquake Engineering, 1st ed, New York: CRC; c2009, 960 p.
2. Lee JS, Scattering of Surface Waves in Anisotropic Media for Applications in Wave Barrier and Non-Destructive Evaluation, J Earthquake Eng Soc Kor, 1998 Jun;2(2):77-85.
3. Lee JH, Kim JK, Hong KJ, Characteristics of Earthquake Responses of an Isolated Containment Building in Nuclear Power Plants According to Natural Frequency of Soil, J Earthquake Eng Soc Kor, 2013 Nov;17(6): 245-55.
4. Jeon BG, Choi HS, Hahm DG, Kim NS, Seismic Fragility Analysis of Base Isolated NPP Ping Systems, J Earthquake Eng Soc Kor, 2015 Jan;19(1): 29-36.
5. Pendry JB, Optics: Positively negative, Nature, 2003 May;423:22-23.
6. Pendry JB, Photonics: Metamaterials in the sunshine, Nature Materials, 2006 Aug;5:599-600.
7. Pendry JB, Schurig D, Smith DR, Controlling Electromagnetic Fields, Science, 2006 May;312(5781):1780-1782.
8. Schurig D, Mock JJ, Justice BJ, Cummer SA, Pendry JB, Starr AF, Smith DR, Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies, Science, 2006 Oct;314:977-980.
9. Leonhardt U, Philbin T, Geometry and Light, The science of invisibility, 1st ed, New York: Dover; c2010, 288 p.
10. Caloz C, Itoh T, Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications, 1st ed, New York: Wiley; c2006, 376 p.
11. Solymar L, Shamonina E, Waves in Metamaterials, 1st ed, London: Oxford; c2009, 208 p.
12. Gömöry F, Solovoyov M, Šouc J, Navau C, Prat-Camps J, Sanchez A, Experimental Realization of a Magnetic Cloak, Science, 2012 Mar 23;335(6075):1466-1468.
13. Schittny R, Kadic M, Guenneau S, Wegener M, Experiments on Transformation Thermodynamics: Molding the Flow of Heat, Phys Rev Lett, 2013 May;110(19):195901.
14. Schittny R, Kadic M, Bückmann T, Wegener M, Invisibility cloaking in a diffusive light scattering medium, Science, 2014 Jul; 345 (6195):427-429.
15. Milton GW, Briane M, Willis JR, On cloaking for elasticity and physical equations with a transformation invariant form, New J Phys, 2006

- Oct;8(10):248(21pages).
16. McCall MW, Favaro A, Kinsler P, Boardman A, A spacetime cloak, or a history editor, J Opt, 2011 Feb;13(2):024003(9pages).
17. Boyd RW, Shi Z, Optical physics: How to hide in time, Nature, 2012 Jan;481(7379):35-36.
18. Farhat M, Guenneau S, Enoch S, Movchan AB, Cloaking bending waves propagating in thin elastic plates, Phys Rev B, 2009 Jan ;79(3):033102(4pages).
19. Farhat M, Guenneau S, Enoch S, Ultrabroadband Elastic Cloaking in Thin Plates, Phys Rev Lett, 2009 Jul;103(2):024301(4pages).
20. Farhat M, Guenneau S, Enoch S, Broadband cloaking of bending waves via homogenization of multiply perforated radially symmetric and isotropic thin elastic plates, Phys Rev B, 2012 Jan;85(2): 020301(4pages)(R).
21. Kim SH, Das MP, Artificial Shadow Zone by Acoustic Metamaterials, Mod Phys Lett B, 2013 Jul;27(20):1350140(9pages).
22. Kim SH, Das MP, Seismic Waveguide of Metamaterials, Mod Phys Lett B, 2012 Jun;26(17):1250105(8pages).
23. Kim SH, Seismic Wave Technology Using Acoustic Metamaterials, New Phys, 2013 Sep;63(9):1032-1037.
24. Udias A, Principles of Seismology, 1st ed, Cambridge: Cambridge Univ. Press; c2000, 492 p.
25. Aki K, Richards PG, Quantitative Seismology, 2nd ed, New York: University Science Books; c2009, 700 p.
26. Kuznetsov SV, Seismic Waves and Seismic Barriers, Acoustical Physics, 2011 May 28;57(3):420-426.
27. Audin A, Lacan P, Tavera H, Bondoux F, Upper plate deformation and seismic barrier in front of Nazca subduction zone: The Chololo Fault System and active tectonics along the Coastal Cordillera, southern Peru Tectonophysics, 2008 Nov;459(1-4):174-185.
28. Michel GW, Janssen C, Deformation along an apparent seismic barrier: a palaeoseismological study along the North Anatolian Fault, Annali Di Geofisica, 1996 May;39(3):647-662.
29. O'Hanlon L, Earthquakes that break seismic sound barrier confirmed in lab experiments, [Internet], U. S. A.: sott, net, Science & Technology; 2013 Jun, Available from: <http://www.sott.net/article/262535-Earthquakes-that-break-seismic-sound-barrier-confirmed-in-lab-experiments>
30. Cummer SA, Schurig D, One path to acoustic cloaking, New J, Phys, 2007 Mar;9:45(4pages).
31. Cai LW, Sánchez-Dehesa J, Analysis of Cummer-Schurig acoustic cloaking, New J Phys, 2007 Dec;9:450(10pages).
32. Daniel T, Sanchez-Dehesa J, Acoustic cloaking in two dimensions: a feasible approach, New J Phys, 2008 Jun;10:063015(10pages).
33. Pryor RW, Multiphysics Modeling Using COMSOL 4, Har/DVD ed, Herndon: Mercury Learning & Information; c2011, 700 p.
34. Storrs C, Earthquake-proof skyscrapers hide from seismic waves, [Internet], U. S. A.: Popular Science; 2009 Oct, Available from: <http://www.popsci.com/science/article/2009-10/earthquake-proof-skyscraper>.
35. Brûlé S, Javelaud EH, Enoch S, Guenneau S, Experiments on

- Seismic Metamaterials: Molding Surface Waves, *Phys Rev Lett*, 2014 Mar;112(13):133901(5pages).
36. Sheng P. Viewpoint: A Step Towards a Seismic Cloak, *Physics* 2014 Mar;7:34(3pages).
37. Piore A. How to Make Anything Disappear, 3, Earthquake Cloak [Internet]. U. S. A. : Discover Magazine; 2012 Jul/Aug. Available from: <http://discovermagazine.com/2012/jul-aug/06-how-to-make-an-anything-disappear>