

남인도양에서의 해수면에 대한 위성자료(Topex/Poseidon

고도계)와 현장자료(Tide Gauge 해면계)간의 비교

윤홍주 · 김상우* · 이문옥 · 박일흠

여수대학교 해양시스템학부

*여수대학교 해양수산연구정보센터

Comparison of Topex/Poseidon sea levels data and

Tide Gauge sea levels data from the South Indian Ocean

Hong-Joo Yoon · Sangwoo Kim* · Moon Ock Lee · Il Heum Park

Division of Ocean System, Yosu National University

*Korean Ocean Science and Fisheries Information Center, Yosu National University

E-mail : yoonhj@yosu.ac.kr

ABSTRACT

According to standard procedures as defined in the users handbook for sea level data processes, I was compared to Topex/Poseidon sea level data from the first 350days of mission and Tide Gauge sea level data from the Amsterdam- Crozet- Kerguelen region in the South Indian Ocean. The comparison improves significantly when many factors for the corrections were removed, then only the aliased oceanic tidal energy is removed by oceanic tide model¹⁾ in this period. Making the corrections and smoothing the sea level data over 60km along-track segments and the Tide Gauge sea level data for the time series results in the digital correlation and RMS difference between the two data of $c=-0.12$ and $rms=11.4cm$, $c=0.55$ and $rms=5.38cm$, and $c=0.83$ and $rms=2.83cm$ for the Amsterdam, Crozet and Kerguelen plateau, respectively. It was also found that the Kerguelen plateau has a comparisons due to propagating signals(the baroclinic Rossby wave with velocity of $-3.9 \sim -4.2cm/sec$, period of 167days and amplitude of 10cm) that introduce temporal lags($\tau=10 \sim 30days$) between the altimeter and tide gauge time series. The conclusion is that on timescales longer than about 10days the RMS sea level errors are less than or of the order of several centimeters and are mainly due to the effects of currents rather than the effects of sterics(water temperature, density) and winds.

Key words : Topex/Poseidon altimetry, In suit Tide Gauge, Data processing, Sea levels, Baroclinic Rossby

waves

1. 서 론

Topex/Poseidon위성의 고도계(altimeter)는 해양의 해수면 높이를 측정하는데 사용된다. 즉, 해양의 어떤 점에서의 임의의 수직 기준점에 대한 시간에 따른 해수면의 변화 값을 연속적으로 제공해준다. 이때 해수면 높이의 수직기준점이란 임의적인 것으로 지반이 수직운동을 하지 않는다는 가설을 전제로 한다. Tide Gauge와 같은 해면 측정계는 시간에 따른 해면의 높낮이 변화를 연속적으로 측정하는데 사용한다. 따라서 고도계의 해수면 자료와 해면계의 해수면 자료를 시·공간적으로 비교하여 상호간의 일치성이 어떻게 나타나는지를 파악할 수 있다. 이러한 비교연구들이 처음에는 수개월 이상에 걸친 Geosat위성의 고도계 자료들을 이용하여 수행되었다. 이때의 결과는 기

본적으로는 두 자료간의 비교는 가능했으나 대체로 위성계도의 낮은 정도 때문에 root-mean-square(rms)가 대체로 10~20cm범위의 높은 오차를 나타내었다^{2,3,4,5,6,7)}. 그러나 Topex/Poseidon의 위성은 자체의 정확하고 정도 높은 위성계도 때문에 본 연구에서는 수 cm 정도의 매우 낮은 rms를 나타낼 것으로 생각된다.

T/P자료로부터 정도 높은 해수면의 값을 구하기 위해서는 여러 가지 원인(대기 및 해양의 영향)에 의한 들에 기인하는 오차 값들을 보정해주어야 하는데, 이러한 것을 보정해주는 알고리즘은 AVISO^{8,9)}에 잘 설명되어 있다. 특히 해양에서 높은 진폭의 변화를 나타내는 해양조석에 의한 오차는 높게 나타나므로 정도 높은 해양조석 모델을 이용하여 오차의 범위를 줄이는 것이 좋다. 즉, 해양조석의 진폭의 변화에 대한 비교에서 Le

Provost et al.¹⁰⁾의 해양조석모델로 계산된 진폭과 현장의 해면자료로 계산된 진폭간의 비교에서 rms가 2~3cm로 오차가 매우 낮게 나타난 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 AVISO에서 제공하는 Cartwright and Ray¹¹⁾의 해양조석모델 대신에 정도가 높은 Le Provost et al.¹⁾의 해양조석모델을 사용하였다.

본 연구는 근본적으로 두 가지 목적을 가지고 수행되어졌는데, 첫째는 고도계의 해수면 자료와 해면계의 해수면 자료간의 비교 및 검정을 통한 정량적인 특성을 알아보고, 둘째는 두 자료간의 불일치에 대한 원인들을 정성적으로 이해하는데 있다. 그리고 부가적으로 이 지역에서 발생하는 로스비파(Rossby waves)의 전파경로의 특성을 파악해 보는 것이다.

II. 자료 및 방법

1. 고도계의 해수면자료(Topex/Poseidon sea level data)

본 연구에서는 1993년 7월에서 1994년 9월까지의 기간에 걸친 T/P의 고도계자료를 사용했다. T/P자료의 처리과정은 AVISO의 사용자 지침서를 따랐다. 조사 대상지는 남인도양의 암스테르담-크호제트-케르겔렌 지역으로서 45~80 °E 및 35~55 °S에 위치한다. 따라서 이 지역은 해양학적으로 중규모 스케일의 범위에 포함되는 것을 알 수 있다. 그림에 나타낸 기하학적 지상계적은 각각 위도 및 경도에 대하여 보간법을 이용하여 재구성하였다(Fig. 1). 그리고 해면계의 자료를 현장에서 조사할 당시에 대기압의 자료를 획득할 수 없었으므로 고도계의 자료 처리과정에서 대기압력의 영향인 해면기압(inverted barometer) 성분은 고려하지 않았다. 고도계의 자료는 상호 정확한 비교를 위해서 위도를 따라서 해면계의 자료가 측정되는 점의 가장 가까운 근접점에서의 자료를 선택하였다.

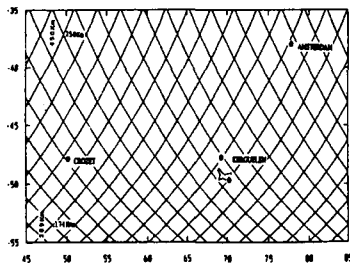


Fig. 1. Amsterdam-Crozet-Kerguelen region of the South Indian Ocean.

2. 해면계의 해수면자료(Tide Gauge sea level data)

일반적으로 해면계의 자료는 자료의 간격이 수초에서 수 시간의 간격으로 측정된다. 이러한 자료들은 고주파수(단주기)의 성분들을 가지고 있는데, 1시간 간격의 자료를 획득하기 위해서는 이러한 고주파수의 성분들을 평균하여야 한다. 이때 1시간 간격의 자료는 일주조 및 반일주조의 성분을 제거하고 계산한다. 그러나 장주기의 조석성분은 자료처리과정에서 드러나지 않는다. 본 연구에서는 해면계에서 조사된 저층 및 표층의 압력자료를 이용하여 아래와 같은 방법으로 시간변화에 따른 해수면 $h(t)$ 의 높이를 구하였다.

$$h(t) = \frac{P_b(t) - P_a(t)}{\rho g}$$

III. 결과 및 고찰

1. 고도계의 해수면과 해면계의 해수면간의 비교

1.1 암스테르담 대지지역

이 지역의 두 해수면간의 비교에서, 고도계의 조사점(37.9100°S, 77.4228°E)과 해면계의 조사점(37.9000°S, 77.5800°E)이 상대적으로 서로 가까운 거리(distance, $d=13.77\text{km}$)에 위치해있음에도 불구하고 낮은 상관계수(coefficient of correlation, $c=-0.12$)와 높은 편차 값(root-mean-square, $\text{rms}=11.40\text{cm}$)을 보인다. 이러한 결과는 그림에서 보는 바와 같이 고도계의 해수면자료의 초기값의 오차에 주로 기인하는 것으로 보인다.

1.2 크호제트 대지지역

이 지역에서는 고도계의 조사점(46.3992°S, 51.2025°E)과 해면계의 조사점(46.3991°S, 51.9420°E)의 거리($d=57.30\text{km}$)가 상대적으로 암스테르담 대지지역에 비해서 멀리 떨어져있음에도 불구하고 높은 상관계수와 낮은 편차 값을 나타낸다. 이때 $c=0.55$ 이며 $\text{rms}=5.38\text{cm}$ 였다.

1.3 케르겔렌 대지지역

이 지역은 상관계수와 편차 값이 가장 이상적인 결과를 보인다. 즉, $c=0.83$ 및 $\text{rms}=2.83\text{cm}$ 로 나타났다. 이러한 좋은 결과는 고도계의 조사점(47.6471°S, 69.4208°E)과 해면계의 조사점(47.6600°S, 69.3600°E)간의 거리($d=4.55\text{km}$)가 서로 매우 근접하고 그리고 이 지역이 육상 및 해안으로부터 멀리 떨어진 원해에 위치하여 정도 높은 고도계의 자료를 획득할 수 있었기 때문이다.

1.4 케르젤른 해안지역

이 지역에서의 고도계의 조사점(49.2694°S, 70.5859°E)과 해면계의 조사점(49.3300°S, 70.2200°E)간의 거리(d=27.31km)는 상대적으로 그렇게 멀리 떨어져있지는 않으나, 고도계의 조사점이 해안가 가까이에 접해있는 관계로 정도가 낮은 고도계의 자료가 획득되었다. 따라서 낮은 상관관계와 높은 편차 값을 보이는데, 이때 c=0.24이며 rms=6.47cm로 나타났다. 이러한 결과는 고도계의 해수면자료의 오차에 주로 기인한다. 왜냐하면 T/P위성의 고도계는 일반적으로 해안지역 근처에서는 정도 높은 자료를 제공하지 못하기 때문이다.

2. 해면계의 해수면에 대한 케르젤른 대지지역과 케르젤른 해안지역간의 비교

해면계의 해수면과 관련하여 케르젤른 대지지역과 케르젤른 해안지역간의 해수면 변동에 대한 상관성을 알아보는 것은 중요하다. 만약 우리가 이 두 지역간의 정량적인 상관성을 잘 파악할 수 있다면, 풍부한 자료(ARGOS 위성에 의한 대기 및 저층 압력자료, 프랑스 기상청의 대기 압력자료)를 쉽게 획득할 수 있는 케르젤른 해안지역의 자료를 이용해서 케르젤른 대지지역의 해수면 변동과 관련한 물리 및 역학적 현상들을 잘 예측할 수 있다. Coherency squard는 어떤 특정주기에서의 두 해수면간의 상관관계(r^2) 및 위상차(θ)에 대한 좋은 정보를 제공해 준다. 일반적으로 이 식은 아래와 같이 나타낸다.

$$S_{xy}(\omega) = K_{xy}(\omega) - iQ_{xy}(\omega)$$

$$K_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int (C_{xy}(\tau) + C_{yx}(\omega)) \cos \omega \tau d\tau$$

$$Q_{xy}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int (C_{xy}(\tau) - C_{yx}(\omega)) \sin \omega \tau d\tau$$

$$r^2(\omega) = \frac{K_{xy}^2(\omega) + Q_{xy}^2(\omega)}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)}, 0 \leq r^2(\omega) \leq 1$$

$$\theta_{xy}(\omega) = \tan^{-1} \frac{Q_{xy}(\omega)}{K_{xy}(\omega)}$$

케르젤른 대지지역 및 해안지역에 대한 편차 값은 각각 rms=10.88cm 및 rms=9.13cm 로, 그리고 두 해수면간의 상관관계는 c=0.65로 각각 나타났다(Fig. 2a). 95%의 신뢰구간을 가지는 $r^2 \geq 0.46$ 에 대해, 전체적으로 Coherency squard은 $f > 0.5\text{cpd}$ (cycles per day)의 주파수에서 높은 상관성을 보인다(Fig. 2b). 즉, 두 해수면간의 거리

가 비록 서로 먼 거리에 위치해 있음에도 불구하고 2일 이상의 주기에서는 상호 밀접한 해수면의 변동성을 나타낸다는 것을 의미한다. 위상차는 $f > 1.4\text{cpd}$ 의 주파수(7일 이상의 주기)에서 일정하게 '+'의 부호를 나타낸다(Fig. 2c). 즉, 케르젤른 대지지역의 해수면의 변동이 앞선다. 따라서 케르젤른 대지지역의 해수면의 변화의 특성이 케르젤른 해안지역의 해수면의 변화에 전파된다는 것을 의미한다. 이상과 같이 모두 결과들을 종합해 볼 때, 두 지역은 2일 상의 장주기에 대해서는 상호 높은 상관성과 함께 유사한 해수면의 변화를 가진다는 것을 알 수 있다.

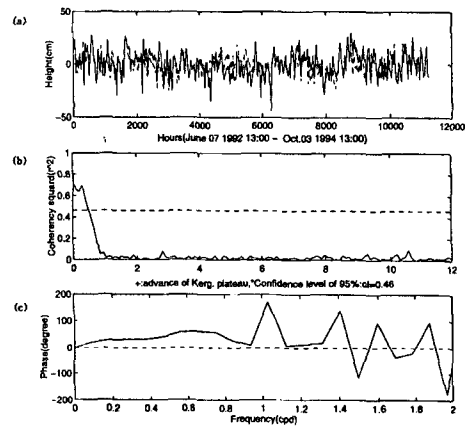


Fig. 2. (a) Variation of the Tide Gauge sea levels in the Kerguelen plateau(—, rms=10.88cm) and the Kerguelen coast(---, rms=9.13cm), (b) coherency(r^2), and (c) phase(θ) for two sea levels, respectively.

3. 케르젤른 대지지역내의 로스비파(Rossby wave)

이 지역내의 두 지점의 해수면간에는 시간에 따른 어떤 위상 차가 존재한다. 따라서 해면계의 조사점의 해수면의 변화는 고도계의 조사점의 해수면의 변화에 대해서 수십 일을 앞서서 해수면의 변화를 가진다는 것을 쉽게 생각할 수 있다. 이상과 같이 이 지역에서 두 해수면간의 정확한 위상차(시간차)를 알기 위하여 220일까지의 기간에 걸친 자기 및 상호 상관관계를 구하였다. 두 해수면의 각각에 대한 자가상관(autocorrelation)에 대해서는 뚜렷한 특성을 파악할 수는 없었다. 그러나 두 해수면간의 상호상관(crosscorrelation)은 10~20일 사이에서 최대의 상관계수의 값(c=2)을 보인다. 여기서 '+'의 부호는 해면계의 해수면이 고도계의 해수면보다 앞서서 해수면의 변화를 일으킨다는 것을 의미한다.

해면계의 조사점과 같은 위도에 위치한 지상궤적 170번 내 고도계의 조사점(302번)의 표면에서

의 지형류의 속도를 알아볼 필요가 있다. 전 기간에 걸쳐서 남극순환류(Antarctic Circumpolar Current, ACC)가 강하게 흐르는 케르젤른의 경로 (passage, 35~50°S)에서 가장 높은 해수면의 변화를 일으키는 것을 잘 알 수 있다. 이러한 높은 해수면의 변화는 주로 남극순환류와 해저지형(케르젤른의 북부 대륙사면과 크호제트의 남부 해저대지)의 영향에 기인한다.

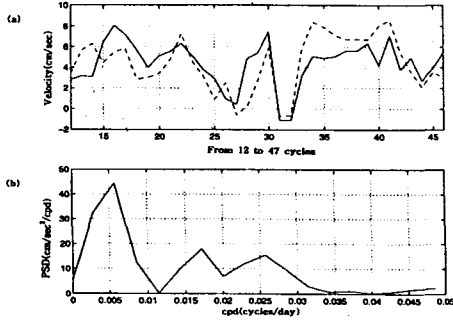


Fig. 3. (a) Surface geostrophic currents by MSL ($U=4.3972\text{cm/sec}$, —) and MSL_{geo} ($U_{geo}=4.4026\text{cm/sec}$, ...) at the point 305 in the ground track 170 during 1 year (from 12 to 47 cycles), and (b) Power Spectrum Density (PSD) for U_{geo} .

따라서 이상과 같은 결과들을 근거로 이 지역에서의 표면 지형류를 계산할 수 있다. Fig. 3a는 고도계의 해수면의 조사점 302번에서 12~46 사이클에 걸친 시간에 따른 x축 방향의 지형류 속도의 변화를 나타낸다. 여기서 실선은 평균 해수면에 대한 지형류(U) 그리고 점선은 평균 해수면에 지오이드오차를 보정한 후의 평균 해수면에 대한 지형류(U_{geo})를 각각 나타낸다. 계산 결과 두 지형류 모두 유사한 값을 보인다 ($U=4.3972\text{cm/sec}$, $U_{geo}=4.4026\text{cm/sec}$). 그러나 주기에 따른 스펙트럼분석(Power Spectrum Density, PSD)을 해보면 U_{geo} 가 U에 비해서 뚜렷한 특성을 보인다(Fig. 3b). 이때 주파수가 $f=0.006\text{ cycle/day}$ (주기는 $T=166.6\text{ days}$)에서 최대의 피크(peak)를 보인다. 즉, 표면에서 advection 성분의 지형류($U_{adv} = U_{geo}$)가 발생하는데 동쪽방향으로 진행을 하면서 4.4cm/sec 의 속도와 167일(약 4개월)의 주기를 가진다는 것을 의미한다. Fig. 4은 케르젤른 대지지역 내에서 서쪽으로 로스비파가 전파한다는 것을 보여준다. 이 그림에 대한 설명은 앞서 논의한 모든 결과들로부터 다음과 같은 가설을 설정하여 설명할 수 있다. 여기서 (1) U_{geo} 는 이 지역에서 항상 일정한 속도를 가진다 [$U_{geo}(x)=U_{geo}(y)$], (2) 해면계의 조사점은 초기시간(t)에 advection하는 지형류가 순간적으로 포착된 지점이며, perturbation을 통하여 어떤 특정시간(t+dt)에 고도계의 조사점까지 전파된다. 이때 이것은 약 1일 후에 도달하게 된다

[$dt=dx/U_{geo}=4550\text{m}/0.044\text{m/sec}=1\text{day}$]. (3) 지형류가 해면계의 조사점에서 고도계의 조사점까지의 도달하는 데는 10~30일 정도의 시간차를 가진다. (4) 외형속도(U_{appear} , 겉보기속도)는 동쪽으로 전파하고 반대로 로스비파(U_c)는 서쪽으로 전파한다 [$U_{appear} = 4550\text{m}/10\sim30\text{days} = 0.18\sim0.5\text{cm/sec}$, $U_c = -(U_{adv}-U_{appear}) = -3.9\sim-4.2\text{cm/sec}$]. 끝으로 (5) 고도계의 해수면과 해면계의 해수면간의 변화에 대한 진폭은 약 10cm이다. 이상을 종합해 보면, $-3.9\sim-4.2\text{cm/sec}$ 정도의 유속, 167일 정도의 주기 그리고 10cm 정도의 진폭을 가지며 서쪽으로 전파하는 로스비파가 존재한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Park and Saint-Guilly¹²⁾가 이 지역의 남극순환류 내에서 발생하는 바로크리닉 로스비파(baroclinic planetary Rossby wave)의 유속 ($U_c=-2\sim-4\text{cm/sec}$) 및 주기($T=180\pm 40\text{days}$)에 대하여 이론적으로 설명한 결과들과 대체로 잘 일치한다.

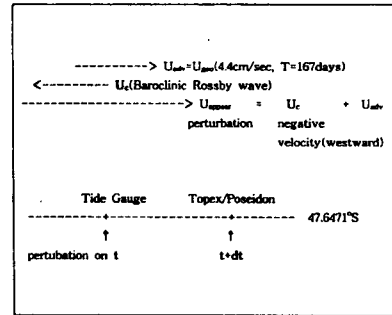


Fig. 4. Propagation of Baroclinic Rossby wave for the western direction in the Kerguelen plateau.

IV. 결 론

약 1년 간에 걸쳐서 조사된 남인도양의 암스테르담-크호제트-케르젤지역에서의 Topex/Poseidon의 고도계 자료와 Tide Gauge의 해면계 자료를 상호 비교 및 검정하였다.

케르젤른 대지지역보다 케르젤른 연안지역의 진폭의 변동성이 높은 것은 해안지역의 지형적 특성과 관계하는 연안해류의 흐름이 크게 영향을 미치기 때문이다.¹³⁾

두 자료간의 상관관계(correlation coefficient)와 편차(rms)를 보면, 암스테르담 대지지역에서는 $c=-0.12$ 및 $rms=11.40\text{cm}$, 크호제트 대지지역에서는 $c=0.05$ 및 $rms=5.83\text{cm}$, 케르젤른 대지지역에서는 $c=0.83$ 및 $rms=2.83\text{cm}$ 로 그리고 케르젤른 해안지역에서는 $c=0.24$ 및 $rms=6.47\text{cm}$ 로 각각 나타났다. 이 중 케르젤른 대지지역이 상관계수와 편차 값이 가장 이상적인 결과를 보이는데, 이것은 케르젤른 해안지역과는 달리 육상 및 해안지역으로부터 멀어질수록 정도 높은 고도계의 자료

를 획득할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 2일 이상의 장주기에 대한 케르겔른 해안지역의 해수면 자료로부터 케르겔른 대지지역의 해수면의 변화의 특성을 파악할 수 있다. 즉, 두 지역은 2일 상의 장주기에 대해서는 상호 높은 상관성과 함께 유사한 해수면의 변화를 가진다. 끝으로 케르겔른 대지지역 내에서는 바로크리닉 로쓰비파가 발생하는데, 이 파는-3.9-4.2cm/sec의 유속, 167days의 주기 그리고 10cm의 진폭을 가지면서 서쪽으로 전파한다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Le Provost, C., M. Genco, and F. Lyard, 1994a, Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model, *J. Geo. Res.*, Vol. 99, C12, pp. 24777-24797.
- [2] Tai, C. -K., W. White, and S. Pazan, 1989, Geosat crossover analysis in the tropical Pacific, 2, Verification of altimetric sea level maps with expendable bathythermograph and island sea level data, *J. Geophys.*, 94, pp. 879-908.
- [3] Cheney, R., B. Douglas, and L. Miller, 1989, Evaluation of Geosat altimeter data with application to tropical Pacific sea level variability, *J. Geophys. Res.*, 94, pp. 4737-4748.
- [4] Wyrтки, K., and T. Bongers, 1987, Sea level at Tahiti- A minimum of variability, *J. Phys. Oceanogr.*, 17, pp. 164-168.
- [5] Harangozo, S., P. Woodworth, R. Rapp, and Y. Wang, 1993, A comparison of monthly mean sea level variability determined from Geosat altimetry and a global tide gauge dataset, *Int. J. Remote Sens.*, 14, pp. 789-795.
- [6] Chao, Y., D. Halpern, and C. Perigaud, 1993, Sea surface height variability during 1986-1988 in the tropical Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, 98, pp. 6949-6960.
- [7] Park, Y. H. and B. Saint-Guily, 1992, Sea level variability in the Crozet- Kerguelen- Amsterdam area from bottom pressure and Geosat altimetry, *Geophysical Monograph* 69, IUGG Vol. 11, pp. 117-131.
- [8] AVISO, 1994a, AVISO CD-ROM User manual: Merged Topex/Poseidon products, AVI-NT-02-100-CN, Edition 2.1.
- [9] AVISO, 1994b, AVISO User handbook: Merged Topex/Poseidon products, AVI-NT-02-101-CN, Edition 2.1.
- [10] Le Provost, C., M. Genco, and F. Lyard, 1994b, Modeling and prediction tides over the World Ocean, *Coastal and Estuarine, Geophys. Res. Lett.*, pp. 845-848.
- [11] Cartwright, d. E. and R. D. Ray, 1990, Oceanic tides from Geosat altimetry, *J. of Geo. Res.* 95: 3069-3090.
- [12] Park, Y. H. and L. Gamberoni, 1995, Large-scale circulation and its variability in the South Indian Ocean from Topex/ Poseidon altimetry, *J. geo. Res.*, Vol. 100, c12, pp. 24911-24929.
- [13] Yoon, H. J., 1997, The variation of sea level in the Amsterdam- Crozer- Kerguelen region of the South Indian Ocean, PhD. thesis, Joseph fourier University - Grenoble I, III, pp. 31-32.