라이고 검출기의 구조와 성능

DOI: 10.3938/PhiT.26.043

김재완·조규만

The Design and Characteristics of the LIGO Detectors

Jaewan KIM and Kyuman CHO

The gravitational waves were detected directly for the first time on September 14, 2015 by two LIGO detectors located at Livingston, Louisiana and Hanford, Washington, USA, nearly simultaneously. Careful analysis revealed that this signal was produced by the last moment of inspiral and merger of two black holes that have been orbiting each other for a long time. Since the first detection, 6 other gravitational wave sources, including the recent neutron star binary, have been observed by the LIGO detectors. LIGO detector is basically a Michelson interferometer incorporating many techniques to obtain the strain sensitivity, below $10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$, required for the observation of very weak gravitational waves from the distant binaries. This article provides a very brief overview of the design and characteristics of the LIGO detectors.

서론

2017년 노벨 물리학상은 라이고(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, LIGO) 검출기의 개발과 이를 이용한 중력과 관측에 기여한 공로로 라이너 바이스(Rainer

저자약력

김재완 교수는 서울대학교 물리학과에서 박사학위를 받고 프랑스 고등사범학교(ENS-Paris) Kastler-Brossel 연구소와 국립표준연구소(LNE-SYRTE) 박사후 연구원을 거쳐 2006년부터 명지대학교에서 교수로 재직하고 있다. 극저온 원자와 원자 간섭계를 이용한 정밀 측정에 대해 연구하고 있으며, 현재 한국중력파연구협력단의 일원으로 활동하고 있다.(jwkim@mju.ac.kr)

조규만 교수는 1991년 Maryland 대학에서 간섭계를 이용한 정밀측정에 대한 연구로 박사학위를 취득하고 1992년부터 서강대학교 교수로 재직하고 있다. 간섭계를 이용한 센서에 대하여 많은 연구를 수행하여 왔으며, 현재 한국중력파연구협력단의 일원으로 활동하고 있다.(kcho@sogang.ac.kr)

Fig. 1. The views and locations of the two LIGO interferometers. The gravitational wave first hit the interferometer in Livingston and then passed its twin in Hanford, just over 3,000 km away, 7 milliseconds later on 14 September 2015. (taken from "The Nobel Prize in Physics 2017", Nobelprize.org)

Weiss), 킵 쏜(Kip Thorn), 배리 배리시(Barry Barish) 등 세 명의 과학자에게 수여되었다. 라이너 바이스는 1970년대 중반 이미 레이저 간섭계에서 중력과 검출을 방해할 수 있는 배경 잡음의 원인을 분석하고 이러한 잡음을 극복할 수 있는 레이저 간섭계의 밑그림을 그렸으며, 킵 쏜은 어떤 천체물리학적 파원이 레이저 간섭계가 검출할 수 있는 진동수 대역의 중력파를 발생시킬 수 있는지 이론적으로 연구하여 중성자별 쌍성, 블랙홀 쌍성 등에서 방출되는 중력파의 특성을 예측하고 이의 검출을 위해 검출기가 가져야 하는 민감도를 제시하였다. 배리 배리시는 연구 프로젝트의 수장으로서 1990년대 후반 연구비 수주와 장치의 건설부터 중력과 검출에 이르기까지 거대 연구 협력체인 라이고 프로젝트를 성공적으로 이끌었다.

라이고는 그림 1에서 보듯이 미국 핸포드(Hanford)와 리빙스턴(Livingston)에 위치한 동일한 두 개의 검출기로 이루어져 있으며 각 검출기는 마이컬슨 레이저 간섭계에 기반을 둔 장치로 길이가 4 km인 두 팔이 L자 형으로 배치된 형태이다. 라이고는 2015년 9월 14일 지구로부터 약 13억 광년 떨어진

블랙홀-블랙홀 쌍성에서 발생한 중력파를 최초로 검출한^[1] 이래 2017년 11월 현재까지 모두 7건의 중력파 검출을 보고하였다.^[2]

아인슈타인의 일반상대론에 의하면 물체가 가속될 때 중력파가 방출되어 빛의 속도로 전파된다. 중력파는 파의 진행 방향과 수직인 방향으로 중력장의 진동 즉, 공간의 수축과 팽창이 일어나는 횡파이며, 중력파의 진폭 h 는 두 개의 고정된 점 사이의 거리의 상대적인 변화에 비례한다. 좀 더 구체적으로 표현하자면 두 개의 고정된 점 사이의 거리가 L 일 경우 L 보다 파장이 훨씬 큰 중력파가 지나가면 순간적으로 거리가 $\delta L = \frac{1}{2}Lh$ 만큼 변하게 된다. 또한, 중력파는 ‘+’와 ‘×’ 두 가지 편광을 가질 수 있는데, 예를 들어 + 편광의 경우 수직방향으로 공간이 팽창하면 수평방향으로는 수축하고 이어 수직방향으로 수축하면 수평 방향으로 팽창하는 주기적인 왜곡이 빛의 속도로 전파된다. 따라서 적절하게 편광된 중력파가 마이컬슨 간섭계 면을 지나가면 서로 수직인 간섭계 양팔 사이에 Lh 만큼 거리 변화가 유도된다. 중력파 검출기는 이러한 길이의 반복적인 변화를 읽어냄으로서 중력파의 진폭과 진동수를 알아낸다. 음의 질량이 없기 때문에 중력파의 가장 큰 기여는 사극 모멘트의 가속에 의한 것이며 이때 만들어지는 중력파는 그 진폭이 매우 작기 때문에 측정이 매우 어렵다. 정지 에너지가 모두 중력파로 방출된다고 가정하고 대략 계산하면 질량이 M 이고 거리가 r 인 어떤 천체로부터 나오는 중력파의 최대 진폭은 $h \sim GM/c^2 r$ 이 된다. 여기서 G 와 c 는 각각 중력상수와 빛의 속력이다. 그러나 전체 질량이 모두 중력파로 방출되는 것은 불가능하며 블랙홀 쌍성이 나선으로 다가가 합체하는 과정에서 5%~10%의 질량이 중력파로 방출되는데 이러한 경우 거리 r 에 있는 질량 M 인 천체가 중력파를 낸다면 추정되는 최대 진폭은 다음과 같다.

$$h \sim 5 \times 10^{-22} \left(\frac{\epsilon}{0.1} \right) \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{10 \text{Mpc}}{r} \right)$$

여기서 ϵ 는 질량이 중력파로 변환되는 비율이고 $M_{\odot}$ 는 태양 질량이다. 2015년 최초로 검출된 중력파를 낸 블랙홀 쌍성계의 전체 질량은 $65M_{\odot}$, $\epsilon \sim 0.5$, 그리고 $r \sim 400 \text{ Mpc}$ 이었으며 이때 최대 진폭은 약 10^{-21} 이었다. 이것은 4km짜리 중력파 검출기의 팔의 길이가 원자핵 크기의 약 1/1000 정도 변한 양이다. 이렇듯 격렬한 블랙홀의 충돌에 의한 중력파의 진폭조차도 매우 작은 값이며 이를 측정해 낸다는 것은 현재 가능한 과학과 기술을 동원하더라도 매우 힘든 도전임에 틀림없다. 본 글에서는 언뜻 생각하기에 측정 불가능할 것 같이 작은 길이 변화를 라이고가 어떻게 측정하였고 이를 위해 광학계,

Fig. 2. Layout of a basic Michelson interferometer.

진동 차폐, 진공 등의 분야에서 어떠한 기술들이 사용되었는지를 살펴본다.

라이고 간섭계의 구성

라이고 검출기는 기본적으로 그림 2와 같은 마이컬슨 레이저 간섭계이다. 레이저로부터 방출된 빛은 빔 가르개(beam splitter, BS)에 의해 서로 수직인 두 개의 경로로 나뉘지고 각각의 경로를 따라 진행되는 광선에 수직으로 정렬된 거울에서 반사되어 같은 경로를 따라 다시 BS로 돌아온다. 되돌아온 각각의 광선은 BS에 의해 다시 두 갈래로 나뉘면서 합쳐지는데, 반사되었다 돌아와 BS에서 투과된 성분과 다른 경로를 따라 되돌아와 BS에서 반사된 성분이 서로 합쳐져서 광 검출기에 도달하여 두 광선 사이의 간섭신호로 검출된다. 따라서 두 경로 사이에 길이 차이가 발생할 경우 이를 따라 이동한 빛의 경로 차이, 즉 위상 차이가 발생하므로 간섭신호의 변화로 나타나게 된다. 적절하게 편광된 진폭이 h 인 중력파가 간섭계 두 팔을 포함하는 면에 수직으로 입사되면 한쪽 팔 길이는 수축하고 다른 쪽 팔 길이는 팽창하여 $L_1 \approx L_2 = L$ 인 간섭계 팔 사이에 $\delta L_g = Lh$ 의 경로차가 유도되어 간섭신호가 변하게 된다. 따라서 팔 길이를 되도록 길게 하는 것이 경로차를 크게 할 수 있으므로 유리하지만 건설에 한계가 있으며, 특히, 중력파 지진 관련된 잡음 때문에 지상에서는 4 km가 팔의 최

REFERENCES

- [1] B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016).
- [2] List of detection papers (<https://www.ligo.caltech.edu/page/detection-companion-papers>).

Fig. 3. Basic Michelson interferometer with Fabry-Perot cavities. Mirrors placed near the beam splitter keep the laser contained within the arms. This increases the distance traveled by the beams, greatly improving LIGO's sensitivity to changes in arm length like those caused by gravitational waves.

적 길이로 알려져 있다. 앞에서 살펴보았듯이 $L=4$ km에 달하더라도 라이고에서 최초로 측정된 크기의 중력파에 의한 팔 길이 차이가 $\delta L_g \sim 10^{-18}$ m밖에 되지 않으므로 단순한 마이컬슨 간섭계로 중력파를 측정할 수는 없다. 이를 해결하기 위해 라이고에서는 그림 3과 같이 기본적인 간섭계에 파브리-페로(Fabry-Perot) 공진기를 추가하여 빛이 공진기의 두 거울 사이를 여러 번 왕복하도록 함으로써 유효 팔 길이를 늘이는 방법을 사용한다. 이 공진기를 팔 공진기(arm cavity)라고 부른다. 이 경우 간섭 신호는 각 팔의 두 거울 사이의 유효 팔 길이의 변화를 측정하는 것이 되고 레이저 빛이 들어가는 쪽의 거울을 입력 시험 질량(input test mass, ITM), 팔의 끝에 있는 거울을 말단 시험 질량(end test mass, ETM)이라 한다. 라이고의 경우 ITM은 약 1.4% 정도의 투과율을 갖고, ETM은 약 5 ppm의 투과율을 가져 공진기의 예리도(finesse)가 $F=450$ 이다. 이 경우, 입력 레이저를 켜둘 때 공진기 안의 빛의 세기가 $1/e$ 만큼 줄어드는 시간으로 정의되는 저장 시간(storage time) τ_s 는 $\frac{L}{c} \frac{F}{\pi} = 1.9$ ms이다. 한쪽 거울의 반사율이 거의 1이고 되돌아 나오는 레이저 빛의 간섭을 관찰하므로 공진기 밖으로 나온 빛은 두 거울 사이를 280회 정도 왕복하는 셈이고 따라서 유효 팔 길이가 1120 km에 이른다. 하지만 여전히 중력파에 의한 거울 사이의 거리의 변화가 $\delta L_g \sim 10^{-15}$ 정도이므로 이러한 미세한 변화를 측정하기 위해서는 간섭계 팔의 길이를 늘이는 것과 동시에 미세한 위상 변화도 감지할 수 있도록 간섭무늬를 더욱 선명하게 하여야 한다.

양자 잡음

간섭 신호는 결국 광 검출기에서 빛의 세기 신호로 측정되므로 간섭 신호의 궁극적인 잡음원은 측정할 때마다 무작위로 달라지는 광자 개수의 요동이며 이를 산탄 잡음(shot noise)이라고 한다. 선포이 좁고 주파수가 안정화된 레이저로부터 출력되는 빛은 결맞는 빛(coherent light)으로 볼 수 있다. 따라서 Δt 라는 시간마다 광 검출기에서 측정되는 광자 수는 통계적으로 푸아송(Poisson) 분포를 하기 때문에 빛의 세기 측정값은 광자 개수 흐름(number flux) N 에 비례하고 잡음은 $\sqrt{N}$ 에 비례하므로 빛의 세기를 증가시켜 광자의 개수를 증가시키면 신호-대-잡음비가 $\sqrt{N}$ 에 비례하여 커진다. 여기서 자세한 논의는 생략하겠지만 간섭계 출력 포트(output port)에서 소멸간섭이 되도록 거울 위치를 바이어스 시켰을 때 중력과 측정에 대한 신호-대-잡음비가 최대가 되며 이를 암 포트(dark port)라고 부른다. 이때 산탄 잡음 한계에 의해 이 간섭계의 측정할 수 있는 단위 대역폭당 최소 중력과 선포은

$$h(f) = \frac{\sqrt{1 + (4\pi f \tau_s)^2}}{4\pi \tau_s} \sqrt{\frac{\pi \hbar \lambda}{\eta P_{BS} c}}$$

로 주어지며, λ 는 레이저의 파장, f 는 중력파의 진동수, P_{BS} 는 BS에 입사하는 레이저의 일률, η 는 광 검출기의 양자 효율이다.^[3] 예를 들어 $\tau_s = 1.9$ ms, $\eta P_{BS} = 0.9 \times 1$ kW, $\lambda = 1.06$ μ m이면 이상적인 산탄 잡음 한계는 $f = 100$ Hz에서 $h = 4 \times 10^{-24}$ Hz^{-1/2}로서 산탄 잡음만 고려한다면 라이고의 목표 변형 민감도 10^{-23} 이하를 얻을 수 있다. 산탄잡음이 백색 잡음(white noise)이지만 중력파의 주파수가 커질수록 민감도가 감소하는 이유는 중력파에 의한 거울의 진동주기가 공진기의 저장시간보다 충분히 느려야지만 다중왕복에 의한 효과를 얻을 수 있기 때문이다.

레이저의 출력을 높이면 산탄 잡음에 의한 신호-대-잡음비는 향상되지만 거울에 미치는 복사압이 커진다. 거울에 입사되는 광자의 숫자를 N 이라 하면 거울이 받는 제곱-평균-제곱근(root-mean-square, rms) 운동량은 $\delta P = \delta N \cdot \frac{2\hbar\omega}{c} = \sqrt{N} \frac{2\hbar\omega}{c} = \sqrt{\frac{P_0 \tau}{\hbar\omega}} \frac{2\hbar\omega}{c}$ 가 된다. 이를 진동수 f 인 중력파에 대한 단위 대역폭당 진폭 오차로 환산하면

REFERENCES

- [3] B. P. Abbott *et al.*, Rep. Prog. Phys. **72**, 076901 (2009).

Fig. 4. Advanced LIGO optical configuration. ITM: input test mass; ETM: end test mass; ERM: end reaction mass; CP: compensation plate; PRM: power recycling mirror; PR2/PR3: power recycling mirror 2/3; BS: 50/50 beam splitter; SRM: signal recycling mirror; SR2/SR3: signal recycling mirror 2/3; FI: Faraday isolator; Φ_m : phase modulator; PD: photodetector. The laser power numbers correspond to full-power operation. All of the components shown, except the laser and phase modulator, are mounted in the LIGO ultra-high vacuum system on seismically isolated platforms. (taken from reference [41])

$$h_{\text{rad}}(f) = \frac{1}{2\pi^2 M f^2 L} \sqrt{\frac{\hbar \omega P_0}{c^2}}$$

가 된다. 여기서 M 은 거울의 질량이고, P_0 은 공진기 내에서 레이저 빛의 일률이다. 산탄 잡음이 중력과 진동수의 제공근에 비례하는 반면 복사압 잡음은 진동수의 제공에 반비례한다는 사실로부터 진동수가 높은 영역에서는 산탄 잡음이, 진동수가 작은 영역에서는 복사 잡음이 우세해진다는 사실을 알 수 있다. 산탄 잡음과 복사압 잡음을 양자 잡음(quantum noise)이라고 하며 이에 의해 민감도가 제한되는 것을 민감도의 표준 양자 한계(standard quantum limit, SQL)라고 한다.

라이고의 경우 최종 목표로 하는 변형 민감도(strain sensitivity)를 얻기 위해서는 레이저의 출력이 750 kW가 되어야 한다. 이러한 레이저를 제작하는 것은 현실적으로 불가능하므로 출력 재생 거울(power recycling mirror, PRM)을 사용하여 빔 가르개(BS)를 통해 나온 빛을 다시 팔 공진기 안으로 돌려 보내는 방법을 사용한다. 간섭계의 두 팔의 길이를 정밀하게 조정하여 신호-대-잡음비가 최대가 되도록 하였을 때, 즉 간섭계 출력이 암 포트 조건을 만족하면, 팔 공진기에서 반사되어 온 대부분의 출력은 레이저 쪽으로 되돌아간다. 따라서 그림 3과 같이 레이저와 BS 사이에 PRM을 놓으면, 팔 공진기로부터 반사되어온 거의 모든 출력을 다시 팔 공진기로 되돌려 보내 재사용할 수 있다. 라이고에서는 투과율이 3%인 PRM을 사용

Table 1. Main parameters of the Advanced LIGO interferometers. PRC: power recycling cavity; SRC: signal recycling cavity. (from reference [4])

Parameter	Value
Arm cavity length	3994.5 m
Arm cavity finesse	450
Laser type and wavelength	Nd:YAG, $\lambda=1064$ nm
Input power, at PRM	up to 125 W
Beam polarization	linear, horizontal
Test mass material	Fused silica
Test mass size & mass	34 cm diam. $\times$ 20 cm, 40 kg
Beam radius ($1/e^2$), ITM / ETM	5.3 cm / 6.2 cm
Radius of curvature, ITM / ETM	1934 m / 2245 m
Input mode cleaner length & finesse	32.9 m (round trip), 500
Recycling cavity lengths, PRC / SRC	57.6 m / 56.0 m

하여 125 W의 레이저 빛이 입사할 때 팔 공진기 안에 저장된 빛의 일률이 750 kW에 이르도록 만드는 것이 최종 목표이다.^[4] 현재까지 중력파를 측정하는데 사용된 레이저의 출력은 20 W로 아직 최대치에 이르지 않았지만 25 W 레이저 출력에서도 중성자별 쌍성 혹은 블랙홀 쌍성이 합체하는 과정에서 나오는 중력파를 관측하는 것이 가능한 것으로 예측되어 고출력 모드와 저출력 모드 두 가지 상태로 검출기를 작동시키는 것이 계획되었으며 예상대로 처음 시도한 저출력 모드에서 블랙홀 쌍성 혹은 중성자별 쌍성에서 나오는 중력파가 발견되었다.^[2]

앞서 논의된 바 있듯이 중력과 신호는 암 포트로 출력되기 때문에 출력 재활용 거울이 신호의 저장시간에는 영향을 주지 않는다. 따라서 그림 4에서와 같이 신호 재활용 거울을 사용하여 중력과 신호를 팔 공진기로 다시 되먹임(feedback)하여 재활용시킴으로써 신호추출 대역을 최적화시킬 수 있다.^[5] 또한 레이저 빛을 공진기에 더 잘 집어넣고 검출되는 레이저 빛의 모드를 선택적으로 측정하여 공진기의 결합에 의한 영향이 덜 하도록 입력과 출력 단에 레이저 빛을 깨끗한 가우시안

REFERENCES

- [4] J. Aasi *et al.*, Classical and Quantum Gravity **32**, 074001 (2015).
[5] B. J. Meers, Phys. Rev. D **38**, 2317 (1988).

Fig. 5. Strain sensitivity limit by thermal noise for different mirror substrate materials and reflective dielectric coating. [credit: Caltech/MIT/LIGO Lab]

(Gaussian) 모드로 만들어 주는 모드 청소기(mode cleaner)를 추가하였다. 표 1은 라이고 간섭계의 특성을 결정하는 중요한 변수 값을 나열한 것이다.

거울의 열적 잡음

라이고 검출기에서는 중력파에 의한 거울 사이 거리 변화가 원자 크기 이하의 수준이므로 거울을 구성하고 있는 원자들의 열적 요동에 의해 발생하는 거울 표면의 변형과 이에 따른 간섭 신호의 변화를 고려해야 한다. 레이저의 출력을 증가시키면 앞에서 설명한 바와 같이 양자 잡음을 줄이는데 유리하지만 레이저 빛이 거울에 미량 흡수가 되면서 거울의 온도가 올라가 열적 잡음이 커지는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해서 되도록 레이저 파장 영역에서 흡수율이 낮은 물질로 거울을 만들어야 한다. 라이고에서는 거울의 기반 물질로 각각 상대적으로 장단점이 있는 사파이어(sapphire)와 용융 실리카(fused silica)를 비교 분석하고 거울의 코팅에 관한 연구를 수행하여 왔으며^[6-8] 현재는 둘 중에 적외선 영역에서 흡수율이 낮은 용융 실리카를 선택하여 사용한다. 하지만 사파이어와 비교하여 열전도율이 좋지 않고 밀도가 낮아 거울의 크기가 상대적으로 커서 가우시안 프로파일을 갖는 레이저 빛을 거울에 쏘았을 때 거울의 가운데가 가장자리보다 더 뜨거워져 거울 표면에 변형이 발생한다. 이러한 열적 잡음을 줄이기 위해서는 되도록 레이저 빔의 크기를 키우는 것이 좋지만 빔 크기가 커지면 공진기에서 구멍 손실(aperture loss)이 증가하고 모드 안정성도 나빠진다. 이러한 문제를 완화하기 위해 표 1에서 보듯이 반사율이 더 높고 코팅이 더 두꺼워 레이저 빛의 흡수가 많이 일어나는 ETM에서는 빔의 크기를 키우고 상대적으로 코팅이 얇아 레이저 빛의 흡수가 덜 일어나는 ITM에서는 빔의 크기를

줄여 구멍 손실과 안정성을 확보하는 방법을 사용한다. 가우시안 모드의 빔이 크기가 작으면 가운데와 가장자리의 밝기 차이가 상대적으로 크고 ITM에서 거울 가운데와 가장자리의 온도 차이가 ETM에서 보다 심해지는데 이러한 차이를 보상하기 위해 그림 4에서와 같이 ITM 바로 옆에 보상 고리(compensation ring, CP)를 위치시키고 이를 별도의 고리 모양의 프로파일을 갖는 CO₂ 레이저로 가열한다. 가열된 CP에서 나온 열복사에 의해 ITM의 가장자리를 덥혀 거울 전체의 온도를 고르게 하여 열 변형을 억제한다.

현가장치: 진동 잡음의 억제

그림 4에서 보듯이 라이고 간섭계에는 많은 수의 거울이 들어간다. 이중 중력파를 측정하는데 직접적으로 사용되는 네 개의 시험 질량(두 팔에 각각 위치한 ITM, ETM)은 물론이고 나머지 거울들도 진동의 영향을 받아 움직이면 간섭 신호에 변화를 초래하므로 중력과 측정의 민감도를 좋지 않게 만든다. 따라서 모든 거울들을 거울의 크기와 위치에 따라 다양한 형태의 진자(pendulum) 장치를 이용하여 매단다. 이러한 현가장치(suspension)는 땅의 진동으로부터 모든 자유도에 대해 거울을 수동적으로 격리하고, 용인될 수 있는 수준의 열적 잡음을 준다. 또한 거울을 정렬하고 위치를 조정할 수 있도록 능동적으로 움직일 수 있는 기능도 제공한다. 시험 질량을 매다는 현가장치가 가장 복잡한데 그림 6과 같이 사중(quadruple) 진자와 마래징 강(maraging steel)으로 만들어진 캔틸레버 날 스프링이 3단으로 배치된 구조로 되어 모든 6개의 자유도에 대해 1 Hz 이상의 진동을 격리한다.

각 현가장치는 맨 아래 거울이 매달린 주(main) 사슬과 이와 이웃한 반응(reaction) 사슬로 이루어져 있으며 두 사슬은 서로 독립된 사중 진자 구조이다. 반응 사슬 맨 아래 매달린 질량을 ITM의 경우는 CP, ETM의 경우는 말단 반응 질량(end reaction mass, ERM)이라 한다. 앞서 열적 잡음을 줄이기 위한 CP의 역할을 설명하였는데 CP와 ERM은 시험 질량의 위치와 방향을 능동적으로 조정하는 역할도 한다. CP와 ERM에는 시험 질량과 마주하는 표면에 4분할 된 고리 형태의 금으로 된 전극이 부착되어 있고 각 전극에 고전압을 가함으로써 두 질량 사이에 정전기력이 발생하도록 하여 질량의 위치와 방향

REFERENCES

- [6] S. Reid and I. W. Martin, *Coatings* 6, 61 (2016).
- [7] A. E. Villar *et al.*, *Phys. Rev. D* **81**, 122001 (2010).
- [8] T. Chalermsonsak, "High Fidelity Probe and Mitigation of Mirror Thermal Fluctuations," Dissertation, Caltech PMA, May (2014).

Fig. 6. Anatomy of a quadrupole pendulum. Four vibration damping masses are present. The top two are flat metal structures below which the cylindrical masses hang from 0.4 mm silica fibers. The bottom two on the Main Chain side are cylindrical and made of a high-quality fused silica glass. (Credit: Adapted from IGR, University of Glasgow)

을 미세하게 조절할 수 있다. ETM과 ERM 사이 간격은 5 mm이며 전극에 고전압을 가하였을 때 둘 사이에 작용하는 최대 힘의 크기는 200 μN 이다. 거울의 능동적 조절이 될 필요한 ITM과 CP 사이의 간격은 이보다 넓은 20 mm이다.

전체 사중 진자의 진동 모드 중에서 9 Hz 이하의 진동은 가장 윗단에서 능동적으로 감쇄시킬 수 있다. 맨 아래 질량을 제외한 위의 3개의 질량은 코일/자석 능동자로 모든 자유도에 대해 조절된다. 맨 아래 질량은 앞서 설명한 정전기적 힘으로 잡음이 적고 대역폭이 넓은 능동 조절을 (pitch, yaw, piston 방향에 대해) 할 수 있다.

열적 잡음을 최소화하기 위해, 시험 질량과 그 위의 질량은 자체뿐 아니라 둘 사이를 매다는 줄, 줄과 질량을 부착하는 부위 모두 용융 실리카로 만들어져 있다. 줄의 모양 역시 열적 잡음을 최소화하면서 낮은 수직 되튐(bounce) 모드의 진동수(9 Hz, 대역 이하)와 높은 첫 번째 바이올린 모드의 진동수(510 Hz, 라이코가 가장 민감한 진동수 영역 이상)를 얻을 수 있도록 중간이 가늘고 질량과 부착된 부위에 가까울수록 굵게 제작되었다. 시험 질량을 제외한 위의 3단계의 질량은 서로 강철 줄로 연결되어 있다.

다른 거울을 위한 현가장치도 위의 시험 질량을 위한 사중 진자와 기본 원리는 같고 마지막 단계에서 용융 실리카 줄 대신 강철 줄을 사용한다.

Fig. 7. Seismic isolation for the test mass optic.

위에서 설명한 전체 현가장치는 그림 7에서 보듯이 지진 격리(seismic isolation) 장치에 연결되는데 이는 여러 지점과 진동수 대역에서 땅의 움직임을 측정하고 코일/자석 능동자로 상쇄시켜 현가장치에 들어가는 진동을 최소화한다. 이러한 진동/지진 격리 장치에서 최대 2×10^{-13} m 수준까지 진동을 억제할 수 있으며 현가장치에서 다시 10^6 정도 더 억제하여 최종적으로 목표하는 10^{-19} m의 진동 수준을 얻는다.

진공 시스템: 잔여 기체 잡음

라이코의 진공 튜브는 총 부피가 10,000 m^3 에 이르고 압력은 10^{-9} torr로 유지된다. 이것은 지구상에서 LHC에 이어 두 번째로 큰 초고진공 시스템이다. 이렇게 낮은 진공이 필요한 이유는 첫째, 소리가 전파되어 거울을 진동시키는 것을 막고, 둘째, 공기에 의한 열전도를 막아 거울의 변형과 열적 잡음을 줄이며, 셋째, 공기의 밀도 변화에 의해 레이저가 굴절되어 간섭신호에 매우 큰 변화가 일어나 중력과 검출이 불가능해지는 것을 막기 위함이다.

라이코에서 이러한 진공도를 얻기 위해 펌핑하는 데 총 40 일이 걸렸으며 그 중 30일은 진공 튜브를 150–170 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열하여 금속에 붙은 기체 분자를 떼어내는 과정(baking)을 거쳤다. 초고진공에서 잔여 기체는 대부분 수소이므로 그림 8의 잔여 기체 잡음은 압력 4×10^{-7} Pa에서 수소 분자 기체에 대해 레이저의 굴절에 의한 위상 변화가 초래하는 잡음을 계산

Fig. 8. Principal noise terms for the nominal (high power, broadband) mode of operation of Advanced LIGO.

하여 나타낸 것이다.^[9] 잔여 기체에 의한 또 다른 효과로 공기 저항에 의해 시험 질량의 현가장치에 감쇄가 생길 수 있고 이는 결과적으로 현가장치의 열적 잡음을 증가시킬 수 있다. 이 효과는 시험 질량과 반응 질량 사이의 작은 간격에 의해 증폭되므로 큰 힘이 필요하지 않은 ITM과 CP 사이의 거리를 앞서 기술한 대로 20 mm로 하여 ETM-ERM 간격 5 mm보다 크게 하였다. 이 효과가 변형 민감도에 미치는 정도가 굴절에 의한 효과보다 3-4 배 작고 궁극적으로 장치의 개선(진공 압력 감소, ETM-ERM 간격 증가, 고리 모양의 ERM 등)을 통해 제거될 것이므로 그림 8에 포함되지 않았다.

중력 구배 잡음

지진파는 지표면의 변형을 일으킬 뿐 아니라 지각의 압축과 팽창을 일으켜 밀도를 변화시킨다. 지표면의 변형은 진동을 유발하는데 이는 앞서 기술한 현가장치로 효과적으로 억제할 수 있지만 밀도 변화에 따른 국소적 중력의 변화는 현가장치로 차단할 수 없다. 이러한 국소적 밀도 변화에 따른 중력의 변화에 의한 잡음을 중력 구배 잡음 혹은 뉴턴(Newton) 잡음이라고 한다. 휴(Hughes)와 쏜(Thorne)은 검출기가 설치된 장소의 지각의 특성과 검출기의 전이 함수를 고려하여 중력 구배 잡음에 따른 변형 민감도를 계산하였고^[10] 이는 그림 8에 나타낸 것과 같다. 중력 구배 잡음은 제거하기가 매우 어렵지만 다행히 현재 라이고가 목표로 하는 대역에서는 다른 잡음보다 민감도에 미치는 영향이 작아 문제가 되지 않는다. 하지만 앞으로 지구에 위치한 검출기로 더 낮은 진동수의 중력파를 측정하고자 할 때는 중력 구배 잡음이 중요한 문제로 대두된다.

그림 8은 앞서 기술한 여러 잡음이 라이고의 변형 민감도에 미치는 영향을 계산한 결과이며 이러한 잡음의 영향을 모두 포함할 때 30 Hz-1 kHz 대역에서 10^{-23} 이하의 변형 민감도를 얻을 수 있다. 현재 라이고가 이러한 계획된 민감도에 완전히 이르지 못했음에도 2015년 최초로 중력파를 검출한 이래 6건의 추가적인 중력파 검출이 있었다. 앞으로 계획된 민감도를 얻고, 조임(squeezed) 상태의 빛을 이용하는 연구, 거울의 열적 변형 등에 의한 변수 불안정성(parametric instability)을 줄이는 연구, 스프링의 균열 잡음을 줄이는 연구 등을 통해 라이고의 민감도를 더욱 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

맺는 말

길이의 변화를 정밀하게 측정하는 장치로 광학 간섭계가 널리 쓰이는 것은 사실이나 앞에서 살펴 본대로 중력파에 의한 길이 변화는 우주에서 가장 강력한 천문 현상 중의 하나인 블랙홀 병합에서 발생하는 중력파에 의한 것조차도 킬로미터 정도의 거리에 원자핵 크기의 1/1000 정도의 변형을 일으킬 정도로 매우 작다. 이를 측정한다는 것은 불가능하다고 많은 사람들이 생각할 때 올해 노벨상을 탄 세 사람을 비롯한 몇몇 선구적인 과학자들은 이것이 가능하다는 확신을 가지고 연구와 설득을 지속했으며 마침내 과학계가 이들의 주장을 수용하면서 라이고라는 거대 연구 프로젝트가 탄생될 수 있었다. 많은 과학자들이 수십 년간 노력해 온 결과 마침내 2015년 중력파를 직접 검출하였으며 이후 7건의 중력파원을 발견하는 성과를 거두었다. 본 글에서는 언뜻 보기에 불가능해 보이는 민감도를 어떻게 얻을 수 있었는지에 대해 간략히 살펴보았다. 현재 라이고뿐만 아니라 유럽의 비르고(VIRGO)도 성능 개선을 하여 작동 중이며, 특히 2017년 8월 14일 측정에서는 세 곳에서 거의 동시에 측정이 되어 블랙홀의 위치를 더욱 정확하게 측정할 수 있었다. 현재 인도에 새로운 라이고 검출기가 건설될 예정이며, 일본에 지하 저온 검출기인 카그라(KAGRA) 건설이 순조롭게 진행되고 있으며 리사(LISA)와 같이 검출기를 우주에 건설하여 지진의 영향을 벗어나 더 낮은 진동수의 중력파를 측정하려는 계획도 추진되고 있다. 앞으로 더욱 많은 중력파 검출과 더욱 정밀한 관측이 가능해져 중력파 천문학의 시대가 열릴 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [9] M. E. Zucker and S. E. Whitcomb, *Proc. Seventh Marcel Grossman Meeting on General Relativity* (Stanford, July 1994), edited by R. T. Jantzen and G. M. Keiser (Singapore, World Scientific, 1996), p. 1434.
- [10] S. Hughes and K. Thorne, *Phys. Rev. D* **58**, 122002 (1998).