

## Neurospora crassa의 포자형성 주기에 미치는 빛파장과 중금속 이온의 영향 관계 조사\*

한 상 진

한림대학교 자연과학대학 생물학과

## The Correlation of Wavelengths with Heavy Metal Elements on the Circadian Rhythm Conidiation in *Neurospora crassa*

Sang-Zin Han

Department of Biology, Hallym University

### ABSTRACT

The most periodlengths( $\tau$ ) of conidiation of *Neurospora* were shortened in the medium with  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ , and  $\text{Cs}^+$  under the blue or green light. The higher the concentration of the heavy metal elements are, the shorter the circadian lengths are. The largest differences between the maxima- and minima circadian lengths showed in the medium with  $\text{LiCl}$ ,  $\text{RbCl}$ , and  $\text{CsCl}$  under the blue lights at 150 Lux, while the little differences of circadian lengths presented in 1 mM heavy metal elements at the 270Lux blue light.  $\text{Li}^+$  under the blue light effected extremely much and in the order of  $\text{Rb}^+$  and  $\text{Cs}^+$  on the conidiation of *Neurospora*.

Under the green lights at 270Lux, the smallest changes of the circadian lengths are resulted in the medium with heavy metal elements. The other way at the green light 150 Lux, the conidiation is stimulated by 1mM  $\text{LiCl}$  or  $\text{RbCl}$  for the average 0.71h and 0.29h longer than the periodlength of control 28.34h. The medium with  $\text{Li}^+$  under the green light has less effect on the conidiation rhythm of *Neurospora* than with  $\text{Rb}^+$  or  $\text{Cs}^+$ .

### 서 론

빵곰팡이인 *Neurospora*의 성장주기는 다른 생물체와 마찬가지로 일정한 환경조건에서 일주기적으로 이루어진다.<sup>1,2)</sup> 그러므로 일정한 환경조건을 벗어나게 되거나, 혹은 생체대사에 영향을 미치는 여러 가지 물질

이나 환경요소와 같은 Zeitgeber에 의하여 변화를 초래하게 된다.

이에 대하여 구체적으로 세포내의 생화학적인 변화,<sup>2,3)</sup> 온도,<sup>4,5)</sup> 광선의 광도나 파장의 효과<sup>6,7)</sup> 등에 관한 연구가 다수 발표되었다.

또한 파장이 다른 광선에 따라 생명체에 다양한 변

\* 이 논문은 1994학년도 한림대학교 학술연구 조성비 지원으로 이루어진 것임.

화를 주고 있는 것도 알려져 있다. 이를테면 초록색 이외의 광선은 식물에, 적색 이외의 광선은 동물에게 각각 성장, 발육, 활동주기 등에 크게 변화를 초래하는 요인이 되고 있다<sup>8)</sup>. 무엇보다 자외선이나 X-광선은 돌연변이나 발암의 요인이 되고 있음이 다각도로 규명되고 있다.<sup>9,10)</sup> 오존층의 변화로 인하여 적당히 차단되지 못한 유해한 광선과 과학기술의 발달로 광선이 용의 산업이 광범위해짐에 따라 생활에 유익하면서도 동시에 생명체에 해로운 변화를 초래하고 있는 것은 사실이다.

중금속 이온이나 방사선 물질도 성장의 일주기에 영향을 미친다는 실험결과가 보고된 바 있다.<sup>11,12)</sup> 그 뿐만 아니라 방사선 물질이 *Neurospora*의 포자형성에 변화를 주거나 유전인자의 돌연변이를 유발시킨다는 사실도 밝혀져 있다.<sup>11,13)</sup>

이와 같이 우리 환경의 여러 가지 물질로 인하여 많은 생물체에 형태적, 유전적으로 영향을 미친다는 연구가 계속 발표되고 있으나, 날로 발전하는 핵기술과 중금속 물질이용으로 자연환경에 잔존하는 방사선 물질이나 중금속 이온들이 병행하여 가중되는 대기오염에서 지구상에 투과되는 여러 가지 광선에 따라 생명체에 어떠한 변화를 유발시키는가는 아직 조사되어 있지 않은 상태이다. 이 논문은 방사선 물질로 이용되어지는 중금속 이온  $Li^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$ 이 각각 파장이 다른 광선과 복합적인 조건에서 과연 어떠한 영향을 미치게 되는가를 규명하기 위하여 민감하게 변화를 나타내는 *Neurospora*를 대상으로 성장상태 및 포자형성 주기의 변화를 조사하였다.

## 재료 및 방법

실험에 사용된 *Neurospora crassa*는 wild type 으로서 형태적 변이형 *bd csp*이며, 미국의 Fungal Genetics Stock Center, University of Kansas Medical Center, Kansas City에서 공급받아 실험 재료로 사용하였다.

Vogel's salts 0.3%, glucose 0.5%, arginine 이 포함된 원배양액<sup>14)</sup> 배양접시(지름 15cm)에 70 ml씩 일정표면이 되도록 넣어  $25 \pm 0.5^\circ C$ 의 온도와, 자연백색광 55~60Lux(20W/15)로 외부 요인이 차단된 항온기 안에서 72시간 배양시켜 자연성장시킨 다음, 새로 형성된 포자를 필요한 실험배양에 사용하였다. 접종시에는 배양액 12ml씩 채운 각 유리관(길이

60cm, 지름 1cm)에 같은 수의 세포가 들어가도록 72시간 배양시킨 접시에서 지름 5mm의 원통관으로 일정한 면적을 찍어 접종하였다. *Neurospora*는 매 2 주마다 새 배양액에 배양시켜 신선한 포자를 실험에 사용토록 하였다.<sup>15)</sup>

실험은 실내온도  $22 \pm 0.5^\circ C$ , 습도  $35 \pm 5\%$ 를 항상 유지할 수 있는 실험실에서 9일간 수행되었으며, 온도는 온도기록기(SS-100P-6P, KONICS)의 6개 감지기를 직접 실험유리관 위에 놓아 *Neurospora*의 성장상태가 일정온도에서 이루어지는 지를 자동기록 점검하였다.

광선의 파장에 따른 방사선 물질의 영향을 알아보기 위한 실험으로 원배양액에 방사선 물질인 알칼리성 중금속 이온이 함유된  $LiCl$ ,  $RbCl$ ,  $CsCl$ (s.c. Merck)을 농도별로 1mM부터 고농도로 각각 혼합한 배양액에 *Neurospora*를 접종한 것을 가시광선중 파장이 짧은 청색광(420nm~480nm)과 녹색광(480nm~560nm)을 150Lux(40W/15)와 270Lux로 각각 설치하여 성장상태 및 주기를 조사하였다. *Neurospora*의 성장 끝부분을 매일 정해진 시간에 표시하여 각 유리관마다 실험 기간동안 24시간 성장한 길이를 계산하고, 매번 포자가 형성된 중앙부와 중앙부 사이의 성장길이를 *Neurospora*의 하루 주기로 하여 평균치를 산출하였다. 같은 농도로 배양시킨 *Neurospora*를 최소한 7개 유리관을 취하여 *Neurospora*의 성장주기를 좀 더 정확한 수치를 낼 수 있도록 하였으며, 또한 같은 조건의 실험을 3회씩 반복함으로써 총평균을 산출해 내었다. 통계방법은 컴퓨터 프로그램을 사용하여 얻어진 평균치를 Siegel의<sup>16)</sup> 공식에 따라 유의성 여부를 판별하였다.

## 결과 및 고찰

방사선 물질의 여러 가지 농도와 광선파장의 광도에 따라 9일간 실험실에서 배양시킨 *Neurospora*를 꺼내어 매일 24시간동안 자란 길이를 계산해 내고, 포자가 형성된 것에서 평균 주기를 계산한 결과 청색광 및 녹색광 상태에서 각각  $LiCl$ ,  $RbCl$ ,  $CsCl$ 의 농도별로 다음 table 1과 2와 같은 포자형성주기( $\tau$ ) 결과가 나왔다.

모든 방사선 물질의 농도에 따라 포자형성 주기에 현저하게 나타난 현상은 고농도일 수록 큰 차이로 주기가 단축된 것이다. 포자형성주기의 단축된 차이는  $x$

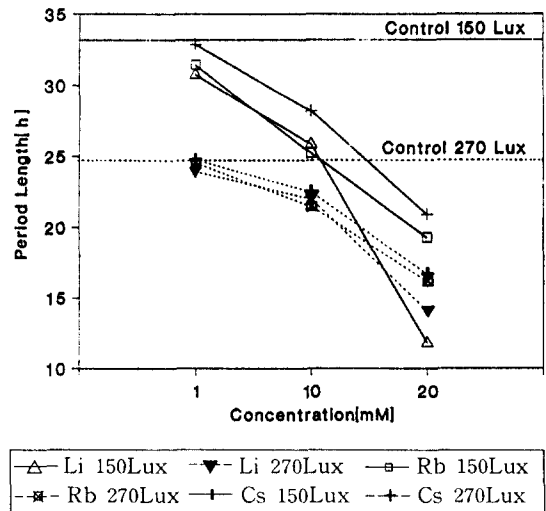
**Table 1.** Periodlengths( $\tau$ ) of conidiation of *Neurospora* in the medium with various concentrations of LiCl, RbCl, and CsCl under the blue light at the intensity of 150 Lux or 270Lux.

Intensity of Light	150 Lux	270 Lux
Periodlength	$\tau$ (h) $\pm$ SE	
Control	33.22 $\pm$ 0.21	24.77 $\pm$ 0.30
LiCl(mM)		
1	30.77 $\pm$ 0.26	23.95 $\pm$ 0.21
10	25.90 $\pm$ 0.29	22.04 $\pm$ 0.22
20	11.81 $\pm$ 0.27	14.12 $\pm$ 0.21
RbCl(mM)		
1	31.43 $\pm$ 0.26	24.56 $\pm$ 0.28
10	25.25 $\pm$ 0.30	21.52 $\pm$ 0.24
20	19.30 $\pm$ 0.15	16.20 $\pm$ 0.16
CsCl(mM)		
1	32.87 $\pm$ 0.22	24.78 $\pm$ 0.17
10	28.24 $\pm$ 0.32	22.52 $\pm$ 0.27
20	20.95 $\pm$ 0.18	16.73 $\pm$ 0.34

\*The given values are averages of independent measurements. SE: Standard error.

<sup>2</sup>-검사에서 매우 유의성 있는 결과로 나타났다( $p > 0.05$ ). LiCl 20mM의 경우 150Lux에서 대조군의 포자형성 주기 33.22시간보다 21.41시간 짧은 11.81 시간으로 최다의 단축된 현상을 보였다(Table 1, Fig. 1). 또한 Fig. 1에 나타난 바와 같이 저농도인 경우 모두 최소의 영향을 받으나, 150Lux에서보다 광도가 높은 270Lux에서는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 오히려 CsCl 1mM에서는 0.01시간 미소한 차이로 연장되어 거의 영향이 없었다. *Neurospora*는 청색광에서 al-3(c)를 자극하여 포자형성을 증가시키고, 그럼으로써 포자형성 전사가 활발히 일어나게 되어 mRNA에 의해 초기단계에 포자형성을 촉진시키는 것으로 알려져 있다.<sup>17)</sup> 청색광은 또한 에너지 공급을 증가시켜 수명이 연장되기도 한다는 *Rhodobacter*에 대한 실험보고도 있다.<sup>18)</sup> 이와 유사하게 세포내 GUS( $\beta$ -glucuronidase)가 청색광에 의해 활성도가 최고 100배까지 증가됨으로써 유전자에 따라 다양하게 조절하는 요소로 작용한다는 사실도 밝혀졌다<sup>19)</sup>. 약간의 파장주기의 차이는 있으나 청색광은 특정한 효소나 유전인자에 자극을 주어 포자형성이나 성장대사를 촉진시키도록 유발하는 조절요소로 작용함을 알 수 있다. 그리하여 mRNA의 양적 증가가 일어

**Results under the Blue Light**



**Fig. 1.** Periodlengths( $\tau$ ) of conidiation of *Neurospora* in the medium with different concentrations of LiCl, RbCl, and CsCl under the blue light at the intensity of 150Lux or 270Lux.

나고, 일정한 범위내의 광도에서는 저농도의 방사선 물질에 의한 영향을 거의 차단한 채, *Neurospora*에서 포자형성이 촉진되어 일주기가 연장되는 변화를 보인다고 할 수 있다.

Li<sup>+</sup>은 고등생물의 활동주기를 연장시키는 효과를 가지고 있다<sup>20,21)</sup>. Li<sup>+</sup>이 대사작용에 영향을 미치어 대사리듬을 느리게 작동시킴으로써 식물의 운동이나 동물의 활동상태를 지연시켜 주기가 연장된다고 본다. 그러나 *Neurospora*의 경우는 단축효과를 가지고 있다고 밝혀져 있다<sup>22)</sup>. 이는 해당과정에서 Mg<sup>++</sup>과 효소가 복합체를 형성하여 고에너지 인산화합물이 생성되는 두번째 반응에서 촉매역할을 하는데, 이때 Li<sup>+</sup>이 Mg<sup>++</sup> 작용을 저해시킴으로써 복합체가 형성되지 못하여 해당과정을 통한 에너지 공급을 차단시키게 되므로 세포내 대사와 성장에 영향을 미치게 되고<sup>23)</sup>, 따라서 *Neurospora*의 포자형성주기의 단축을 초래하여, Li<sup>+</sup>이 고농도일수록 극심한 저해가 일어나 더 이상 성장이 이루어지지 않은 것을 알 수 있다. 그러나 청색광 150Lux에서 2.45시간이 단축되고, 270Lux에서 최소한 0.82시간 단축된 것으로 보아 도리어 고광도에서 저해작용이 덜 일어나는 것으로 보여진다.

Rb<sup>+</sup>이나 Cs<sup>+</sup>에 의해서도 Li<sup>+</sup>의 경우와 마찬가지로

성장주기의 단축효과를 보였다. 150Lux에서 대조군의 포자형성주기 33.22시간에 비하여  $Rb^+$ 에 의한 단축시간은 최고 19.3시간,  $Cs^+$ 에 의해서는 20.95시간의 주기로 되어 각각 13.92시간 및 12.27시간이나 단축되었다. 반면에 최소의 효과가 270Lux에서 대조군의 24.77시간에 비하여  $Rb^+$ 의 배양액에서 0.21시간 나타나고, 한편  $Cs^+$  배양액에서 0.01시간의 미소한 차이로 연장되는 반응이 나타났다. 이 결과는  $Li^+$ 이나  $Rb^+$ 보다  $Cs^+$ 의 효과가 같은 농도에서 가장 약하게 나타나고,  $Li^+$ 이 청색광에서 가장 강한 영향을 미치는 것이다. 역시 *Oxalis*에서도  $RbCl$ 의 50mM 이상에서는 세포내  $Rb^+$  농도가 높을 수록 단백질 합성률이 떨어지면서 운동주기가 저하되는 현상을 보였고,  $Cs^+$ 이 40mM까지는 주기가 연장되고, 그 이상의 농도에서는 주기가 단축되었다.<sup>12)</sup>

그러므로 청색광에 대한 각 방사선 물질의 변화도  $Li^+$ 이 대조군보다 가장 차이가 많이 나타나고,  $Cs^+$ 에서는 가장 적은 변화를 보임으로써  $Li^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$ 의 순으로 영향을 받는다는 것을 알 수 있다(Fig. 1).

Table 2에서 볼 수 있는 것처럼 녹색광에서도 모든 방사선 물질의 농도에 따른 포자형성이 고농도일 수록 큰 차이로 주기가 단축된 현상이 두드러지게 나타났

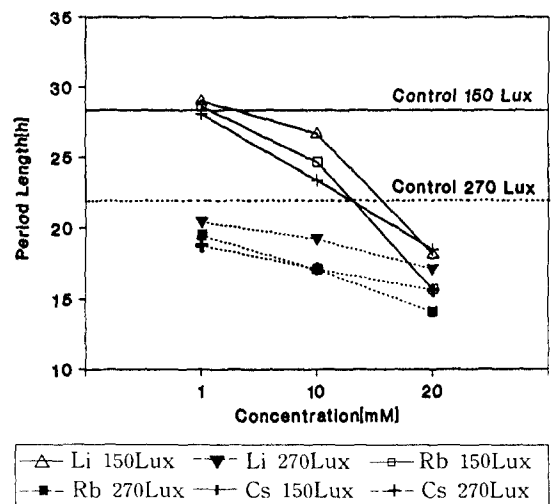
다.  $RbCl$  20mM의 경우 150Lux에서 포자형성주기가 15.71시간으로 대조군의 28.34시간보다 12.63시간이나 짧아진 최다의 단축현상을 보였다(Table 2, Fig. 2). 포자형성주기의 변화는  $\chi^2$ -검사에서 매우 유의성 있는 결과로 나타났다( $p > 0.05$ ). 또한 Fig. 2에 나타난 바와 같이 저농도인 경우는 고농도에서보다 모두 최소의 영향을 받으나, 청색광에서와는 달리 광도가 낮은 150Lux에서 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 오히려  $LiCl$ 과  $RbCl$ 에서의 성장은 29.05시간 및 28.63시간으로 녹색광에 의해 대조군의 포자형성 주기 28.34시간보다 0.71시간 및 0.29시간 연장되는 현상을 보였다. *Rhizobia*와 *Agrobacterium*에서  $Rb^+$ 에 의해 성장이 촉진된 실험결과가 발견되었고, 여기에서  $Rb^+$ 이  $\alpha$ -glucosidase에 자극을 유발시킨 요인으로 밝혀졌다<sup>21)</sup>. 보통 일정한 조건에서 *Neurospora*는 방사선 물질에 의하여 저농도에서부터 단축된 현상을 지속적으로 보였으며, 20배 높은 농도까지는 성장주기가 짧아졌다가 그 이상의 고농도에서는 성장을 보이지 않을 정도로 강한 영향을 받는다<sup>24)</sup>. Srivastava 등은<sup>25)</sup> *Vicia faba*에서 470nm의 청색광에 의해 기공이 광수용체를 조절할 수 있도록 작용하며, 520nm~695nm의 황색광에서도 zeaxanthin

**Table 2.** Periodlengths( $\tau$ ) of conidiation of *Neurospora* in the medium with different concentrations of  $LiCl$ ,  $RbCl$ , and  $CsCl$  under the green light at the intensity of 150Lux or 270Lux.

Intensity of Light	150 Lux	270 Lux
Periodlength	$\tau(h) \pm SE$	
Control	28.34 $\pm$ 0.27	22.04 $\pm$ 0.34
$LiCl$ (mM)		
1	29.05 $\pm$ 0.35	20.45 $\pm$ 0.31
10	26.69 $\pm$ 0.23	19.25 $\pm$ 0.22
20	18.19 $\pm$ 0.19	17.15 $\pm$ 0.23
$RbCl$ (mM)		
1	28.63 $\pm$ 0.34	19.52 $\pm$ 0.28
10	24.68 $\pm$ 0.32	17.14 $\pm$ 0.33
20	15.71 $\pm$ 0.23	14.11 $\pm$ 0.37
$CsCl$ (mM)		
1	28.09 $\pm$ 0.31	18.83 $\pm$ 0.31
10	23.37 $\pm$ 0.22	17.17 $\pm$ 0.28
20	18.50 $\pm$ 0.25	15.68 $\pm$ 0.33

\* The given values are averages of independent measurements. SE: Standard error.

### Results under the Green Light



**Fig. 2.** Differences between the maxima- and minima circadian lengths in the medium with  $LiCl$ ,  $RbCl$  and  $CsCl$  under the various lights.

의 조절이 일어나 똑같은 작용이 일어날 수 있다고 하였다. 이같은 현상에서 광도가 낮은 녹색광에서는 저농도에 한해서 방사선 물질의 저해작용이 일어나지 않고, 고광도의 청색광에서와 마찬가지로 특정한 인자에 초기단계에 포자형성이 발현되도록 촉진시키어 오히려 연장되는 결과를 초래하는 것으로 보여진다<sup>17)</sup>. 이는 보통 일정한 조건에서 *Neurospora*의 포자형성주기가 방사선 물질중에서도 Cs<sup>+</sup>에 의해 가장 영향을 많이 미쳤으며, 그 다음으로는 Rb<sup>+</sup>이 크게 영향을 미쳤고, Li<sup>+</sup>이 가장 적은 영향을 보인 것과 같은 결과로<sup>23)</sup> 방사선 물질들이 녹색광에 의하여 포자형성에 변화를 보이거나 저광도에서는 도리어 촉진작용이 형성되고, Li<sup>+</sup>이나 Rb<sup>+</sup>에서 배양된 포자주기에 가장 작용이 잘 일어나 연장된 결과가 나타나며, Cs<sup>+</sup>에서는 가장 짧은 포자형성 주기를 보임으로써 청색광에서와는 반대로 Cs<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>순으로 영향을 받는다는 것을 알 수 있다(Fig. 2).

광선의 파장주기와 광도에 따라 나타난 실험결과를 Fig. 3에 표기한 바와 같이 녹색광에서보다 청색광에서 훨씬 많은 변화를 보이고 있다. 물질에 따라 저농도와 고농도에서의 포자형성주기가 비례적인 상관관계를 보여지지 않는으나(p>0.05), 청색광 150Lux에서 최소한 11.92시간으로 18.96시간까지 크게 영향을 미치고 있으며, 반면에 녹색광 270Lux에서 크게 3.30시간, 적게는 2.38시간으로 농도별 변화가 가장 적은 결과를 보였다. 여기에서 고광도에서보다는 저광도에서 현저한 차이로 변화를 보인다는 것을 알 수 있다. 그러므로 파장에 따라 영향을 미치는 바가 다르나, 또한 같은 파장의 광선이라도 광도에 따라 판이한 변화를 초래한다는 것을 알 수 있다.

최근에 저준위 방사선이 살균효과가 있으며 일부 생물에서는 세포노화방지로 수면연장효과를 보인다는 결과가 제시되었다<sup>26)</sup>. 그러나 저준위 방사선이 *Neurospora*에 별 영향을 미치지 않는다고 하나<sup>11)</sup>, 잔존물질이 1mM일지라도 성장주기에 단축 내지 장애 효과를 보이는 것이 증명되었다<sup>23)</sup>. Jordan이<sup>27)</sup> 이미 발표한 바와 같이 생물체에 따라 방사선 물질과 광선에 대한 민감도의 차이는 크게 나타난다. 생리학적, 유전학적 위험부담은 하등생물보다는 고등생물에게, 체구가 작은 것보다는 노출부분이 더 많은 큰 생물에게 더욱 높다고 하였다. 본 실험에서 나타난 결과에 의하면 광선과 방사선 물질의 반응에 차이를 보이므로 생물마다 이해(利害)가 되는 광선의 파장을 알아내고, 동시에

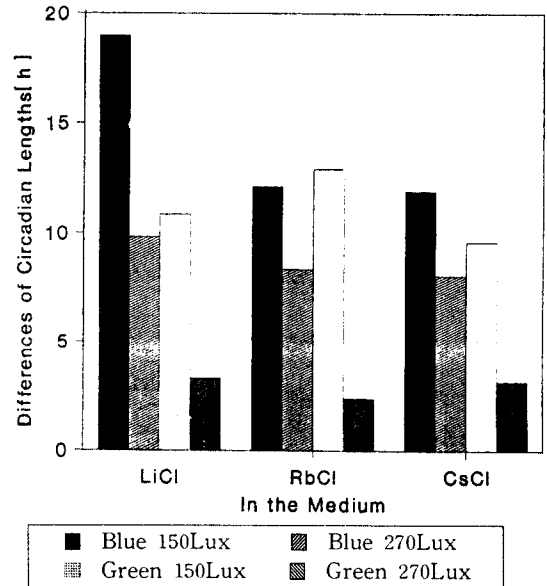


Fig. 3. Differences between the maxima- and minima circadian lengths in the medium with LiCl, RbCl, and CsCl under the various lights.

방사선 물질에 따라 적절한 효과를 보이는 광도의 기준을 연구조사한다면 점차 오염되어 가는 환경내에서 피해를 최소한으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 생리적, 유전적으로 유익하게 응용할 수 있는 기초기술 제공도 가능하리라고 본다.

### 결 론

청색광 및 녹색광 조건에서 Li<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>이 각각 포함된 배양액으로 *Neurospora*의 포자형성주기를 관찰한 결과 대체로 단축된 현상을 보였으며, 고농도일수록 짧은 주기를 나타내었다.

청색광 150Lux에서 최고와 최저의 변화의 폭이 가장 컸을지라도(Fig. 3) 청색광 270Lux에서는 방사선 물질의 1mM 저농도에서 미소한 변화를 보였으며, Li<sup>+</sup>이 포함된 배양액에서 성장한 *Neurospora*가 가장 큰 변화를 보인 반면, Rb<sup>+</sup> 다음으로 Cs<sup>+</sup>이 가장 적게 영향을 받는 것으로 밝혀졌다(Table 1, Fig. 1). 한편 녹색광에서 배양된 *Neurospora*는 270Lux에서 방사선 물질에 의한 최고와 최저의 변화차이가 가장 적은 포자형성주기로 성장이 상당히 부진하였으나(Fig. 3),

150Lux에서는 반대로 방사선 물질에 의해 대조군의 주기 28.34시간보다  $\text{Li}^+$ 이나  $\text{Rb}^+$ 에 의해 0.71시간 및 0.29시간이 더 촉진된 주기현상이 나타났다(Tab. 2, Fig. 2). 또한 *Neurospora*는 녹색광에서 배양될 때  $\text{Li}^+$ 에 의한 장애가  $\text{Rb}^+$ 이나  $\text{Cs}^+$ 에 비하여 가장 적었다.

### 참 고 문 헌

- Dunlap, J. C., Closely watched clock. *TIG* 6, 159-165(1990)
- Brody, S., C. Dieckmann, and S. Milolajczyk, Circadian rhythms in *Neurospora crassa*: the effects of point mutations on the proteolipid portion of the mitochondrial ATP synthetase, *Mol. Gen. Genet.* 200, 155-161(1985)
- Cornelius, G. and L. Rensing, Circadian rhythm of heat shock protein synthesis of *Neurospora crassa*. *Euro. J. Cell Biol.* 40, 130-132, (1986)
- Loros, J.J. and J.J. Feldman, Loss of temperature compensation of circadian period length in the *frq-9* mutant of *Neurospora crassa*. *J. Biol. Rhythms.* 1, 187-188(1986)
- Mattern, D.L., L.R. Forman, and S. Brody, Circadian rhythms in *Neurospora crassa* : A mutation affecting temperature compensation. *Cell Biol.* 79, 825-829(1982)
- Sargent, M.I., and W.R. Briggs, The effects of light on a circadian rhythm of conidiation in *Neurospora crassa*. *Plant Physiol.* 42, 1504-1510(1967)
- Lauter, F.R., and V.E.A. Russo, Blue light induction of circadian specific genes in *Neurospora crassa*. *Nucleic Acids Res.* 19(24), 6883-6894(1991)
- 한상진, 바이오 리듬의 규명과 응용. 도서출판 아카데미 서적(1993)
- de Serres, F.J., Comparison of mutational changes induced by ultraviolet light,  $^{85}\text{Sr}$  gamma rays, and carbon in *Neurospora crassa*. In: *Advances in Radiation Research. Biology and Medicine.* (J.F., Duplan, editor). New York: Gordon and Breach, Science Publishers, Inc. 1, 377-384(1973)
- Nemerofsky, A., The interactive effect of ultraviolet irradiation and 5-bromouracil at the *rib-1* locus in *Neurospora crassa*. *Can. J. Genet. Cytol.* 17, 275-278(1975)
- Chung, Y.H., M.S. Chung, and S.Z. Han, Effects of low-level radioactive irradiation on circadian rhythm of *Neurospora crassa*. *Env. Mutagens & Carcinogens* 11-1, 1-11 (1991)
- Rinnan, T., and A. Johnsson, Effects of alkali ions on the circadian leaf movements of *Oxalis regnellii*. *Physiol. Plant.* 66, 139-143 (1986)
- Feldman, J.F. and M.N. Hoyle, Isolation of circadian clock mutants of *Neurospora crassa*. *Genetics.* 82, 9-17(1973)
- Vogel, H.J., Distribution of lysine pathways among fungi: evolutionary implications. *Am. Natural.* 98, 438-556(1964)
- Dharmananda, S., and J.F. Feldman, Spatial distribution of circadian clock phase in aging cultures of *Neurospora crassa*. *Plant Physiol.* 63, 1049-1054(1979)
- Siegel, S., On parametric statistics for the behavioural sciences. McGraw-Hill, New York, Toronto, London(1956)
- Arpaia, G., A. Carattoli, and G. Macino, Light and development regulate the expression of the albino-3 gene in *Neurospora crassa*. *Developm. Biology* 170, 626-635(1995)
- Hess, S., K.J. Visscher, T. Pullerits, V. Sundstom, G.J.S. Fowler, and C.N. Hunter, Enhanced rates of subpicosecond energy transfer in blue-shifted light harvesting LH2 mutants of *Rhodobacter sphaeroides*. *Biochemistry* 33, 8300-8305(1994)
- Han, S.Z., Lithiumchloride changes sensitivity of hamster rhythm to light pulses. *J. Interdis. Cyc. Res.* 15, 139-146(1984)
- Lubberstedt, T., C. E.H. Sudhir Sopory, K. Flieger, R.G. Herrmann, and R. Oelmuller, Promoters from genes for plastid proteins possess regions with different sensitivities toward red and blue light. *Plant Physiol.* 104, 997-1006 (1994)
- Johnsson, A., W. Engelmann, B. Pflug, and W. Klemke, Period lengthening of human circadian rhythms by lithium carbonate, a prophylactic for depressive disorders. *Brain Res.* 8, 129-147(1981)
- Hoelzle, I., and J.G. Streeter, Stimulation of

- $\alpha$ -glucosidases from fast-growing rhizobia and agrobacterium tumefaciens by  $K^+$ ,  $NH_4^+$  and  $Rb^+$ . *Can. J. Microbiol.* 36, 223-227(1990)
23. 한상진, The comparison of radioactive elements  $Li^+$ ,  $Rb^+$ , and  $Cs^+$  effect on the growth circadian rhythm in *Neurospora crassa*. *Kor. J. Environ. Toxicol.* 8, 11-17(1993)
24. Kornblatt, M.J., and R. Musil, The inhibition of yeast enolase by  $Li^+$  and  $Na^+$ . *Arch. Biochem. and Biophysics.* 277(2), 301-305(1990)
25. Srivastava., A., and E. Zeiger, The inhibitor of zeaxanthin formation, dithiothreitol, inhibits blue-light-stimulated stomatal opening in *Vicia faba*. *Planta* 196, 445-449(1995)
26. 김정희, Adaptive response induced by low dose radiation. *Kor. J. Environ. Toxicol.* 17, 3 (1995)
27. Jordan, C.F., Ecological effects of nuclear radiation. Atomic Energy Commission. 331-344 (1983)