

졸른호펜 판상석회암에 응용한 푸리에 주기분석의 이용과 한계에 대한 소개

박명호 · 김일수*

연세대학교 지구시스템학과

Introduction to the Use and Limitations of Fourier Spectral Analysis Applied to the Solnhofen Platy Limestone

Myong-Ho Park and Il-Soo Kim*

Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Shinchon-dong 134, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

1. 서 론

시간의 경과와 함께 환경이 어떻게 변화되어 가는지 에 대한 이해와 해석은 지질학 분야의 중심 문제 중 하나일 것이다. 지금까지 밝혀진 바에 따르면, 환경의 변화는 시간과 공간의 차원에서 상당히 심하게 변해왔다. 윌슨 사이클(Wilson Cycle)이나 생물의 진화과정, 해수면 변동 또는 규모가 큰 기후변동은 그런 예의 일부이다.

특히, 신생대 제4기의 주기적인 기후의 변동은 몇 천 년의 밀레니엄 주기서부터 몇 백만 년의 주기까지 복합적인 주기로 이루어져 있다. 최근에는 이런 주기적인 변화를 소위 밀란코비치 이론(Milankovic, 1941)으로 설명하고 있다. 이 가설에 의하면, 지구로 들어오는 복사에너지의 양은 지구 자전축의 세차운동(precession), 자전축 기울기의 변화(obliquity) 및 공전궤도의 이심률(eccentricity)에 의하여 결정되며, 제4기 동안 일어난 빙기와 간빙기의 기후변화 역시 이런 힘에 의한 결과로 보고 있다(Fig. 1). 복사에너지 변화의 주기는 수십 가지의 요소(factor)가 있으나, 무시할 수 있는 크기의 요소를 제외하면 약 404, 127, 96, 41, 23, 19 kyr 등의 큰 주기를 들 수 있다(Fig. 2; Berger and Loutre, 1994). Hay *et al.*(1976)은 실제로 이와 같은 주기를 인도양의 코어 퇴적물에서 확인하였으며, 이후로 Imbrie *et al.*(1992, 1993)은 여러 가지 기후변화의 원인 중에서 밀란코비치 주기가 가장 설득력 있

는 기후변화의 원인임을 보여주었다.

기후변화에 관여한 주기의 종류와 구체적인 과정 및 예측을 연구하기 위해서는 체계적인 스펙트럼 분석이 선행되어야 한다(Blackman and Tukey, 1958). 그러나 이 방법은 지질학 분야에서 직접 적용하여 사용하기에 적합하지 않기 때문에, 이에 필요한 방법들이 추가로 개발되어 나오게 되었다(Davis, 1986). 이 논문에서는 주기분석에 있어서 일반적으로 사용되고 있는 푸리에 스펙트럼 분석(Fourier spectral analysis)을 소개하였고, 특히 고속 푸리에 변환(FFT: Fast Fourier transform) 방법을 독일의 상부쥐라기 졸른호펜 판상석회암(Solnhofen platy limestone)에 응용한 내용(Park and

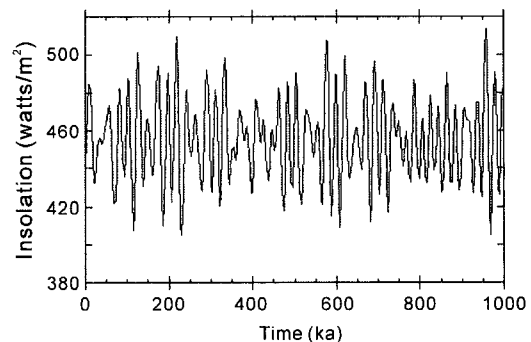


Fig. 1. Berger's solution for 65°N latitude from 1 Ma B.P. to the present. In the Northern Hemisphere, peak insolation occurred ca. 220, 600, 960 ka B.P., respectively (Berger, 1987).

*Corresponding author: ilsookim@yonsei.ac.kr

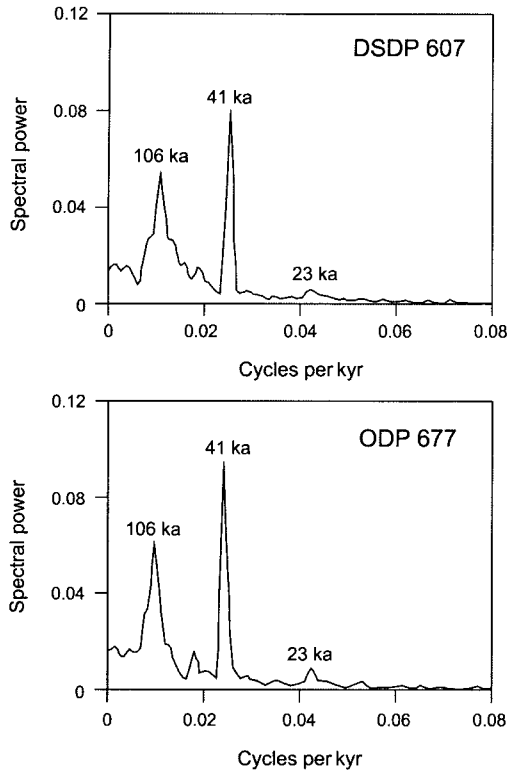


Fig. 2. Fourier spectra of oxygen isotope data for the past 2.5 Myr for two deep ocean cores DSDP 607 and ODP 677. The major peaks of precession (23 kyr), obliquity (41 kyr) and eccentricity (106 kyr) are indicated in the periodograms. Modified from Weedon (1993).

Fürsich, 2001, 2002)을 소개하면서, 줄른호펜 석회암에 적용한 분석방법의 이용과 한계에 대하여 논의하였다.

2. 푸리에 주기분석의 방법

스펙트럼 분석은 몇몇 연구자들에 의하여 50년대 이후로 소개되었다. 그 중에서 Priestley(1981)의 스펙트럼 분석이 가장 많이 채택되고 있으며, 운영체제와 FORTRAN 알고리즘을 소개하면 Table 1과 같이 요약

할 수 있다.

분석할 시계열(time series)은 보통 여러 가지 주기의 성분들로 이루어져 있기 때문에 수학적으로 처리할 수 있다. 이때 시계열의 복합적인 주기성분을 분리해 내는 과정이 변환운영의 핵심이다. 한 시계열은 여러 빈도의 코사인 곡선의 합으로 표현할 수 있다(Jenkins and Watts, 1968):

$$y = \sum A_k \cdot \cos(k \cdot \theta + \Phi_k),$$

여기서 A는 곡선의 진폭이고 k는 빈도이고 Φ 는 상(phase)이다. 이 방정식은 다음 식과 일치한다:

$$y = \sum [\alpha_k \cdot \cos(k \cdot \theta) + \beta_k \cdot \sin(k \cdot \theta)],$$

여기서 $\alpha_k = A_k \cdot \cos(\Phi_k)$ 이고 $\beta_k = A_k \cdot \sin(\Phi_k)$ 이다. 진폭과 상은 $A_k = \sqrt{(\alpha_k^2 + \beta_k^2)}$ 과 $\Phi_k = \tan^{-1}(\beta_k/\alpha_k)$ 에 의하여 각각 계산할 수 있다.

Table 2. An example of the interpolation and FFT process for spectral analysis using the program MatLab.

Fast Fourier Transform (FFT)	
A. Interpolation:	<pre>Data = [...]; x = Data(:,1); y = Data(:,2); xi = 6:0.1:240; from 6 to 240 with 0.1 step yi = interp(x,y,xi, 'linear') plot(x,y,xi,yi)</pre>
B. FFT process:	<pre>Data = [...]; x = Data(:,1); y = Data(:,2); Y = fft(y); Y(1) = []; n = length(Y); power = abs(Y(1:n/2)).^2; nyquist = 1/2; freq = (1:n/2)/(n/2)*nyquist; period = 1./freq; plot(freq, power) plot(period, power) axis([x0 xn y0 yn]); ylabel('spectral density'); title('periodogram'); grid on;</pre>

Table 1. Operation and FORTRAN algorithms for spectral analysis (Weedon, 1991).

Operation	Fourier	Walsh
Trend removal	Least-squares regression	-
Tapering	Split cosine bell applied to first and last 10% of time series	-
Transform	Fast Fourier Transform (FFT)	Fast Walsh Transform (FWT)
Spectral estimates	Periodogram	Averaged Walsh power spectrum
Normalization of estimates	By sum of squares of estimates	By sum of squares of estimates
Spectral window	3 point Hanning, applied three times	3 point Hanning applied once

실제 빈도의 세기는 진폭이 아니라 스펙트럼 파워 (또는 파워 밀도)로 알려진 $\alpha_k^2 = [(\alpha^2 + \beta^2)/2]$ 에 의하여 계산된다. k에 대한 α_k 와 β_k 의 계산은 너무 복잡하기 때문에 적합한 SW 프로그램을 이용하는 게 필요하다. 이 과정을 위하여 FORTRAN 90이나 MatLab 5.3 등을 이용하면 된다. MatLab을 이용하여 주기분석을 할 경우에 필요한 언어는 Table 2에 제시한 예와 같이 사용하면 된다. Table 2의 A는 시계열의 데이터를 등 간격으로 나누는 과정이다. B는 선형내삽법(linear interpolation)에 의하여 처리된 x값과 y값의 시계열 데이터를 고속 푸리에 변환(FFT)으로 계산하는 과정이다.

그러나 주기분석 전후로 데이터를 추가로 처리해야 한다. 전반부 데이터의 평균값과 편차가 후반부 데이터의 그것과 비슷하지 않다면, 시계열은 추세(trend)를 갖고 변하는 값이다. 이런 경우에 데이터는 주기분석 전에 추세를 제거해야 한다. 추세를 제거한 다음에는, 끝 부분의 데이터가 사인과 코사인 곡선의 합에 의하여 나타나지 않기 때문에 5% 내지 10%의 tapering을 적용해야 한다. 스펙트럼 측정이 끝난 다음에는 smoothing을 이용하여 주요 피크와 랜덤 노이즈(random noise)를 구분한다(Weedon and Jenkyns, 1999).

3. 주기분석의 시뮬레이션

시계열에 들어있는 여러 빈도 또는 주기를 코사인의 합으로 나타냈듯이 주기분석을 통하여 밝혀진 주기를 역으로 사인이나 코사인의 곡선으로 나타낼 수 있다 (Schwarzacher, 1991). 단지 여러 크기의 주기 중에서 주요 주기(신뢰도 범위 95%나 98% 이상의 피크)만을 선택하여 시뮬레이션하는 것이기 때문에 합성된 결과가 초기의 데이터와 차이를 보일 수 있다.

Fig. 3에서 보여주고 있듯이, 본 논문에서는 2D-시뮬레이션을 위하여 사인 공식을 이용하였다. 주기의 크기(진폭)에 사인 곡선의 곱이 주기가 되는데, 여기에 상(phase, ϕ)의 크기에 따라 곡선의 변이가 변한다. 빈도(주기의 역, $f=1/P$)가 큰 주기도 같은 방식으로 계산할 수 있으며, 여러 크기를 갖는 주기들의 합으로 복합주기를 간단하게 얻을 수 있다(Fig. 3).

시뮬레이션 과정에서 까다로운 작업은 상($\phi_1, \phi_2, \phi_3 \dots$)의 크기를 정하는 일이다. 상의 크기에 따라 합한 곡선의 진폭이 작아질 수도 있고 커질 수도 있기 때문이다. 진폭의 절대값은 데이터의 종류에 따라 지구로 들어오는 복사에너지의 양이나 지층의 두께, 엽리의 수 또는 해수의 온도 변화가 될 수 있기 때문에, 상의 처

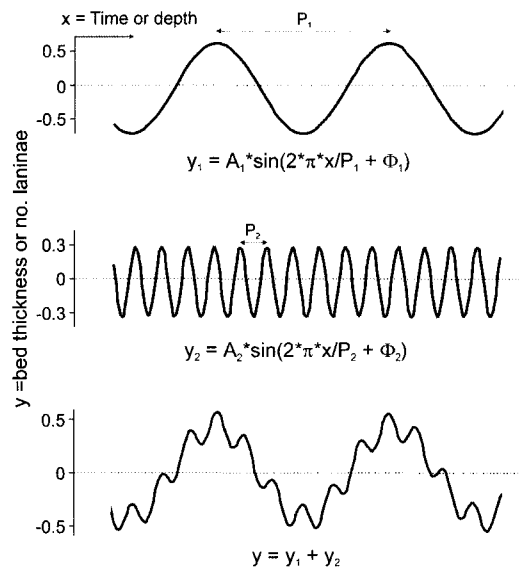


Fig. 3. The method of simulation for reconstructing any cyclicities in time series. Modified from Park and Fürsich (2001).

리는 2D-시뮬레이션 과정에서 가장 중요하다. 일반적으로, 상을 결정하기 위하여 테스트하는 방법이 몇 가지 있으나, 고기후학의 연구분야에서는 초기 데이터(initialized data)와 비교 작업을 통하여 프로그램으로 합성하면서 상의 크기를 직접 결정한다. 그러나 1차(first-order) 주기와 2차(second-order) 주기의 차가 큰 데이터에서는 1차 주기만을 고려하기 때문에 상의 처리에 대한 중요성이 상대적으로 낮다.

4. 졸른호펜층의 교호층과 주기분석

4.1. 졸른호펜층의 교호층

시조새(*Archaeopteryx*) 화석으로 유명한 졸른호펜 판상석회암은 독일의 남부지방에 분포하고 있다. 지역에 따라 지층의 두께가 30m에서 90m까지 매우 큰 폭으로 변한다(Zeiss, 1977). 상부쥐라기 졸른호펜층의 판상석회암은 점토광물이 상대적으로 많은 층(85~90% CaCO₃)과 대부분 석회암으로 이루어진 층(95~98% CaCO₃)의 교호층으로 되어 있다(Barthel *et al.*, 1990). 점토광물은 주로 일라이트, 카올리나이트 및 스�멕타이트로 이루어져 있으나(Hückel, 1974), 두 층 사이의 점토광물의 정량 차는 실제로 매우 작은 편이다(Moon *et al.*, 2002).

교호층의 두께는 0.57cm에서 70cm까지 큰 폭으로 변한다. 교호층은 밀리미터 단위의 매우 얇은 엽리로

구성되어 있으며, 엮리는 다시 점토광물이 풍부한 층과 점토광물이 거의 없는 층이 쌍(couplet)으로 교호한다. 판상석회암의 쪼개지는 면(parting plane)은 교호층의 경계를 이루며, 판상석회암(platy limestone)이란 이름도 석회암의 이런 특성으로부터 유래하였다(Barthel *et al.*, 1990). 그러나 쪼개짐은 층의 경계에서만 일어나는 것은 아니며 엮리의 경계에서도 관찰되기 때문에 판상석회암은 얇은 층이 쌓여있는 모습처럼 보인다.

4.2. 졸른호펜층의 주기분석

그동안 졸른호펜 판상석회암이 몇 가지 주기적인 요소로 이루어져 있을 것이라는 연구가 있었으나(Swinburne and Hemleben, 1994), 이를 직접적으로 증명하지는 못하였다. 그러나 최근 들어 Park and Fürsich(2001)는 암모나이트의 생층서와 푸리에 주기분석 및 시뮬레이션 방법을 이용하여 지층의 교호층이 밀란코비치 주기의 영향 하에 형성되었음을 밝혔다. 특히, Park and Fürsich(2002)는 졸른호펜층의 1차 주기가 상부쥐라기의 세차운동과 직접적인 관련이 있으며, 세차운동과 주기변화의 상관관계를 기준으로 상부쥐라기 동안의 퇴적률을 계산하였다.

우선, 졸른호펜층의 주기분석을 위하여 교호층을 기호화할 필요가 있다. 연구논문에서 적용한 방법은 다음과 같다: 점토질이 많은 층을 <-1>로, 점토질이 적은 층을 <+1>로 기호화하여 1 cm 단위로 측정된 다음, 지층의 암질 변화를 디지털 데이터(digitized data)로 전환하였다(Fig. 4A). 인근 코어인 Plaka 3-2와

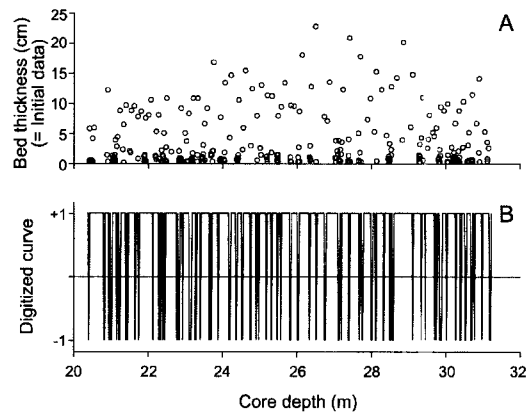


Fig. 4. An example of data treatment for the spectral estimation: (A) A sequence of the raw data (=bed-thickness time series) from the Solnhofen Formation of southern Germany; (B) Digitized data by coding two lithologies +1 (for carbonate bed) or -1 (for marly carbonate bed) every 1 cm.

Plaka 2-3을 분석한 결과에 따르면(Moon *et al.*, 2002; for core location see Park and Fürsich, 2001), <+1> 층에는 <-1> 층보다 방해석이 10~11% 정도 많으며, 일라이트, 카올리나이트 및 스베타이트와 같은 점토광물은 4~9% 적게 함유되어 있다. 이번에 주기분석을 위하여 선정한 Plaka 7-1 코어는 Plaka 3-2와 Plaka 2-3 코어의 암질과 거의 동일한 것으로 이루어(Park and Fürsich, 2001), <+1> 층과 <-1> 층은 점토광물의 정량에서도 기존 코어와 비교하여 크게 다르지 않으리라 여겨진다. 뿐만 아니라 <+1> 층

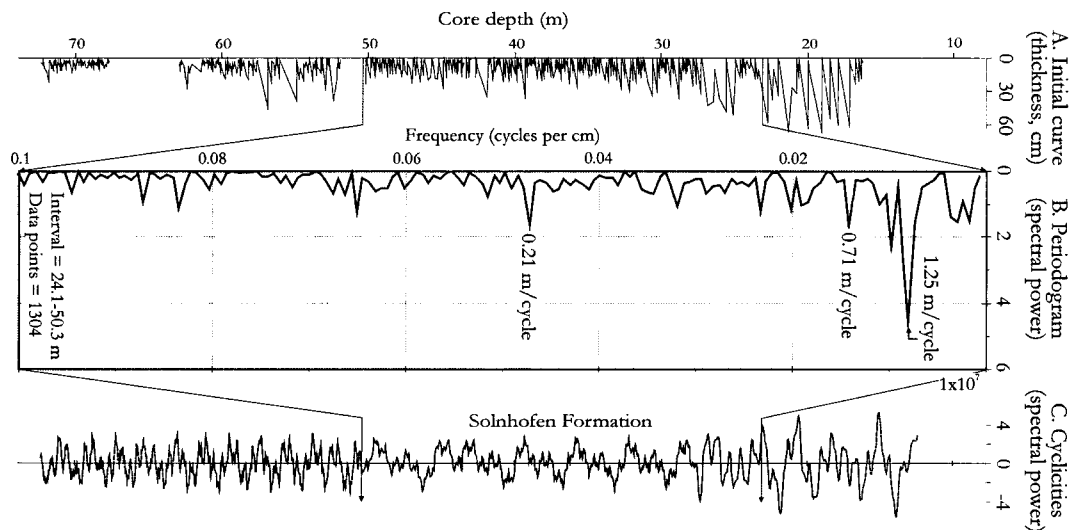


Fig. 5. Simulation of the top 3 to 5 cyclicities of the Solnhofen Formation (core Plaka 7-1) detected by the Fourier spectral analysis.

과 <-1> 층은 육안으로도 쉽게 층의 경계를 식별할 정도로 색상에서도 뚜렷한 차이를 보이고 있기 때문에 코어에서 층의 경계나 층의 두께를 디지털 데이터로 전환하기가 매우 용이하다. 데이터를 1 cm 단위로 디지털화했기 때문에 추가로 내삽법을 이용할 필요는 없었다. 그리고 나서 층의 깊이를 x축의 값으로, 디지털 데이터를 y축의 값으로 설정한 후에 고속 푸리에 변환을 운영하였다(Fig. 5B).

Plaka 7-1 코어에 대한 주기분석의 결과는 졸른호펜 층의 1차 주기가 약 1.25 m임을 보여준다(Fig. 5). 이는 층의 두께가 약 1.25 m 마다 주기적으로 변한다는 것을 의미한다. 층의 두께를 변화시키는 가장 큰 요인으로 퇴적물을 들 수 있으며, 퇴적물의 변화는 분지로 유입되는 퇴적물의 양의 변화가 직접적인 원인일 수 있다. 고속 푸리에 변환을 통하여 얻은 주요 피크만을 가지고 다시 시뮬레이션을 하였을 경우, Fig. 5C와 같은 합성곡선을 얻을 수 있다. 랜덤 노이즈를 제외하고 합성한 곡선은 졸른호펜층이 약 1.25 m 주기를 갖고 변한다는 것을 보다 더 뚜렷하게 보여주고 있다.

5. 토의 및 결론

지층의 두께를 이용하여 주기분석을 할 경우에, 시계열은 bed-thickness time series가 된다. 층의 두께를 이용한 시계열 분석의 가장 큰 단점은, 층서의 기록이 속성작용(diagenesis)을 통하여 얼마만큼 변했는지 평가하기가 어렵다는 것이다. 특히, 점토질과 석회질의 층이 교대하는 교호층에서 층의 두께가 다짐작용(compaction)에 의하여 어느 정도 변했는지를 알아내는 일은 더욱 어렵다. 실험 결과에 의하면(Arthur *et al.*, 1984), 탄산염광물은 퇴적 시 초기 다공질의 40~50%가 물리적인 속성작용에 의하여 층의 두께가 변하며, 이어서 화학적 다짐작용에 의하여 이차적인 변화를 받는다고 한다. 게다가 점토질 층의 다짐작용은 석회질 층보다 약 3~4배 강하다고 한다(Ricken, 1985). 이와 같은 층을 주기 분석한다면 분석된 피크는 속성작용의 주기(diagenetic cycles)를 의미할 수 있다.

졸른호펜 석회암의 경우 점토광물과 유기물의 함량이 매우 낮은 편이지만(Moon *et al.*, 2002; 박명호 외, 2002), 졸른호펜층도 일반적인 탄산염암류와 마찬가지로 속성작용의 문제점을 내포하고 있다. 이와 같은 문제점을 기금적 피하기 위하여, 점토질이 상대적으로 많은 엽리와 점토질이 적은 엽리를 하나의 단위로 묶어서 계산함으로써 다른 비율로 변하는 속성작용의 문제

점을 극복하고자 하였다(Park and Fürsich, 2001). 또한 산소 안정동위원소 분석을 함으로써 층의 깊이에 따라 속성작용의 강도가 일정하게 변했는지 체크할 수 있다. 그러나 Viohl(1994)이 언급한 *Aspidorhynchus* 종의 내부에 쌓인 마이크로이트층(layers of micrite)을 관찰해 보면 석회질이 많은 층이 매우 빠르게 퇴적되어 형성되었음을 가리키지만, 실제 시계열 분석에 따르면 석회질이 많은 층은 반대로 낮은 퇴적률의 시기를 가리킨다(Park and Fürsich, 2001). 이와 같은 문제점을 극복하기 위해서는 주기분석 이외에도 퇴적물이 유입되는 양과 자체적으로 형성되는 양의 비율을 결정할 수 있는 추가적인 요소를 고려해야 한다.

그럼에도 불구하고 주기분석은 변성작용을 거의 받지 않은 제4기 지층과 일부 제3기 지층 및 중생대 지층의 퇴적환경과 층서를 밝히는 데에 유용하게 이용될 수 있다. 주기분석은 연속적인 퇴적층의 계산을 통하여 눈으로 쉽게 확인되지 않는 부정합면이나 단층면도 탐지할 수 있는 방법이기도 하다. 무엇보다도 주기분석은 절대연령의 값을 간접적으로 얻을 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 고환경 변화 및 고기후 연구에 필수적인 방법이다. 그러나 지표에 쌓이는 퇴적물은 쉽게 감지하기 어려운, 복합적인 환경요소(environmental factors)에 의하여 퇴적되기 때문에, 주기분석에는 일정한 오차율이 들어 있다. 이와 같은 오차의 가능성을 충분히 해석하면서 주기분석을 한다면, 주기적인 퇴적과정의 지나친 과장이나 해석을 피하면서 유용한 정보를 주기분석으로부터 얻을 수 있을 것이다.

사 사

졸른호펜 판상석회암의 주기분석에 대하여 조언을 주신 F.T. Fürsich 박사(독일 Univ. Würzburg)과 G.P. Weedon 박사(영국 Univ. Luton)께 감사를 드린다. 또한 논문을 심사해 주신 무명의 두 심사위원께 건설적 비평과 조언에 대하여 감사를 드린다.

참고문헌

박명호, 김일수, 이영주 (2002) 독일 남부지역에서 시추한 상부쥐라기 코어 시료의 유기물 특성 연구. *자원환경지질*, v. 35, p. 429-436.
 Arthur, M.A., Dean, W.E., Bottjer, D. and Scholle, P.A., (1984) Rhythmic bedding in Mesozoic-Cenozoic pelagic carbonate sequences: The primary and diagenetic origin of Milankovitch-like cycles. In Berger, A., Imbrie, J., Hays, J., Kukla, G. and Saltzman, B. (eds.)

- Milankovitch and Climate. Part 1, Reidel, Hingham, p. 191-222.
- Barthel, K.W., Swinburne, N.H.M. and Conway Morris, S. (1990) Solnhofen: A Study in Mesozoic Palaeontology. Cambridge Univ. Press, 236p.
- Berger, A.L. (1987) Milankovitch Theory and Climate. Contribution de l'Institut d'Astronomie et de Géophysique, Univ. Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, No. 52, 78p.
- Berger, A.L. and Loutre, M.F. (1994) Astronomical forcing through geological time. *Int. Ass. Sediment., Spec. Publ.*, v. 19, p. 15-24.
- Blackman, R.B. and Tukey, J.W. (1958) *The Measurement of Power Spectra*. Dover, New York, 190p.
- Davis, J.C. (1986) *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons, New York, 646p.
- Hays, J.D., Imbrie, J. and Shackleton, N.J. (1976) Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science*, v. 194, p. 1121-1132.
- Hüchel, U. (1974) Vergleich des Mineralbestandes der Plattenkalk Solnhofens und des Libanon mit anderen Kalken. *N. Jahrbuch Geol. Paläont., Abh.*, v. 145, p. 153-182.
- Imbrie, J., Boyle, E.A., Clemens, S.C., Duffy, A., Howard, W.R., Kukla, G., Kutzbach, J., Martinson, D.G., McIntyre, A., Mix, A.C., Molfino, B., Morley, J.J., Peterson, L.C., Pisias, N.G., Prell, W.L., Raymo, M.E., Shackleton, N.J. and Toggweiler, J.R. (1992) On the structure and origin of major glaciation cycles: 1. Linear response to Milankovitch forcing. *Paleoceanography*, v. 7, p. 701-738.
- Imbrie, J., Berger, A., Boyle, E.A., Clemens, S.C., Duffy, A., Howard, W.R., Kukla, G., Kutzbach, J., Martinson, D.G., McIntyre, A., Mix, A.C., Molfino, B., Morley, J.J., Peterson, L.C., Pisias, N.G., Prell, W.L., Raymo, M.E., Shackleton, N.J. and Toggweiler, J.R. (1993) On the structure and origin of major glaciation cycles: 2. Linear response to Milankovitch forcing. *Paleoceanography*, v. 8, p. 699-735.
- Jenkins, G.M. and Watts, D.G. (1968) *Spectral Analysis and its Applications*. Holden-Day, San Francisco, 525p.
- Milankovitch, M. (1941) *Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Royal Serb. Sci., Spec. Publ., 132, Sec. Math. Nat. Sci., Beograd, v. 33, 633p.
- Moon, J.-W., Park, M.-H., Song, Y. and Moon, H.-S. (2002) Implication of mineralogical variations on genetic environments of finely laminated Solnhofen platy limestone in southern Germany. *Clays and Clay Minerals*, in review.
- Park, M.-H. and Fürsich, F.T. (2001) Cyclic nature of lamination of the Tithonian Solnhofen Plattenkalk of southern Germany and its palaeoclimatic implications. *Geologische Rundschau*, v. 90, p. 847-854.
- Park, M.-H. and Fürsich, F.T. (2002) Cyclicity in the alternating beds of the Upper Jurassic Solnhofen Formation (southern Germany) and its cyclostratigraphic implications. *Newsletters on Stratigraphy*, v. 39, p. 125-142.
- Priestley, M.B. (1981) *Spectral Analysis and Time Series* (v. 1: Univariate series, v. 2: Multivariate series, prediction and control). Academic Press, London, 890p.
- Ricken, W. (1985) Epicontinental marl-limestone alternations: Event deposition and diagenetic bedding (Upper Jurassic, southwest Germany). In Bayer, U and Seilacher, A. (eds.) *Sedimentary and Evolutionary Cycles*. Lecture Notes in Earth Sciences, v. 1, Springer, Berlin, p. 126-162.
- Schwarzacher, W. (1991) Milankovitch cycles and the measurement of time. In Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A. (eds.) *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer, Berlin, p. 855-863.
- Swinburne, N.H.M. and Hemleben, C. (1994) The plattenkalk facies: A deposit of several environments. *Geobios*, M.S., v. 16, p. 313-320.
- Viohl, G. (1994) Fish taphonomy of the Solnhofen Plattenkalk - an approach to the reconstruction of the palaeoenvironment. *Geobios*, M.S., v. 16, p. 81-90.
- Weeden, G.P. (1991) The spectral analysis of stratigraphical time series. In Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A. (eds.) *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer, Berlin, p. 840-854.
- Weeden, G.P. (1993) The recognition and stratigraphic implications of orbital-forcing of climate and sedimentary cycles. In Wright, V.P. (ed.) *Sedimentology Review*. v. 1, Blackwell, Oxford, p. 31-50.
- Weeden, G.P. and Jenkyns, H.C. (1999) Cyclostratigraphy and the Early Jurassic timescale: Data from the Belemnite Marls, Dorset, southern England. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 111, 1823-1840.
- Zeiss, A. (1977) Jurassic stratigraphy of Franconia. *Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde*, B31, 32p.