지진파 투명망토 (지진을 사라지게 하는 법)

DOI: 10.3938/PhiT.23.029

김 상 훈

Cloaking Earthquakes (How to Make Earthquakes Disappear)

Sang-Hoon KIM

Recently, two cloaking methods of earthquake engineering by using acoustic metamaterials have been suggested. One is the traditional cloaking method in which seismic waves are deflected from the building to be protected by using a variable refractive index. The other is the artificial shadow zone method that makes use of an area through which seismic waves cannot pass. We explain the fundamental principles of the two methods and compare their advantages and disadvantages.

최근 음향메타물질을 이용하여 지진파를 가림방법으로 제어 하려는 움직임이 나타나고 있는데 크게 두 가지 방법이 제시 되었다. 하나는 전통적인 가림방법으로 굴절률을 변화시켜 지진파가 건물을 비껴가게 하는 것이고, 다른 하나는 지진파가 통과하지 않는 인공 지진파 암영대를 조성하는 가림방법이다. 이 두 가지 방법의 기본 이론 및 장단점을 살펴보고 현재의 연구내용을 소개한다.

지진파에 대하여

인류문명을 위협하는 자연재해를 두 가지만 꼽으라면 소행성 충돌과 지진을 들 수 있다. 소행성 충돌은 자주 일어나지 않으나 지진은 지진대를 중심으로 자주 일어나고 있어 더 현실적인 위협이다. 또한 지진은 지진해일과 이로 인한 대홍수를 동반하기도 한다. 지진의 이해는 지구의 판구조론에 기반하고 있는데 지각의 판들이 만날 때 쌓인 압력이 한꺼번에 분출할 때 지진이 발생한다. 지진이 발생하는 곳을 진원(focus)이라 하는

데 지각과 맨틀 경계부근이나 바로 윗부분에 주로 위치한다.

지진파는 탄성파이자 음향파의 일종으로서 진원에서 퍼져가는 1차파인 몸체파와, 몸체파가 지각 표면에 도달하여 발생하는 2차파인 표면파로 나뉜다. 몸체파는 P파(Primary wave, 종파)와 S파(Secondary wave, 횡파)가 있고, 표면파에는 L파(Love wave)와 R파(Rayleigh wave)가 있다. 표면파는 지면으로부터 파장 깊이 정도로만 진행하며, 파장보다 깊으면 지수적으로 진폭이 감소한다. 지표면에서 표면파가 만들어지는 중심을 진앙(epicenter)이라 하는데 주로 진원의 수직 윗부분에 위치한다. 진원은 복수로 존재할 수 있으며, 진원이 하나라도 지진파가 단단한 지층에 반사하여 나올 수 있기 때문에 지진파는 파동의 일반적 성질인 보강간섭과 소멸간섭을 한다.

표면파는 파장이 서로 다른 여러 가지 파가 혼재해 있으며 횡파와 종파 모두 존재한다. 속력은 1~3 km/s로 몸체파에 비하여 느리나, 파장이 100 m 내외로 길다. 표면파의 진동수는 대략 30 Hz 이하의 초저주파(infrasonic)로 사람의 귀에는 거의 들리지 않는다. 컴퓨터 시뮬레이션에서는 일반적으로 지진파의 속력은 1 km/s, 파장은 100 m, 주파수는 10 Hz, 지진해일의 속력은 1,000 km/h를 상징적인 값으로 이용한다. 몸체파인 S 파도 인명과 재산에 피해를 입히기는 하나 표면파는 몸체파에 비해 소멸이 천천히 일어나고 진폭이 커서 주요 피해요인이다. 그러므로 내진설계란 주로 표면파를 막는 것이고, 따라서 지진에서는 1차파의 발생지점인 진원보다 2차파의 생성중심인 진앙이 중요하다.

지진파의 규모 M (magnitude)은¹⁾ 보통 리히터 숫자(Richter scale)를 따르는데, 진동의 최대 진폭과 배경 진폭의 비에 로그를 취한 값으로 정의한다: $M = \log(A/A_0)$. A 는 진앙으로부터 100 km 떨어진 지점에서 측정한 최대 진폭이고, A_0 는 지진이 발생하지 않았을 때의 최대 배경 진폭으로 1 μm 로 둔다. 지진계는 이 최대 진폭을 변화시켜 측정하는 장치로 보통 x , y , z 의 세 방향으로 설치한다. 측정방법은 지진이 일어나도 관성이 커서 움직이지 않는 물체와 지진이 나면 움직이는 물체의 움직임을 서로 비교하는 것이다. 현재까지 알려진 지진계 중에서는 2세기 중국에서 만들어진 지진계가 가장 오래된

저자약력

김상훈 박사는 1993년 University of Missouri-Columbia에서 원자/분자 물리학으로 박사학위를 받았고, 현재 목포해양대학교에 근무하고 있다. (shkim@mmu.ac.kr)

1) 지진의 세기라는 뜻의 '진도(震度, intensity)'는 나라마다 기관마다 정의가 다른데 정수만으로 표시한다.

Fig. 1. Measurement of seismic amplitude by seismograph.^[1]

었다.

리히터 규모로 3 이하의 지진은 별다른 피해가 없으며, 큰 피해를 입히는 것은 리히터 규모 6 이상의 지진이다. 지진의 규모가 지수적으로 정의되기 때문에 내진비용도 규모 M 이 증가함에 따라 지수적으로 증가한다. 최근 백 년 이내에 발생한 지진 중에서 규모가 가장 컸던 것은 1960년의 칠레 해안에서 발생한 지진인데 규모가 9.5였으며 이때 발생한 지진해일이 태평양을 지나 일본에도 피해를 입혔다. 지진이 가장 많이 일어나는 대륙은 물론 가장 큰 대륙인 아시아다. 2011년 3월 일본 동북해저에서 발생한 지진과 2004년 12월 인도네시아 수마트라 부근의 해저에서 발생한 지진은 규모가 9 정도였는데 대규모 지진해일을 동반하였다.

우리나라 부근의 지진은 주로 동해안이나 서해안에 진앙이 있으며, 최근 10년 이내에 발생한 지진 중에는 2014년 4월 1일 충남 태안군 앞바다에서 발생한 지진이 규모 5.1로 가장 컸다.^[2] 지진의 90% 이상이 지진대에서 발생하는 것으로 알려져 있는데 다행히 한반도는 지진대를 벗어나 위치한다. 지진 기록 이전의 지진은 지층의 퇴적물을 분석하여 알 수 있다.

우리나라의 보통 건물은 규모 4까지는 큰 피해를 입지 않는데, 최근의 내진설계 기준은 주요 건물에 대하여 규모 6.5까지 견디도록 설계기준이 마련되어 있다.^[3] 세계적인 고층건물은 주로 규모 7까지 견디도록 설계되어 있고,^[2] 우리나라도 최근에 짓는 원자로는 규모 7에 맞추어져 있다. 하지만 그 이상의 지진이 일어나면 어쩔 수 없이 피해가 발생한다. 지진에 의하여 지면이 흔들릴 때 얼마나 빨리 흔들리느냐를 중력가속도를 기준으로 나타내는 최대지반가속도(PGA: Peak Ground Acceleration)도 지진피해를 측정하는 기준인데 통상 $0.2 \text{ g}(2 \text{ m/s}^2)$ 이상을 위험수치로 본다.

인류가 지진을 상대하는 방법은 과거에는 주로 지진에 의한 건물의 요동을 최소화하여 대응하는 수동적인 방식이었다. 기

존의 내진설계는 건물과 지반을 분리시켜 지진파의 전달을 줄이는 면진, 건물에서 건물로 전달되는 지진파를 줄이는 방진, 그리고 이미 전달된 지진파에 의한 건물의 흔들림을 줄이는 제진 등이다. 하지만 최근에는 지진파의 파동적 성질을 이용하여 지진파를 제어하는 ‘가림’ 혹은 클로킹(cloaking)이라는 전혀 새로운 방법이 제시되고 있다. 이른바 지진망토 방법인데 현재까지 두 가지가 알려져 있다. 이 논문에서는 이에 대한 원리와 각각의 장단점을 비롯하여 최근의 연구경향 및 앞으로의 과제들을 소개하고자 한다.

굴절을 변화한 이용한 지진파 가림

모든 파동은 굴절률이 다른 물질을 만나면 굴절한다. 지진파 역시 음파처럼 음향파의 일종으로서 굴절률이 다른 물질을 만나면 휘어진다. 따라서 굴절률이 다른 물질을 점층적으로 쌓으면 파동이 휘어져 특정 부분을 비켜나가게 할 수 있다. 가림에는 공간의 특정부분을 파동이 통과하지 않게 하는 것 외에도, 사건의 특정 시간만 피해가는 시간 가림, 특정 주파수만 피해가는 주파수 가림, 열전도가 특정 지역을 피해서 이루어지는 열 가림, 특정 냄새만 피해가는 냄새 가림, 특정 원자만 피해서 포획하는 원자 가림, 특정 유전자만 발현하지 않도록 하는 유전자 가림 등 얼마든지 있을 수 있다. 바닷물이 초록색으로만 보이는 것도 파장 가림이고, 특정 데이터를 제외하고 표본을 추출하는 것도 가림의 일종이다. 고체의 탄성과 가림에 대해서는 국내 연구진의 논문이 나와 있다.^[4]

물질의 모든 전자기적 성질은 전기유전율 ϵ 과 자기투자율 μ 가 결정한다. 전자기파의 속력은 $v = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$ 로 주어지며 굴절률은 그의 역수로 $n = \sqrt{\epsilon_r\mu_r}$ 로 주어진다. ϵ_r 과 μ_r 은 전기유전율과 자기투자율의 진공 값에 대한 상대적인 크기다. 전자기파 가림은 전기유전율이나 자기투자율 중에 적어도 하나를 변화시키는 것이다. 가리고자 하는 부분의 외곽을 밖에서부터 안으로 굴절률을 점차 증가시키는 가림막 지역을 설치하면 파동이 점차 느려지며 가림지역을 비켜간다. 그런데 이 방법에는 가림지역의 크기가 파장보다 작아야 한다는 조건이 있다. 또 가능한 대로 가림막 지역의 임피던스를 일치시키면 파동이 굴절할 때 튕겨나가는 것을 최소화할 수 있다.

2009년에 프랑스 그룹에 의하여 지진파를 비켜가게 하는 지

REFERENCES

- [1] <http://www.youtube.com/watch?v=EMoJiOAVGus>.
- [2] <http://www.kma.go.kr/weather/earthquake/domesticlist.jsp>.
- [3] 지진재해대책법 제14조. 지진재해대책법 시행령 제10조.
- [4] D. Shin *et al.*, Nature Comm. **3**, 1213 (2012).

2) 높이가 800 m급인 아랍 에미리트의 버즈 칼리파(Burj Khalifa)도 규모 7까지 견디도록 설계되었다.

진과 가림이 제시되었는데 원리는 전자기파 가림을 음향파에 적용한 것이다.^[5] 물질의 모든 기계적 성질은 밀도 ρ 와 탄성률 B 가 결정한다. 탄성률에는 영률(Young's modulus), 층밀립률(shear modulus), 그리고 부피탄성률(bulk modulus)이 있는데 외부 압력변화에 저항하는 능력으로서 기본 원리는 동일하다. 지진파는 음향파의 일종으로 굴절률이 다음처럼 표시된다: $n = \sqrt{\rho_r/B_r}$. ρ_r 과 B_r 은 매질의 밀도와 탄성률로서 배경 값에 대한 상대적인 크기다. 전자기파나 음향파나 기본원리는 유사하여 ϵ 은 $1/B$ 에 대응하고 μ 는 ρ 에 대응한다.

음향파 가림은 가림지역 주변에 밀도나 탄성률 중에 적어도 하나를 변화시킨 가림막 지역을 설치하는 것이다. 만일 가림막 지역의 외곽은 밀도가 작은 물질로 싸고, 안쪽으로 들어오며 밀도가 큰 물질로 싸면 굴절률을 점차 증가시킬 수 있어서, 그림 2처럼 파동이 가운데의 가림지역을 피해간다. 적색은 압력이 높은 곳이고 청색은 압력이 낮은 곳이다. 그 둘의 차이가 파동의 진폭에 비례한다.

프랑스 그룹의 방법은 탄성률을 변화시키는 것으로서, 가림 지역 주위의 땅을 파고 외곽은 영률이 큰, 즉 잘 휘어지지 않는 단단한 물질로, 안으로 들어가면 영률이 작은, 즉 잘 휘어지는 부드러운 물질로 싸는 가림막 지역을 설치하는 것이다. 그러면 굴절률이 밖에서 안으로 들어가면서 점차 증가되어 가림지역보다 크기가 큰 파장의 지진파는 그림 2와 마찬가지로 휘어나간다. 가림막 지역이 많은 층으로 구성될수록 임피던스 변화가 적어 반사파가 적다. 이 방법의 장점은 지진파가 어느 방향에서 오든, 지진의 규모가 얼마이든 상관없이 가릴 수 있다는 것이다. 깊이는 건물의 기초공사부분까지만 설치하면 된다. 기초공사부분 깊이가 표면파의 파장을 넘는 경우에는 파장 정도까지만 설치한다.

하지만 단점도 존재한다. 지진파의 파장보다 작은 소규모 건물에만 적용이 가능하며, 가림막 지역의 면적이 가림지역보다 넓다보니 건물 주위에 건물보다 더 넓은 땅이 필요하다는 것이다. 더 심각한 문제는 지진파를 약화시키는 것이 아니고 보호하고자 하는 건물 주위로 방향만 바꾸어 비껴가게 하는 것이므로 주위의 건물들이 대신 피해를 입을 수 있다는 점이다. 최악의 경우 지진파로부터 건물을 지키고도 주변의 피해보상비가 더 들어갈 수 있다. 따라서 이 방법을 적용하기에 적당한 대상은 인구밀도가 희박한 교외에 위치한 중소형 독립건물들로서 원자로, 전망대, 송신탑, 등대 등이다. 만일 원자로에 적용하는 경우는 원자로 한기 한기를 충분히 멀리 떨어뜨려 놓고 설치하여야 한다.

최근 프랑스에서 굴절률변화를 이용한 지진파 가림법을 실험하였다.^[6] 지진파가 통과하는 지역의 탄성률을 다르게 하기 위하여 땅에 격자모양으로 직경 32 cm, 깊이 5 m의 구멍을

Fig. 2. Acoustic cloaking of sound wave in the air by variable density method. $f = 100$ Hz, $v = 340$ m/sec, unit is m.

1.73 m 간격으로 여러 개 뚫었다. 한쪽 끝 땅 속에서 인공적으로 78 m/s의 R파를 만들어 보낸 후 반대쪽에서 어느 주파수가 이 지역을 통과하지 못하는지를 보는 것이다. 실험결과 50 Hz 부근의 파가 통과하지 못하고 튕겨나가는 것이 관측되었다. 그런데 지진파해를 가져오는 표면파는 여러 주파수의 파가 섞여 있으므로 피해를 주는 중심 주파수 구간 전체를 막아야 한다. 아직은 실제로 내진설계에 적용하기 어려우나 특정 주파수의 지진파를 가렸다는 것은 의의가 크다.

인공 암영대를 이용한 지진파 가림

1985년에 멕시코에서 발생한 지진은 규모 8 정도였는데 특정한 크기의 건물만 집중적으로 무너졌다. 그 이유는 지진파에 공명한 건물들이 지진파 에너지를 집중적으로 흡수한 것인데, 이는 역으로 지진파 에너지를 흡수하여 지진을 막을 수 있는 방법을 제시하였다. 굴절률 변화를 이용한 지진파 가림이 몇 가지 문제점들을 보이자 2012년에 국내에서 나온 것이 지진파 암영대를 이용한 가림이다.^[7] 예를 들면 몸체파인 S파는 액체인 지구 외핵을 통과하지 못하여 지구 표면에 지진파 암영대가 생긴다. 이것을 인공적으로 만들어 지진을 막는 것인데 원리는 멕시코 지진에서 본 것처럼 공명을 이용한 것이다. 원자를 공명시켜 나오는 빛을 외부로 뽑아내는 것이 레이저고, 분자를 공명시켜 나오는 열을 외부로 뽑아내는 것이 전자레인저

REFERENCES

- [5] M. Farhat *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 033102 (2009); Phys. Rev. Lett. **103**, 024301 (2009); Phys. Rev. B **85**, 020301(R) (2012).
- [6] S. Brûlé *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 133901 (2014).
- [7] S.-H. Kim *et al.*, Mod. Phys. Lett. B **16**, 1250105 (2012); New Phys.(Sae Mulli) **63**, 10321037 (2013); Mod. Phys. Lett. B **27**, 1350140 (2013).

Fig. 3. Cylindrical 6-holed seismic instrument and its corresponding LC-circuit for four instruments.

다. 울림통을 공명시켜 소리를 밖으로 뿜어내는 것이 관악기다. 전자기적 공진회로는 특정 주파수대에서 공진이 일어나면 큰 파장의 전자기파가 빠져나온다.

그림 3처럼 내부에 거대한 울림통(공명통)을 가진 악기를 시멘트 콘크리트로 만들어 표면의 구멍을 일치하도록 하여 수천 개를 지하에 매설한다. 공명통의 입구 구멍은 유도기에 해당하고 공명통 내부는 축전기에 해당하기 때문에 공명통을 매립한다는 것은 지하에 LC 공진회로를 설치하는 것과 같다. 10 Hz 내외의 지진파의 주파수에 맞추어 공명통을 제작하면 크기가 대략 그림 3과 같은데, 모양은 상관없고 공진주파수가 중요하다. 지진파는 여러 파장의 파가 섞여있으므로 공명통도 공진주파수가 다른 것들을 혼합하여 매설한다. 저주파용일수록 구멍의 크기와 개수를 줄이고, 두께를 얇게 하며, 내부 부피를 늘린다. 깊이는 굴절률을 이용한 가림법과 마찬가지로 건물의 기초공사부분까지만 매립한다. 공명통과 공명통을 딱 붙일 필요가 있는데 그 이유는 공명통들 사이의 빈 공간이 축전기 역할을 하기 때문이다.

지진파의 파장이 공명통의 구멍직경보다 훨씬 크므로 강력한 에돌이 현상에 의해 지진파가 공명통 내부로 퍼진다. 지하에 기계적 공진회로를 구축한 후 붙여서 악기처럼 연주하는데 부는 것은 지진파 에너지를 이용한다. 지진파를 공명통을 이용하여 마치 관악기처럼 공명시켜 지진파 에너지를 열과 소리로 바꾸어 공기 중과 땅속에 뿌려버리는 것이다. 매립하고자 하는 장소는 진앙에서 오는 지진파가 건물에 도달하기 전에 차단해야 하므로 그림 4처럼 진앙과 건물 사이의 적당한 곳이다. 진앙의 위치는 과거의 지진 데이터로부터 추정하는데 오늘날에는 백 년 이상의 누적된 데이터가 있다.

공명이 일어나면 유효탄성률이 음이 된다. 여기서 유효란 특정조건하에서 마치 그런 것처럼 나타난다는 뜻이다. 유효탄성률이 음이 되면 굴절률이 허수가 되고, 따라서 속력과 파동함수도 허수가 되어 파동의 진폭이 지수적으로 감소하는 소멸파가 된다. 유효탄성률 대신에 유효밀도를 음으로 만들어도 같은 효과가 발생한다. 공명이 일어나면 유효탄성률이 음이 되는 이

Fig. 4. A vertical landscape of the negative barrier or seismic waveguide. The amplitude of the seismic wave is reduced exponentially in the waveguide.

유는 다음과 같다. 유효영률이 음이 되려면 잡아당길 때 길이가 늘어나지 않고 반대로 줄어들어야 한다. 유효부피탄성률이 음이 되려면 마찬가지로 압력으로 눌렀을 때 부피가 줄어들지 않고 팽창해야 한다. 이는 공명통에 파가 쌓여 공명이 일어나는 경우가 그 중 하나다. 이와 같이 유효탄성률을 음으로 만들 수 있으면 모든 방법이 다 가능하다. 유효탄성률이 음이 되는 영역은 공진주파수부터 그 위쪽 주파수 부분이다. 그림 3에서 구멍의 부피에 비하여 울림통, 즉 공명통의 부피가 클수록 음이 되는 주파수 영역이 커진다. 이 공명통 지대가 방진벽 역할을 하는 것이다.

방진벽의 전체적인 모양은 그림 4와 같다. 지진파가 방진벽을 통과하면 규모가 줄어 나오는데 줄어든 규모는 그림 4의 방진벽의 폭 Δx 에 비례한다.^[7] $\Delta x = \frac{\lambda \ln 10}{2\pi |n|} \Delta M$. 즉 내진 비용이 내진규모가 증가할 때 지수적으로 증가하지 않고 선형적으로 증가하므로 규모가 큰 내진설계에 적합하다. 규모를 3 정도 줄이는 방진벽, 예를 들어 규모 7의 지진이 방진벽을 통과한 후 규모 4로 바뀌게 하려면, 그 폭이 대략 100 m는 되어야 한다.

왼쪽에서 오는 지진파가 직사각형 모양의 방진벽을 통과하면 그림 5처럼 오른쪽에 지진파 암영대가 조성된다. 굴절률을 이용한 가림은 가림막 지역이 원형만 가능한데 비하여 암영대 방법은 사각형, 원형 등 다른 모양들도 가능하다. 이 방법은 방진벽 내외의 임피던스가 일치하지 않아 반사파가 존재한다. 또한 방진벽의 지진파가 들어오는 표면 부분은 파괴되나 전체 구조는 살아남는다. 파괴된 부분은 다시 수리하면 된다. 암영대 방법은 임피던스가 일치하지 않으므로 에너지 소모가 발생하는데 지진파 에너지의 일부는 초저주파의 소리로 바뀌어 공기 중으로 날아가고, 다른 일부는 열로 바뀌어 사라진다. 즉 지진이 일어났을 때 큰 저주파가 감지되거나 방진벽 부분의 땅의 온도가 올라가야 효과적으로 작동하는 것이다. 지진의 규모에 따라 어느 정도의 소리가 들릴 것인가는 예측이 가능하다.^[7]

Fig. 5. Pressure distribution of an artificial seismic shadow zone by the negative barrier. $f = 15$ Hz, $v = 1,000$ m/s, unit is m.

이 인공 지진파 암영대를 이용한 가림은 건설방법이 간단하며, 지진의 경로 적당한 곳에 설치하면 되므로 위치선택이 자유롭고, 보호하고자 하는 건물을 변형시키거나 할 필요가 없다. 방진벽의 크기가 크면 클수록 효과적이기 때문에 인구밀집 지역 같은 아주 넓은 지역을 저렴한 비용으로 보호할 수 있다. 반면에 단점으로는 설치 위치를 위하여 과거 진앙의 위치에 대한 충분한 자료가 있어야 한다는 것인데, 지진학의 발달로 어느 지역이건 진앙데이터가 충분히 축적되어 있다. 이 방법은 넓은 지역을 집단적으로 보호할 때 유리하므로 적용대상은 주택단지, 산업단지, 발전소, 댐, 비행장, 긴 다리 등이다.

요약 및 앞으로의 과제

지진으로 인하여 매년 평균 약 1만 명이 목숨을 잃는 것으로 알려져 있는데 이는 아직 우리의 지구에 대한 이해가 부족하다는 뜻이다. 지진망토를 이용한 지진파 가림으로 지진파를 제어하는 방법에는 두 가지가 있는데 하나는 건물 주변에 굴절률 변환지대를 조성하여 지진파가 건물 주위를 비껴가게 하는 방법이고, 다른 하나는 진앙과 건물 중간에 인공 암영대를 조성하여 지진파를 중간에 약화시켜 차단하는 방법이다. 이 모두 두 지진에 대한 적극적 대처방법으로 기존의 방법과는 원리가 전혀 다르다.

굴절률을 이용한 가림이 진동으로부터 건물을 보호하는 방법이라면, 암영대 방법은 진동으로부터 땅을 보호하는 방법이다. 굴절률 변환방법은 외딴 곳에 위치한 독립된 소형 건물을 모든 방향의 지진으로부터 절대적으로 보호할 때 유리하다. 반면에 암영대 방법은 인구밀집지역에 집단적으로 몰려있는 대형 건물군을 저렴하게 보호할 때 유리하다. 방진벽의 폭을 조절하면 방비해야 하는 지진파 규모를 원하는 대로 올리거나 낮출 수 있다. 이 두 가지 방법은 2009년에 발표된 이래로 학계와

산업계의 상당한 관심을 끌었다.^[8] 그런데 미국 최대의 대중과학잡지인 디스커버지는 표지에 지진파 가림의 기술로 두 번째 방법을 소개하였고,^[9] 홍콩과기대의 펑셴도 Physics Viewpoint에서 두 번째 방법이 좀 더 발전된 것으로 판단하였다.^[10]

이런 지진망토 방법이 현실화되기 위해서는 아직도 넘어야 할 산이 많다. 암영대를 이용한 가림은 아직 실험이 이루어지지 않았다. 폐광산을 이용하여 인공지진을 일으켜 실험한다고 하여도 상당한 비용과 시설이 필요할 것이다. 하지만 산업현장에서 적용되기 위해서는 실험적으로 성공이 확인되어야 할 것이다. 만일 이 방법이 성공하면 내진설계기술은 전혀 새로운 단계에 진입하여 토목 및 건축 산업이 큰 도약의 계기를 맞을 것이고, 인류는 지진의 위협으로부터 조금 더 안전해질 것이다.

2011년 3월 일본 동북 해저에서 발생한 지진은 수많은 인명피해를 가져왔는데 주로 지진 자체보다 지진해일에 의하여 발생하였다. 우리나라는 지진대를 피해 위치하여 지진으로 인한 피해보다 지진해일에 의한 피해 가능성이 더 크다. 따라서 지진해일을 효과적으로 제어하는 방법이 연구되어야 할 것이다. 바닷가에 거대한 방벽을 쌓는다는가 하는 방법은 모두 실패한다. 그 이유는 물살과 부딪히는 장치는 해일의 운동량을 감당하기 어렵기 때문이다. 그 외에도 바닷가의 방벽은 교통을 방해하고 경관만 파괴할 뿐이다. 효과적인 지진해일 방벽은 지진해일 경보가 발령하면 두어 시간 이내에 설치가 가능해야 하며, 가능한 대로 물살과 부딪히지 않고 지진해일을 제어해야 한다. 또한 지진해일 이후에 철거가 간단하여야 하며 흔적이 남지 않아야 한다. 따라서 새로운 사고가 요구된다.

끝으로 소행성충돌도 이론적으로는 지구 가림(또는 소행성 가림)으로 막을 수 있다. 단 소행성의 파장을 지구 크기로 키우는 것이 필요한데, 소행성의 파장은 다음처럼 물질파식으로 부터 구할 수 있다. $\lambda = h/mv$. h 는 플랑크 상수다. 소행성은 질량 m 이 매우 커서 파장이 아주 짧기 때문에 지구 가림을 이용하려면 소행성의 유효파장을 지구 크기로 키워야 한다. 이것은 소행성의 유효질량을 없애는 방법으로 가능한데, 유효질량 소거법에 대해서는 나중에 기회가 생기면 다시 다루기로 한다.

REFERENCES

- [8] <http://www.technologyreview.com/blog/arxiv/27566/>; <http://log.physicsworld.com/2013/07/25/how-to-survive-earthquakes-and-noisy-neighbours/>.
- [9] A. Piore, Discover Magazine, Jul./Aug. (2012). <http://discovermagazine.com/2012/jul-aug/06-how-to-make-anything-disappear/>.
- [10] P. Sheng, Physics Viewpoint 7, 34 (2014). <http://physics.aps.org/articles/v7/34>.