

분산 컴퓨팅을 이용한 중력과 검출을 위한 데이터 분석
ANALYSIS OF GRAVITATIONAL WAVE EXPERIMENTAL DATA
WITH DISTRIBUTED COMPUTING

임수일¹, 이형목¹, 김진호¹, 오상훈¹, 이상민²

¹서울대학교 물리천문학부

²한국과학기술정보연구원

SOOIL LIM¹, HYUNG MOK LEE¹, JINHO KIM¹, SANG HOON OH¹, AND SANG MIN LEE²

¹School of Physics and Astronomy, Seoul National University

²Korea Institute of Science and Technology Information

E-mail: sooillim@phy.snu.ac.kr

(Received May 18, 2007; Accepted June 13, 2007)

ABSTRACT

Many gravitational wave detectors are now being built or under operation throughout the world. In particular, LIGO has taken scientific data several times, although current sensitivity is not sufficient to detect the weak signals routinely. However, the sensitivities have been improving steadily over past years so that the real detection will take place in the near future. Data analysis is another important area in detecting the gravitational wave signal. We have carried out the basic research in order to implement data analysis software in Korea@home environment. We first studied the LIGO Science Collaboration Algorithm Library(LAL) software package, and extracted the module that can generate the virtual data of gravitational wave detector. Since burst sources such as merging binaries of neutron stars and black holes are likely to be detected first, we have concentrated on the simulation of such signals. This module can generate pure gravitational wave forms, noise suitable for LIGO, and combination of the signal and noise. In order to detect the gravitational signal embedded in the noisy data, we have written a simple program that employs 'matched filtering' method which is very effective in detecting the signal with known waveform. We found that this method works extremely well.

Key words: gravitational wave, matched filtering

1. 서론

중력과 검출기 실험에는 수천억원 이상의 막대한 자금이 들어갈 뿐 아니라, 대규모, 초정밀 실험이기 때문에 국내의 수준으로 직접 참여하는 것은 당장 어려운 일이다. 중력과 연구에 필수적인 수치 상대론 역시 외국에 비해 국내 수준이 결코 높다고 볼 수는 없지만, 계산상의 어려움과 컴퓨터 연산 능력의 한계 등으로 인해 아직도 중력과 검출 실험에 직접 적용할 수 있는 정도의 결과는 얻지 못하고 있는 실정이다. 따라서 수치 상대론은 국내의 인적 자원과 전산 자원의 집중적인 투자를 통해 빠른 시일 내에 국제 수준에 도달할 수 있는 분야로서 2005년 자발적인 연구자들의 참여를 통해 수치 상대론 연구회가 발족되었다.

미국을 비롯한 선진 외국에서는 이미 20여년 전부터 정교한 중력과 검출기를 제작하여 실험에 임하고 있으며 특히 미국의 LIGO(Laser Interferometer Gravitational Observatory)는 이미 여러 차례 데이터를 수집한 바 있으나 현재 실험 감도는 중력파를 항상 검출할 정도에 이르지 못하고 있다. 그러나 실험의 감도가 점차 향상되고 있어 중력과 검출은 가까운 장래에 이루어질 것으로 생각된다.

중력과 검출에서 실험 못지않게 중요한 것은 검출을 위한 자료 분석이다. 국내에서는 최근 중력파에 대한 관심이 고조되면서 슈퍼컴퓨터를 이용한 수치 상대론이 활기를 띠고 있지만 아직 자료 처리에 대해서는 연구가 전혀 이루어지지 않고 있다.

중력과 검출기가 생성하는 데이터는 그 양이 매우

방대하여 분석이 매우 어렵다. 분석하는 과정 자체는 주어진 파형에 맞는 신호가 매우 높은 잡음 속에 숨겨져 있는 것을 찾아내는 과정이기 때문에 매우 단순하지만, 반복적인 계산을 수없이 수행해야 한다. 이러한 어려움을 극복하기 위한 노력의 일환으로 미국 LIGO에서는 Einstein@home이라는 분산 컴퓨팅 환경을 이용한 분석 작업을 수행하고 있다.

우리나라는 IT 관련 산업이 매우 발달하여 전 세계에서 전산망이 가장 잘 확충되어 있는 나라로 손꼽힌다. 그러나 언어 장벽과 같은 이유로 인해 Einstein@home 프로젝트에 기여하는 정도는 거의 최하위 수준에 머물고 있다. 만약 국내 컴퓨터 환경을 잘 결합한다면 국제적으로 매우 중요한 기여를 할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 국내에서 추진하고 있는 분산 컴퓨팅 프로젝트인 korea@home 프로젝트에서 중력과 검출 분석을 수행할 수 있도록 하는 기본 연구를 수행하였다. 우선 LAL(LIGO Science Collaboration Algorithm Library)이라는 소프트웨어 패키지를 분석하고 발췌하여 가상의 자료를 생성하는 프로그램으로 재구성하고 이를 이용해 가상의 관측 자료를 생성할 수 있게 하였다. 가장 먼저 검출될 가능성이 높은 쌍블랙홀이나 쌍중성자별이 궤도 진화를 거쳐 일어나는 나선강하(inspiral)과정의 중력파를 계산하고 이를 지구에서 관측할 수 있는 형태로 만들었다. 여기에 LIGO와 같은 중력과 검출기가 가지는 가상의 잡음을 생성해 신호와 잡음이 섞여 있는 신호를 만들었다. 이러한 가상의 데이터를 분석하기 위해 정합필터를 이용해 신호를 찾는 프로그램을 제작하였다. 이 방법은 이미 알려져 있는 신호가 잡음과 섞여 있을 때 순수 신호 존재 여부를 알게 해 주는 방법이다.

2. 국내외 기술개발 현황

중력파는 천체의 정보를 관측할 수 있는 세 가지 수단 가운데 하나이다. 나머지 두 가지 방법은 광자와 입자(주로 중성미자)로서 이미 천체 관측에 활발히 사용되고 있다. 그러나 중력파는 아인슈타인의 일반 상대성 이론에서만 예측되는 현상으로서 아직 직접 검출된 바 없다. 중력파의 검출은 일반 상대성 이론의 검증에 위해 남은 마지막 시험인 셈이다.

중력과 검출은 일반상대성 이론의 시험 이외에도 강한 중력장을 수반하는 현상을 직접 관측하고 연구할 수 있다는 점에서 매우 중요하다. 따라서 선진 각국에서는 이미 중력과 검출기를 건설하여 가동 중에 있거나 건설 또는 건설 계획 중이다. 중력과 검출기의 종류로는 공명구(resonant sphere), 공명 막대(resonant

bar), 레이저 간섭계(laser interferometer), 우주 검출기(space-based detector) 등이 있다. 초창기 실험은 주로 공명막대를 사용하였으나 현재 대형 검출기는 레이저 간섭계들이다. LIGO 역시 레이저 간섭계 장치이다. 또 최신 기술을 이용한 공명구 실험이 여러 연구자들에 의해 제안되어 있다. 우주 검출기는 행성 탐사선들을 이용한 경우가 몇 차례 시도되었으며 최근에는 레이저 간섭계를 우주에 설치하는 LISA 프로젝트가 제안되어 있는 상태이다. 지금까지 기초 연구를 위한 수많은 중력과 실험 장치가 제작되어 사용되었고, 앞으로도 많은 수의 실험이 이루어질 것으로 기대된다.

중력과 검출을 위해서는 양자역학적 한계에 접근하는 초정밀 측정 기술이 필수적이다. 중력과 검출 자체도 과학적으로 매우 의미 있는 연구이지만, 검출기에 요구되는 새로운 기술이 다른 분야에 응용될 소지가 매우 크다. 예를 들어 레이저 간섭계에는 고�출력 레이저 발생 기술과 첨단 광학 기술이 있어야 하며, 공명 막대나 공명구를 이용한 측정에는 초미세 전류의 검출 기술이 필요하다. 이렇게 중력과 검출기 건설은 관련 분야에 파급 효과가 크기 때문에 선진국에서 막대한 예산을 투입해 추진하고 있는 것으로 보인다. 특히 최근에는 초저온 냉각 기술을 이용해 열적 잡음을 현저하게 줄일 수 있게 되었기 때문에 이러한 기술이 적용된 검출기 건설이 점차 힘을 얻어가고 있다. 또 지상에서는 지진과 때문에 매우 진동수가 낮은 중력파를 검출하는 것이 어렵기 때문에 거대 질량 블랙홀과 관련된 중력과 연구를 위해 우주 공간에 검출기를 배치하여 실험을 수행하고자 하는 노력이 진행 중이다.

중력과 검출에는 거대한 실험 장치도 필요하지만 중력파를 내는 천체에 대한 천체물리학적 연구, 중력파원이 내는 파형 계산을 위한 정밀 수치 상대론 연구, 그리고 자료 처리 연구 등이 병행되어야 한다. 중력파원에 대한 천체물리학적 연구는 주로 천체물리학자들에 의해 수행되며 주로 쌍성계의 진화와 그 결과에 의한 블랙홀 쌍성이나 중성자별 쌍성의 형성 연구와 밀집 성단에서의 항성 역학 연구가 그 범주에 속한다고 할 수 있다. 이러한 연구를 통해 주어진 감도를 가진 검출기에서 얼마나 자주 중력파가 검출될 수 있는지를 추정할 수 있다.

중력과 검출 자료 처리 연구는 검출기가 가지고 있는 잡음이 매우 복잡하고 신호는 상대적으로 매우 약하기 때문에 많은 수치 모의실험을 통해서 이루어질 수 있다. 이러한 종류의 연구를 위해서는 검출기의 잡음 특성과 중력과 신호가 전기 신호로 바뀌는 과정을 정확히 알고 있어야 가능하기 때문에 실험에 직접 참여하는 내부 연구진에 의해 주로 수행되고 있다. 특히

표 1. 지금까지 관측된 쌍펄사(binary pulsar) 목록과 이들의 궤도 특성 및 합병시간.

이름	궤도 주기 (P_b , days)	이심률	$M_1 (M_\odot)$	$M_2(M_\odot)$	τ_{merge} (년)
J1518+4904	8.634	0.249	$>3.6 \times 10^{12}$
B1913+16	0.323	0.617	1.44	1.39	1.0×10^8
B1534+12	0.420	0.274	1.34	1.34	1.0×10^9
B2127+11	0.335	0.681	1.35	1.36	8.0×10^7
B2303+46	12.340	0.658	$>1.6 \times 10^{12}$
B1820-11	357.762	0.795			$>2.4 \times 10^{15}$

LIGO 연구진은 앞서 언급한 LAL(<http://www.lsc-group.phys.uwm.edu/lal/sources>)이라는 방대한 소프트웨어를 작성하여 모의실험과 분석에 사용하고 있다. 이 소프트웨어는 공개되어 있으나 검출기 실험 자료가 공개되어 있지 않기 때문에 외부인으로서 매우 제한적으로만 사용할 수 있다. 최근 LIGO 연구진은 중력파 실험 데이터에서 펄사의 신호를 찾고자 하는 분석을 Einstein@home이라는 프로젝트로 진행하고 있다. 이 프로젝트에는 한국을 비롯한 전 세계 연구자들이 참여하고 있다.

지금까지 살펴본 전 세계의 중력파 연구 활동에 비해 이 분야 국내 연구 활동은 매우 미미한 실정이다. 특히 우리나라에는 중력파 실험 관련 연구자가 없기 때문에 중력파 검출 실험은 국내에서 한 번도 이루어진 바 없을 뿐 아니라 계획 중인 실험도 없다. 따라서 실험 데이터를 다루는 자료 처리 연구 역시 활성화되어 있지 않다. 그러나 실험 데이터의 분석은 막대한 실험 기기를 건설하지 않고도 수행할 수 있을 뿐 아니라 국내의 발달된 IT 환경을 활용할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 우리나라에서 수행하기 적합한 연구라고 생각된다. 수치 상대론 연구가 높은 수준에 이르면 이를 이용해 LIGO나 LISA와 같은 실험 팀에 가입할 수 있을 것이며 이 경우 우리나라에서도 실험 데이터를 분석하는 연구가 이루어질 수 있을 것이다. 따라서 장기적인 관점에서 자료 처리에 관한 기초 연구를 수행하는 것은 매우 의미 있는 일일 것이다. 특히 Korea@home과 같은 분산 컴퓨터 환경을 이용한 연구 기반이 확립된다면 향후 실험 데이터를 국내에서 분석하여 중력파 연구에 기여할 수 있는 길이 열릴 수 있을 것이다.

3. 중력파 발생에 의한 쌍성 궤도의 변화

중력파원에는 여러 가지가 있으며 어떤 것은 연속적으로 중력파를 내고 어떤 것은 매우 급작스럽게 중력파를 내고 없어진다. 연속적으로 중력파를 내는 것을 주기적 파원(periodic source), 급작스럽게 중력파를 내는 것을 폭발적 파원(burst source)라 부른다. 주기적 파원으로는 중성자 쌍성들이 있다. 중성자 쌍성은 펄사일 경우에만 관측이 가능하기 때문에 쌍펄사(binary pulsar)라 부르기도 한다. 현재까지 알려진 중성자 쌍성은 표 1에 주어진 바와 같다. 표 1에 보여진 쌍펄사들 가운데 B1913+16은 최초로 발견된 것으로서 주기가 매우 정확히 측정되어 있고, 주기의 시간에 따른 변화도 관측되었다. 궤도 주기가 매우 짧은 이 계에서는 중력파의 영향이 상대적으로 크게 나타나며, 실제로 관측된 주기의 변화는 일반 상대성 이론으로 계산한 결과와 매우 잘 일치한다.

연속적으로 중력파를 내는 천체의 경우 표 1에 보인 것들과 같이 이미 알려진 천체를 대상으로 중력파 검출을 시도할 수 있으나 중력파 신호가 매우 약하기 때문에 검출이 매우 어려운 상황이다. 반면 급작스럽게 중력파를 내는 천체는 매우 드물고 어디에서 신호가 올지 예측하기 어려우나 신호가 비교적 강하게 나타날 수 있기 때문에 검출이 보다 쉬울 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 파열원에 대한 검출 알고리즘을 연구하고 이를 구현하고자 한다.

파열원의 대표적인 예로는 쌍펄사를 이루는 중성자 별들의 충돌이나 블랙홀 쌍성의 충돌을 들 수 있다. 질량이 M_1 과 M_2 이고 궤도 장반경이 a , 이심률이 e 인 쌍성은 다음과 같은 율로 궤도 에너지를 잃게 된다.

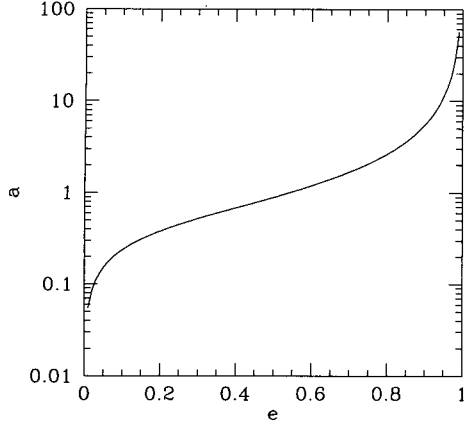


그림 1. 중력파의 영향으로 진화하는 쌍성 궤도에서 이심률과 궤도 장반경과의 관계. 여기서 궤도 장반경은 임의의 값으로서 초기에 주어진 값에 정규화시킬 수 있다.

$$\frac{dE}{dt} = - \left(\frac{32}{5} \right) \frac{G^4}{c^5} \frac{M_1^2 M_2^2 M}{a^5} f(e), \quad (1a)$$

$$f(e) = \left(1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4 \right) (1 - e^2)^{-7/2}, \quad (1b)$$

여기서 c 는 빛의 속도, G 는 뉴턴의 중력 상수이며 $M = M_1 + M_2$ 이다. 식 (1b)의 이심률 함수는 이심률 1 부근에서 급격히 변하는 모습을 보여준다.

위에 보인 것과 같은 에너지 변화를 겪는 쌍성의 궤도 인자인 장반경(a)과 이심률(e)의 변화는 다음과 같이 쓸 수 있다 (Peters 1964).

$$\frac{da}{dt} = - \frac{64 G^3 M_1 M_2 (M_1 + M_2)}{5 c^5 c^3 (1 - e^2)^{7/2}} \left(1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4 \right) \quad (2a)$$

$$\frac{de}{dt} = - \frac{304 G^3 M_1 M_2 (M_1 + M_2)}{15 c^5 a^4 (1 - e^2)^{5/2}} e \left(1 + \frac{121}{304}e^2 \right) \quad (2b)$$

이러한 장반경과 이심률의 변화를 그림으로 표시하면 그림 1과 같다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 중력파 방출에 의해 진화하는 쌍성 궤도의 진화는 초기 이심률

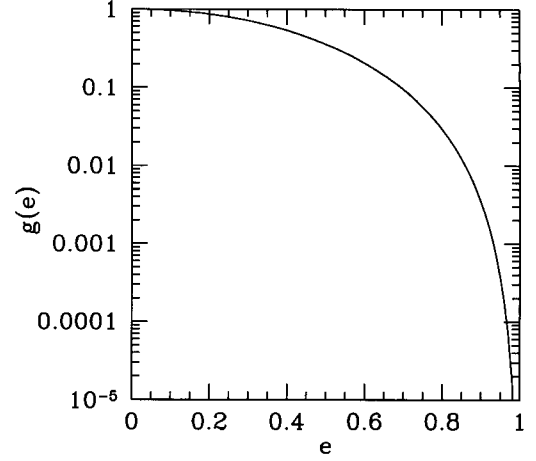


그림 2. 식 (4)의 $g(e)$ 의 모습. 이심률이 1에 가까워짐에 따라 매우 급격히 감소하는 함수이다. 즉 이심률이 큰 쌍성은 매우 짧은 시간에 합병에 이른다.

이 얼마이던 상관없이 마지막 단계에서는 이심률이 0으로 접근함을 알 수 있다. 실제 중력파 검출기로 검출되는 파열원은 궤도 진화의 마지막 단계에서 일어나는 것으로서 궤도 장반경이 슈바르츠실트 반지름의 수배 이내일 때부터 강한 중력파가 나오기 시작한다. 이렇게 궤도 장반경이 작은 경우에는 궤도 이심률은 0이라고 보아도 무관하다. 이 사실 때문에 우리는 검출하려는 파형을 초기 이심률이 0인 궤도를 이용해 구하면 된다.

4. 파열 중력파원의 발생률

4.1 쌍성 궤도의 진화와 별의 합병

개개의 중성자 쌍성이나 블랙홀 쌍성이 궤도 진화를 거쳐 궁극적으로 합병에 이르는 시간을 τ_{merge} 라 부른다. 주어진 이심률에서 쌍성이 중력파에 의해 에너지를 잃는 율은 장반경의 네제곱에 반비례하고 케플러의 법칙에 따라 장반경은 궤도 주기의 2/3승에 비례하므로 τ_{merge} 는 궤도 주기의 8/3승에 비례한다. 결국 궤도 주기가 긴 쌍성이 경우에는 τ_{merge} 가 매우 길다. 따라서 우주의 나이 이내에 합병에 이를 수 있는 쌍성은 궤도 주기가 매우 짧은 것이어야 한다. 식 (2a)와 (2b)를 적분함으로써 우리는 주어진 장반경과 이심률을 가진 쌍성이 합병하는데 걸리는 시간을 계산할 수 있다. 초기 장반경과 이심률을 각각 a_0 와 e_0 라 하면

$$\tau_{merge} = \frac{c^5}{G^3} \frac{5a_0^4}{256M^2\mu} g(e_0), \quad (3)$$

이고 여기서 $M = M_1 + M_2$ 는 전체 질량, $\mu \equiv \frac{M_1 M_2}{M}$ 은 환산질량 (reduced mass), 그리고 $g(e_0)$ 는 이심률에만 관계하는 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$g(e_0) = \frac{48}{19} \frac{(1 - e_0^2)^4}{e^{48/19} \left(1 + \frac{121}{304} e^2\right)^{3480/2299}} \int_0^{e_0} \frac{\left(1 + \frac{121}{304} e^2\right)^{1181/2299}}{(1 - e^2)^{3/2}} e^{29/19} de \quad (4)$$

그림 2에는 $g(e_0)$ 를 보여주고 있다. 이미 앞에서 언급한 것과 같이 중력파 발생률은 궤도 이심률이 1 부근에서 급격히 증가한다. 따라서 $g(e_0)$ 역시 이심률이 1에 가까워지면 매우 급격하게 감소함을 알 수 있다. 실제 관측된 중성자별 쌍성계에 적용해 구한 τ_{merge} 는 표 1의 마지막 열에 보였다.

4.2 우리 은하 내 중성자성 합병률

과연 우리 은하와 우주에는 얼마나 많은 짧은 주기의 블랙홀이나 중성자별 쌍성이 존재하는지 추정하는 것은 매우 어려운 일이다. 특히 블랙홀은 주변 물질을 끌어 들이는 부착 원반을 가지고 있지 않으면 빛을 거의 내지 않기 때문에 그 존재 여부조차 파악하기 어렵다. 중성자별의 경우에는 빠른 속도로 회전하면서 주기적인 전파를 내는 펄사 단계에 있을 수 있어 펄사로서 발견된 것이 표 1에 보인 것과 같이 여러 개 있다. 이 표의 마지막 줄에는 τ_{merge} 를 보여준다. 이 표에 보인 6개의 쌍펄사 가운데 3개는 매우 긴 τ_{merge} 를 가지고 있는 반면 세 개는 우주의 나이보다 훨씬 짧은 시간 안에 합병에 이를 수 있음을 알 수 있다. 이 사실은 이미 우리 은하에서는 상당수의 중성자 쌍성이 합병을 통해 강력한 중력파원 역할을 했었음을 의미한다. 또 이 표를 이용해 우리는 중성자 쌍성의 합병률을 대략적으로 추정할 수 있다. 표 1에 보인 중성자 쌍성들의 τ_{merge} 에 대한 조화 평균을 구하면 이는 중성자 쌍성의 합병률에 해당한다. 즉,

$$\left(\frac{dN_{merge}}{dt}\right)_{local} \approx N_{nb} \times \left(\frac{1}{\tau_{merge}}\right) = \frac{N_{nb}}{3 \times 10^8} \text{ year}^{-1}$$

이다. 여기서 아래첨자 local은 중성자 쌍성 탐사가 수행된 영역을 의미하며, N_{nb} 는 표 1에 있는 중성자 쌍성의 개수로 6이다. 중성자 쌍성 탐사는 우리 은하 전 부피의 1% 정도에 대해서만 이루어졌다고 추정되므로 실제 우리 은하에서 일어날 수 있는 합병률은 약 $2 \times 10^{-6} \text{ year}^{-1}$ 정도일 것이다. 다시 말해서 약 100만 년에 두 개 정도의 중성자성 합병이 일어날 수 있다.

표 1에 보인 중성자 쌍성들은 우리 은하의 원반에 존재하는 별들 가운데 특별한 초기 조건을 가지고 태어난 쌍성의 진화를 통해 만들어진 것들이다. 하늘에 존재하는 별들 가운데 쌍성의 빈도수는 매우 높지만, 궁극적으로 중성자 쌍성에 이를 수 있는 특별한 조건을 가지고 태어나는 것은 매우 드물다. 그렇기 때문에 중성자별의 합병 현상이 매우 드물게 일어나는 것이다.

중력파원으로 매우 중요한 또 다른 종류의 쌍성은 블랙홀 쌍성이다. 그러나 이미 언급한 바와 같이 블랙홀 쌍성은 관측할 수 있는 좋은 방법이 없기 때문에 아직까지 직접 관측된 바 없다. 따라서 블랙홀 쌍성의 합병률 추정은 이론적인 방법으로만 가능하다. 블랙홀 쌍성에 이를 수 있는 초기 조건을 가지는 쌍성의 생성률이 매우 낮을 것으로 추정되며, 따라서 블랙홀 쌍성의 진화를 통한 합병률은 중성자별 쌍성의 합병률에 비하면 매우 낮을 것이다. 본 연구에서 수행한 중력파 검출 시뮬레이션은 모두 중성자별 쌍성을 가정하고 있다.

우리 은하의 별들은 대부분은 원반에 존재하고 있으나 전체 별의 약 0.1% 정도는 밀도가 매우 높은 구상 성단에 포함되어 있다. 구상 성단의 중심에서는 항성 밀도가 매우 높아 별 사이의 근접 상호 작용이 매우 활발히 일어난다. 이러한 근접 상호 작용은 아래에 설명하는 것과 같은 이유로 인해 상당수의 중성자 쌍성을 만들어내고 이들 중 상당수는 궤도 반지름이 매우 작아 빠른 시간에 합병에 이를 수 있다.

구상 성단을 구성하는 별의 대부분은 주계열에 놓여 있는 질량이 작은 별들이지만, 중성자별도 포함되어 있다. 구상 성단 내에 중성자 별이 존재한다는 사실은 우리 은하에서 발견된 약 100개 정도의 저질량 X-선 쌍성(Low-mass X-ray binaries: LMXB) 가운데 약 10여개는 구상 성단에 있다는 관측을 통해 알 수 있다. 구상 성단에 속하는 별은 우리 은하 전체 별의 약 0.1% 정도라는 사실과 비교하면 구상 성단에서 LMXB의 상대적 빈도수는 은하 원반에서의 LMXB 빈도수에 비해 약 100배 정도 높다는 것을 의미한다. LMXB는 중성자별을 주성으로 하는 근접쌍성이라는 사실이 잘 알려져 있으므로 구상 성단에도 중성자별이 존재하고 있을 뿐 아니라 근접 쌍성의 빈도수가 매우 높음을 알 수 있다. 구상 성단내 중성자별들은 성단 생성 때 있었던 질량이 큰 별의 진화를 통해 만들어진 것들이다.

우리 은하 내에서 일어나는 중성자성 합병 현상은 너무 드물기 때문에 외부 은하에서 일어나는 합병을 검출하는 것이 훨씬 더 현실적이다. 우주에는 은하의

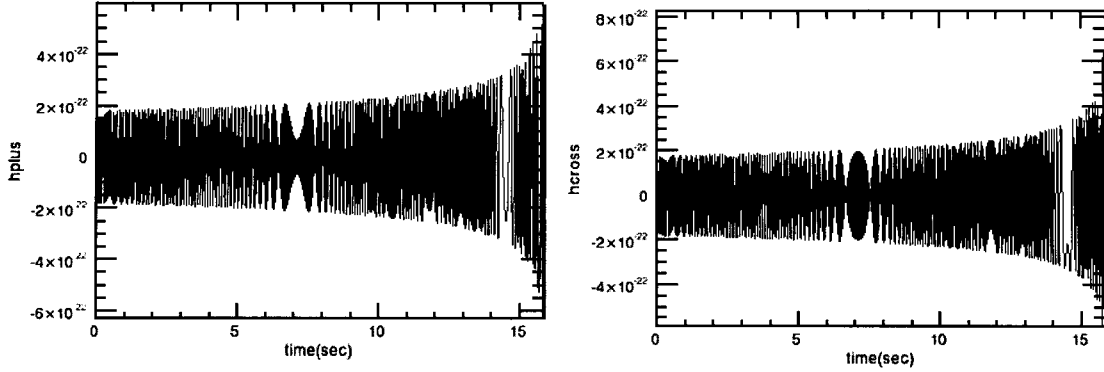


그림 3. 질량이 $1.4M_{\odot}$, $2.5M_{\odot}$ 인 두 개의 중성자별 (또는 블랙홀이라도 상관없음) 쌍성이 나선강하 하는 동안 방출하는 두 개의 편광 파형. 이 파형은 포스트 뉴턴 근사로 구한 것이며 실제 충돌이 일어난 후의 파형은 아직 잘 알려져 있지 않기 때문에 여기에 표시하지 않았다. 관측되는 파형은 이 두 편광 파형의 선형 조합이 된다.

밀도가 대략적으로 1 Mpc^{-3} 이므로 약 100만개 정도의 은하를 포함하는 부피의 반지름은 약 100 Mpc이다. 만약 이 정도 거리에서 일어나는 중성자 쌍성의 합병을 검출할 수 있다면, 1년에 한 두 개 정도의 검출이 가능하다.

5. 중력파의 발생과 검출 원리

중력파는 중력장이 급격하게 변할 때 나오는 파동으로, 일반 상대론에서만 기대되는 현상이기 때문에 그 파형을 구하는 것이 매우 어렵다. 따라서 대개 중력파는 중력장이 비교적 약한 중력장에서 구하는 '약중력장 근사(weak field approximation)'을 사용한다. 이 경우 시공간의 구조를 나타내는 메트릭은 편평한 시공간의 메트릭인 민콥스키(Minkowski) 메트릭에 약간의 섭동을 가한 메트릭인 $h_{\mu\nu}$ 를 더한 것으로 나타낼 수 있다. 또한 메트릭은 좌표계의 설정에 따른 자유도를 가지고 있어 transverse traceless 게이지를 사용하면 아래와 같은 파동 방정식을 만족한다.

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) h_{\mu\nu} = 0. \quad (4)$$

즉 중력파는 빛의 속도로 진행하는 파동이라는 것이다.

또 중력파는 스핀이 2이기 때문에 위상이 45 회전된 두 개의 독립적인 편광 상태를 가지고 있다. 이들 편광중 위아래로 진동하는 성분을 h_+ , 45도 회전되어 진동하는 성분을 h_{\times} 라 표현하면 x-방향으로 진행되는 중력파는 두 개의 편광이 섞여 있는 형태로서,

$$h_{\mu\nu} = h_+(t-x/c) + h_{\times}(t-x/c) \quad (5)$$

처럼 쓸 수 있다. 이렇게 h_+ 와 h_{\times} 가 적절히 결합되어 관측자의 위치에서 일으키는 메트릭의 요동을 변형(strain)이라 부른다. 이러한 변형은 관측자의 입장에서 보면 두 점 사이의 거리가 변하는 것으로 나타나며, 중력파 검출기는 두 점 사이의 거리가 시간에 따라 변하는 양상을 관측하는 것이다.

중력파에 의한 변형은 시간에 따라 변하는 양으로서 변형의 크기와 진동수로 특징지을 수 있다. 케플러 운동을 하고 있는 쌍성이 내는 중력파의 진동수는 궤도 진동수의 두 배가 된다. 즉 궤도 반지름이 r 이고 전체 질량이 M 인 쌍성에서 케플러 운동 각속도를 Ω_K 라 하면 중력파의 진동수는

$$f_{GW} = \frac{1}{\pi} \Omega_K = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{GM}{r^3}} \quad (6)$$

가 될 것이다. 만약 궤도 반지름이 원궤도가 역학적으로 불안정해지는 $r=3r_s=6GM/c^2$ 라 하면 (여기서 r_s 는 슈바르츠실트 반지름) 중력파의 진동수는

$$f_{GW} = \frac{c^3}{216M} = 1.4 \times 10^4 \left(\frac{M_{\odot}}{M}\right) \text{ Hz} \quad (7)$$

가 된다. 질량이 $1.4M_{\odot}$ 인 중성자 별의 경우 10kHz, $10M_{\odot}$ 인 블랙홀의 경우 약 1.4kHz가 됨을 알 수 있

다. 파열원은 대개 1kHz에서 10kHz 정도의 진동수를 가지고 있다.

중력파의 변형 정도는 다음과 같이 간단히 추정할 수 있다. 이제 전체 에너지 E 이고 진동수 f_{GW} 를 가진 중력파가 발생해 거리 R 만큼 떨어진 곳에 도달한다고 하자. 이 경우 중력파의 변형 h 는 대략

$$h \approx f_{GW}^{-1} \dot{h} = f_{GW}^{-1} \left[\frac{20Gc^5}{R^2} f_{GW} E \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$\approx 2.7 \times 10^{-20} \left(\frac{E}{M_\odot c^2} \right)^{1/2} \left(\frac{f_{GW}}{\text{kHz}} \right)^{-1/2} \left(\frac{R}{10\text{Mpc}} \right)^{-1}$$

이다.

이 식으로부터 우리는 변형 정도는 매우 작으며 중력파원과 검출기 사이의 거리에 반비례함을 알 수 있다. 변형이 파원까지의 거리에 반비례한다는 사실은 멀리 있는 파원이라도 변형이 떨어지는 정도가 빛의 밝기가 떨어지는 정도에 비해 훨씬 느리기 때문에 측정이 상대적으로 용이해질 수 있음을 의미한다. 그러나 변형 정도가 10^{-20} 이라는 사실은 중력파 검출이 얼마나 어려운 실험인가를 말해준다.

식 (8)에 표현한 변형은 중력파가 없을 때의 길이에 비해 변하는 상대 길이를 의미한다. 즉 $h = 10^{-20}$ 일 때 길이가 4 km인 LIGO 검출기 사이의 거리가 변하는 양은 4×10^{-15} cm로 중성자나 양성자의 크기인 10^{-13} cm보다 수십분의 1 정도로 매우 작은 양이다. 이렇게 미미한 변화를 측정하기 위해 여러 가지 종류의 중력파 검출기가 제안되어 있으며, LIGO나 VIRGO와 같은 대형 실험에서는 Fabry-Perot 간섭계가 포함된 마이켈슨 간섭계를 사용한다. 여기서 Fabry-Perot 간섭계는 LIGO 검출기의 팔 길이 4km를 수십배 늘여주는 것과 같은 역할을 한다. 이런 방법으로 매우 미세한 거리 변화를 측정하는 것이다.

6. 파열원으로부터 기대되는 중력파의 파형

궤도 반지름이 슈바르츠실트 반지름에 비해 매우 큰 안정된 케플러 궤도에 놓여 있는 쌍성에서 나오는 중력파는 매우 규칙적인 파동이지만 그 변형 정도는 매우 작다. 그러나 쌍성의 궤도가 점점 줄어들어 불안정해지는 $3r_s$ 부근부터는 궤도 반지름이 비교적 빠른 속도로 줄어들면서 변형의 크기가 증가하고 그 모양은 점점 불규칙해진다. 궤도가 빠른 속도로 감쇠하면서 나선 강하(inspiral)가 일어나는 시기의 중력파는 포스트 뉴턴 근사를 이용해 정확한 파형 계산이 가능하다. 그러나 블랙홀이 슈바르츠실트 반지름에 아주 가까워지면 중력장이 매우 강해지고 포스트 뉴턴 근사를 사

용할 수 없게 된다. 따라서 실제 합병이 일어나는 단계에서는 아인슈타인 방정식을 직접 적분하는 수치 상대론의 방법을 사용해야 한다. 아직까지 합병단계의 중력파를 정확히 구한 예는 매우 드물고, 따라서 최근 수치 상대론의 중요한 연구 과제이다. 중성자별 쌍성의 경우에는 유체역학적 현상이 중요해지기 때문에 수치 적분이 더 어렵다. 합병이 거의 끝날 무렵에는 중력파의 진동이 감쇠 진동 모양을 따르게 되는 안정화 단계에 접어든다. 안정화 단계의 중력파는 변형 정도가 빠른 속도로 작아진다. 따라서 본 연구에서는 중력파의 파형을 계산할 수 있고 중력파에 의한 변형도 비교적 큰 나선강하 단계의 중력파 검출을 목표로 삼고 있다.

그림 3은 이러한 파형의 예를 보여준다. 이 그림에 보인 것은 거리 15Mpc 떨어진 곳에 위치한 질량 1.4 M_\odot 와 2.5 M_\odot 의 중성자별로 이루는 쌍성계에 대해 관측자로부터 쌍성계까지의 시야선과 쌍성계의 각운동량 사이의 각이 30°일 때 나선강하를 하는 동안 방출하는 중력파의 두 편광 성분을 보여주고 있다. 실제 관측되는 중력파는 두 개의 편광 성분이 분리된 형태가 아니고 합성된 형태이다. 일반적으로 레이저 간섭계 실험 장치에서 측정되는 중력파의 변형은 다음과 같이 주어진다.

$$h(t) = \frac{1\text{Mpc}}{D_{eff}} [\sin\alpha h_+(t-t_c) + \cos\alpha h_\times(t-t_c)] \quad (9)$$

여기서 D_{eff} 는 쌍성계까지의 유효 거리로 쌍성계까지의 거리, 쌍성계의 위치, 그리고 궤도면의 방향에 의존하며, α 는 쌍성계의 위상, 궤도면의 방향에 의존한다. 그리고 t_c 는 충돌이 일어나는 시간이다.

또한 h_+ 와 h_\times 는 각각 쌍성계의 궤도면이 간섭계 양팔에 의해 결정되는 평면과 평행하고 수직인 방향으로 1Mpc 에 의지할 때의 두 편광 성분이다.

6.1 중력파 검출기의 잡음

만약 중력파 검출기에 잡음이 전혀 없다면, 아주 미세한 중력파라고 하더라도 정확히 검출할 수 있을 것이다. 그러나 모든 측정기는 잡음을 반드시 포함하고 있다. 중력파 검출기의 경우도 많은 종류의 잡음을 가지고 있어 실제 측정되는 신호는 잡음과 신호가 섞여 있는 것이다.

중력파 검출기의 잡음원에는 크게 세가지 종류가 있다. 지구 표면은 끊임없이 진동하고 있으며 이러한 진동은 중력파 검출기 거울을 진동하게 만들어 측정 부정확성을 증가시킨다. 이런 종류의 잡음을 지진 잡

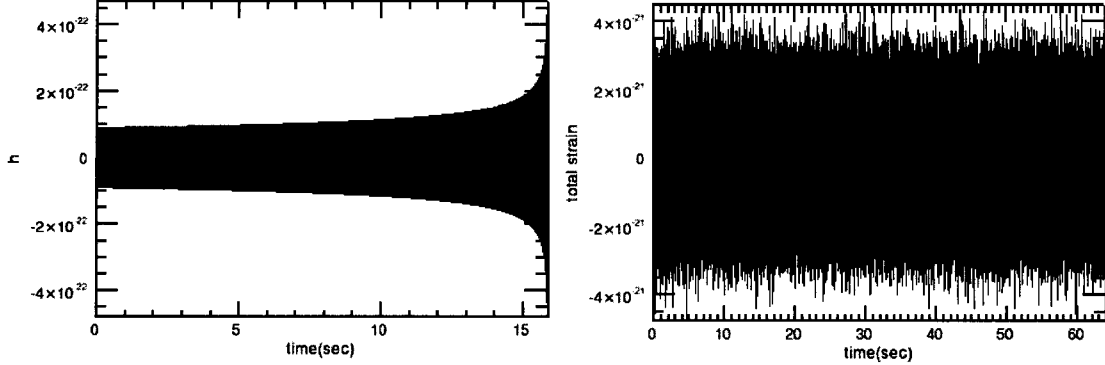


그림 5. 질량 $1.4M_{\odot}$ 와 $2.5M_{\odot}$ 의 중성자별로 이루어진 쌍성계에 대해 식 (11)에서 $D_{eff} \approx 34.5\text{Mpc}$ 과 $\alpha \approx 5.49$ rad 에 해당하는 이론적인 파형과 (왼쪽) 이러한 파형이 잡음과 섞여 있는 가상의 신호 (오른쪽). 이 가상의 신호에는 중력과 신호가 약 39.659초 부근에 숨겨져 있다. 오른쪽 그림과 같이 잡음만 보이고 파형은 전혀 알 수 없는 신호에 정합필터를 사용해 신호를 찾아 낼 수 있고 그 결과는 다음 그림 14에 보여준다.

음(seismic noise)라 부른다. 두 번째 잡음은 간섭계에 있는 반사 거울을 지지하는 끈의 열적 진동에 의해 측정 불확실성이 높아지는 열잡음(thermal noise)이다. 열잡음은 지지끈의 온도에 크게 좌우되며 절대온도 0도에 가깝도록 냉각시키면 무시할 수 있을 정도로 작아진다. 마지막으로 간섭현상을 일으키는 빛이 입자성을 가지고 있기 때문에 나타나는 산탄 잡음(shot noise)가 있다. 지진 잡음은 우주 공간에 간섭계를 설치함으로써 없앨 수 있고, 열잡음은 지지 끈의 온도를 낮춤으로써 줄일 수 있지만 산탄 잡음은 원천적으로 없앨 수 없는 잡음이다.

변형의 측정 오차에 영향을 주는 각종 잡음의 시간에 따른 변화 양상을 $n(t)$ 라 하자. 이러한 잡음의 특징을 나타내는 유용한 함수로는 잡음의 Power spectral density (PSD)를 들 수 있다. PSD는 잡음의 자기상관함수(autocorrelation function)을 푸리에 변환한 것으로 다음 과정을 통해 계산할 수 있다. 잡음의 자기상관 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T n(t+\tau)n^*(t)dt.$$

이렇게 구한 자기상관 함수의 푸리에 변환이 잡음의 PSD인 $S_n(f)$ 로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau)\cos(2\pi f\tau)d\tau.$$

위에서 설명한 세 가지 잡음 PSD의 진동수에 따른 양상은 잡음마다 모두 다르다. 지진 잡음은 주로 진동수가 작은 영역에서, 열잡음은 중간 진동수 영역에서, 그리고 산탄 잡음은 주로 높은 진동수 영역에서 중요해진다. 이러한 잡음 PSD의 진동수에 따른 변화는 그림 4에 보였다. 대부분 지상 검출기들은 진동수 100Hz 정도 영역에서 가장 민감한 감도를 가지고 있음을 볼 수 있다.

6. 결과

본 연구에서 제작한 소프트웨어는 가상의 데이터를 생성하고 이를 PC 환경에서 분석할 수 있을 정도의 분량으로 쪼개는 프로그램과 이들 데이터를 분석하여 파일 중력과원의 존재 여부와 이러한 파형을 만들어 내는 쌍성계의 인자를 추출하는 프로그램으로 구성되어 있다.

6.1 잡음이 포함된 가상의 데이터 생성 프로그램

중력과 검출을 위한 소프트웨어 작성을 위해서는 관측 자료가 필요하다. 그러나 LIGO와 같은 실험 관측 자료는 공개되어 있지 않다. 우리나라는 아직 LIGO의 회원이 아니기 때문에 관측 자료를 직접 사용할 수 없다. 게다가 실험 자료는 아직 충분한 감도를 가지고 있지 않기 때문에 소프트웨어 제작 및 시험을 위해 사용하기에는 어려운 면이 있다. 이런 이유 때문에 실제 LIGO 소프트웨어 제작진들도 실제 관측 데이터를

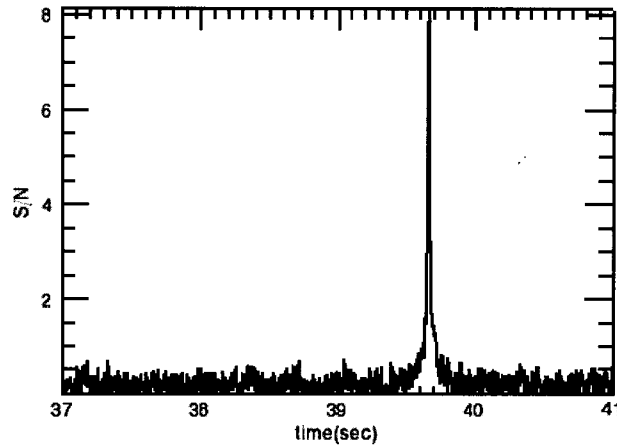


그림 6. 그림 5의 오른쪽에 있는 잡음이 섞인 신호를 왼쪽의 이론적 파형으로 정합필터 방법을 이용해 구한 신호대 잡음비. 이론적 파형을 삽입한 $t=39.66$ 초 부근에서 신호대 잡음비가 크게 증가함을 볼 수 있다.

사용하지 않고 수치 모의실험으로 생성한 가상의 데이터를 사용한다.

본 연구에서도 중력파 검출 소프트웨어 제작을 위해 가상의 신호를 생성하였다. 이 때 가상의 신호는 그림 4에 보인 것과 같은 잡음 스펙트럼을 만족시켜 주어야 한다. 그러나 본 연구에서는 편의상 진동수에 무관한 백색 잡음 스펙트럼을 가지는 잡음을 생성하였다. 우선 본 연구에서 검출하려는 신호의 진동수 범위가 매우 좁고 (100 Hz 내외) 잡음의 생성과 분석이 용이하기 때문이다. 그러므로 LAL 내의 일부 모듈을 발췌 수정하여 여러 종류의 질량이 조합된 쌍성계로부터 나오는 파형을 구하고 이를 잡음과 합하여 관측 가능한 신호로 바꾸는 프로그램을 만들었다.

본 연구에서는 잡음의 세기를 일정하게 놓고 신호의 세기를 변화시키면서 검출 가능성을 연구하기 위해 잡음과 섞인 가상의 관측 데이터를 생성하였다. 그림 5는 이렇게 생성된 가상의 데이터 일부를 보여주고 있다. 우리는 이러한 과정을 통해서 얻어진 잡음이 포함된 시계열 데이터를 하나의 PC에서 분석이 용이하도록 하기 위해 64초의 단위 데이터로 쪼개고, 이 단위 데이터를 다음절에서 설명할 분석 프로그램을 이용해서 분석하였다.

6.2 정합 필터를 이용한 중력파 검출 프로그램

이제 잡음이 섞여 있는 가상의 신호에서 실제 중력파를 어떻게 검출하는지 알아보자. 쌍성 궤도의 나선 강하시 나타나는 중력파와 같이 그 파형이 알려져 있는 경우 정합필터(matched filter)를 이용해 그 신호 존재

여부를 알 수 있다. 정합필터란 신호의 파형을 알고 있을 때, 신호와 잡음이 섞여있는 입력신호에서 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio)를 최대로 만들어 잡음을 최소화 시키는 필터를 말한다.

우리는 이러한 원리를 실제 중력파 검출에 적용하고 모형 인자를 추출하며 정량적인 신호대 잡음비를 구하기 위해 Abbott et al. (2004a)가 제시한 이론을 바탕으로 프로그램을 작성하였다. 앞서 정의한 바와 같이 잡음을 $n(t)$, 중력파 신호를 $h(t)$ 라 하면 실제로 관측되는 신호는 $s(t) = n(t) + h(t)$ 이다. 이제 찾으려는 신호의 파형이 $f(t)$ 라고 하면 정합 필터 방법은 다음과 같이 정의된 상관 값

$$z = 4 \int_0^{\infty} \frac{\tilde{h}_+^*(f) \tilde{s}(f)}{S_n(f)} e^{2\pi i f t} df$$

의 절대값이 최대가 될 때 신호가 원하는 파형에 가깝다는 것이다. 여기서 $\tilde{h}_+^*(f)$ 는 $h_+(t)$ 의 푸리에 변환 함수의 complex conjugate, $\tilde{s}(f)$ 는 $s(t)$ 의 푸리에 변환, 그리고 $S_n(f)$ 는 PSD로서 잡음의 자기상관 함수 (autocorrelation function)에 대한 푸리에 변환 값이다. 이 방법을 사용할 경우 정합필터에 의한 신호대 잡음비 $\rho(t)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\rho(t) = \frac{|z(t)|}{\sigma}; \quad \sigma^2 = 4 \int_0^{\infty} \frac{|\tilde{h}_+(f)|^2}{S_n(f)} df.$$

표 2. 질량이 각각 $1.4M_{\odot}$ 와 $2.5M_{\odot}$ 중성자 쌍성계의 신호가 $t=39.659$ 초에 삽입된 가상 데이터의 분석 결과.

$m_1(M_{\odot})$	$m_2(M_{\odot})$	time(sec)	max S/N	chirp mass
1.360000	2.579999	39.64975	7.89782	1.61434
1.380000	2.539999	39.65769	8.11580	1.61499
1.400000	2.499999	39.65900	8.11770	1.61521
1.420000	2.459999	39.65406	7.95014	1.61498
1.440000	2.419999	39.64306	6.83188	1.61432
1.460000	2.379999	39.62894	5.51007	1.61321
1.480000	2.359999	39.69213	5.25294	1.61822
1.500000	2.319999	39.66944	7.97383	1.61635
1.520000	2.279999	39.63700	6.09288	1.61402
1.540000	2.259999	39.69156	5.60278	1.61816
1.560000	2.219999	39.64787	6.92624	1.61506
1.580000	2.199999	39.69425	5.23029	1.61864
1.600000	2.159999	39.64356	6.47383	1.61475
1.620000	2.139999	39.68544	6.80385	1.61778
1.640000	2.099999	39.62750	5.00992	1.61311
1.660000	2.079999	39.65188	7.12338	1.61558
1.680000	2.059999	39.68419	7.06429	1.61782
1.720000	1.999999	39.63431	5.20256	1.61371
1.740000	1.979999	39.64625	6.57926	1.61518
1.760000	1.959999	39.66163	7.74417	1.61641
1.779999	1.939999	39.67612	7.79734	1.61743
1.799999	1.919999	39.68812	6.69306	1.61821
1.819999	1.899999	39.69381	5.59188	1.61877
1.839999	1.879999	39.69644	5.17456	1.61911
1.859999	1.859999	39.69613	5.06854	1.61922

그림 5에는 순수 신호(왼쪽)와 잡음이 섞인 신호(오른쪽)의 모습을 보여주고 있다. 이러한 가상의 데이터에 정확한 파형을 알고 있다고 가정한 필터를 적용하여 구한 신호대 잡음비의 결과는 그림 6에서 볼 수 있다. 이 그림에서 $t=39.659$ 초 부분에서 신호대 잡음비 값이 크게 나타나는 것을 볼 수 있고 이것은 그 시각에 파형을 알고 있는 순수한 신호가 잡음 속에 포함되어 있음을 의미한다.

그러나 중력파의 파형은 쌍성의 질량에 따라 다르므로 실제 분석을 할 경우에는 다양한 질량조합의 쌍성에 의한 이론적인 파형들을 만들어서 반복적인 적용을 해야만 어떤 질량조합에 의한 중력파의 신호가 존재하는지를 알아낼 수 있다. 그러므로 본 연구에서

개발한 정합필터를 이용한 중력파 분석 프로그램은 특정한 질량조합에 의한 중력파의 template을 생성한 후 이 template에 대해 64초 단위 데이터의 신호대 잡음비를 계산하고 결과 값이 특정 문턱 값을 넘었을 때 그 값을 기록한다. 이후에는 질량조합을 바꾸어 가면서 이러한 과정을 반복한다. 쌍성계 각각의 질량에 대해 $m = 1.3M_{\odot} \sim 2.6M_{\odot}$ 범위에서 $\Delta m = 0.02M_{\odot}$ 씩 변화시키고, 신호대 잡음비의 문턱값을 $\rho^* = 5.0$ 으로 설정했을 때 결과의 일부가 표 2와 표 3에 예시되어 있다. 표 2는 그림 13의 오른쪽에 있는 가상의 데이터에 대한 결과이고 표 3은 질량이 각각 $1.8M_{\odot}$, $2.2M_{\odot}$ 인 쌍성계에 의한 신호가 $t=23.0$ 초에 숨겨져 있는 가상의 데이터에 대한 결과이다.

표 3. 질량이 각각 $1.8M_{\odot}$ 와 $2.2M_{\odot}$ 중성자 쌍성계의 신호가 $t=23.0$ 초에 삽입된 가상 데이터의 분석 결과.

$m_1(M_{\odot})$	$m_2(M_{\odot})$	time(sec)	max S/N	chirp mass
1.540000	2.599999	23.00556	6.61422	1.73020
1.560000	2.559999	22.99113	7.13556	1.72918
1.580000	2.519999	22.97188	5.45858	1.72774
1.600000	2.499999	23.02538	5.11368	1.73252
1.620000	2.459999	23.00275	7.00284	1.73037
1.640000	2.419999	22.97206	5.21246	1.72779
1.660000	2.399999	23.01687	5.87691	1.73175
1.680000	2.359999	22.97762	5.63708	1.72845
1.700000	2.339999	23.01738	5.90656	1.73190
1.720000	2.299999	22.97250	5.02504	1.72786
1.740000	2.279999	23.00375	7.13706	1.73079
1.779999	2.219999	22.97569	5.35451	1.72843
1.799999	2.199999	23.00000	7.22260	1.73063
1.819999	2.179999	23.02156	5.58615	1.73263
1.879999	2.099999	22.98125	5.87412	1.72922
1.899999	2.079999	22.99356	7.02028	1.73027
1.919999	2.059999	23.00425	7.18708	1.73111
1.939999	2.039999	23.01231	6.79271	1.73174
1.959999	2.019999	23.01756	6.31404	1.73216
1.979999	1.999999	23.02006	6.02895	1.73237

표 2와 표 3의 결과를 보면, 잡음속에 삽입된 쌍성계의 질량과 같은 조합을 갖는 템플릿에 대하여 가장 큰 신호대 잡음비가 얻어지고 삽입된 신호의 시각도 가장 정확히 찾아진다는 것을 볼 수 있다. 하지만 그 외의 여러 질량조합에 대해서도 비교적 큰 신호대 잡음비가 얻어짐을 볼 수 있는데 이는 중력파의 파형이 쌍성계의 질량에 의존하는 방법과 관련이 있다. 중력파 방출에 의한 쌍성계의 진화를 뉴턴 근사방법을 이용하여 구할 경우 중력파의 파형은 쌍성계의 개개의 질량에 의존하는 것이 아니라 처프(chirp) 질량이라는 두 질량의 특정한 조합에 의해서 완전히 결정된다. 쌍성계의 처프질량은 $M_{\text{ch}} = (m_1 + m_2)^{-1/5} (m_1 m_2)^{3/5}$ 로 정의된다. 따라서 뉴턴 근사방법에서는 처프질량이 같은 쌍성계는 완전히 같은 파형의 중력파가 방출된다. 그러나 포스트 뉴턴 근사방법을 이용하여 중력파의 파형을 구할 때는 뉴턴 근사법에 의한 값에 보정항들이 추가됨으로서 같은 처프질량에 대해서도 서로 다른 파형의 중력파를 얻게 된다. 본 연구에서는 앞서 설명

했듯이 포스트 뉴턴 근사법에 의한 중력파를 이용하였다. 그러나 이 경우에도 여전히 뉴턴 근사법에 의한 결과가 전체 파형에 대해 가장 큰 부분을 차지하므로 쌍성계의 처프질량의 값이 비슷할수록 방출되는 중력파의 파형도 비슷하고 따라서 신호대 잡음비도 같은 양상을 띄게 될 것으로 예상할 수 있다. 표 2와 표 3은 이러한 경향을 잘 보여주고 있으며 이외의 질량조합에 대한 템플릿 파형들은 실제 삽입된 신호와 비교적 처프질량의 차이가 크고, 그럴수록 신호대 잡음비가 급격히 감소함을 확인할 수 있었다.

7. 논의 및 결론

중력파의 실험적 관측은 현재 전 세계적으로 초미의 관심사가 집중되고 있는 분야이다. 이는 아인슈타인의 일반상대성 이론의 직접적인 검증뿐만이 아니라 우주 및 천체의 정보를 얻고 강한 중력장이 수반되는 현상에 대한 우리의 이해를 향상시키는데 큰 진전을 가져다 줄 수 있기 때문이다. 그러므로 현재 많은 수의 중

력과 검출기가 가동 중이거나 건설 중이며 특히 LIGO에서는 이미 몇 차례 데이터를 수집하여 그 분석 결과를 발표한 바 있다.

그러나 중력파를 실험적으로 측정하거나 관측기에서 생성된 데이터를 분석하는 분야에 대해서는 여러 가지 이유로 인해 국내에서 진행된 연구가 전무한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 상황을 고려하여 중력과 데이터 분석을 분산컴퓨팅 환경에서 수행할 수 있는 기본연구를 수행하였다. 실제 관측 데이터는 검출기 관련 연구진에게만 공개되기 때문에 가상의 중력과 신호와 기기의 잡음을 생성하고 이를 분석하여 순수 중력파의 신호가 존재하는지 여부를 분석하는 프로그램을 개발하였다.

본 연구를 통해 우리는 다음과 같은 성과를 얻었다. 첫째, 중력파의 중요한 파열 파원으로는 중성자별 쌍성과 블랙홀 쌍성을 들 수 있는데 이들은 대부분 은하면에 존재하는 쌍성의 진화로부터 만들어진다고 믿어져 왔다. 그러나 우리는 밀집 성단의 역학적 진화를 통해서도 이러한 파열 파원들이 만들어질 수 있음을 보였다. 이렇게 만들어지는 중성자별 쌍성은 경험적으로 구한 은하면 내 쌍성의 진화를 통해 생성된 중성자별 쌍성과 비슷한 율로 파열 중력파원이 될 수 있을 것으로 추정되었다. 둘째, 방대한 LAL 소프트웨어를 이용하여 LIGO가 관측할 것으로 생각되는 잡음이 포함된 중력과 신호를 생성하는 프로그램으로 재구성하였다. 셋째, 정합 필터 방법을 이용해 잡음과 섞여 있는 중력과 신호를 찾아내는 프로그램을 작성하였다. 이 프로그램은 임의로 숨겨 놓은 중력파를 정확히 찾아내었다.

참고 문헌

- Abbott, B. et al, 2004a, Analysis of LIGO data for gravitational waves from binary neutron stars, Phys. Rev. D., 69, 122001 (gr-qc/0308069)
- Abbott, B. et al., 2004b, First upper limits from LIGO on gravitational wave bursts, Phys. Rev. D., 102001 (gr-qc/0312056)
- Anderson, W. G., Brady, P. R., Creighton, D. E., & Flanagan, E. E., 2001, Phys. Rev. D. 63, 042003.
- Heggie, D. C., 1975, Binary evolution in stellar dynamics, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 173, 729
- Lee, H. M., 1995, Evolution of galactic nuclei with $10-M_{\odot}$ black holes, Mon. Not. Roy. Ast. Soc., 272, 605
- Peters, P. C., 1964, Gravitational Radiation and the Motion of Two Point Masses, Phys. Rev., 136, B1224
- Will, C. M., & Wiseman, A. G., 1996, Gravitational radiation from compact binary systems: Gravitational waveforms and energy loss to second post-Newtonian order, Phys. Rev. D. 54, 4813

참조한 웹사이트:

<http://www.johnstonsarchive.net/relativity/gwdtable.html> :

중력과 실험 목록

<http://www.fft.w.org> : 매우 효율적인 FFT 라이브러리

<http://www.lsc-group.phys.uwm.edu/lal/sources> : LAL 소스코드

<http://www.cascina.virgo.infn.it/> : VIRGO 중력파 검출기 홈페이지

<http://www.ligo.caltech.edu/> : LIGO 프로젝트 홈페이지