

저선량방사선(율)이 야생형 초파리 계통의 발생과 수명에 미치는 영향

한국수력원자력(주) 방사선보건연구원 방사선영향연구팀

이진우* · 성기문* · 김차순 · 남선영 · 양광희 · 진영우

— Abstract —

Low-dose Gamma-irradiation Effect on Early Stage Development and Lifespan in Various Strains of *Drosophila melanogaster*

Jin Woo Lee*, Ki Moon Seong*, Cha Soon Kim, Seon Young Nam, Kwang Hee Yang, Young-Woo Jin

*Division of Radiation Effect Research, Radiation Health Research Institute,
Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.*

Objectives: Although ionizing radiation is recognized as being harmful to humans, debate continues regarding the effects of low doses of ionizing radiation. Some studies have reported that low doses of ionizing radiation have a bio-positive effect, namely hormesis, and many researchers have attempted to find concrete and scientific evidence to prove this. To determine whether the discrepancy in effects of low doses of ionizing radiation arises from genetic differences, a study with a multicellular organism system such as fruit flies is needed.

Methods: After irradiation at a low-dose rate of gamma radiation with chronic (0.2 Gy) and acute (0.2, 0.75 and 4 Gy), the pupa rate, eclosion rate and life span were examined with various wild type strains of *Drosophila melanogaster* such as W1118, Oregon-R, and Canton-S.

Results: The life span of Oregon-R exposed to both acute and chronic, low-dose radiation (0.2 Gy) was increased. Although there was some difference in the longevity between the acute and chronic radiation rate, no other differences were found. In Canton-S, only acute dose (0.75 Gy) increased the life span, but it did not in W1118.

Conclusions: Although there were some differences between wild type fruit fly strains in longevity, the low doses of ionizing radiation extended the life span of *D. melanogaster*. Further studies need to be carried out to explain the difference according to dose and dose rate of radiation in the tested strains.

Key Words: Low-dose radiation, *Drosophila melanogaster*, Lifespan

〈접수일: 2008년 4월 23일, 채택일: 2008년 7월 30일〉

교신저자: 진 영 우 (Tel: 02-3499-6660) E-mail: ywj@khnp.co.kr

* 공동 제1저자임 (These two authors contributed equally to this work.)

* 이 논문은 한국수력원자력(주) 연구개발사업(A08NJ23)의 지원으로 연구되었음.

서 론

초파리(*Drosophila melanogaster*)는 토마스 H 모간에 의해 흰 눈을 가진 돌연변이체가 발견된 이후, 신경생물학, 행동 발달학, 발생학, 세포신호전달 등과 같은 수많은 생물학적 연구들의 대표적 동물 모델로서 이용되고 있다. 이것은 초파리의 유전자 중 상당부분이 인간과 유사하고 여러 대사 및 신호 전달 체계가 진화학적으로 상호 보존되어 있으며 짧은 시간 안에 과학적 현상을 관찰할 수 있는 생활사를 가졌기 때문이다. 방사선을 이용한 초파리 연구는 X-ray에 의한 돌연변이 발생 연구에서부터, 돌연변이의 물리적 성질을 이해하기 위해 방사선을 염색체에 조사하는 실험까지 활발하게 이루어지고 있다¹⁻⁵⁾. 한편 방사선에 의한 생물학적 효과는 긍정적인 것과 부정적인 것 모두가 보고 되었는데, 특히 초파리 수명에 대해서는 조사선량에 따른 효과가 달리 나타나고 있다. 즉, 고선량방사선이 초파리의 수명을 단축시킨다는 결과들이 많이 보고 되었으나⁶⁾, 1960년대부터 저선량방사선에 의해서는 초파리의 수명이 연장된다는 결과가 지속적으로 보고 되고 있다⁷⁾. 이것은 저선량방사선이 초파리의 다양한 생활사 및 세포 내 생체 방어 시스템에 영향을 미치기 때문으로 생각된다^{8,9)}. 특히 초파리의 수명을 증가시키는 원인의 하나로 가벼운 스트레스를 제시하였는데, 초파리를 유충시기에 좁은 공간에 많이 넣어 밀도를 높여주면 그것으로 인한 스트레스가 세포 기작에 영향을 미쳐 성체의 수명을 증가시킨다는 것이다¹⁰⁾. 이처럼 가벼운 스트레스가 생명체에 이롭게 작용하는 현상은 저선량방사선에서도 유사하게 나타나며, 이를 '방사선 호메시스(Radiation hormesis)' 라고 정의한다¹¹⁾. Luckey(1982)의 논문에 따르면, 매우 적은 양의 방사선은 동물의 성장과 발달, 생식력, 수명 그리고 건강에 이로운 영향을 줄 수 있다는 것이다¹²⁾. 이상과 같이 초파리에서 방사선과 수명과의 관련성에 대한 일부 연구들이 있었지만 급성 및 만성 방사선피폭, 즉 선량률과 초파리 계통들의 생태적 변화의 상관성에 대한 연구는 전무하다. 따라서 이 연구에서는 여러 계통의 야생형 초파리를 이용하여 개체 수준에서 저선량방사선의 생물학적 영향을 규명함과 동시에 방사선민감성 연구의 기초 자료를 확보하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 초파리 배양 조건

초파리는 국내의 벤처기업인 제넥셀(Genexel)로부터 분양 받은 야생형인 W1118, Oregon-R, Canton-S 세 가지 계통을 사용하여 실험을 수행하였다. 초파리 유지

조건은 온도 25℃, 습도는 70% 그리고 광주기는 밤 12시간, 낮 12시간을 주어서 배양기 안에서 유지시켰다. 배지는 cornmeal, sugar, yeast, agar가 적절히 혼합된 배지를 사용하였다.

2. 방사선 조사

감마선 발생장치(¹³⁷Cs, IBL 437N)를 이용하여 급성 방사선은 0.8 Gy/min의 선량율로 각 선량 0.2 Gy(15초), 0.75 Gy(56초), 4 Gy(300초) 조사하였고, 만성 방사선은 저선량방사선 조사설비에서 11.11 mGy/hr의 선량으로 18시간 조사하였다. 방사선 조사는 산란 후, 3~4시간 동안 안정시킨 후에 알 단계에 조사하였다. 초파리는 각 초파리 계통에 따라 만성방사선(0.2 Gy)과 급성방사선(0.2, 0.75, 4 Gy)을 이용하여 4개의 선량그룹으로 구분하여 조사하였다.

3. 초파리 알 수집

성체가 된 지 3~4일된 초파리를 통하여 약 1시간 동안 비슷한 양의 알을 충분히 얻었다. 알의 숫자는 대략 200~300개 정도를 얻어 실험에 사용 하였다. 암·수가 교배하는 시간 동안에는 최대한 암 상태를 유지하고, 암·수의 비율은 3:2 비율로 암컷의 비율을 높여서 교배 성공률을 높여주었다. 교배와 산란을 하는 시간에도 빛을 제외한 다른 모든 조건은 앞에서 언급한 초파리 유지 조건과 일치하게 유지하였다¹³⁾.

4. 부화 관찰

방사선을 조사한 알에서 부화되어 유충 2기에 접어들은 초파리 유충들을 한 vial당 30마리, 처리군당 5 vial씩(처리군: 150마리/5vial) 옮겨주고 앞에서 말한 초파리 배양조건으로 유지하였다. 이렇게 옮겨진 유충은 약 7일이 지난 후, 번데기 상태를 지나 성체로 우화되었다. 번데기에서 우화한 초파리를 새로운 vial로 옮겨주고, 벽면에 붙어 있는 번데기 껍질의 탈피 여부를 관찰하여 남아 있는 번데기 껍질의 수와 옮겨준 유충의 수로 번데기율을 측정하고, 옮겨준 초파리 성체의 수를 통하여 우화율을 확인하였다. 각 변화율의 차이를 검증하고자 Z-검정(Z-test)을 수행하였다.

5. 수명 관찰

번데기에서 정상적으로 우화한 성체 초파리들을 초기 3주 동안은 매일 새로운 배지로 갈아주면서 관찰하다가 3

주 후부터는 일주일에 3회 정도 새로운 배지로 갈아주면서 매일 측정하였다. 초파리 수명곡선은 Kaplan-Meier survival analysis의 Wilcoxon test를 사용하여 통계분석을 하였다. Table 1의 날짜 측정은 Alexey Moskalev (2007)의 방법을 응용하여 측정하였다¹⁴⁾.

결 과

본 연구에서는 앞에서 자세히 언급하였듯이 저선량방사선을 알(egg)상태에서 조사한 후 번데기율, 우화율 그리고 수명을 측정하였다. 선택한 야생형 초파리 계통은 Oregon-R, Canton-S, W1118인데, 앞의 두 종은 방사선에 대한 생물학적 연구에 쓰이는 대표적 야생형이고, W1118의 경우, 초기부터 초파리 유전학 실험에서 많이 이용된 계통이다.

1. 번데기율 관찰

급성 방사선 0.2 Gy가 조사된 Oregon-R의 번데기율

에서 대조군보다 10% 이상의 증가를 나타냈고 (P=0.001), 다른 조사군에서는 증가를 확인할 수 없었다. 0.75 Gy가 조사된 W1118에서는 감소를 나타낸 반면 (P=0.0135), 다른 초파리 계통들에서는 대조군과 차이가 없었다. 그리고 4 Gy에서는 모든 계통이 대조군보다 낮게 나타났는데, 특히 다른 계통에 비해 Oregon-R이 급격한 감소를 보였다(P=0.0143)(Fig. 1A). 만성 방사선 0.2 Gy가 조사된 W1118과 Canton-S는 대조군과 차이가 없었고, Oregon-R은 통계적으로 유의성 있는 증가양상을 나타냈다(P=0.004)(Fig. 1B). 즉, 저선량방사선은 초파리의 번데기율을 증가시켰으며, Oregon-R계통은 급성 혹은 만성 방사선의 선량율에 관계없이 번데기율을 증가시켰다.

2. 우화율의 관찰

급성 방사선이 조사된 초파리 우화율의 경우, 0.2 Gy가 조사된 모든 초파리 계통에서 대조군에 비하여 증가하였으며 특히 다른 처리군보다 W1118에서 약 10% 정도

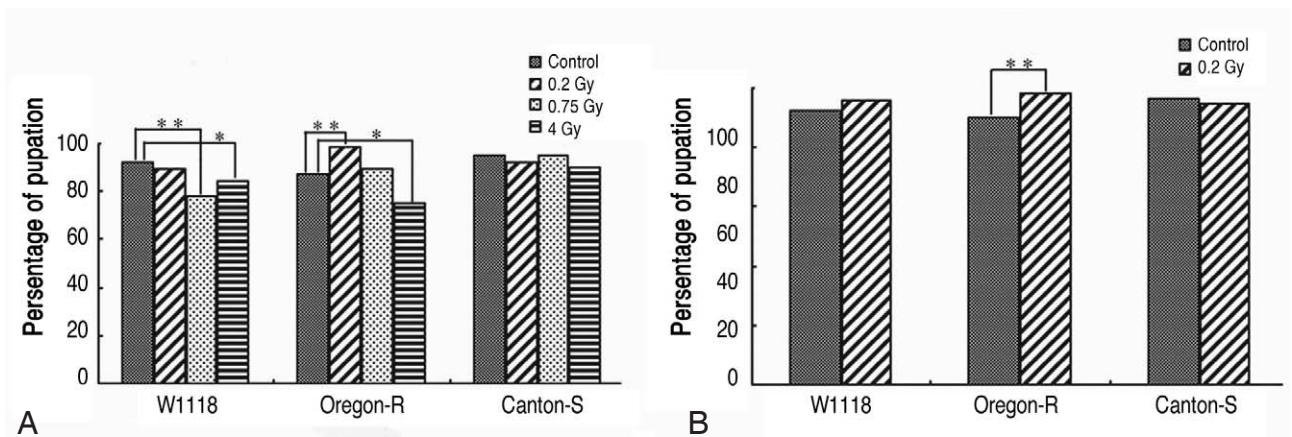


Fig. 1. The rate of pupation in W1118, Oregon-R and Canton-S after irradiation with acute 0.2 Gy, 0.75 Gy, 4 Gy (A), chronic 0.2 Gy (B) at the egg stage. Asterisk represents significant differences compared to control. (*P <0.05, ** P <0.01)

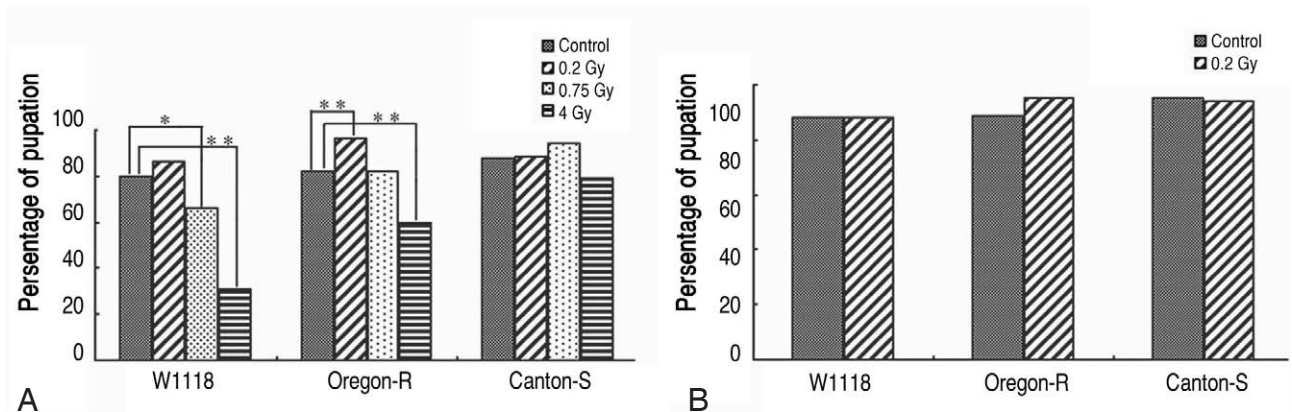


Fig. 2. The rate of eclosion in W1118, Oregon-R and Canton-S after irradiation with acute 0.2, 0.75, and 4 Gy (A), chronic 0.2 Gy (B) at the egg stage. *P <0.05, ** P <0.01.

높은 증가율이 나타났다($P=0.0041$). 0.75 Gy가 조사된 경우에는, W1118에서 유의성 있는 감소를 보인 반면 ($P=0.0135$) 다른 계통들은 대조군과 차이가 없었다. 그러나 고선량 4 Gy가 조사된 실험에서는 모든 초파리 계통들의 우화율이 대조군보다 낮게 나타났는데, 특히 다른 조사군보다 W1118에서 50% 이상 감소하였다($P=0.0000$) (Fig. 2A). 이것은 번데기율과 마찬가지로 우화율에서도 초파리의 계통에 따라서 선량에 대한 차이가 나타난다는 것을 보여준다. 만성 방사선 0.2 Gy를 조사한 우화율에서는 번데기율과 달리, 모든 초파리 계통들이 대조군과 비슷한 경향을 보이며 큰 차이를 나타내지 않았다 (Fig. 2B).

3. 급성 방사선 조사의 수명에 대한 영향 관찰

급성방사선을 선량 별로 조사한 모든 초파리 계통에 대하여 수명을 확인하였다. 급성 방사선이 조사된 W1118은 0.2 Gy가 조사된 경우 수명곡선에서 그 차이가 관찰되지 않았으나, 0.75 Gy와 4 Gy를 조사한 군에서는 각각 대조군에 비하여 더 낮은 생존율을 나타냈다($P=0.0014$, $P=0.02$). 그러나 4 Gy를 조사한 경우, 우화율

에서 0.75 Gy에 비하여 급격한 감소를 보인 반면, 초파리 성체의 수명에는 0.75 Gy 조사군과 큰 차이가 없었다¹⁸⁾ (Fig. 3A). 0.2 Gy를 조사한 Oregon-R의 경우에는 수명 30일이 지나면서 대조군보다 특이적으로 높은 생존율이 나타났으며 ($P=0.0268$), 0.75 Gy에서는 수명 40일까지 대조군보다 높은 생존율을 나타내다가 40일 이후부터 급격히 감소하였다 ($P=0.0008$) (Fig. 3B). 0.2 Gy가 조사된 Canton-S는 대조군과 큰 차이를 보이지 않고 비슷한 수명곡선을 보여주었다. 또한 0.75 Gy가 조사된 경우는 수명 전반에 걸쳐 대조군보다 높은 생존율이 나타났으며, 특히 45~56일경에는 대조군에 비하여 10% 이상의 높은 생존율을 보였다 ($P=0.024$). 그러나, 4 Gy가 조사된 경우는 수명 조사기간 전체에 대해서는 통계적으로 유의하지 않으나 ($P=0.4630$), 수명 관찰 이후 45일까지 대조군에 비하여 급격한 생존율 감소를 보였다 ($P=0.006$) (Fig. 3C).

4. 만성 방사선 조사의 수명에 관한 영향 관찰

W1118에 조사된 만성 방사선 0.2 Gy에 대한 수명 관찰 곡선은 통계적으로 유의하기는 하나, 그 차이가 뚜렷

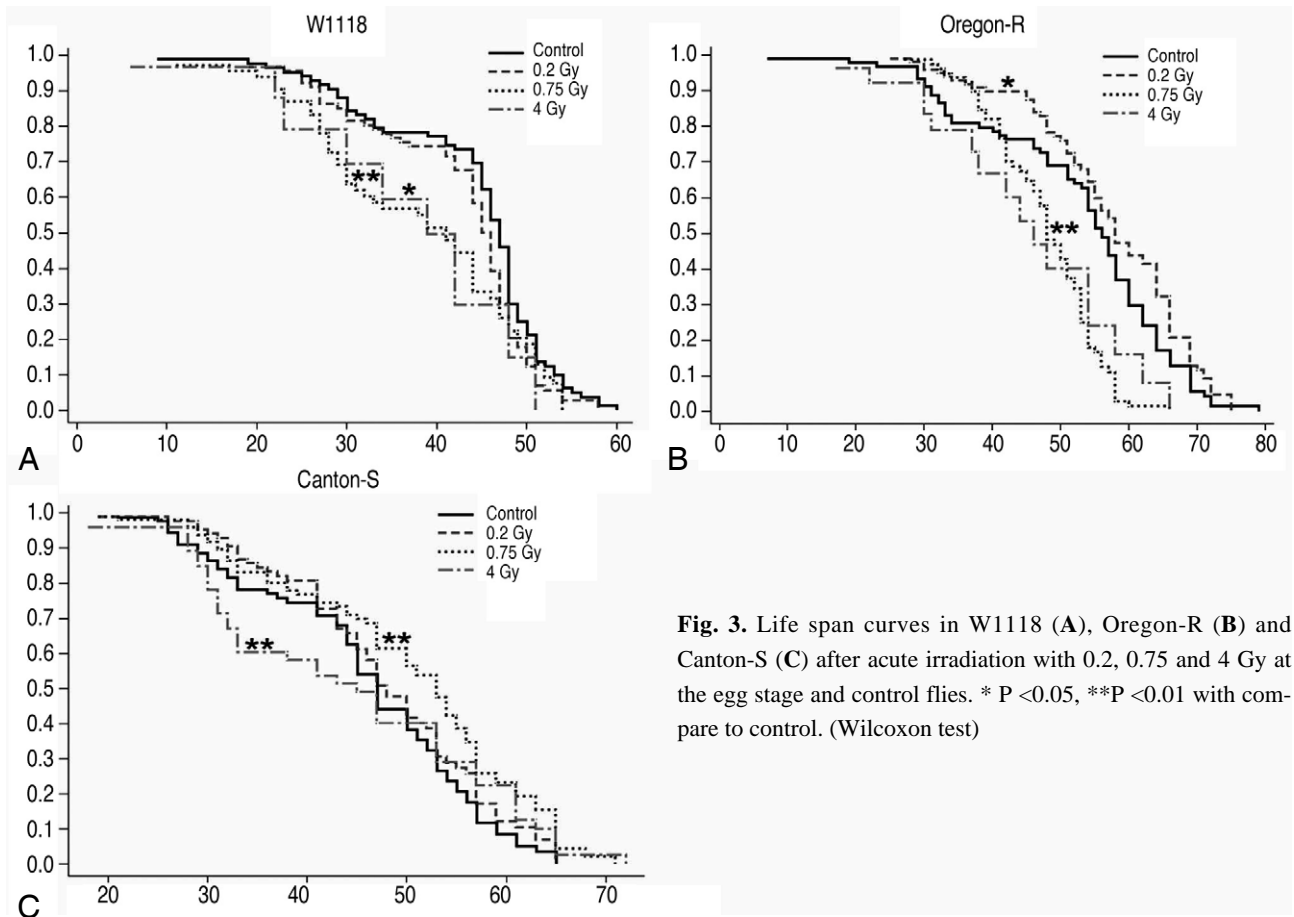


Fig. 3. Life span curves in W1118 (A), Oregon-R (B) and Canton-S (C) after acute irradiation with 0.2, 0.75 and 4 Gy at the egg stage and control flies. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ with compare to control. (Wilcoxon test)

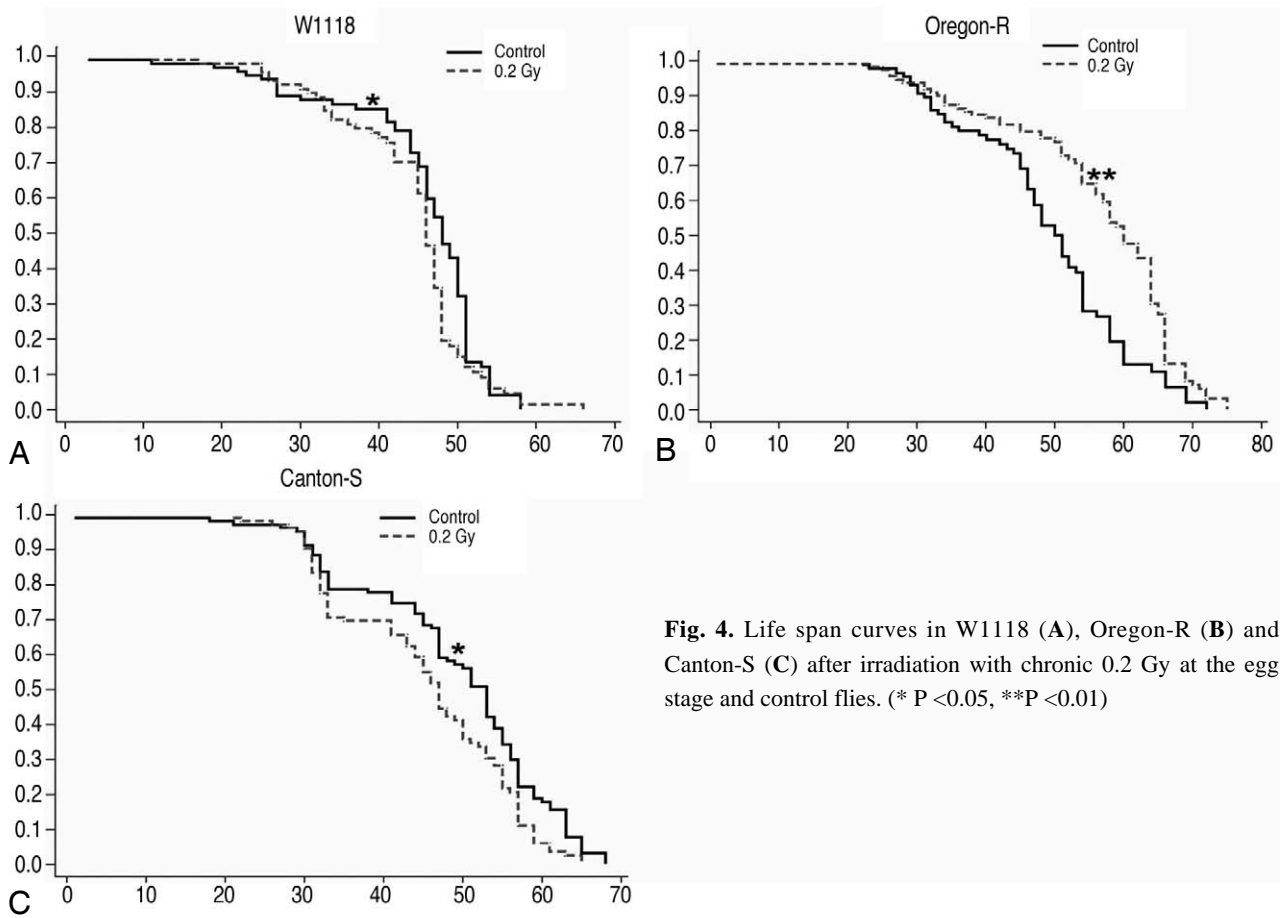


Fig. 4. Life span curves in W1118 (A), Oregon-R (B) and Canton-S (C) after irradiation with chronic 0.2 Gy at the egg stage and control flies. (* P < 0.05, **P < 0.01)

Table 1. Effect of irradiation on the lifespan in various wild type strains. Median (in days) of the 30%, 50%, 70%, 90% and Max (maximum) mortality in *D. melanogaster* after irradiation with different doses at the egg stage. N is the sample size

Strain	Dose rate	Irradiation	30%	50%	70%	90%	Max	N
W1118	chronic	0	45	48	49	51	58	105
		0.2	44	45	46	48	66	106
	acute	0	45	47	49	53	60	96
		0.2	42	46	46	51	58	104
		0.75	30	41	46	53	54	79
Oregon-R	chronic	4	34	38	47	51	51	37
		0	45	51	54	66	73	106
		0.2	53	59	64	69	77	121
		0	51	56	62	69	79	98
		0.2	53	58	66	72	75	116
Canton-S	acute	0.75	41	48	53	58	66	98
		4	35	46	54	62	66	72
		0	46	53	57	63	68	113
		0.2	41	47	54	59	65	118
		0	46	47	53	58	65	105
Canton-S	chronic	0.2	43	48	55	63	65	106
		0.75	43	53	56	65	71	113
		4	32	45	56	65	71	95
		0	46	53	57	63	68	113

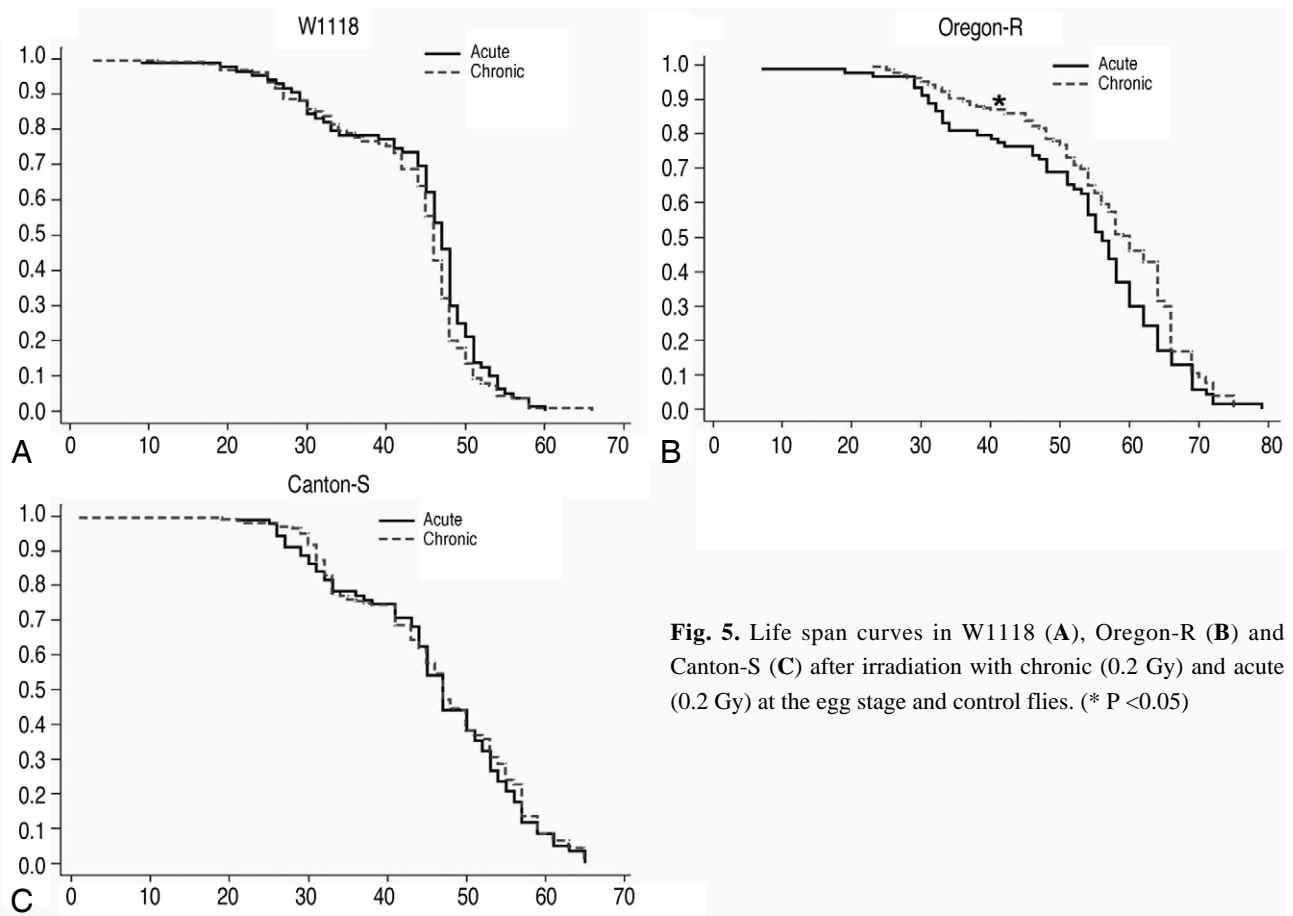


Fig. 5. Life span curves in W1118 (A), Oregon-R (B) and Canton-S (C) after irradiation with chronic (0.2 Gy) and acute (0.2 Gy) at the egg stage and control flies. (* P <0.05)

하지 않았다(P=0.048). 하지만, Oregon-R은 이전의 여러 연구에서 보고되었듯이 만성 방사선이 조사된 경우, 대조군에 비하여 뚜렷한 생존율 증가를 나타냈다(P=0.0001). Canton-S에서는 이러한 긍정적인 영향이 보이지 않았으며, 오히려 생존율이 대조군에 비하여 감소되는 경향이 나타났다(P=0.013)(Fig. 4).

5. 방사선 조사 선량율의 수명에 대한 영향 비교

초파리들의 방사선 조사 선량율에 대한 수명의 영향은 급성 방사선 0.2 Gy와 만성 방사선 0.2 Gy가 조사된 모든 초파리 계통에서 30%, 50%, 70% 그리고, 90%의 관찰 시기별 생존율로 확인하였다. 그 결과, 초파리의 수명에 대한 영향은 조사된 방사선 선량율과 관계없이 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다(Table 1). 하지만, Oregon-R의 경우는 급성, 만성 방사선 모두에서 시기별로 비슷한 경향을 보인 것으로 확인되었으나 수명곡선에서는 급성 방사선에 비하여 만성 방사선이 조사된 초파리들이 30~40일경에 다소의 증가를 나타냈다(P=0.0116)(Fig. 5).

고 찰

이 연구에서는 야생형 초파리의 저선량방사선에 대한 반응을 확인하기 위해서 번데기율, 우화율 그리고 수명에 대하여 계통적, 통계적 방법으로 접근하였다. 수명(life-span)은 각 개체 별로 나타낼 수 있는 변수이기도 하지만 군체의 생존능력을 가늠할 수 있는 지표도 될 수 있기 때문에, 방사선에 대한 생물체의 영향평가에 적합한 기준이 될 수 있다. 같은 맥락에서 초파리의 발생 단계 즉, 초파리 형태분화 관찰을 통하여 생물체에 대한 방사선 영향을 평가하는 것도 중요한 자료로 이용할 수 있다. 비록 호메시스에 대해 과학자들의 견해가 일치하지 못하고 있으나, 이 연구에서는 초파리의 번데기율과 우화율이 저선량방사선에 의하여 증가됨을 확인하였고, 일부 계통 초파리에서 수명연장 효과도 확인하였다. 비록 계통간의 차이는 존재하나 저선량방사선은 급성 혹은 만성의 선량율에 상관없이 번데기율을 증가시켰으며(Fig. 1), 더욱이 우화율에서는 야생형 계통에 관계없이 모두 증가시키는 결과를 나타냈다(Fig. 2). 특히, 급성 방사선 0.2 Gy를 조사한 Oregon-R에서 대조군 보다 높은 생존율을 보이

는 결과는 A. M. Vaiserman의 논문에서 0.25, 0.5 Gy가 조사된 Oregon-R의 수명이 증가한 결과와 일치한다¹⁵⁾(Fig. 3B). 그러나 이전의 보고에 따르면 Oregon-R에 급성 방사선 0.2 Gy를 조사하여 알에서 우화되기까지의 생존율을 관찰했을 때, 본 연구결과와 달리 대조군에 비해 생존율이 감소한 것으로 나타났다⁸⁾. 이는 방사선이 조사된 시기의 차이에서 나타나는 결과로서, 본 실험에서는 방사선 조사가 알 단계에서 이루어진 것과 달리, 이전 연구는 애벌레 단계에서 조사가 이루어졌기 때문이다. 즉, 우화시기에서 가까운 애벌레 단계에 조사된 방사선이 성체로의 변화에 영향을 주었을 것으로 여겨진다. 이와 같은 현상적 차이는 이전의 방사선에 대한 초파리 실험들에서도 나타났으며, 방사선 조사 단계에 따라 수명 연장에서도 차이를 보이고 있다^{8,16)}. 이와 더불어, 야생형 계통에 따라 차이가 있는 애벌레율도 방사선이 조사된 시기로 인한 결과로 짐작할 수 있다⁴⁾. 알 단계에서 조사된 방사선의 영향이 생체에 효과를 나타내기에 애벌레율은 시기적으로 다소 가까운 반면, 그 보다 오랜 적응기간을 갖는 번데기율에는 안정적으로 작용한 것이다. 그 결과 번데기율은 저선량방사선에 의해 야생형 계통의 차이 없이 모두 증가되었다. W1118은 방사선에 민감하게 반응한 반면, Canton-S와 Oregon-R은 특정 방사선 선량과 수명기간에 특이적으로 긍정적인 수명 연장 효과를 나타냈다. 이러한 결과는 번데기율이나 우화율에서 관찰된 것과 마찬가지로 비록 초파리의 계통에 따라 다소의 차이는 있으나, 저선량방사선이 생물체의 생존율을 높여주는 긍정적 효과를 보여주는 것이다. 특히, 선량율에 따라서 특정 기간에 다소 차이를 보이는 Oregon-R의 수명관찰 결과는 급성 혹은 만성과 같은 방사선 선량율이 여러 초파리 계통들의 번데기율이나 우화율에 영향을 주듯이 수명 연장 효과에도 야생형 계통에 따라 영향을 줄 수 있다는 것을 보여주며(Fig. 5), Oregon-R은 수명 뿐만 아니라 번데기율과 우화율에서도 만성 방사선이 전체적으로 영향을 주어 생존율이 높아졌다. 여러 계통간의 차이를 나타내는 원인으로 계통 자체의 유전적 차이와 오랜 시간에 걸쳐 축적된 환경적 차이를 생각해 볼 수 있다¹⁹⁾. 비록 많은 연구자들이 돌연변이형에 대한 대조군으로 동일하게 사용하고 있으나, 이 연구결과에서처럼 W1118 계통이 다른 야생형 계통과 달리 실험 전체에 걸쳐 방사선에 민감한 것은 초파리의 연구 초기에서부터 상대적으로 오랜 기간 실험용으로서 보호받아 계속 유지가 되어 외부 환경 자극에 대한 반응 및 적응력이 약해진 결과이며 이것은 야생형 계통간의 그 차이를 분명 반영한다 할 수 있다^{19,20)}. 지금까지 많은 연구에서 호메시스 효과가 뚜렷이 관찰되지 못한 것은 고선량방사선에 의한 생물체의 효과는 직접적이고 결정적인 반면, 저선량방사선의 효과는 간접적이고 확률

적으로 나타나기 때문으로 여겨진다. 더불어, 알 상태에서 조사한 방사선에 의하여 성체 이후에 발생하는 현상, 즉 수명의 연장을 확인하는 실험에서는 방사선 조사 이후, 길게는 약 80일까지 관찰하는 시간이 소요된다. 이 기간 동안에 개체에서 일어날 수 있는 많은 가능성, 예를 들면, 자극에 대한 민감성, 손상에 대한 반응과 회복 정도의 차이 등이 존재할 수 있기 때문에 뚜렷한 수명 연장효과를 나타내는데 한계가 있을 수 있다. 그럼에도 불구하고, 이 연구에서는 저선량방사선 자체가 생존율을 높일 수 있다는 것을 여러 야생형 초파리를 통하여 번데기율과 우화율, 수명연장 등 세분화된 발생과정을 통하여 확인하였다. 더불어, 비록 야생형 계통간의 방사선에 대한 근본적 차이는 이 연구에서 모두 밝히지 못하였으나, 이 결과들을 토대로 초파리의 생태학적, 유전학적 차이 등을 고려하여 보다 심도 있게 접근할 필요가 있다. 인간에 대한 저선량방사선의 효과는 초파리보다 훨씬 더 복잡하고 많은 요인이 결합되어 일어나는 현상으로 그 규명이 더욱 쉽지 않을 것이다. 따라서 초파리를 이용한 본 연구 결과를 바탕으로 유전적, 생화학적 실험을 설계하여 시행한다면 인간에 대한 저선량방사선(률)의 호메시스 효과도 분자적 수준의 기작까지 밝힐 수 있을 것이라 기대된다.

요 약

목적: 저선량방사선에 대한 생물학적 효과 연구들의 결과는 세포사멸, 암 발생 증가 등 부정적 효과에서부터 면역 활성화, 수명연장 등의 긍정적 효과 즉 호메시스(hormesis) 효과까지 다양하게 나타나고 있어 많은 연구자들 사이에서 논란이 되고 있다. 저선량방사선의 긍정적 효과를 세포 수준이 아닌 개체 수준에서 확인하고자 본 실험을 수행하였다.

방법: 이 연구에서는 저선량방사선(률)에 대한 생물학적 현상을 확인하기 위해, 다양한 야생형 초파리 계통에 감마 방사선(급성(acute): 0.2, 0.75, 4 Gy, 만성(chronic): 0.2 Gy)을 조사한 후, 그들의 번데기율, 우화율 그리고 수명을 조사하였다.

결과: 급성, 만성 방사선 0.2 Gy가 조사된 Oregon-R은 대조군에 비하여 생존율이 증가되었고, Canton-S는 급성 0.75 Gy가 조사된 경우에만 대조군에 비하여 생존율이 증가되었다. 급성 방사선 4 Gy가 조사된 W1118은 번데기율에서 큰 변화가 없는 반면, 우화율의 급격한 감소를 나타내는 특이적 현상을 보였다. 또한, 방사선 조사를 통한 초파리의 수명 연장 확인 실험에서 급성 혹은 만성 방사선 선량율에 의한 효과는 Oregon-R에서만 나타났고 다른 계통에서는 그 차이가 관찰되지 않았다.

결론: 이러한 결과를 통해, 저선량방사선은 초파리 계

통 간 차이는 있으나, 초파리의 번데기율 및 우화율의 증가를 유도하며, 수명의 연장 또한 유발하는 것을 확인할 수 있었다. 계통간의 차이가 발생하는 원인에 대한 규명과 초파리의 저선량방사선에 대한 생물학적 현상의 분자적 기전 규명은 후속 연구를 통하여 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Gould AB, Clark AM. X-ray induced mutations causing adult life-shortening in *Drosophila melanogaster*. *Exp Gerontol* 1976;12:107-12.
- 2) Oliver CP. The effect of varying the duration of X-ray treatment upon the frequency of mutation. *Science* 1930;71(1828):44-6.
- 3) Muller HJ. Artificial transmutation of the gene. *Science* 1927;66(1699):84-7.
- 4) Seuge J, Lauge G, Ferradini C, Deysine A. Accelerated aging of the insect *Drosophila melanogaster* by gamma irradiations of pupae. *Exp Gerontol* 1985;20(2):131-9.
- 5) Shaposhnikova MV, Zainullin VG. The influence of gamma irradiation in low doses on the rate of dominant lethal mutations in *Drosophila*. *Radiats Biol Radioecol* 2006;46(4):429-30. (Russian)
- 6) Lamb MJ. The effect of radiation on the longevity of female *Drosophila subobscura*. *J Ins Physiol* 1964;10:487-97.
- 7) Sacher GA. Effects of X-rays on the survival of *Drosophila* imagoes. *Physiol Zool* 1963;36:295-311.
- 8) Zainullin VG, Moskalev AA. Radiation-induced changes in the lifespan of laboratory *Drosophila melanogaster* strain. *Genetika* 2001;37(9):1304-6.
- 9) Osipov AN, Puchkov PV, Sypin VD, Pomerantseva MD, Ramaiya LK, Shevchenko VA. Genetic effects of chronic gamma-irradiation at a low dose rate: Experimental study on CBA/LAC Mice: NATO Security Through Science Series. In: Brechignac F and Desmet G (eds) *Equidosemetry? Ecological Standardization and Equidosemetry for Radioecology and Environmental Ecology*. Springer, Netherlands. 2006. pp 299-304.
- 10) Sorensen JG, Loeschcke V. Larval crowding in *Drosophila melanogaster* induces Hsp70 expression, and leads to increased adult longevity and adult thermal stress resistance. *L Insect Physiol* 2001;47:1301-7.
- 11) Macklis RM, Beresford B. Radiation hormesis. *J Nucl Med* 1991;32:350-9.
- 12) Luckey TD. Physiological benefits from low level of ionizing radiation. *Health Phys* 1982;43:771-89.
- 13) Pimentel AE, Levine L. Radioresistance of sibling *Drosophila* species from Laguna Verde, Veracruz, Mexico. *Int J Radiat Biol* 2003;79(12):1003-9.
- 14) Moskalev A. Radiation-induced life span alteration of *Drosophila* lines with genotype differences. *Biogerontology* 2007;8(5):499-504.
- 15) Koana T. A threshold exists in the dose-response relationship for somatic mutation frequency induced X irradiation of *Drosophila*. *Radiat Res* 2004;161:391-6.
- 16) Vaiserman AM. Effect of x-irradiation in early ontogenesis on the longevity and amount of the S1 nuclease sensitive DNA sites in adult *Drosophila melanogaster*. *Biogerontol J* 2003;4(1): 9-14.
- 17) Vaiserman AM, Koshel NM. Cross-life stage and cross-generational effect of irradiations at egg stage on *Drosophila melanogaster* life histories. *Biogerontology* 2004;(5):327-37.
- 18) Vaiserman AM. Molecular and cellular aspects of radiation hormesis in *Drosophila melanogaster*. *Tsitol Genet* 2003;37(3):41-83. (Russian)
- 19) Lazzaro BP, Flores HA, Lorigan JG, Yourth CP. Genotype-by-environment interactions and adaptation to local temperature affect immunity and fecundity in *Drosophila melanogaster*. *PLoS Pathog* 2008;4(3): e1000025.
- 20) Lazzaro BP, Sackton TB, Clark AG. Genetic variation in *Drosophila melanogaster* resistance to infection: a comparison across bacteria. *Genetics* 2006;174:1539-54.