

미행성 지구충돌의 역사 II: 2002년 데이터베이스를 이용한 주기분석

문홍규^{1†}, 민병희^{1,2}, 김승리¹
¹한국천문연구원, ²연세대학교 천문대

TERRESTRIAL IMPACT CRATERING CHRONOLOGY II: PERIODICITY ANALYSIS WITH THE 2002 DATABASE

Hong-Kyu Moon^{1†}, Byung-Hee Min^{1,2}, and Seung-Lee Kim¹

¹Korea Astronomy Observatory, Yusong, Daejeon 305-348, Korea

²Yonsei University Observatory, Shinchon, Seoul 120-749, Korea

E-mail: fullmoon@kao.re.kr, bhmin@galaxy.yonsei.ac.kr, slkim@kao.re.kr

(Received October 30, 2002; Accepted October 29, 2003)

요 약

Grieve(1991), Moon et al.(2001), Earth Impact Database(2002; DB02) 등 세 가지 충돌구 DB를 이용해서 미행성 지구충돌 사건의 주기성 여부를 조사했다. 특히 DB02는 과거 사용됐던 데이터베이스들에 비해서 연령 측정오차가 크게 향상되었으며, 이를 이용한 주기분석 발표는 이번이 처음이다. DB02(나이 $t \leq 250\text{Myr}$ 및 $t \leq 150\text{Myr}$, 나이오차 $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$)에 대한 Fourier 분석 결과, $D \geq 5\text{km}$ 와 $D \geq 20\text{km}$ 인 표본의 경우, 주기성이 검출되지 않았다. 그러나 $D \geq 30\text{km}$ 인 표본인 경우 16.1Myr와 34.7Myr에서 두 개의 피크가 나타났고, $D \geq 45\text{km}$ 인 표본은 16.1Myr 부근에서 강한 파워를 보였다. 이로부터 우리는 $d \geq 1.5\text{km}$ 인 천체의 주기적인 지구 충돌 가능성을 고려할 수 있으며, 충돌구 나이의 정밀도는 물론 t 와 D 의 범위, 그리고 데이터베이스의 선택이 미행성의 지구충돌의 역사를 재구성하는데 중요한 변수로 작용한다는 사실을 확인했다.

ABSTRACT

We examined the hypothesis that the crater formation rate exhibits periodicity, employing data sets of Grieve (1991), Moon et al. (2001), and the Earth Impact Database (2002; DB02). DB02 is known to supercede previous compilations in terms of its accuracy and precision of the ages; it is the first time that this database has been used for periodicity analysis. For data sets comprising impact structures with $D \geq 5\text{km}$ (and also those with $D \geq 20\text{km}$), there is no convincing evidence for periodicities in the crater ages, according to our Fourier analysis. However, we detected two peaks at 16.1Myr and 34.7Myr for craters with $D \geq 30\text{km}$; we confirm that the age distribution of impact craters with $D \geq 45\text{km}$ has dominant power at 16.1Myr. Thus, we may conjecture a probable periodic shower of Earth impactors with sizes $d \geq 1.5\text{km}$. In addition, we found that the selection of data sets, the lower limits on the ages and diameters of impact craters, as well as the accuracy and precision of the ages, all constitute crucial factors in reconstructing the impact cratering history of the Earth.

[†]corresponding author

Keywords: terrestrial impact craters, periodicity of impacts

1. 서 론

우리가 통계적으로 의미 있는 개수의 충돌구(impact crater) 표본에 대해서 나이를 정밀하게 알고 있다면 과거 충돌사건에 대한 시간 축 상에서 충돌구의 분포를 재현해 볼 수 있다. 이것은 지질학과 천문학의 공통 관심 분야인 동시에 태양계는 물론, 지구 역사의 한 단면을 재조명하는 중요한 작업이라 생각된다. 1979년 이후 일부 연구자들은 충돌구의 연령 분포가 주기성을 갖는다는 사실에 주목했다. Seyfert & Sirikin(1979)은 최초로, 충돌구 나이가 시간 축 t 에 대해서 26Myr의 간격을 갖는 그룹들로 나뉘어 분포한다고 제안했다. Alvarez & Muller(1984; 이하 AM84라고 표기함)는 11개 충돌구 자료를 바탕으로 28.4Myr의 주기성을 찾아냈으며, Rampino & Stothers(1984; 이하 RS84라고 표기함)는 나이 $t \leq 600$ Myr인 65개 충돌구 자료를 분석, 충돌주기가 30 ± 1 Myr라고 주장했다. 그 이후, Yabushita(1991)는 AM84, RS84, Grieve(1987)의 102개의 표본을 이용해서 새롭게 분석을 시도했다. 그 결과, 16.5, 30, 50Myr 등 3개의 주기를 얻었으며, 16.5Myr가 나머지 2개의 기본주기(fundamental period)라는 점에 착안, 16.5Myr 주기를 제안했다. 뒤이어, 그는 AM84, RS84, Grieve(1987), 그리고 Grieve(1993)의 104개 자료를 채택, $t \leq 600$ Myr인 표본들에 대해서 충돌구 지름 $D \leq 2$ km, 2 km $\leq D \leq 10$ km, $D \geq 10$ km 등 세 개의 구간으로 나누어 통계분석을 시도한 결과 30Myr의 주기성을 확인했다. 그 뒤, Matsumoto & Kubotani(1996)는 139개 충돌구를 수록한 Grieve & Shoemaker(1995)의 데이터베이스(Database, DB) 중에서 나이 5 Myr $\leq t \leq 300$ Myr, 나이 오차 $\Delta t \leq \pm 10$ Myr인 35개 자료를 기초로 30Myr의 주기를 재 검출했다. 한편, Stothers(1998)는 Grieve & Pesonen(1996)의 DB 가운데 $D \geq 5$ km, $t \leq 250$ Myr, $\Delta t \leq \pm 20$ Myr인 조건을 만족하는 31개 표본에 대해서 36 ± 1 Myr의 주기성이 나타난다고 보고했다.

그러나, 반론들도 꾸준히 제기되어 왔다. Grieve et al.(1985)과 Tremaine(1986) 등은 충돌의 주기성에 관한 연구 결과들에 대해서 의문을 제기했다. 그 뒤, Montanari et al.(1998)은 Grieve & Pesonen(1996)의 DB에서 $t \leq 150$ Myr, $t \leq \pm 10$ Myr, $D \geq 5$ km인 충돌구 33개에 대해서 이전 연구자들과 다른 방법을 적용, 주기성 분석을 시도했다. 그는 충돌체 크기와 충돌구 겉보기 지름 (apparent diameter) 및 충돌 에너지와의 관계식을 가정한 뒤, $t \leq 150$ Myr에 대해서 충돌체의 에너지를 시간에 대해 적분, 그 분포가 주기성을 갖는지 조사했다. 그는 몇 개 충돌구 그룹의 생성연대가(지질학적으로) 짧은 시간간격을 이루며 분포한다는 것을 확인했을 뿐 특별한 주기성은 찾지 못했다. 한편, Jetsu(1997), Jetsu & Pelt(2000)는 과거 연구자들이 사용해온 충돌구 나이가 대부분 정수로 표시됐다는 점에 착안, ‘인공적인 주기성’이 개입해 분석 결과를 왜곡할 수밖에 없었다고 강조했다. 또 Yabushita(2002)는 Grieve(2001)의 DB에서 $t < 400$ Myr, $D > 30$ km인 조건을 만족하는 15개 충돌구 자료를 선택, 주기분석에 사용했으며, 36.5Myr~37.5Myr의 주기를 검출했으나, Monte Carlo 실험 결과 통계적으로 신뢰도가 떨어진다고 결론지었다.

Shoemaker(1998)는 태양이 주기적으로 은하면을 통과하며, 이 때 오오트 구름(Oort Cloud)을 이루는 혜성 핵들이 주기적으로 지구에 충돌, 주요 충돌기록을 남겼다고 주장했다. 일반적으로 $D \geq 45$ km인 충돌구는 지름 $d \geq 3$ km급 소행성(또는 혜성)에 의해서 형성되며, 이러한 사건을 통해서 환

경 및 생태계에 급격한 변화가 나타나는 것으로 알려졌다(Montanari et al. 1998). 따라서 충돌(특히 대규모 충돌)의 주기성이 확인될 경우, 은하 포텐셜에 대한 태양계의 상대운동이 주기적으로 생태계 진화에 영향을 끼쳐왔다는 가설의 결정적 근거로 사용될 수 있다. 또한, 이러한 주기성을 바탕으로 미래의 “사건”을 수학적으로 예측하고, 장기적으로는 기술적 한계를 극복, 미래의 “사건”을 제어 가능한 대상으로 만들 수 있다고 생각된다.

본 연구에서는 Grieve(1991)와 Moon et al.(2001; 이하 DB01이라고 표기함), 그리고 새로 발표된 Earth Impact Database(2002; 이하 DB02라고 표기함) 등 세 가지 DB를 활용해서 충돌사건의 시간적 분포를 재구성하는 한편, 충돌구의 지름 및 나이, 그리고 DB의 선택이 주기분석에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보기로 한다. 우리는 이러한 작업을 통해서 ‘충돌’이 주기적으로 발생했는지 여부를 확인하는 한편, 내행성계(inner solar system)와 지구 역사를 재 조명하는 새로운 해결의 실마리를 얻을 수 있을 것으로 기대하고 있다.

2. 충돌구 나이와 오차요인

지표면에 남은 ‘충돌기록’은 통계적으로 부실하기 때문에 자료분석에 특별한 주의를 기울여야 한다(Moon et al. 2001). 1970년대 초반부터 목록화 되기 시작한 충돌구조(impact structure)의 대부분은 지표에 노출돼 있지만, 20% 가량은 지하에 묻혀 있는 것으로 알려졌다. 이들 구조들에 대해서는 중력이상(gravitational anomaly) 검출을 통해서 발견한 다음, 시추와 지질분석을 거쳐 충돌기원 여부를 판단하고 있다(Grieve 1991). 또 한가지, 지표는 오랜 시간에 걸쳐 침식, 퇴적, 식생, 판 이동 등 다양한 변화를 경험하고 있으며, 그 결과 우리는 불완전한 기록에 의존해서 ‘충돌’의 역사를 재구성할 수밖에 없다(Shoemaker 1998).

일반적으로 충돌구 나이 측정에는 동위원소가 이용된다. 즉, 연구자들은 충돌시 고온 고압 상태에서 만들어진 암석 및 유리질에 포함된 K-Ar, Ar-Ar, Rb-Sr 등의 동위원소비를 측정해서 그 나이를 결정하고 있다. 그러나 이 방법은 아직 기존 DB에 포함돼 있거나, ‘후보’로 거론된 모든 표본에 대해서 적용되지 못하고 있다. 그 이유는, (1) 인공위성 및 우주왕복선 촬영 영상자료를 통해 충돌구 후보라고 분류된 것 가운데 지질탐사가 이루어지지 않은 경우가 많으며, 그 중 일부는 접근의 어려움, 또는 해당 지역의 분쟁 및 정치적 불안정 때문에 지질조사가 불가능한 상태에 놓여있다(Master & Reimold 2001). (2) 충돌구 연구 초기에 조사된 표본의 경우, 당시 사용되던 붕괴상수(decay constants)를 기초로 나이 측정이 이루어졌기 때문에 붕괴상수 값이 부정확하거나 신뢰도가 낮다. 그리고, (3) 지질학자들이 층서학적인 방법을 동원, 충돌 시 형성된 분출물의 나이를 추정해서 충돌구 나이를 결정할 때 적지 않은 오차가 개입된다. Montanari et al.(1998)이 지적한 것과 마찬가지로 실제 충돌사건과, 동시대에 형성됐을 것으로 추정되는 퇴적층의 충돌흔적을 동일시할 수 있는지의 여부는 지질학적인 연대구분 방법(geochronologic time scale calibration)의 정밀도는 물론, 충돌연대의 측정 정밀도에 크게 의존한다. 특히 미행성 지구 충돌에 관한 주기분석에 있어서 연령측정시 포함되는 오차는 충돌의 주기성 여부 및 주기결정에 치명적인 영향을 끼칠 수 있다.

3. DB02를 이용한 주기분석

3.1 DB02 이전의 데이터베이스

충돌구 형성과 관련, 과거 주기분석에 사용되어 온 자료는 Grieve et al.(1985), Grieve(1987, 1991, 1993), Grieve & Shoemaker(1995), Geological Survey of Canada(1995, 1996, 1998) 등이다. 이 가운데 Geological Survey of Canada(1995, 1996, 1998)는 Grieve가 1985년부터 체계적으로 수집, 목록화한 DB(곧, Grieve et al. 1985, Grieve 1987, 1991, 1993, Grieve & Shoemaker 1995)로서 새로운 자료가 발표될 때마다 지속적으로 갱신되어 왔다. 단지 DB 간에 차이가 있다면 새로운 충돌구조들이 발견됨에 따라 자료의 수가 늘어났으며, 연령측정 정밀도 및 오차가 지속적으로 향상돼 왔다는 점을 들 수 있다. 주의할 점은, DB의 선택이 '충돌'의 주기성 판단여부와 주기결정에 지대한 영향을 미친다는 사실이다. 이에 관해서는 4장에서 살펴보기로 한다.

3.2 DB02와 충돌구 나이

DB02는 새로운 붕괴상수(decay constants; Steiger & Jager 1977)를 적용, 1977년 이전의 자료를 포함한 충돌구의 나이를 재 계산한 결과이다. 현재까지 발표된 충돌구 DB는 대부분 표본 개수가 적을 뿐 아니라, 과거 발표된 충돌구 나이를 그대로 사용하고 있다. 이에 반해서, DB02는 수개월 주기로 자료 갱신이 이루어지고 있으며, 인터넷을 통해서 충돌구 지름과 나이에 관한 최신의 자료를 제공하고 있다. 참고로, DB02를 이용한 충돌 주기분석 시도는 이 연구가 처음이라는 사실을 밝혀둔다. 우리는 Grieve(1991), DB01, DB02에 수록된 충돌구 가운데 $t \leq 250\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 5\text{km}$ 인 표본과 (2) $t \leq 150\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 5\text{km}$ 인 표본을 이용해서 충돌구 연령분포 및 충돌의 주기성 여부를 조사했다. 이 때 약 150Myr는 지구의 충돌기록이 비교적 잘 보존된 시간의 상한(Moon et al. 2001; 그림 1 참조)에, 250Myr는 대략 중생대와 고생대의 경계면(248.2Myr)에 해당한다. ~150Myr 이전에는 판의 이동(plate tectonics)과 침식, 퇴적작용 때문에 많은 충돌기록(cratering record)이 소실된 것으로 판단된다(Moon et al. 2001). 그러나 충돌구 지름 D가 클수록 충돌기록이 보존될 수 있는 확률이 높다.

3.2.1 나이 오차

일부 연구자 가운데는 나이오차 Δt 에 제한을 두지 않거나, $\Delta t \leq \pm 20\text{Myr}$ 로 설정, 주기분석을 시도했으며(Stothers 1998, Yabushita 2002), 그밖에 특별한 경우를 제외하고는 $t \leq \pm 10\text{Myr}$ 를 택하고 있다(Matsumoto & Kubotani 1996, Montanari et al. 1998). 본 연구에서도 이러한 관례를 따랐다. 그리고 DB02의 주기분석에 사용된 충돌구(02-250)의 70% 이상은 나이(t)가 소수로 표시되었기 때문에 Jetsu(1997), Jetsu & Pelt(2000)가 제기한 문제점(서론 참조)은 거의 영향을 미치지 않았을 것으로 판단된다.

3.2.2 충돌구 지름

충돌구 지름 D는 충돌 천체의 지름(d)에 의존하며, 일부 연구자들은 대형 충돌구 대부분이 주기적인 혜성 충돌에 의해 형성되었을 것으로 추정하고 있다(RS84, Shoemaker 1998). 그것은 태양계가 주기적으로 은하면을 통과하면서 오르트 구름을 구성하는 얼음 핵들이 주기적으로 '혜성 소나기'(comet shower)를 일으킨다는 가설에 기초하고 있다(RS84). 혜성의 지구대기 진입속도는

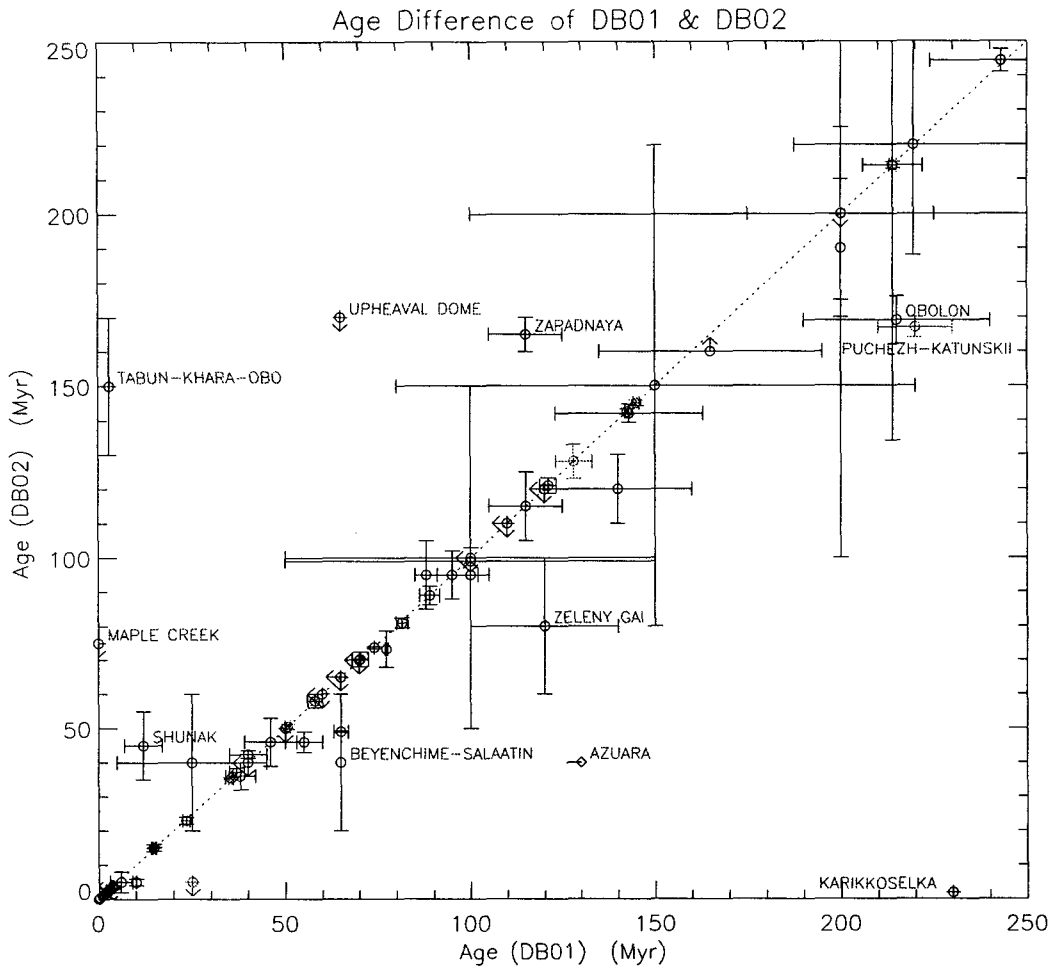


그림 1. DB01과 DB02 간의 충돌구 연령의 차이를 나타낸 그림.

16.9-72.9km/s(Weissman 1995)로서 충돌 에너지는 속도 제곱에 비례하기 때문에 질량이 같을 경우 혜성은 실제로 더 큰 충돌구를 만들 수 있다. 이들 연구자들은 대규모 충돌의 원인으로서는 소행성보다는 혜성을 선호하고 있다. 그것은 소행성에 대해서는 충돌의 주기성을 기대할 수 없는 반면, 혜성에 대해서는 가능하기 때문이다. Shoemaker(1998)는 백금(Pt)과 이리듐(Ir) 성분비 분석을 토대로 Chicxulub(170km), Popigai(100km)와 Manicouagan(100km), Chesapeake(90km), Puchezh-Katunki(80km) 등 주요 충돌구들이 혜성 충돌에 의해 형성되었을 확률이 각각 90%, 80%, 80%, 70%와 65%라고 밝혔다. 그러나 이들은 대규모 충돌구에서 측정된 친철원소의 함량비가 미분화운석(primitive meteorites)의 그것과 유사하다는데 착안, 미분화운석은 곧 혜성 물질이라고 단정하는 경향이 있으나, 이것은 많은 운석학자들의 견해와 다르다.

한편, 우리는 주기분석에 사용하는 충돌구 데이터베이스에 대해서 D의 하한을 어떻게 선택할 것인가 하는 문제에 직면하게 된다. 본 연구에서는 그 하한을 5km로 선택했으며(4.1~4.3절), 4.4절에

서는 $D \geq 20\text{km}$, $D \geq 30\text{km}$, $D \geq 45\text{km}$ 등 세 구간으로 나누어 주기분석을 수행했다.

3.3 DB01과 DB02의 비교

DB01은 Geological Survey of Canada(1998) 등 4개의 자료(Moon et al. 2001 참고)를 신뢰도에 따라 분류, 선택적으로 수집한 것이다. DB01과 DB02와의 차이점을 살펴보면 다음과 같다. (1) DB01은 자료 개수가 192개, DB02는 163개이며, (2) DB02는 DB01에 비해 연령 측정오차가 크게 감소했다. 그것은 (a) 1977년 이전에 측정된 충돌구 나이에 새로운 붕괴상수(Steiger & Jager 1977)를 적용, 재 계산된 결과이며, (b) DB02에는 정밀 지질조사 및 연령측정이 시도되지 않은 자료가 제외됐기 때문이다. 그림 1에는 DB01과 DB02에 공통적으로 포함된 충돌구의 연령 차이를 나타냈다. 참고로, DB02에 수록되지 않은 충돌구는 지름이 10km보다 작거나 형성연대가 250Myr보다 오래된 것이 대부분이다(Eltanin의 경우 남태평양 해상에 낙하한 것이기 때문에 DB02에는 포함되지 않았다).

DB01과 DB02의 차집합에 해당하는 표본 가운데 D 가 10km보다 큰 것은 Alamo($t \sim 367\text{Myr}$, $D=190\text{km}$), Duolun($t = 129 \pm 3$, $D=70\text{km}$), Highbury($t = 1034 \pm 13\text{Myr}$, $D=20\text{km}$), Landsortsjupet($t \sim 1200\text{Myr}$, $D=30\text{km}$), Lukanga($t \sim 300 - 500\text{Myr}$, $D=110\text{km}$), Lyksele($t \sim 1260 - 1800$, $D=130\text{km}$), Paasselka($t < 1900$, $D=10\text{km}$) Synthylemenkat Lake(0.01Myr , $D=12\text{km}$), Tannas($t = 0.82 \pm 0.22\text{Myr}$, $D=20\text{km}$), Tom's Canyon($t = 35.5\text{Myr}$, $D \sim 15 - 20\text{km}$) 등이 있다. 이들 중에서 $t \leq 250\text{Myr}$, $t \leq \pm 10\text{Myr}$ 의 조건을 만족하는 충돌구를 따로 분류하면 Duolun, Synthylemenkat Lake, Tannas, Tom's Canyon 등이 해당된다. 이들 충돌구의 나이, 나이 오차, 지름은 Moon et al.(2001)의 Appendix(Table 1)에 수록되어 있으며, 앞서 언급한 것과 같이 새로운 붕괴상수를 이용한 정밀 나이 결정이 시도되지 않은 결과들을 밝혀둔다.

DB01과 DB02에서 연령 차이가 10Myr보다 큰 충돌구들 가운데 이번 주기분석에 쓰인 것은 Azura($< 130\text{Myr} \rightarrow 40\text{Myr}$), Kamensk($65 \pm 2\text{Myr} \rightarrow 49 \pm 0.2\text{Myr}$), Karakul($25\text{Myr} \rightarrow < 5\text{Myr}$), Obolon($215 \pm 25\text{Myr} \rightarrow 169 \pm 7\text{Myr}$), Puchezh-Katunskii($220 \pm 10\text{Myr} \rightarrow 167 \pm 3\text{Myr}$), Ragozinka($55 \pm 5\text{Myr} \rightarrow 46 \pm 3\text{Myr}$), Zamanshin($900 \pm 100\text{Myr} \rightarrow 0.9 \pm 0.1\text{Myr}$) 등이다. 여기서 보는 것처럼, DB01과 DB02 가운데 이번 주기분석에 사용된 충돌구들, 곧 $t \leq 250\text{Myr}$, $t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 5\text{km}$ 인 조건을 만족하는 표본은 DB01과 비교할 때 DB02의 나이가 작게 나타났다. 이 경향은 단지 주기분석에 사용된 조건을 만족하는 표본에 국한된 것임을 밝혀둔다. 결과적으로, DB02 이전에 발표된 DB들은 나이 측정상의 불확정성에 기인, 부분적으로 왜곡된 결과를 낳았을 것으로 쉽게 예상할 수 있다. 4.2.1~4.2.3절에서는 3개의 데이터베이스(Grieve 1991, DB01, DB02)를 이용한 주기분석 결과를 비교해 보도록 하겠다.

4. 주기분석 및 결과

4. 1 Grieve(1991) 데이터베이스를 이용한 주기분석

Grieve(1991)의 DB에서 $t \leq 250\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 5\text{km}$ 인 충돌구(91-250) 29개와 $t \leq 250\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 5\text{km}$ 인 충돌구(91-150) 25개를 이용해서 파워 스펙트럼 분석을 시도했다. 그 결과를 표 1에 수록 하였다. 표 1에서 P1-P4는 파워 스펙트럼 상 피크의 위치(My)를 나타낸다. 표 1에서 보듯이, 그림 2에 충돌 사건(event)의 시간분포 및 파워 스펙트럼을 나타내었다. 여기서 파워(power)는

표 1. Grieve(1991), DB01, DB02에 대한 파워 스펙트럼 분석결과.

자료	자료 개수	P1	P2	P3	P4
91-150	n=29	17.6	35.7	27.8	11.9
91-250	n=25	18.0	35.7	12.3	
01-150	n=45	12.9	30.2	15.9	
01-250	n=42	12.8	30.4	35.7	17.9
02-150	n=38	11.7	23.4	15.6	34.8
02-250	n=34	23.8	11.7	34.8	15.1

상대적인 양이며, 91-250은 18.0Myr에서 최대값을 보였고, 그 다음으로 35.7Myr, 12.3Myr에서 파워가 강하게 나타났다. 91-150에서는 17.6Myr에서 피크를 이루었고, 35.7Myr, 27.8Myr에서는 이와 비슷한 강도를 보였다. 따라서 후자의 경우 특별한 주기성이 있다고 판단하기는 어렵다.

4. 2 DB01을 이용한 주기분석

DB01 가운데 $t \leq 250\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 5\text{km}$ 인 충돌구(01-250) 45개와 $t \leq 150\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 5\text{km}$ 인 충돌구(01-150) 42개 자료를 이용해서 주기분석을 시도했다. 그 결과, 표 1 및 그림 2에서 보듯이 01-250의 경우 12.8Myr, 30.4Myr에서 거의 같은 파워를 갖는 2개의 극대값이 나타났으며, 17.9Myr와 35.7Myr의 두 개 피크 역시 높이가 비슷했다. 그리고 30.4Myr와 35.7Myr에서는 비교적 넓은 분포양상을 보이고 있다. 01-150에서는 파워가 12.9Myr, 30.2Myr, 15.9Myr의 순으로 우세하게 나타났으며, 30.2Myr에서는 비대칭 모양의 넓게 퍼진 분포를 보인다. 01-150과 01-250을 비교하면 전자는 12.9Myr에서 다른 극대값에 비해 약 1.5배 높은 피크를 보이지만, 두 가지 경우 모두 주기성이 있다고 판단하기는 어렵다고 생각된다.

4. 3 DB02를 이용한 주기분석 I ($D \geq 5\text{km}$)

우리는 DB02에서 $t \leq 250\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 5\text{km}$ 인 충돌구(02-250) 38개와 $t \leq 250\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 5\text{km}$ 인 충돌구(02-150) 34개 자료를 이용해서 주기분석을 수행했다. 표 1 및 그림 2에서 보듯이 02-250에서는 23.8Myr, 11.7Myr, 34.1Myr, 41.5Myr의 ‘주기 후보’들을 찾았으며, 이 가운데 11.7Myr와 23.8Myr에서 비슷한 파워를 보였다. 한편, 02-150의 경우 11.7Myr, 23.4Myr, 15.6Myr, 34.8Myr의 순서대로 파워가 강하게 나타났으며, 11.7Myr와 23.4Myr, 그리고 15.6Myr와 34.8Myr, 두 쌍의 피크는 높이가 거의 비슷했다. 또 02-150의 33.9Myr, 02-250의 34.0Myr의 두 개 피크는 시간축에 대해 넓은 분포양상을 보이고 있다. 그림 2에서 02-150과 02-250의 극대값 4개를 각각 비교한 결과, 뚜렷한 피크는 발견되지 않았다. 따라서 02-150과 02-250에서도 역시 주기성이 나타난다고 주장하기는 어렵다.

4.1~4.2절의 주기분석 결과는 (1) 동일한 조건($t, \Delta t, D$)으로 실험했다는데 의미가 있을 뿐, 연령 측정값이 부정확하기 때문에 결과 자체로서 활용도는 낮다고 판단된다. 그리고, (2) DB의 선택에 따라 분석 결과가 다르다는 사실을 강조하기 위해 연령측정의 신뢰도가 떨어지는 자료(91-150, 91-250, 01-150, 01-250)를 이용한 분석결과를 비교했다는 점을 밝혀둔다.

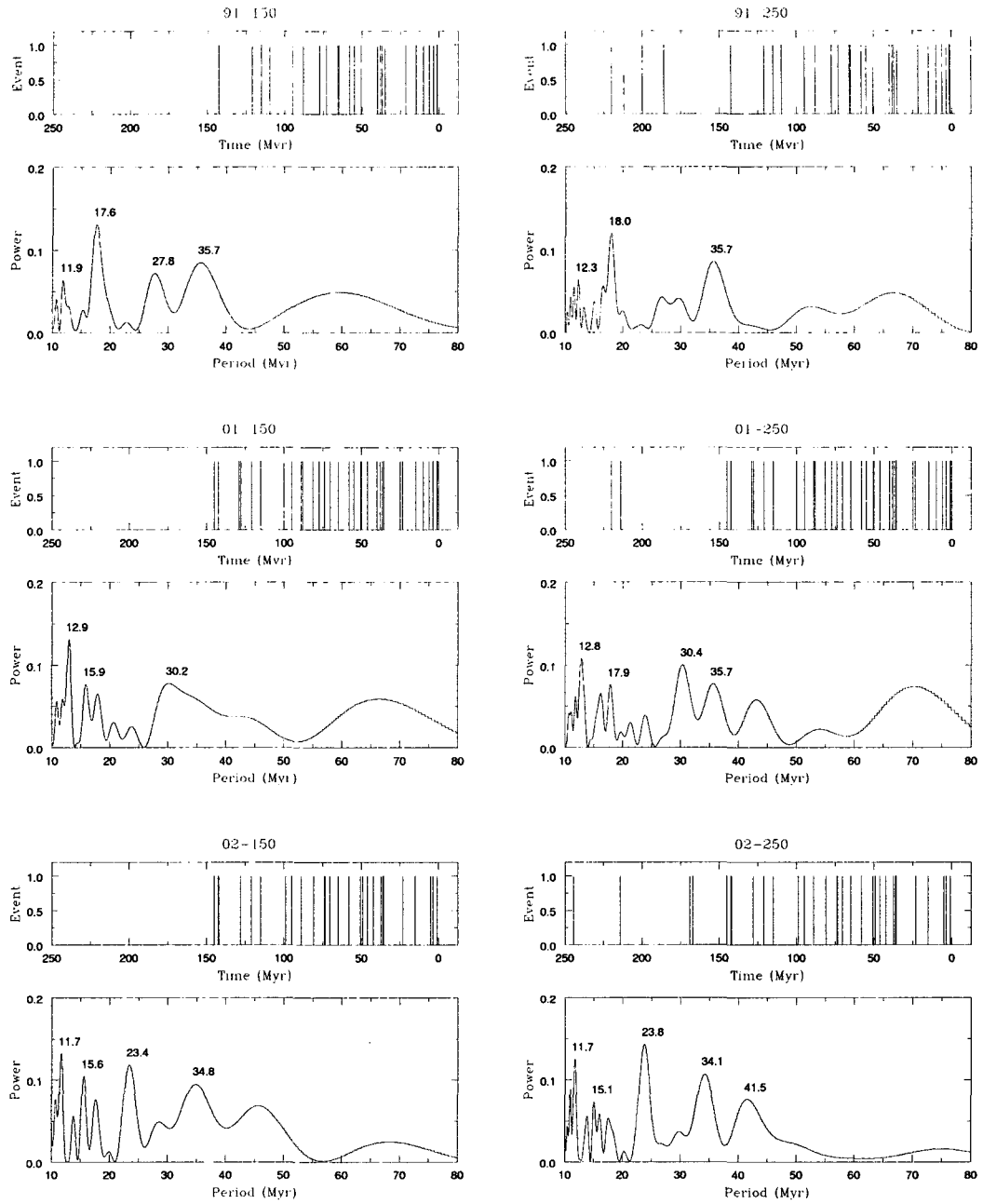


그림 2. 충돌사건의 시간분포 및 파워 스펙트럼(Grieve 1991, DB01, DB02). 91-150, 91-250, 01-150, 01-250, 02-150, 02-250에서 앞의 숫자는 DB의 발표 년도를 뜻하며, 뒤의 숫자는 t 의 상한을 Myr 단위로 나타낸 것이다.

표 2. DB02 ($t \leq 250\text{Myr}$)에서 $D \geq 20\text{km}$, $D \geq 30\text{km}$, $D \geq 45\text{km}$ 인 표본들에 대한 파워 스펙트럼 분석결과.

자료	자료 개수	D	P1	P2	P3	P4
02-250-20	n=24	$\geq 20\text{km}$	11.7	24.3	14.9	34.4
02-250-30	n=14	$\geq 30\text{km}$	34.7	16.1		
02-250-45	n=10	$\geq 45\text{km}$	16.1	(14.9)	(18.1)	34.5

4. 4 DB02를 이용한 주기분석 II ($D \geq 20\text{km}$)

4.1~4.3절의 실험에서는 D의 하한을 5km로 설정했는데, 이러한 크기의 충돌구는 250m급 충돌체에 의해서 형성되며, 그 영향은 국지적인 것으로 알려져 있다. 한편, $d \sim 1\text{km}$ 인 천체는 20km급 충돌구조를 만들어낼 수 있으며, 그 결과 전지구적 기후변화를 초래하게 된다. 그리고 30km급 충돌구조는 1.5-2km급 천체에, 45km급 충돌구조는 3km급 천체에 각각 기원을 두고 있으며, 후자의 경우 대량멸종을 동반하는 충돌구 지름 D의 하한값(zero extinction threshold)이라고 생각된다(Jansa et al. 1990). 우리는 DB02 가운데 $t \leq 250\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 20\text{km}$ 인 충돌구(02-250-20) 24개와 $D \geq 30\text{km}$ 인 충돌구(02-250-30) 14개, 그리고 $D \geq 45\text{km}$ 인 충돌구(02-250-45) 10개의 자료를 이용해서 4.1~4.3절에서 수행한 방법으로 Fourier 주기분석을 수행했다. 표 2는 그 결과를 수행한 것이며 그림 3은 Fourier 주기분석을 한 결과 충돌사건에 시간분포와 그 파워스펙트럼을 나타낸 것이다. 표 2에서 보듯이 02-250-20은 11.7Myr, 24.3Myr, 14.9Myr, 34.4Myr의 순서대로 피크를 이루지만, 파워스펙트럼의 높이가 비슷하게 나타나기 때문에 주기성이 있다고 보기는 힘들다. 그러나 02-250-30과 02-250-45를 비교하면 $\sim 24\text{Myr}$ 와 $\sim 12\text{Myr}$ 의 피크는 낮아지는 반면, 15-16Myr의 피크가 ~ 1.6 배 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 02-250-30에서는 12-16Myr 구간과 34.7Myr에서, 그리고 02-250-45에서는 14.9Myr, 16.1Myr(및 18.1Myr) 그룹과, 30-35Myr 구간 등 각각 두 쌍의 주기를 정의할 수 있다. 그림 3에서 볼 수 있는 것처럼 02-250-30의 16.1Myr, 34.7Myr 등 2개의 주기후보는 파워가 4.1~4.3절의 실험에서 검출했던 최대값보다 ~ 1.5 배 높고, 02-250-45에서 16.1Myr의 파워는 그보다 3배 가량 크게 나타난다. 이처럼 주기분석 결과는 D의 범위에 따라 판이하다는 사실을 알 수 있다.

위 결과로부터 우리는 다음과 같이 가정할 수 있다. 즉, 1km보다 작은 충돌 천체는 지름 30km보다 작은 충돌구들을 형성해 왔으며, 이들은 특별한 주기성이 없이 지구에 떨어졌다고 생각된다. 그러나 30km보다 큰 충돌구들에 대한 실험에서는(02-250-30, 02-250-45) $\sim 16\text{Myr}$ 와 $\sim 34\text{-}35\text{Myr}$ 등 두 개의 주기가 검출되었으며, 따라서 우리는 $d \geq 1.5\text{km}$ 인 천체들의 주기적인 지구충돌 가능성을 배제할 수 없다. 1.5km급 천체의 경우 충돌 직후 장기 기후변화 등 지구 전체에 걸쳐 심각한 환경적 효과를 미치며, $d \geq 3\text{km}$ 인 천체는 대량멸종의 원인이 되는 것으로 알려져 있다(Motanari et al. 1998). 따라서 이 연구결과는 대량멸종과 충돌주기와의 관계(예; RS84)를 뒷받침하는 자료로 쓰일 수 있다. 표 2와 그림 3에서 확인할 수 있는 것처럼, 02-250-45의 경우에 P1=16.1Myr 외에도 P2=14.9Myr, P3=18.1Myr 등 작은 피크들이 눈에 띈다. 이 특성은 02-25-30에서도 발견되지만, 16.1Myr 외에 약한 주기성이 실제로 존재하는지의 여부에 관해 아직 선불리 결론을 내릴 수 없다고 생각된다. 마찬가지로

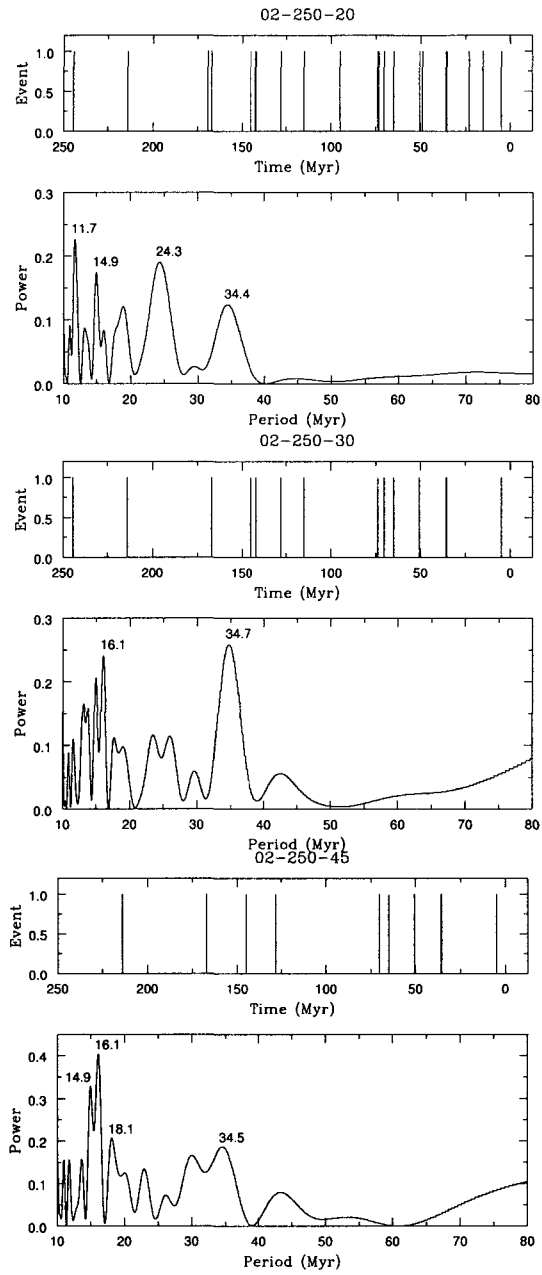


그림 3. 충돌사건의 시간 분포 및 파워 스펙트럼(DB02).

가지로, 02-250-30의 P1과 02-250-45의 P4로부터 $1.5\text{km} < D < 3\text{km}$ 급 충돌체의 주기 약 35Myr의 충돌 가능성을 고려할 수 있다. 그러나 단언하기에는 아직 이르다.

Age-Diameter Distribution of Terrestrial Impact Craters (248 - 0 Myr)

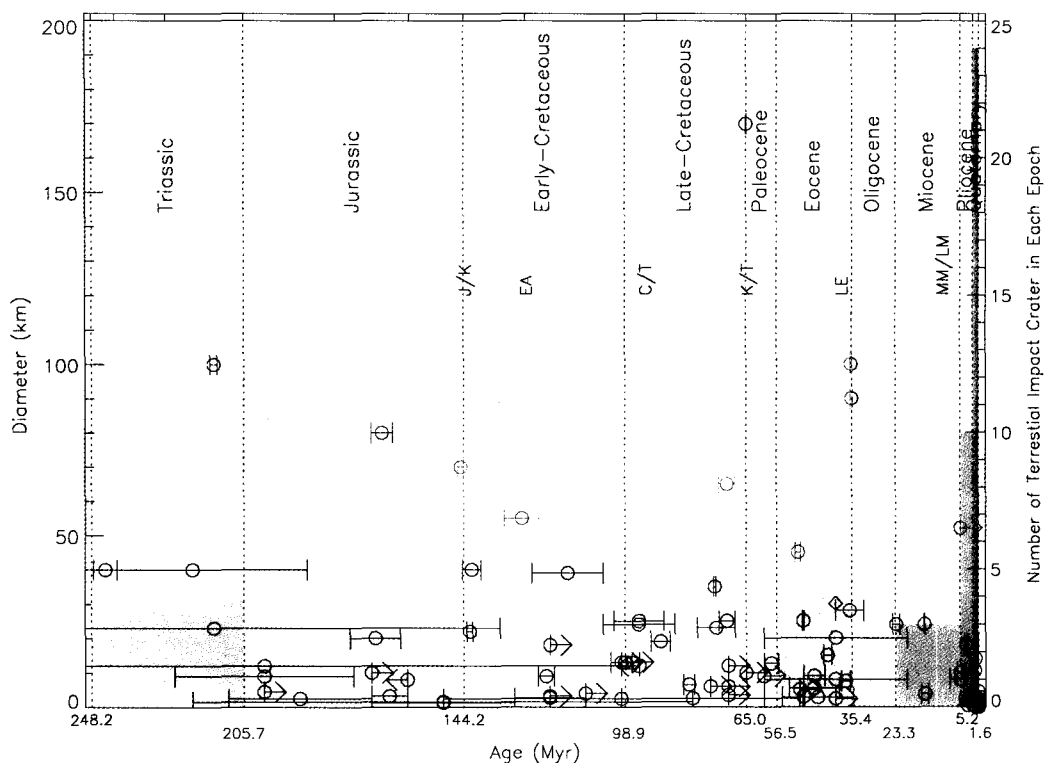


그림 4. 중생대-신생대 (250-0Myr)의 충돌구 나이에 대한 충돌구 개수 및 지름 분포(DB02). 충돌구 개수는 해당 지질 경계면 사이에서 형성된 것으로 알려진 충돌구의 개수를 뜻한다.

5. 충돌연대와 지질경계면

우리는 DB02를 이용해서 지질 경계면과 충돌 시점이 대체로 일치한다는 사실을 확인했다(그림 4 참조). DB02는 DB01에 비해 연령 측정오차가 크게 개선되었기 때문에 특히 이러한 일대일 비교에 유용한 것으로 보인다. 예를 들면, Woodleigh 충돌구의 경우 오차가 $\pm 55\text{Myr}$ 에서 $\pm 8\text{Myr}$ 로 대폭 줄었으며, Mjolnir는 $\pm 20\text{Myr}$ 에서 $\pm 2.6\text{Myr}$ 로, Chesapeake Bay는 $\pm 0.6\text{Myr}$ 에서 $\pm 0.3\text{Myr}$ 로 감소했다. 대표적 충돌구들의 충돌 시기와 지질 경계면을 비교하면 다음과 같다. Siljia Ring($368 \pm 1.1\text{Myr}$, 52km)과 Woodleigh($364 \pm 8\text{Myr}$, 40km)는 데본기-석탄기 경계면(362.5Myr)과 인접한 시기에, Clearwater East ($290 \pm 20\text{Myr}$, 26km)와 Clearwater West($290 \pm 20\text{Myr}$, 36km)는 석탄기-페름기 경계면(290.0Myr)에서 생성된 것으로 확인되었다. 또한 Morokweng($145 \pm 0.8\text{Myr}$)과 Mjolnir($142 \pm 2.6\text{Myr}$, 40km)는 J/K 경계면(144.2Myr)에, (Duolun 충돌구를 포함시킬 경우) Toookoonooka($128 \pm 5\text{Myr}$, 55km)와 Duolun $129 \pm 3\text{Myr}$, 70km)은 형성연대가 EA 경계면($\sim 127\text{Myr}$)과 오차 범위 내에서 일치하고 있다. 한편, 그보다 형성연대가 앞서는 Boltsh($95 \pm 10\text{Myr}$, 24km)와 Steen River($95 \pm 7\text{Myr}$, 25km)는 C/T 경

계면(93.5Myr)과 비슷한 시기에 생성된 것으로 나타났다. 잘 알려진 것처럼, Chicxulub(64.98Myr, 170km)은 K/T 경계면(65Myr)에서 형성됐으며, Popigai(35.7±0.2Myr, 100km)와 Chesapeake Bay (35.5±0.3Myr, 90km)는 신생대 Oligocene-Eocene 경계면(35.4Myr)과 일치한다. 마지막으로 Kara-Kul 충돌구(<5Myr, 52km)는 신생대 Miocene-Pliocene 경계면(5.2Myr)과 동시대에 형성된 것으로 확인되었다.

DB02에서 충돌 시점이 지질 경계면과 일치하는 충돌구 가운데 DB01과 DB02의 나이가 다른 표본의 예를 들면 다음과 같다. 곧, Woodleigh는 DB01에서 250-280Myr로 추정됐다가 DB02에서는 364±8Myr로, Boltysch 충돌구는 DB01에서 88±3Myr로 추정됐다가 DB02에서는 95±10Myr로 재 계산이 이루어졌다. 그리고 Alamo 충돌구($t = 367\text{Myr}$, $D=190\text{km}$)의 경우 DB01에는 수록돼 있지만, DB02에는 포함되지 않았다. 일반적으로 충돌구 연령 측정에는 많은 어려움이 따르기 때문에 형성연대가 빠른 표본의 나이에는 적지 않은 오차가 포함돼 있다는 점에 유의해야 한다. 향후 지질 경계면과 나이가 일치하는 충돌구가 새로 발견되거나, 새로운 연령 측정 결과가 발표될 경우 좀 더 정밀한 분석을 시도할 수 있을 것으로 예측할 수 있다. 그러나 지질시대의 구분이 곧 대량멸종과 연관되어 있지 않다는 점에 유의할 필요가 있다. 현재 지질학자들은 지질학적 경계와 대량멸종이 일치하는 시기를 Ordovician-Silurian(~440Myr), Permian-Triassic(~250Myr), Triassic-Jurassic(~205Myr), Cretaceous-Paleogene(~65Myr) 등으로 보고 있다.

6. 결론 및 토의

Grieve(1991), DB01, DB02 등의 충돌구 자료 가운데 (1) $t \leq 250\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 5\text{km}$ 인 표본과 (2) $t \leq 150\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 5\text{km}$ 인 표본에 대해서 Fourier 분석을 시도했다. 그 결과 DB와 t 의 선택에 따라 다양한 파워 스펙트럼 개형을 보여주었으며, 비교적 파워가 강한 몇 개의 극대값이 나타났지만, 특별한 주기성은 검출되지 않았다. 그러나 02-250의 자료 중에서 $t \leq 250\text{Myr}$, $D \geq 30\text{km}$ 인 표본을 대상으로 동일한 작업을 수행한 결과 우리는 전혀 다른 모양의 파워 스펙트럼을 얻었다(02-250-30, 02-250-45). 즉, $t \leq 250\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 30\text{km}$ 인 충돌구 표본은 16.1Myr와 34.7Myr에서, $t \leq 250\text{Myr}$, $\Delta t \leq \pm 10\text{Myr}$, $D \geq 45\text{km}$ 인 표본은 16.1Myr와 30-35Myr에서 뚜렷한 피크가 나타났다. 이로부터 (지질학적인 시간 동안) $d \leq 1\text{km}$ 인 작은 천체는 규칙성 없이 충돌을 일으켰다는 해석이 가능한 반면, 1.5km보다 큰 천체에 대해서는 ~16Myr와 30-35Myr 주기의 지구 충돌 가능성을 고려할 수 있다. 이것은 Stothers(1998), Grieve & Pesonen(1996), Yabushita(1996)와 Matsumoto & Kubotani(1996)의 분석결과와 부합된다.

앞서 언급한 바와 같이 $D \geq 45\text{km}$ 인 충돌구는 $d \geq 3\text{km}$ 급 소행성 및 혜성에 의해 형성되며, 이러한 천체는 충돌과 함께 대량멸종을 불러일으키는 것으로 알려져 있다(Montanari et al. 1998). 이 작업을 통해서 우리는 충돌주기의 존재 가능성을 재확인했으며, 충돌구 나이의 정밀도는 물론, t 와 D 의 범위, 그리고 데이터베이스의 선택이 미행성의 지구충돌 역사를 재구성하는데 중요한 요소로 작용한다는 사실을 알았다. 보다 엄밀한 분석을 위해서는 통계적 접근방법이 필요할 것으로 보인다. 이와 함께 우리는 지질 경계면과 '충돌' 시점이 대체로 일치한다는 점을 재확인했다(Moon et al. 2001). DB02는 과거 사용했던 데이터베이스에 비해 연령 측정오차가 크게 개선되었기 때문에 주기분석은 물론, 충돌연대와 지질 경계면을 비교하는데 큰 이점을 갖는다. 향후 지질 경계면과 나이가 일치하

는 새로운 충돌구가 발견되거나, 좀 더 정밀한 연령측정 결과가 발표될 경우 우리는 미행성의 충돌 주기에 관해서 보다 신뢰성 있는 분석을 시도할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글: 이 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업과 한국천문연구원의 “우주관측기술 개발” 연구사업의 지원으로 수행되었습니다. 그리고 이 연구에 사용된 충돌구 자료는 Earth Impact Database(2002)로서, University of New Brunswick의 PASSC(Planetary and Space Science Centre)에서 제공한 것입니다. 자료 문의에 대해서 친절하게 답해준 University of New Brunswick의 James Whitehead 박사와 논문 초고의 오류들을 지적해주신 심사위원께 감사드립니다.

참고문헌

- Alvarez, W., & Muller, R. A. 1984, *Nature*, 308, 718
- Earth Impact Database 2002, <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/> (Accessed: 5/10/2002)
- Geological Survey of Canada 1995, Terrestrial Impact Crater Database, <http://gdcinfo.agg.emr.ca/cb-bin/crater/crater.table> (No longer exists.)
- Geological Survey of Canada 1996, Terrestrial Impact Crater Database, <http://gdcinfo.agg.emr.ca/cb-bin/crater/crater.table> (No longer exists.)
- Geological Survey of Canada 1998, Terrestrial Impact Crater Database, <http://gdcinfo.agg.emr.ca/cb-bin/crater/crater.table> (No longer exists.)
- Grieve, R. A. F. 1987, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 15, 245
- Grieve, R. A. F. 1991, *Meteoritics*, 26, 175
- Grieve, R. A. F. 1993, *Compilation of Crater Data obtainable on application to Grieve*
- Grieve, R. A. F. 2001, private communication
- Grieve, R. A. F., & Pesonen, L. J. 1996, *Earth, Moon, Planets*, 357
- Grieve, R. A. F., Sharpton, V. L., Goodacre A. K., & Garvin. J. B. 1985, *Earth and Planetary Science Letters*, 76, 1
- Grieve, R. A. F., & Shoemaker, E. M. 1995, in *Hazards due to Comets and Asteroids* (Tucson: University of Arizona Press), 417
- Jansa, L. F., Aubry, M. P., & Gradstein, F. M. 1990, in *Global Catastrophes in Earth History*, ed. Sharpton, V. L. & Ward, P. D. (Boulder: Geological Society of America), p.223
- Jetsu, L. 1997, *A&A*, 321, L33
- Jetsu, L., & Pelt, J. 2000, *A&A*, 353, 409
- Master, S., & Reimold, W. U. 2001, *Ceme. Conf.*, No.3072
- Matsumoto, M., & Kubotani, H. 1996, *MNRAS*, 282, 1407
- Montanari, A., Bagatin, A. C., & Farinella, P. 1998, *Planet. Space Sci.*, 46, 271
- Moon, H.-K., Min, B.-H., Fletcher, A. B., Kim, B.-G., Han, W., Chun, M.-Y., Jeon, Y.-B., & Lee, W.-B. 2001, *JA&SS*, 18, 191
- Rampino, M. R., & Stothers, R. B. 1984, *Nature*, 308, 709

- Seyfert, C. K., & Sirikin, L. A. 1979, in *Earth History and Plate Tectonics* (New York: Harper & Row), pp.1-504
- Shoemaker, E. M. 1998, *J.R.A.S. Canada*, 92, 297
- Steiger, R. H., & Jager, E. 1977, *Earth and Planetary Science Letters*, 36, 359
- Stothers, R. B. 1998, *MNRAS*, 300, 1098
- Tremaine, S. 1986, in *The Galaxy and the Solar System* (Tucson: University of Arizona Press)
- Weissman, P. R. 1995, *JPL Technical Report* (Pasadena: JPL)
- Yabushita, S. 1991, *MNRAS*, 250, 481
- Yabushita, S. 1996, *MNRAS*, 279, 727
- Yabushita, S. 2002, *MNRAS*, 334, 369