

이 학 석 사 학 위 논 문

방사선 피폭에 의한 금붕어
장관 평활근의 수축활성에 관한 연구



2007년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

문 경 희

이 학 석 사 학 위 논 문

방사선 피폭에 의한 금붕어
장관 평활근의 수축활성에 관한 연구

지도교수 이 종 규

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함.



2007년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

문 경 희

문경희의 이학석사 학위논문을
인준함.

2007년 2월 일



주	심	이학박사	김성부	인
위	원	이학박사	옥치일	인
위	원	이학박사	이종규	인

목 차

목차	i
표차례	ii
그림차례	iii
Abstract	iv
 I. 서 론	 1
II. 이 론	3
II-1. 방사선과 방사성붕괴	3
II-2. β^+ 붕괴(양전자붕괴)	6
II-3. 방사선과 물질의 상호작용	8
가. 양전자소멸	8
나. 광전효과	9
다. 콤프턴 효과(Compton effect)	11
라. 방사선의 화학작용	13
II-4. 평활근과 근수축	15
II-5. 아세틸콜린(Acetylcholine)	19
II-6. 방사선과 생명체	20
III. 실 험	23
III-1. 흡수선량 계산	23
III-2. 금붕어 장관(Goldfish intestine)	29
III-3. 피지오그래프(Physiography)	30
가. 장치	30
나. 수축활성의 측정	31
IV. 결과 및 분석	32
IV-1. 아세틸콜린의 농도 결정	32
IV-2. 수축활성 측정	33
V. 결 론	41
참고문헌	42

표 차 례

표 1 피폭선량과 급성영향의 증상	21
표 2 적출 평활근 실험을 위한 완충액(buffer)의 조성	29



그 립 차 례

그림 1 양전자소멸	8
그림 2 광전효과 메커니즘	10
그림 3 콤프턴 산란	12
그림 4 평활근	15
그림 5 횡문근	15
그림 6 평활근 세포내 액틴과 미오신의 배열	16
그림 7 근수축과 필라멘트의 활주를 일으키는 교차다리 주기	18
그림 8 생물학적 영향의 발현단계	22
그림 9 피지오그래프 장치	30
그림 10 아세틸콜린 농도에 따른 수축활성 측정	32
그림 11 금붕어 장관의 수축활성 측정(Ach)	33
그림 12 방사선 조사 2시간 경과 후 수축활성 측정	35
그림 13 방사선 조사 1일 경과 후 수축활성 측정	36
그림 14 방사선 조사 2일 경과 후 수축활성 측정	37
그림 15 방사선에 조사시킨 후 시간경과에 따른 수축활성	38

Study on the contractibility of isolated Goldfish intestines
exposed to the ^{18}F isotope

Kyung Hee Moon

Department of Physics, The Graduate School
Pukyong National University

Abstract

Radioactive ^{18}F isotope used at PET(Positron Emission Tomography) was radiated on goldfish. The change of intestine contractibility was measured by physiograph with the increase of time lapse after the exposure to the ^{18}F isotope, which was created when the concentrated oxygen water combined with hydrogen was exposed to the positron accelerated by the cyclotron. The distance between the goldfish and the ^{18}F isotope of 580 mCi was approximately 4 cm. The exposure time was 4 hours, and then the absorption level was approximately 2 Gy when the distance between the goldfish and the ^{18}F isotope, and the expose time and half decay time of the ^{18}F isotope, were considered. The neurotransmitter was an acetylcholine of 10^{-6} mol used for observing the contractibility of isolated goldfish intestines. The buffer consisted of NaCl 110 mmol, KCl 2 mmol, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1 mmol, Glucose 10 mmol and 0.5MTris-HCl (ph7.8) 5 mmol. The control group were goldfish which were not exposed to the ^{18}F isotope.

The contractibility of the control group had about a gravitational force of 0.8 ± 0.2 g. The contractibility of the goldfish exposed to 2 Gy radiation was measured at 2 hours, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 12, 15 and 30days lapsed after the radiation. The contractibility of the 2 hour lapse was a gravitational force of 0.4 ± 0.1 g which was approximately 50% of the control group. The contractibility of the 1day lapse was the gravitational force of 0.2 ± 0.1 g which was 25% of the control group. The contractibility of the 2 days lapse was a gravitational force of 0.5 ± 0.2 g. The contractibility was gradually increased up to 75% of

the control group with an increase of the lapse time between 2 days and 15 days. After a 36 day lapse, the contractibility was a gravitational force of 0.9 ± 0.2 g. Therefore the contractibility of the 1 day lapse was the lowest and the contractibility was gradually increased up to 100% of the control group with an increase of the lapse time between 2 days and 36 days. It may be considered that the lowest vital activity at the 1 day lapse recovered gradually from the exposure to the ^{18}F isotope.



I. 서 론

독일의 뢰트겐이 1985년에 음극선을 연구하던 중 우연히 발견한 방사선은 물질에 대한 강한 투과력을 가지고 있었다. 이 방사선의 투과력으로 몸속을 간접적으로나마 들여다볼 수 있게 됨으로써 방사선 촬영 장치는 한 세기가 넘는 지금까지 전 세계적으로 모든 병원에서 가장 기본적이고 보편적인 진단 기구로 쓰이고 있다. 1980년대부터는 방사선을 기본으로 컴퓨터를 비롯한 여러 첨단 장치가 결합됨으로써 몸속을 다양한 각도에서 실물과 같은 영상을 보여주는 첨단 진단 장치들이 잇따라 개발되었다.

방사선은 진단에서 뿐만 아니라 치료에서도 사용되고 있으며, 산업적으로나 연구용으로 많은 부분에서 사용되고 있다¹⁾. 이와 같이 방사선은 없어서는 안 될 중요한 에너지원임에도 불구하고 X선의 발견 이후 전리 방사선이 주는 위험성에 대한 관심 또한 계속되어 왔으며, 마리 퀴리와 그녀의 딸 이렌은 차폐 없이 X선과 방사성동위원소를 다루었고 그로 인해 백혈병으로 사망했다.

생물체가 방사선에 피폭되면 생물체를 구성하는 고분자(등)이 에너지를 흡수하여 물리학적 변화 단계를 거쳐 수소원자(hydrogen atom, $\cdot\text{H}$), 수화전자(hydrated electron, e_{aq}^-), 그리고 수산화기(hydroxyl radical, $\text{OH}^\cdot$)와 같은 일차 유리기들이 형성된다. 이러한 유리기들은 세포 내에서 생체를 구성하는 분자의 구조적 변화를 야기하고²⁾, 이것이 원인이 되어 효소 활성화의 저하와 DNA, 지질 및 단백질 등이 손상될 뿐만 아니라, 세포막의 불포화 지방산과 일련의 연쇄반응을 통하여 지질의 산화가 유발됨으로써³⁾ 각종 생물학적 장애가 일어난다. 전신에 방사선조사를 받은 후에 생긴 증상이나 증후들을 방사선증후군이라 하며 각 장기의 세포학적 특성에 따라 나타나는 증후와 증상은 다르다.⁴⁾

특히 소장은 다른 장기에 비하여 방사선에 대한 감수성이 큰 것으로 알려져 있으며, 소장의 자발적 수축은 세포막 전압의 주기적 탈분극 현상인 서파에 기인한다.⁵⁾⁶⁾ 하지만 서파 그 자체만으로는 큰 수축은 일어나지 않으며 여기에 자율신경계에서 분비되는 여러 신경전달 물질들과 호르몬 및 약물 등이 작용하

여 진정한 형태의 수축을 유발시키고 있다.⁷⁾

척추동물의 부교감신경과 운동신경에서 자극을 전달하는 물질인 아세틸콜린(acetylcholine)은 장관 평활근에 대해 강력한 흥분성 수축을 나타내는 인자로 잘 알려져 있으며, 이는 장에 있는 무스카린 수용체에 결합하여 안정막 전압을 저분극 시킴으로써 여러 이온전류들에 영향을 주고 이 무기 이온들이 근원섬유 구성단백질인 myosin⁸⁾, actin⁹⁾ 등과 상호 작용하여 화학적 에너지를 기계적 에너지로 바꾸게 된다.

이러한 근육운동의 조절기작에 관한 연구는 actomyosin system에 ATP, Mg 및 relaxing factor 존재하에 Ca를 첨가할 경우 초침전 반응과 ATPase 활성을 나타낸다는 Weber¹⁰⁾ 등의 보고로부터 시작되어 Enashi¹¹⁾ 등의 Ca binding protein인 troponin의 규명 및 Huxley¹²⁾의 X-ray diffraction 연구를 통하여 근수축조절물질로써 Ca의 조절 기능이 밝혀짐으로써 Ca와 근원섬유단백질의 상호작용에 의한 근수축-이완의 분자론적인 기작을 이해하는 것이 가능하게 되었다.

이런 장관의 수축력 및 수축에 작용하는 여러 인자들에 대하여 육상동물들에 대한 실험이 많이 이루어져 왔으며 어류에 대한 생체 내에서의 특성에 관해서도 일부에서 연구가 이루어지고 있다. 하지만 방사선에 조사된 어류의 장관 평활근의 운동에 대하여는 밝혀진 바가 없다.

이에 본 연구에서는 양전자단층촬영(PET)시 많이 사용되는 동위원소인 ^{18}F 을 사용하여 양전자에 노출시킨 금붕어의 수축활성을 측정함으로써 방사선 조사가 금붕어 장관평활근의 수축활성에 어떠한 영향이 있는지를 알아보고자 본 연구를 시작하였다. 먼저 앞에서 말한 아세틸콜린을 사용하여 어떤 농도에서 근 수축이 활발한지를 알아보아 아세틸콜린의 적정 농도를 결정하였다. 두 번째로 ^{18}F 을 사용하여 금붕어를 2Gy 정도의 방사선에 노출 시킨 후 아세틸콜린에 대한 수축활성을 시간의 경과에 따라 측정하였다.

II. 이 론

II-1 방사선과 방사성붕괴

방사선(radiation)은 원자 또는 원자핵의 에너지준위가 불안정할 때 방출되는 에너지이다. 또한 방사선은 방사성물질이나 방사선발생장치에서 방출되며 입자나 파동의 형태로 나타난다. 따라서 입자적 성질과 파동적 성질을 나타내는 용어 중에서 적절하게 선택하여 사용한다. 예를 들어 전자기파 방사선에서 파동적 특성을 강조할 때는 γ 선(감마선), X선(엑스선)등의 명칭을 사용하고, 물질과의 상호작용을 다룰 때는 입자적 성질을 강조한 '광자(photon)'라는 용어를 사용한다.

방사능은 불안정한 원소의 핵이 스스로 붕괴하면서 내부로부터 방사선을 방출하는 현상을 나타내는 말로 방사성물질 내부에서 단위시간당 일어나는 핵변환의 수로 정의된다. 방사능의 SI단위는 Bq(베크렐, Becquerel)이며, 1 Bq은 방사성핵종이 1초 동안 한 개의 핵변환을 하는 수로 1 dps와 같다. 전통적 단위로는 Ci(퀴리)를 사용하며

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (2-1)$$

이다.

방사능은 X선의 발생과 달리 자발적으로 원자핵에서 방사선이 나오는 현상이며, 원자핵 구조와 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 질량수가 큰 무거운 원자핵에서는 양성자 상호간의 반발력으로부터 핵을 안정화시키기 위해 중성자수가 양성자수보다 많이 존재하고 있으나 어느 정도 이상의 무거운 핵이 되면 내재적으로 불안정하게 되어 그 중에서 특별히 안정된 2개의 중성자, 2개의 양성자 결합체가 핵 밖으로 입자선으로써 튀어나온다. 이것이 α 붕괴이다. 또한 핵 내 중성자수가 지나치게 많은 핵에서는 중성자가 양성자와 전자 및 중성미자로 붕괴되어 전자와 중성미자가 핵 밖으로 방출된다. 이것이 β 붕괴이다. 이에 비하여 γ 선의 방출은 α 선, β 선을 방출하고 붕괴한 원자핵이 그 직후의 들뜬상태로부터 안정된 에너지준위로 돌아오는 과정에서 방출된 전자기파이며, 핵의 변환과

는 직접적으로 관계가 없다.

이러한 방사성 붕괴는 통계적인 현상으로 어느 특정한 원자핵이 언제 붕괴를 일으키는가에 대한 것은 전혀 예측할 수 없다. 그러나 수많은 원자핵으로 구성되어 있는 경우에는 방사성핵종이 방사성붕괴를 일으켜 원자핵의 수가 절반으로 되는 시간은 정확히 예측가능하다. 어미핵종의 원자핵수를 N 이라 하면 방사능 A 는

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (2-2)$$

이며, 붕괴율은 어떤 시각 t 에 존재하는 어미핵종의 원자 수 N 에 비례하므로

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (2-3)$$

이 되고, 여기서 λ 는 비례상수로 붕괴상수라 부른다. λ 는 1개의 원자핵이 단위시간당 붕괴할 확률이며, λ 의 값은 언제나 일정한 원소의 고유값으로 변하지 않는 상수이다. 식(2-3)을 미분방적식으로 나타낸 후 적분하면

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2-4)$$

이 된다. 여기서 N_0 는 초기 어미핵종의 원자수이므로, 방사선을 방출하면서 붕괴하는 원자핵이 시각 0에서 N_0 개 있었다면 t 시간이 경과한 후에는 $N_0 e^{-\lambda t}$ 로 줄어든다. 붕괴속도는 오직 붕괴상수에 의해서만 결정되며, 그 값이 큰 원소일수록 빨리 붕괴한다.

어떤 특정 방사성핵종의 원자수가 방사성붕괴에 의해서 최초의 원자수의 반으로 줄어드는 데 소요되는 시간을 반감기라고 하며 $T_{1/2}$ 로 표기한다. 반감기는 어미핵종의 원자수 N 이 $\frac{1}{2} N_0$ 가 될 때까지 걸리는 시간이므로, 반감기 $T_{1/2}$

와 붕괴상수 λ 는

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \quad (2-5)$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2-6)$$

의 관계가 있다.

반감기와 붕괴상수의 관계를 이용하여 식 (2-4)에서 붕괴상수 대신 반감기로 표현하면 다음과 같다.

$$N = N_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t} \quad (2-7)$$

또한 원자핵의 원자수 N 과 방사능 A 는 식 (2-2)와 식 (2-3)으로부터

$$A = \lambda N \quad (2-8)$$

관계가 있다. 따라서 방사능 A 에 대해서도 식 (2-7)과 같은 형태의 식이 성립한다.

$$A = A_0 e^{-\frac{0.693}{T_{1/2}} t} \quad (2-9)$$

II-2 β^+ 붕괴(양전자붕괴)

양전자 붕괴는 양성자에 대한 중성자의 비 n/p 가 매우 낮고 에너지 수준 때문에 α 붕괴가 불가능할 때 양성자가 중성자로 변화하여 β^+ 입자(양전자)를 방출하는 반응이며, 원자핵 내에서의 핵자의 변화는 다음과 같다.



위 식에서 보는 것처럼 핵 내의 양성자가 중성자로 변하므로 양성자가 하나 감소하고 중성자는 하나가 늘어난다. 따라서 β^+ 붕괴 후에는 원자번호는 1이 감소하고 질량수는 변화가 없는 원자핵으로 변환되며 β^+ 붕괴의 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



여기서 X 는 어미핵종, 즉 붕괴되기 전의 원자핵이며 Y 는 붕괴된 후 변환된 자핵종을 나타낸다. 전자질량을 m_e , 어미핵과 자핵의 질량을 m_x, m_y 라 하면 붕괴 에너지 Q 는 다음과 같다.

$$Q = \{m_x - (m_y + m_e)\}c^2 \quad (2-12)$$

$$= (m_x + Zm_e - m_y - m_e - Zm_e)c^2$$

$$= (M_x - M_y - 2m_e)c^2 > 0$$

$$2m_e c^2 = 2 \times 0.00054859 \text{ u} = 2 \times 0.511 \text{ MeV} \quad (2-13)$$

여기서 M_x, M_y 는 각각 어미핵과 자핵의 원자질량이고, β^+ 붕괴의 붕괴에너지는

원자의 질량으로 표시한다. $m_e c^2$ 는 전자의 정지질량에 해당하는 에너지로서 0.511 MeV이다. Q 값의 산출에서 2개의 전자질량 차이를 고려하는 것은 양전자붕괴가 반응계 밖으로 이탈하는 양전자 1개와 이후 원자번호가 감소함으로써 유발되는 궤도전자 1개가 이탈하여 계 밖으로 방출되기 때문이다.

음전자는 자연 상태에서 자유롭게 나타날 수 있지만, 양전자는 일시적으로 존재하며 전자와 결합하면 이들 두 입자는 소멸되면서 이들 입자의 질량만큼의 에너지를 가지고 있는 두 개의 γ 선을 방출하게 된다.



II-3 방사선과 물질의 상호작용

방사선이 물질을 통과할 때 나타나는 상호작용에는 방사선의 종류 및 이들의 에너지에 따른 투과력과 이를 흡수하는 물질의 특성이 연관되어 나타나는데, 대부분의 경우 방사선의 에너지가 물질로 이동되며 이때 물질을 구성하는 원자들이 들뜨거나 이온화된다.

가. 양전자소멸

양전자는 양전자 붕괴나 에너지가 큰 전자기파 방사선의 물질과의 상호작용의 한 종류인 전자쌍생성에 의해 발생된다. 에너지를 가지는 양전자는 물질 속에서 전자와 같이 탄성산란, 비탄성산란, 제동복사 등으로 가지고 있던 에너지를 잃는다. 양전자가 에너지를 다 잃고 나면 주변에 있는 전자를 만나 소멸하면서 2개의 광자로 변하며 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$e^+ + e^- = 2\gamma \quad (2-14)$$

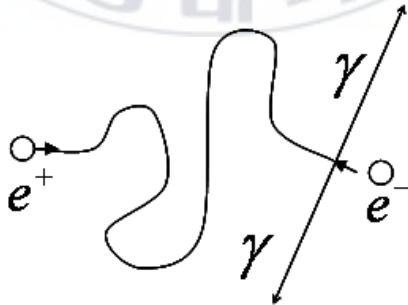


그림 1 양전자소멸

양전자가 소멸할 때 에너지, 전하, 운동량이 보존되어야 한다. 양전자 소멸 전의 양전자와 전자의 전하의 합은 0이므로 전하가 없는 광자가 생성되면 전하 보존법칙이 만족한다. 만약 양전자와 전자가 정지하고 있었다면 양전자-전자 쌍의 소멸 후 두 개의 전자의 정지질량에 해당하는 1.02 MeV 의 에너지가 생성되어야 한다. 그리고 정지하고 있는 한 쌍의 전자의 운동량이 0이므로 소멸 후에도 운동량의 합은 0이어야 한다. 따라서 0.51 MeV 의 광자 두 개(총 1.02 MeV 의 에너지)가 생성되어 광자가 서로 반대방향으로 진행해야 광자의 운동량의 합이 0이 되어 운동량, 에너지 보존 법칙을 만족한다. 즉 양전자가 물질 내에서 에너지를 전부 잃고 주변의 정지하고 있는 전자를 만나 전자쌍이 소멸하면서 0.51 MeV 의 광자 두 개가 생성되어 서로 반대 방향으로 진행하는데 이러한 현상을 양전자 소멸, 소멸방사 또는 전자쌍소멸이라고 하고 이때 방출되는 전자파를 소멸 방사선이라고 한다.

나. 광전효과

광전효과는 물질에 빛을 쏘여주면 전자가 방출되는 현상이다. 광전효과에 의해 방출되는 전자를 광전자라고 하며 광전자를 방출시키기 위해서는 특정한 에너지 이상을 빛을 쏘여야 하는데 이 임계에너지 보다 작은 에너지의 빛에서는 그 빛을 아무리 세게 하여도 광전자는 방출되지 않는다. 이 임계에너지에 해당하는 빛의 파장을 임계파장이라고 하고, 임계파장에 해당하는 에너지를 일함수라고 한다.

빛은 전하가 없는 전자파 방사선이지만 전기장과 자기장이 교대로 나타나 진행하므로 핵의 양전하에 의해 전기장이 강한 핵 부근을 지나면 강한 전기장의 영향을 받을 수 있다. 그래서 궤도 전자는 이 영향으로 빛의 에너지를 받아 궤도로부터 이탈할 수 있는데, 이때 전자가 궤도로부터 이탈되기 위해서는 빛의 에너지가 궤도전자의 결합에너지보다 커야한다. 즉 위에서 말한 일함수가 바로

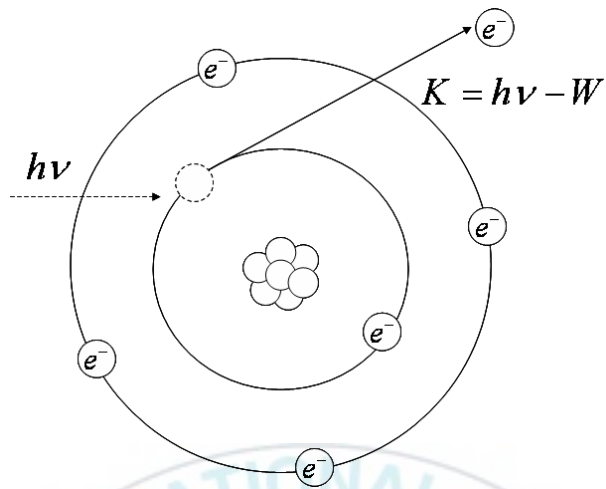


그림 2 광전효과 메커니즘

궤도 전자의 결합에너지인 것이다. 이러한 관계를 수식으로 표시하면 다음과 같이 된다.

$$K = h\nu - W \quad (2-15)$$

여기서 K는 광전자의 운동에너지이고, $h\nu$ 는 광자의 에너지 그리고 W는 일함수이다.

광전효과가 일어나면 모든 광자의 에너지는 그 일부가 물질을 이온화시키는 데 소모되고, 나머지 에너지가 광전자의 에너지로 되면서 광자는 사라진다. 광전자의 수는 전자기파 방사선의 세기가 클수록 많아진다.

감마선과 같이 수 MeV의 에너지를 가지는 광자에 의해 방출된 광전자의 에너지는 궤도 전자의 결합에너지기 광자의 에너지보다 훨씬 작으므로 광전자의 에너지가 감마선의 에너지와 거의 같다고 할 수 있다.

광전효과가 일어나면 원자내의 에너지가 낮은 궤도에는 전자가 빈곳이 생겨나고, 전자의 빈자리를 에너지가 큰 바깥궤도의 전자가 채워주면서 그 에너지 차이에 해당하는 특성 X선 또는 오제전자가 방출된다. 납과 같이 원자번호가

큰 원소에서의 K특성 X선은 K각 전자의 결합에너지 88 KeV에 해당되는 큰 광자에너지를 갖고 있어서 또 다른 광전효과를 일으키면서 상당한 거리를 투과하게 된다. 그러나 원자번호가 낮은 원소에서는 특성 X선이 발생하여도 에너지가 작아서 즉시 발생한 장소 근처에서 흡수된다. 또한 오제전자는 아주 짧은 비정을 지니고 있어 오제전자의 에너지는 발생된 위치 부근에서 물질에 재흡수된다.

광전효과는 특히 에너지가 낮은 광자가 높은 원자번호의 물질에 입사될 때 지배적인 반응형태로 반응단면적은 근사적으로 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\sigma_{ph} \propto \frac{Z^{4 \sim 5}}{E^3} \quad (2-16)$$

여기서 Z는 물질의 원자번호, E는 입사광자의 에너지이다.

다. 콤프턴 효과(Compton effect)

콤프턴 효과는 빛이 자유전자와 상호작용하여 빛의 에너지와 운동량 중 일부를 전자에 전달하고, 빛은 파장이 길어지면서 그 진행경로를 바꾸어 산란되어 진행한다는 것이다. 이와 같이 에너지를 잃고 방향을 바꾸어 진행하는 빛을 산란선이라고 하며, 정지하고 있던 전자는 빛의 에너지와 운동량을 받아 되튀는데 이 전자를 되튐전자 또는 콤프턴 전자라고 한다.

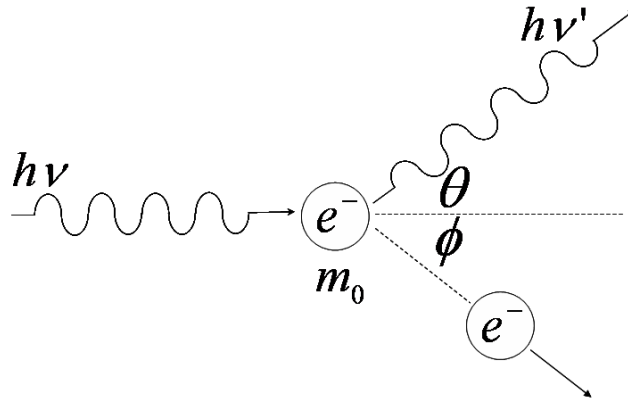


그림 3 콤프턴 산란

콤프턴효과는 물질내의 원자와 느슨하게 결합되어 있는 전자 즉 자유전자로 취급할 수 있는 전자와의 상호작용에서 일어난다. 그러므로 콤프턴 산란이 일어나더라도 특성 X선이나 오제전자는 발생하지 않는다. 이 상호작용에는 운동량 보존법칙과 에너지 보존법칙이 성립한다.

에너지 보존법칙과 운동량 보존법칙으로 충돌 전후의 빛의 파장 변화를 빛의 산란 각도에 따라 구하면 다음과 같다.

$$\lambda' - \lambda = \Delta\lambda = 0.243(1 - \cos\theta) \text{ \AA} \quad (2-17)$$

여기서 λ 는 산란된 빛의 파장으로 입사 빛의 파장 λ 에 비해 큰 값이다. 그리고 0.0243 Å을 콤프턴 파장이라 한다.

빛과 전자와의 충돌 전의 에너지는 전자의 정지질량에너지와 빛의 에너지이인데, 전자는 1 MeV 이상의 에너지만 가져도 속도가 거의 광속에 접근하므로 전자질량은 상대론적 효과를 고려해야 하며, 빛의 운동량은 $\frac{h\nu}{c}$ 또는 $\frac{h}{\lambda}$ 으로 하였다.

빛이 콤프턴 산란을 일으키고 난 후 에너지가 작아진 산란광자는 2차, 3차의 콤프턴 산란 또는 광전효과를 일으키면서 에너지를 잃는다.

콤프턴 산란이 일어나면 빛의 파장의 변화는 물질에 입사하는 빛의 파장의 크기에는 상관없고 빛의 산란각에만 관계하며, 빛의 산란각도에 따라 잃는 에너지가 달라지므로 퇴튠전자의 에너지는 연속스펙트럼으로 나타난다.

콤프턴 산란이 일어날 확률을 상대론적 양자역학을 이용하여 클라인(Oskar Klein:1894-1977)과 니시나(Yoshio Nishina:1890-1951)가 1929년에 계산하였으며 간단하게 다음과 같이 표시된다.

$$\sigma_c \propto \frac{Z}{h\nu} \quad (2-18)$$

즉 광자의 에너지가 클수록 콤프턴 산란이 일어날 확률이 작아지고, 물질의 원자번호가 클수록 콤프턴 산란이 잘 일어난다. 콤프턴 산란의 확률은 광전효과에 비해서 원자번호의 증가에 따라 천천히 증가하고, 산란의 확률이 에너지 증가에 따라 감소하지만 그 확률이 에너지에 반비례하므로 광전효과보다 콤프턴 효과의 산란 확률이 더 천천히 감소한다. 콤프턴 효과는 광자의 에너지가 0.5 MeV에서 2.5 MeV의 범위에서 많이 일어난다.

라. 방사선의 화학작용

방사선이 물질에 조사되면 방사선의 종류나 그 에너지에 따라 여러 가지 물질과의 작용이 일어남을 확인하였다. 이러한 작용결과 화학적 활성이 큰 초기 생성물인 이온, 들뜸분자, 라디칼 등이 생성된다.

이온은 이온화방사선이 원자 또는 분자의 궤도전자를 그 핵으로부터 완전히 분리시킴으로서 생성된다.



생성된 이온들은 이온들은 이온재결합(ion recombination), 해리(dissociation), 전하이동(charge transfer) 및 이온-분자간반응 등에 의해 소멸된다.

분자나 원자의 궤도전자가 가장 안정한 기저상태에 있지 않고 더 높은 에너지상태에 있는 것을 들뜸상태라 한다. 들뜸입자들은 방사선과의 직접작용에 의해 생성되기도 하고, 생성된 양이온이 전자와 중화되어 만들어지기도 한다.

들뜸분자나 원자들은 여분의 에너지를 빛(광자)으로 방출하고 기저상태로 돌아가는 형광방출(fluorescence), 광을 방출하지 않고 다른 입자와의 충돌에 의해 같은 중첩도의 보다 낮은 상태로 변환되는 내부변환(internal conversion), 중첩도가 다른 상태로 변환되는 계간변환(intersystem crossing), 자신이 가진 들뜸에너지를 다른 입자에 전달하고 기저상태로 돌아가는 과정 등에 의해 소멸되기도 하지만, 해리나 이성체 생성 등 일분자 반응(unimolecular reaction) 및 다른 분자와의 이분자반응(bimolecular reaction)등 화학반응을 일으키기도 한다.

자유라디칼은 다른 입자와 결합을 이룰 수는 있으나 결합에 사용되지 않은 전자(unpaired electron)를 가진 원자나 분자를 말한다. 자유라디칼은 방사선 뿐만 아니라 열분해, 광분해 및 산화환원반응 등에 의해서도 만들어질 수 있으며, 분자의 공유 결합이 끊어지면서 결합전자가 양쪽으로 한 개씩 나뉘어져 생성된다.



자유라디칼은 반응성이 커서 해리반응(radical dissociation), 부가반응(addition), 추출반응(abstraction)등을 일으키기도 하고, 라디칼끼리의 결합(radical combination)이나, 전자이동반응(electron transfer)에 의해 소멸되기도 한다.

II-4 평활근과 근수축

근육은 대략 500여 개의 근육계로 이루어져서 각종 운동을 수행하게 되는데 인체에서 근조직은 그 기능과 모양에 따라 횡문근(striated muscle)과 평활근(smooth muscle)으로 분류하며 횡문근은 다시 골격근(skeletal muscle)과 심장근(cardiac muscle)으로 구분된다. 또한 우리의 의사에 따라 근육의 운동을 유발할 수 있느냐 없느냐에 따라 수의근(voluntary muscle)과 불수의근(involuntary muscle)으로 구별하기도 한다. 그러므로 골격근은 수의근에 속하고 심장근과 평활근은 불수의근에 속한다. 골격근은 신경 자극에 의하여 수축과 이완을 할 수 있는 특수한 성질을 가진 구조물로서 생명체의 여러 곳에서 볼 수 있다. 그 밖에, 혈액을 혈관계로 구출하는 일을 하는 근육 조직을 심장근이라 하며, 흥분성(excitability), 율동성(rhythmicity), 전도성(conductivity), 수축성(contractility) 및 자동능(automaticity)을 가진다. 이것은 골격근과 평활근의 양 성질을 갖지만 이러한 성질은 심장근에만 국한된 것은 아니다. 또한 방광(bladder)을 수축시키는 일, 눈의 동공(pupil)을 확대하거나 수축시키는 일, 위장관(gastrointestine)을 움직이는 일 등 모든 내장(viscera)의 기능에 관여하는 근육으로서 평활근이 있다.

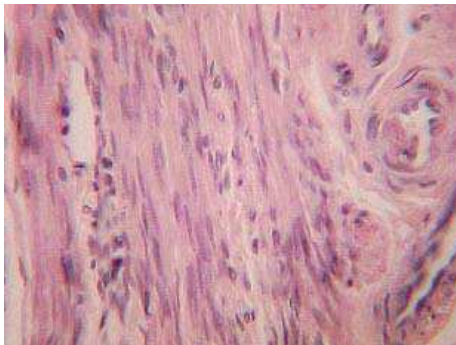


그림 4 평활근

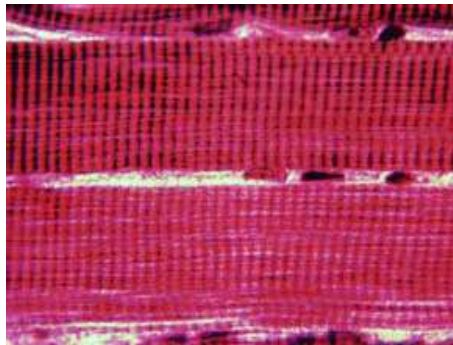


그림 5 횡문근

평활근은 해부생리학적 특성에 따라 다단위성 근육과 단단위성 근육으로 나뉜다. 다단위성 평활근은 운동신경에 의하여 흥분될 수 있고, 보통 운동단위로서 유기적 체제를 이루고 있다. 단단위성 평활근은 심근과 상당히 유사하여 pacemaker activity가 있고 자발적으로 수축하며, 전기적 활동과 기계적 반응이 신경계에 의하여 상당히 조정되고는 있지만 기능적 세포결체(functional syncytium)와 같이 활동을 한다. 단단위성 근육은 일반적으로 신장(伸長, stretch)에 반응하여 장력을 발생시키나, 다단위성 근육은 그렇지 못하다. 단단위성 근육에 속하는 예로는 인체의 여러 기관중에서 속이 빈 기관의 평활근들이 있다.



그림 6 평활근 세포내 액틴과 미오신의 배열

평활근은 한 개의 핵을 가진 작은 방추형의 세포로 이루어져 있으며 직경이 $2\sim 20\mu\text{m}$, 길이는 직경의 $10\sim 100$ 배 정도가 되는 크기이다. 이들 세포는 협간극결합(gap junction)으로 연결되어 있어서 이것을 통하여 세포간의 전류에 대한 전기적 긴장이 전파된다. 따라서 그러한 세포들은 전기적으로 다발을 이루어 연결되어 있는데, 세로 $100\mu\text{m}$, 길이 수 mm로 기능적인 단위를 형성한다.

평활근은 근질을 이루고 있는 액틴과 미오신 필라멘트에 의해 나타나는 특징적인 가로무늬가 없으며, 평활근의 필라멘트는 근세포질내에 무작위하게 분포되어 있다.(그림6) 미오신 필라멘트에는 작은 돌기가 있는데 이것이 가교이다. 액틴과 미오신의 비율은 12:1로서 횡문근의 2배인데, 이것은 평활근에서 가교

가 액틴과 결합하여 힘을 생성할 수 있는 기회를 더 많이 가지는 것으로 설명할 수 있다.

평활근의 신경분포는 골격근과는 아주 다르다. 척추동물의 평활근에서는 평활근 조직을 따라 분포하는 자율신경의 용기부에서 전달물질이 방출된다. 특정 용기부에서 방출된 전달물질은 확산되어 작고 방추형인 많은 수의 평활근세포와 접하게 되는데 이들 세포 표면에는 수용체 분자들이 산재되어 있다. 평활근은 횡문근보다 수축과 이완이 훨씬 더 늦으며 지속적인 수축이 가능하다.

평활근세포의 소포체는 아주 원시적인 형태로서 세포막의 내부 표면 가까이 에 단지 평평한 소낭을 이루고 있을 따름이다. 평활근 세포들이 작기 때문에 용적에 대한 표면적의 비율이 커서 횡문근섬유의 근소포체처럼 고도로 발달된 근소포체를 필요로 하지는 않는다. 따라서 평활근의 세포막이 횡문근의 근소포체와 같은 칼슘이온 조절기능을 가지고 있다. 자극이 주어지지 않은 상태에서 칼슘이온은 세포막 밖으로 계속 운반되어 세포내부의 칼슘이온 농도는 항상 낮게 유지된다. 그러나 신경 충격이나 호르몬 자극으로 세포막이 탈분극되면 칼슘이온에 대한 투과성이 증가하여 밖으로 운반되었던 Ca^{2+} 이 유입되고 이어서 수축이 일어난다. 탈분극이 큰 경우에 활동전위를 유발하게 되고 이 때 유입된 칼슘이온은 내향전류를 수반한다.

활동전위는 최대의 칼슘이온을 유입하게 함으로써 최대수축에 이르도록 하는데, 장력은 세포의 칼슘이온 농도에 비례하게 된다.

칼슘이온은 평활근에서도 조절기능을 갖는다. 그러나 그 기작면에서 횡문근에서의 수축조절을 위한 칼슘이온의 역할과는 다르다. 즉, 평활근에는 트로포닌이 없기 때문에 대신 칼모듈린과 결합한다. 평활근의 미오신 가교가 액틴과 주기적으로 결합하기 위해서는 미오신에 있는 작은 단백질이 인산화되어야 하는데 세포질내의 칼슘이온의 농도증가가 이러한 인산화를 유도한다. 그림7과 같이 인산화된 미오신은 활성화되어 액틴과 결합하게 되고, 가교 활성화에 의하여 액틴과 미오신 분자를 서로 활주하게 된다. 반면 근세포의 이완은 세포내 칼슘이온의 농도가 떨어져 인산화된 미오신 분자가 탈인산화됨으로써 일어난다.

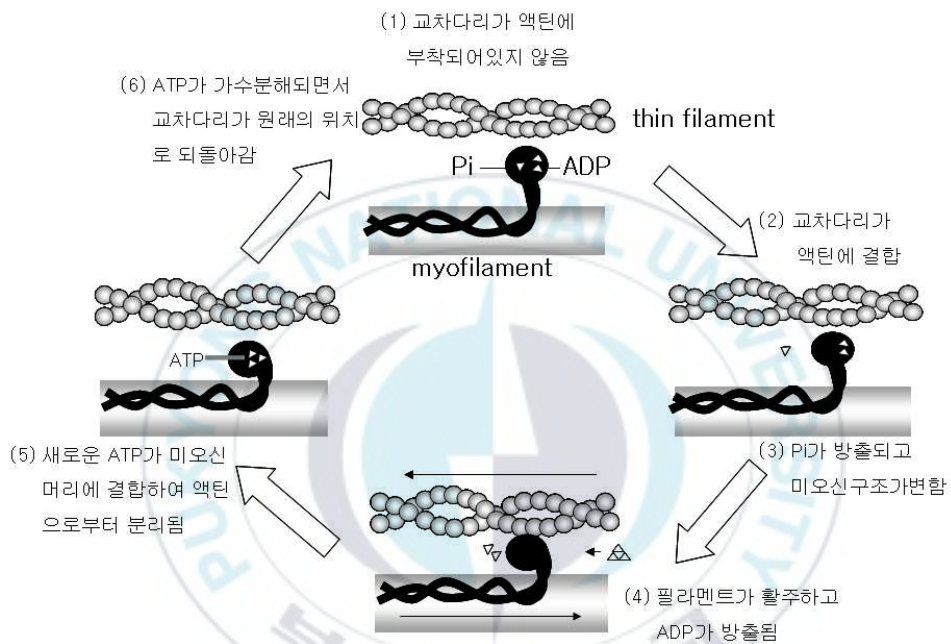


그림 7 근수축과 필라멘트의 활주를 일으키는 교차다리 주기

II-5 아세틸콜린(Acetylcholine)

아세틸콜린은 화학식으로는 $\text{CH}_3\text{COOCH}_2\text{CH}_2\text{N}^+(\text{CH}_3)_3$ 이고 동·식물체에 널리 분포하는 염기성 물질로 분자량은 146.21이다. 또한 아세틸콜린은 콜린의 아세트산에스테르로서, 특히 척추동물의 부교감신경과 운동신경에서 자극을 전달하는 물질로 중요하다. 교감신경에서는 노르아드레날린이 같은 전달물질로 작용한다. 신경세포의 접합부(시냅스)에 있어서 자극은 방향성을 가지며 하나의 신경세포말단(전절)으로부터 다른 신경세포의 표면(시냅스 후막)으로 전달된다. 이것을 매개하는 물질이 아세틸콜린이다. 이를테면 시냅스 전절에서 합성·저장된 아세틸콜린은 자극에 의해 세포 밖으로 분비된다. 시냅스 후막에는 아세틸콜린 수용체와 아세틸콜린에스테라아제가 있는데, 아세틸콜린 수용체는 분비된 아세틸콜린을 새로운 자극으로 변환하고, 아세틸콜린에스테라아제는 아세틸콜린을 가수분해한다. 이러한 과정은 정상적인 신경계에서는 순간적으로 일어나서 세포 외의 아세틸콜린은 즉시 소실되지만 아세틸콜린에스테라아제의 저해제가 존재하면 아세틸콜린은 분비된 그대로 축적되어 이상한 흥분상태가 지속되고 동물을 죽음에 이르게 한다.

아세틸콜린에 대한 수용체는 니코틴성과 무스카린성의 두 종류가 있다. 니코틴성의 수용체는 담배의 니코틴과 같은 작용으로, 예를 들면 신경근 접합부의 니코틴 수용체는 운동 신경으로부터 방출된 아세틸콜린을 받아서 골격근을 흥분시킨다. 자율 신경의 부교감 신경 말단에서 방출된 아세틸콜린은 심근위에 있는 무스카린 수용체에 결합하여 심근의 흥분을 억제하며, 위장이나 식도의 무스카린 수용체에 결합하면 그 평활근을 흥분 수축시켜서 소화를 활발하게 한다.

II-6 방사선과 생명체

방사선이 생체 내에 조사되면 물리화화학적인 변화를 거쳐 생물의 생리적 상황을 변화시킨다. 생물에 대한 방사선의 영향을 분자 수준에서 보는 경우 방사선의 에너지가 그 분자에 직접 흡수되어 장해를 일으키는 것을 방사선의 직접 작용이라고 하며, 타 분자가 에너지를 흡수해서 활성 생성물을 만들고 그것이 표적 분자와 반응해서 표적분자에 장해를 끼치는 것을 간접작용이라고 한다. 생체에서는 직접작용에 의한 분자 장해와 동시에 방사선이 물 분자(세포의 80% 점유)에 직접 작용해 생성된 라디칼(한 개 또는 그 이상의 부대전자를 가지고 독립해서 존재할 수 있는 화학종으로 OH·, H·-라디칼 등)이나 분자 생성물이 생체내의 다른 분자에 장해를 일으키는 간접 작용이 병존한다.

방사선 조사선량이 충분히 클 때 개체는 치사하게 되는데 이는 방사선의 종류, 생물의 종, 생리조건, 연령 등에 따라 차이가 있으나 일반적으로 건강한 성체를 기준으로 척추동물에서는 조류, 어류, 양서류 또는 파충류에 비하여 포유류가 방사선 감수성이 크며 무척추동물은 척추동물에 비해 방사선 저항성이 높다.

방사선의 영향은 신체의 체세포 손상에 의해서 생기는 신체적 영향과 생식세포 손상에 의해서 일어나는 유전적 영향이 있으며, 이러한 영향이 나타나는 시기에 따라 급성영향과 만성영향으로 분류하는데, 급성영향은 피폭 후 비교적 단기간 내에 나타나는 영향이며, 만성영향은 피폭 후 장기간이 경과한 후에 나타나는 영향을 말한다. 아래의 표는 사람이 $\lambda(X)$ 선을 일시에 전신에 조사 받은 경우에 나타나는 급성 영향에 대하여 기술한 것이다.

표 1 피폭선량과 급성영향의 증상

피폭선량(Sv)	증상
0.25이하	임상적 증상이 거의 없음
0.5	백혈구(임파구) 일시 감소
1	구역질, 구토, 전신권태, 임파구 현저히 감소
1.5	50%의 사람이 방사선속취
5	5%의 사람이 사망
4	30일만에 50%의 사람이 사망
6	14일만에 90%의 사람이 사망
7	100%의 사람이 사망

250 mSv이하의 선량에서는 임상증상이 거의 나타나지 않으며, 1.5 Sv 이상의 피폭에서 나타는 방사선 속취 증상은 전날 마신 술이 그 다음날까지 깨지 않는 것과 흡사한 증상이다. 피폭 후 30일 이내에 50%의 확률로 사람이 사망하는 선량은 4 Sv정도이며, 100%의 확률로 사람이 사망하는 선량은 7 Sv로 추정되고 있다. 방사선 전신 조사시 발생하는 징후나 증상을 방사선 증후군이라고 하며 중추신경 증후군은 100 Gy 정도의 방사선 피폭시, 신경조직의 손상으로 인하여 과도흥분, 구토, 설사 등이 생기며 피폭 후 5~6시간이 지나면 혈관염, 유종, 뇌막염 등의 증상이 발생으로 사망하게 된다. 위장 증후군은 9~100 Gy 정도의 방사선 피폭 시, 소장 섬모나출, 설사 백혈수 감소, 세균의 감염 등으로 사망하게 되며, 조혈 증후군은 5 Gy 정도의 방사선 피폭 시, 피폭 후 2~3주 후에는 조혈기관인 골수의 장애로 인하여 골수원세포의 수가 감소하여 혈구가 급격히 감소되며 빈혈, 출혈 등의 증상을 수반하며 사망하게 된다.

만성영향으로는 방사선에 의한 노화와 수명의 단축을 들 수 있으며 기존 질병에 대한 저 선량의 방사선 치유 및 전염성 질병의 출현을 억제 하는 등의 수명의 연장에 도움을 줄 수도 있다. 하지만 정상세포에 방사선이 피폭되어 암,

백내장 등이 발생할 수 있으며 잠복기간의 차이는 있으나 대체로 10~30년 정도로 추정하고 있다.

조사선량이 치사선량 미만일 경우, 개체는 장해로부터 회복된다. 이는 세포 재생계에 있어서 조사에 의하여 억제되었던 세포분열이 재개되고 시간이 경과함에 따라 세포기능이 회복되기 때문이다. 방사선 장해에 대한 회복은 개체 수준에서도 인정되며 생쥐를 실험재료로 많은 연구가 이루어지고 있다. 일반적으로 방사선을 분할 조사할 경우 1회 조사의 경우에 비하여 생물학적 효과가 적게 나타나는데 그 이유를 회복현상으로 설명하고 있다. 하지만 회복작용이 일어나는데 일정한 시간이 필요하며 방사선 장해가 일정한 한계를 초과할 때 생체는 회복능력을 잃게 된다. 특히 방사선에 의한 돌연변이의 유발은 선량률에 관계없이 총선량 의존성인데 이는 방사선 장해가 축적되기 때문이라고 보는 견해가 많다.

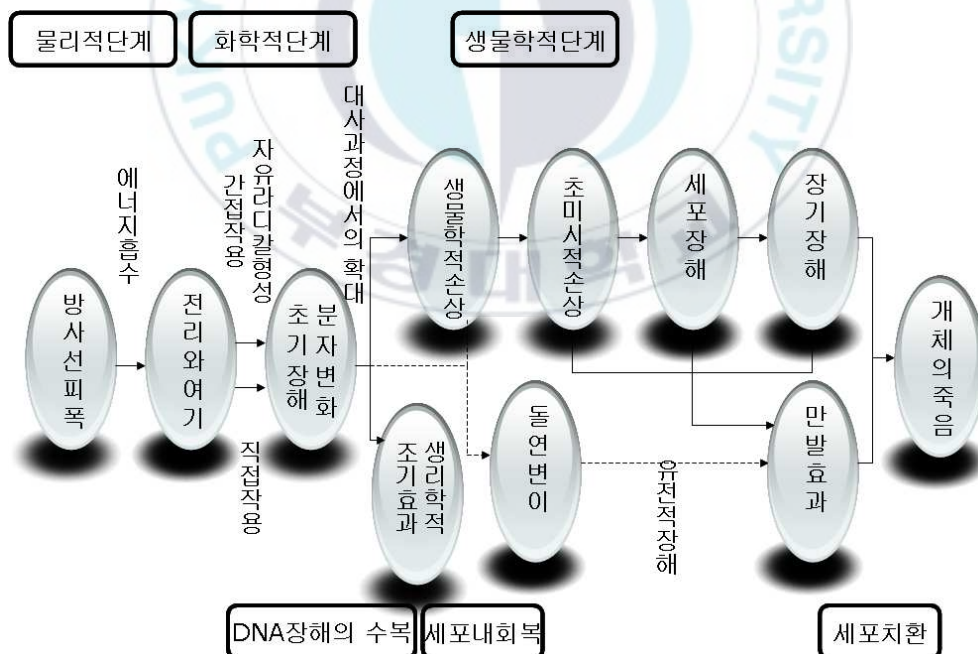


그림 8 생물학적 영향의 발현단계

III. 실 험

본 실험은 양전자에 노출된 금붕어(Goldfish)의 장관 평활근 1 cm를 적출한 뒤 피지오그래프(Physiograph)를 사용하여 아세틸콜린(Acetylcholine)에 대한 장관의 수축활성을 보는 것이다.

양전자 노출은 상온에서 금붕어를 물속에 둔 채 이루어 졌으며, 적출한 장관은 생체 내에 있을 때와 유사한 조건을 만들어 주기위하여 완충액에 넣어 실험에 임했다. 수축활성은 개체마다 가지고 있는 활성차가 있기 때문에 1마리가 아닌 4마리씩 개체수를 최대한 늘여 실험하였으며, 조사 후 2시간 이내, 1일, 2일, 3일, 4일, 5일, 6일, 9일, 12일, 15일, 30일 후의 시간경과에 따라서 측정하였다.

III-1 흡수선량 계산

금붕어를 양전자에 노출시키기 위하여 ^{18}F 을 사용하였다. ^{18}F 은 방사성동위원소 중 양전자 방출핵종으로 가장 많이 생산되는 것이다. ^{18}O 을 농축하여 수소를 결합시켜 만든 물에 사이클로트론으로 가속한 양성자를 쏘아주면 산소-18의 원자핵에 양성자가 들어가면서 중성자가 하나 떨어져 나오는 반응이 일어나게 되는데 이때 ^{18}F 이 생성된다.(3-1)



본 실험에서는 부산대학병원에 있는 사이클로트론(Cyclotron)을 사용하여 1시간 가속시킨 18 Mev의 에너지를 가지는 양성자로 ^{18}F 580 mCi를 생산하였다. ^{18}F 580 mCi를 납으로 밀폐된 공간에 두고 선원으로부터 4 cm떨어진 위

치에 금붕어 50마리를 두어 4시간동안 노출시켰다. 이 때 금붕어가 흡수한 선량은 다음과 같이 계산한다.

먼저 ^{18}F 의 감마상수 $0.58 \text{ R} \cdot \text{m}^2/\text{Ci} \cdot \text{hr}$ 를 이용하여 조사선량률을 구한다.

$$\begin{aligned}\dot{X} &= \Gamma \frac{S}{r^2} = 0.58 \text{ R} \cdot \text{m}^2/\text{Ci} \cdot \text{hr} \times \frac{0.58 \text{ Ci}}{(0.04 \text{ m})^2} \\ &= 210.25 \text{ R/hr}\end{aligned}\quad (3-2)$$

Γ 는 감마상수, S 는 방사능의 세기, r 은 선원에서 금붕어까지의 거리이다.

^{18}F 는 반감기가 110분(1.833시간)이므로 선량률은 ^{18}F 의 방사능 감쇠에 의하여 시간이 지남에 따라 감소하게 된다. 이것을 고려하여 4시간동안의 조사선량을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}X &= \int_0^4 \dot{X}_0 e^{-\lambda t} dt = -\frac{\dot{X}_0}{\lambda} [e^{-\lambda t}]_0^4 \\ &= -\frac{210.25}{0.832} [e^{-0.378t}]_0^4 = 196.99 \text{ R}\end{aligned}\quad (3-3)$$

조사선량은 공기가 흡수한 에너지를 반영하므로 금붕어가 흡수한 선량은 조사선량을 바탕으로 다시 계산해야한다.

흡수선량(기호 D)은 특정 미소체적 dV 내의 매질의 미소질량 dm 에 부여된 에너지 $d\bar{\epsilon}$ 를 dm 로 나눈 몫이며, 다음 식과 같이 정의된다.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (3-4)$$

흡수선량의 단위는 Jkg^{-1} 이며, 이 단위의 특수이름은 그레이(Gy)이다. 비하전입자의 플루언스를 Φ , 원자수 밀도를 n , 단면적을 σ , 충돌당 부여된 에너지를 $\bar{\epsilon}_{en}$, 임의의 매질 m 의 밀도를 ρ 라 놓으면 정의로부터 흡수선량은 다음 식과 같이 주어진다.

$$D = \frac{(\Phi n \sigma)(V)(\bar{\epsilon}_{en})}{(\rho V)} = \Phi E \left(\frac{\bar{\epsilon}_{en}}{E} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_m \right) = \Phi E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_m \quad (3-5)$$

식 (3-5)에서 $(\mu/\rho)_m$ 와 $(\mu_{en}/\rho)_m$ 는 각각 임의의 매질 m 에 대한 비하전입자의 질량감쇠계수와 질량에너지흡수계수이다. 그리고 Φ, E 및 μ/ρ 또는 μ_{en}/ρ 의 단위는 각각 m^{-2} , MeV 및 m^2/kg 이다. 식 (3-5)을 다시 쓰면 흡수선량은 다음식과 같이 주어진다.

$$D = 1.602 \times 10^{-13} \Phi E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_m \quad (\text{Gy}) \quad (3-6)$$

조사선량(기호 X)은 광자에 의하여 공기 중의 미소체적 dV 내의 미소질량 dm 에서 생성된 전하의 양 dQ 을 dm 으로 나눈 몫이며, 다음 식과 같이 정의된다.

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (3-7)$$

조사선량의 전통적인 단위는 뢰트겐(R)이고, SI단위는 Ckg^{-1} 이다. 1R은 포

준상태의 공기 $1.293 \times 10^{-6} \text{ kg}$ 에 X 선 또는 λ 선의 조사에 의하여 발생한 이온쌍 한쪽의 총 전하량이 1 esu 가 되는 조사선량을 말하며, R 과 $C \cdot \text{kg}^{-1}$ 와의 관계는 다음식과 같이 주어진다.

$$1 R = \frac{1 \text{ esu}}{1 \text{ cm}^3} \times \frac{1 C}{3 \times 10^9 \text{ esu}} \times \frac{1 \text{ cm}^3}{1.293 \times 10^{-6} \text{ kg}} \quad (3-8)$$

$$= 2.58 \times 10^{-4} C/\text{kg}$$

공기 중에서 이온쌍(또는 전자)을 생성하는데 필요한 에너지를 $\bar{W}$, 공기 중의 미소체적 dV 내에 부여된 에너지를 $d\bar{\epsilon}$, 이온당 전하량을 e 라 놓으면, dV 내에서 생성된 전하량 dQ 는 다음 식과 같이 주어진다.

$$dQ = \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{W}} \cdot e \quad (3-9)$$

식(3-9)의 양변을 dm 으로 나누면, 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{dQ}{dm} = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \cdot \frac{e}{\bar{W}} \quad (3-10)$$

dQ/dm 은 조사선량, $d\bar{\epsilon}/dm$ 은 흡수선량이므로, 식(3-7)은 다음 식과 같이 주어진다.

$$X = D \frac{e}{W} = \Phi E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a \frac{e}{W} \quad (3-11)$$

여기서 $(\mu_{en}/\rho)_a$ 는 공기에 대한 비하전입자의 질량에너지흡수계수이며, $\overline{W}/e$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\overline{W}}{e} = \frac{33.85 \text{ eV/ip(or electron)}}{1.602 \times 10^{-19} \text{ C/electron}} \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ J/eV} = 33.85 \text{ J/C} \quad (3-12)$$

따라서 식(3-11) 즉, 조사선량은 다음 식과 같이 표현된다.

$$X = 4.733 \times 10^{-15} \Phi E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a \quad (\text{C/kg}) \quad (3-13)$$

또는

$$X = 1.834 \times 10^{-11} \Phi E \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_a \quad (\text{R}) \quad (3-14)$$

조사선량과 흡수선량의 관계는 식(3-6)과 식(3-13)으로부터 다음 식과 같이 주어진다.

$$D = 34 \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_a} X \quad (\text{C/kg}) \quad (\text{Gy}) \quad (3-15)$$

앞에서 구한 ^{18}F 의 조사선량이 196.99 R이므로 이는 식(3-8)에 따라 $5.082 \times 10^{-2} \text{ C/kg}$ 과 같다.

식(3-15)조사선량과 흡수선량의 관계식을 이용하여 흡수선량을 구하면 다음과 같다. 여기서 $(\mu_{en}/\rho)_m$ 와 $(\mu_{en}/\rho)_a$ 는 질량 에너지 흡수 계수로 각각 $3.263 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kg}$, $2.966 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kg}$ 를 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 D &= 34 \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_a} X \\
 &= 34 \times \frac{3.263 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kg}}{2.966 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kg}} \times 5.082 \times 10^{-2} \text{ C/kg} \\
 &= 1.9 \text{ Gy}
 \end{aligned}$$



III-2 금붕어 장관(Goldfish intestine)

금붕어는 학교근처의 옥답수족관에서 구입을 하였으며, 전장은 14 cm 내외, 무게는 50~70 g 정도였다. 국립수산물과학원 내수면생태연구소의 담수생물정보에 따르면 금붕어는 1년이 지나면 전장 14~16 cm, 2년에 16~18 cm, 3년이면 20~23 cm에 달하고, 전장 30 cm가 되기까지는 10년 정도 걸린다고 한다. 이에 실험에 사용된 금붕어는 1~ 2년 정도 자란 금붕어라고 여겨진다.

금붕어 장관표본을 만들기 위하여 먼저 머리에서 등 쪽으로 이어지는 중추신경을 절단하여 움직임을 없게 만든 후, 복부를 절개하여 장관을 약 2.0~3.0 cm 길이가 되도록 적출한다. 이 때 장관을 풀어 위쪽에서 내려오는 굵은 부분을 택하였으며, 모든 개체에서 같은 부위를 적출하였다. 모세혈관 및 지방(adipose)등을 제거한 후, 장관의 길이가 약 1.0 cm가 되도록 단편을 만들었다.

체외로 적출된 평활근은 가급적 생체내에서와 유사한 환경에서 보존해야 하므로, 근절편이 생체내에서와 유사한 기능을 발휘하게 하기 위해서 이 과정은 완충액(buffer)상에서 행하였으며, 조성은 아래와 같다.

표 2 적출 평활근 실험을 위한 완충액(buffer)의 조성

1/ 완충액	mM	g	비고
NaCl	110	7.51	
KCl	2	0.35	
CaCl ₂ • 2H ₂ O	1	0.278	
Glucose	10	0.5~1	
0.5MTris-HCl(ph7.8)	5	10.0 (ml)	

III-3 피지오그래프(Physiography)

가. 장치

피지오그래프는 생물체의 반응을 눈으로 확인할 수 있고 분석이 가능한 전기적 신호로 바꾸어 기록할 수 있는 장치이며 변환기, 증폭기 및 기록기의 세 부분으로 구성된다.

변환기(strain gauge transducer)에서 장관에 걸리는 장력을 전기저항(resistance)의 변화로 바꾸어 주고, 증폭기(amplifier)를 통하여 신호를 증폭시킨 후, paper recorder형태로 기록하였다. 실험은 생물공학과 바이오메디컬 사이언스 연구실에 있는 NEC San-ei Instruments사의 45196A, AS1302 WR7300을 사용하였다.

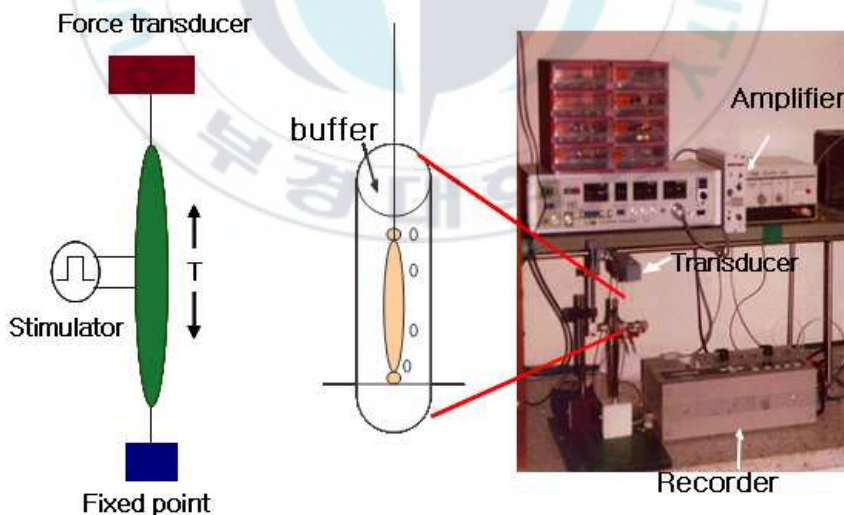


그림 9 피지오그래프 장치

나. 수축활성의 측정

준비된 장관의 아래쪽 말단을 반응조의 지지봉에 고정하고 다른 한쪽 끝을 변환기에 연결하였다. 연결한 장관에 1.0g중의 장력을 준 뒤, 실온에서 15분 간격으로 완충액을 교체하면서 30분동안 안정화시켰다. 이는 평활근 세포의 자발적 탈분극과 수축은 수동적 인장에 의한 자극 뿐만 아니라 영양액의 온도 저하나 공기방울의 움직임에 의해서도 자극을 받으므로 최초 평활근절편을 현수한 직후에 적당한 강도의 수동장력을 가함으로써 절편의 자발운동과 휴식 장력을 확보하기 위한 조치이며, 평활근절편이 자발적으로 수축과 이완이 안정적인 양상으로 정착되는데까지의 시간을 기다린 것이다.

반응조에는 공기를 주입시키면서 실험이 이루어졌으며, 신경의 자극을 근육에 전달하여 장관수축의 생리작용을 나타내는 아세틸콜린을 사용하여 수축활성을 측정하였다. 먼저 금붕어 2마리로 수축활성이 가장 좋은 농도를 찾기 위하여 $10^{-12}\text{mol} \sim 10^{-5}\text{mol}$ 사이에서 예비실험을 하였다. 활성이 좋은 두 가지의 아세틸콜린 농도를 정한 뒤 하나의 장관에 각각 3회씩 투여하여 그 수축활성을 피지오그래프 상에 기록하였다. 활성을 본 후 다시 안정화가 되지 않은 경우는 여러 번 수세 후, 15분간 방치해 두었다가 실험을 진행하였다.

한 시간대에 4마리의 활성을 동시에 보아야 하지만 실험여건상 2마리씩 실험을 하였고 1~2시간 정도의 차이는 무시하였다.

IV. 결과 및 분석

IV-1 아세틸콜린의 농도 결정

그림 10은 각 mol 농도에 따라 아세틸콜린에 대한 장관의 수축활성을 paper recode로 나타낸 것이다.

$10^{-12} \sim 10^{-8}$ mol는 아세틸콜린(Ach)을 넣었을 때와 아세틸콜린을 넣지 않았을 때 장관의 수축 변화가 거의 없었다. 10^{-7} mol부터 수축활성이 눈에 띄게 늘기 시작하여 10^{-5} mol에서는 활성이 거의 최대가 됨을 볼 수 있었다. 방사선에 의해 수축활성이 감소될 것으로 예상되어 고농도에서 실험을 진행하기로 하였으며 10^{-6} mol과 10^{-5} mol에서 활성이 큰 차이가 없었으므로 10^{-6} mol을 택하였다.

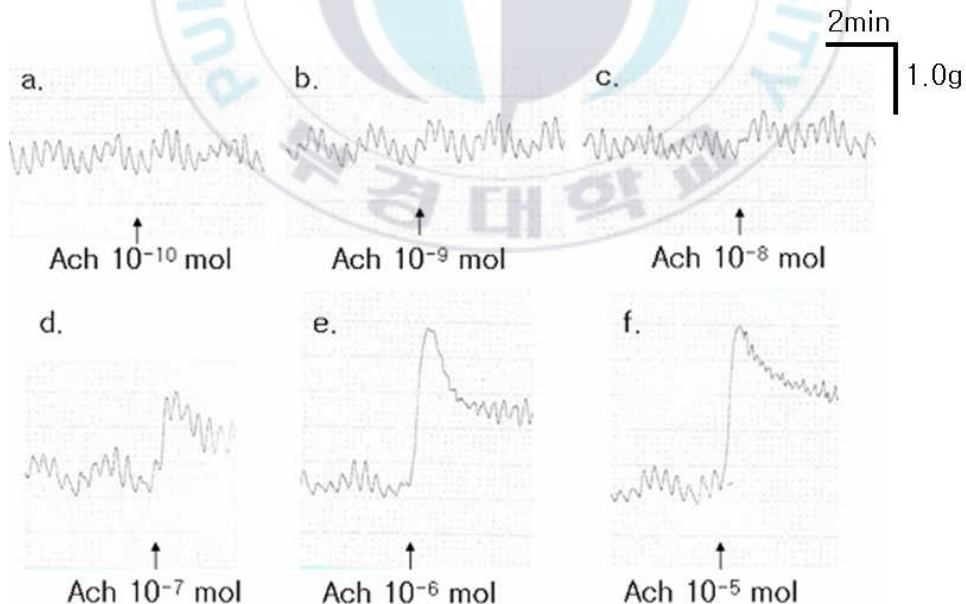


그림 10 아세틸콜린 농도에 따른 수축활성 측정

IV-2 수축활성 측정

방사선에 피폭된 금붕어의 장관의 수축활성을 보기에 앞서 방사선 피폭이 없는 금붕어 10마리에 대한 장관수축활성을 측정하였다. 그 결과 아세틸콜린 10^{-6} mol에 대한 금붕어 10마리의 수축활성은 그림 11과 같이 a는 0.5, b는 0.5, c는 1.0, d는 0.8, e는 0.4, f는 0.9, g는 0.8, h는 0.8, i는 1.0, j는 1.1 g 중으로 측정되었다. 수축활성의 평균값은 0.8 g중 이었고, 앞으로 이 값을 대조군으로 두고 비교할 것이다.

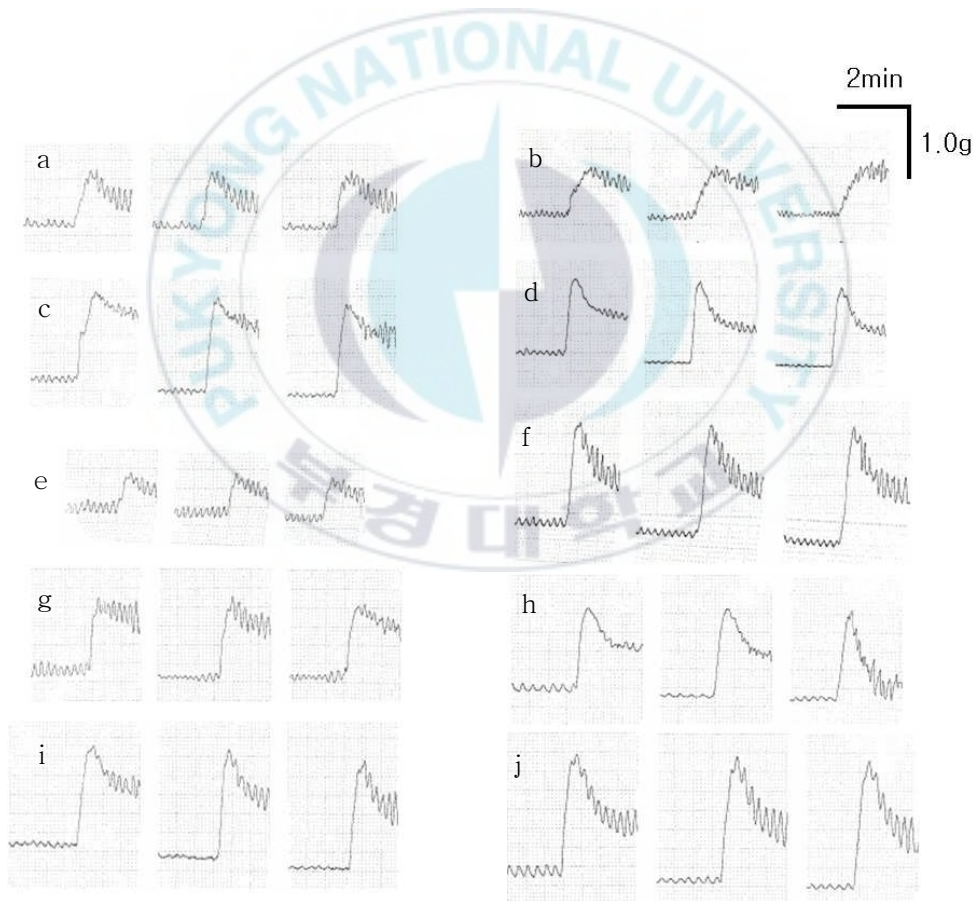


그림 11 금붕어 장관의 수축활성 측정(Ach 10^{-6} mol)

방사선에 조사시킨 후 장관의 수축활성을 측정하는데 까지 2시간 정도가 소요되어서 조사 직후의 수축활성은 측정하지 못하였고, 피폭 2시간 후에 4마리에 대한 장관의 수축활성을 측정하였다. 한 개체에 대하여 아세틸콜린을 3회 투여하였고, 그림12와 같은 결과를 얻었다. 아래의 화살표는 10^{-6} mol의 아세틸콜린을 투여한 시점을 표시하고 있다. 방사선 조사 2시간 후의 장관수축활성은 a는 0.3, b는 0.5, c는 0.2, d는 0.5 g중이었고 수축활성의 평균값은 0.4 g중으로 대조군과 비교하면 그 활성이 50% 줄었다.

방사선에 조사시킨 후 1일 경과 후의 장관수축활성은 그림13에 나타나 있으며, 그 값은 a는 0.3, b는 0.3, c는 0.1, d는 0.0 g중이며 그 평균값은 0.2 g중으로 그 활성이 75%나 감소하였다. 여기서 그림13의 d를 보면 수축활성을 거의 보이지 않는 개체가 처음으로 등장하였다는 것은 주목할 만하다.

방사선에 조사시킨 후 2일이 경과한 후의 장관수축활성은 그림 14와 같으며, 그 값은 a는 0.4, b는 0.3, c는 0.5, d는 0.9 g중으로 장관수축활성의 평균값은 0.5 g중이었다. 이 값은 대조군과 비교하여 38%의 수축활성 감소를 보였으며 하루 전날의 결과와 비교하여 수축활성이 다시 증가함을 보이기 시작했다.

이 이후의 값들은 장관수축활성의 평균값이 3일후 0.5, 4일후 0.5, 5일후 0.4, 6일후 0.4, 9일후 0.6, 12일후 0.6, 15일후 0.6, 36일후 0.9 g중으로 대조군과 비교하여 각각 38%, 38%, 50%, 50%, 25%, 25% 감소하였으며 36일후의 값은 대조군과 비교하여 오히려 13%활성이 증가하는 양상을 보였다.

이 값을 가지고 평균값과 그 표준오차를 나타내면 그림15와 같다.

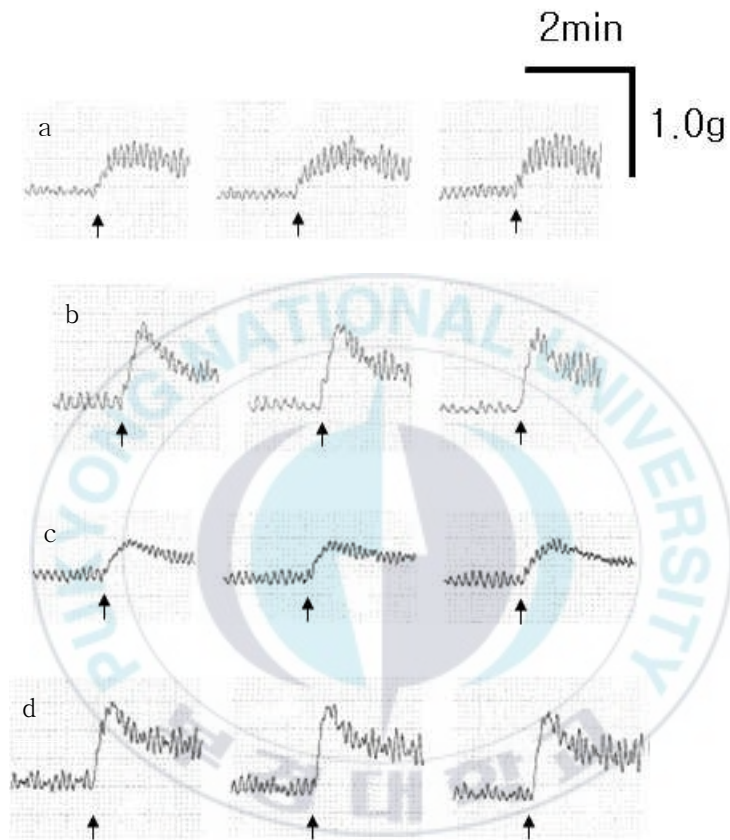


그림 12 방사선 조사 2시간 경과 후 수축활성 측정

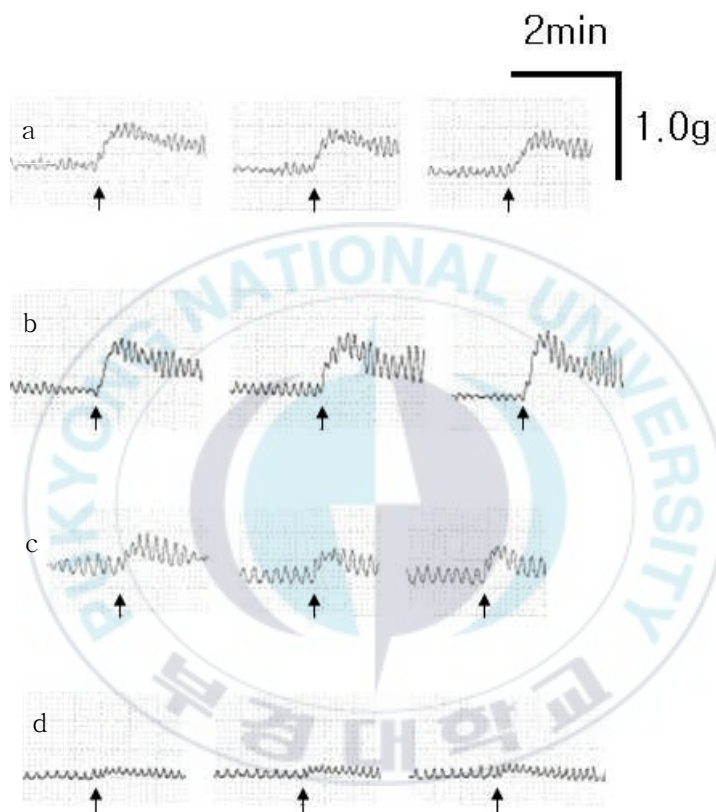


그림 13 방사선 조사 1일 경과 후 수축활성 측정

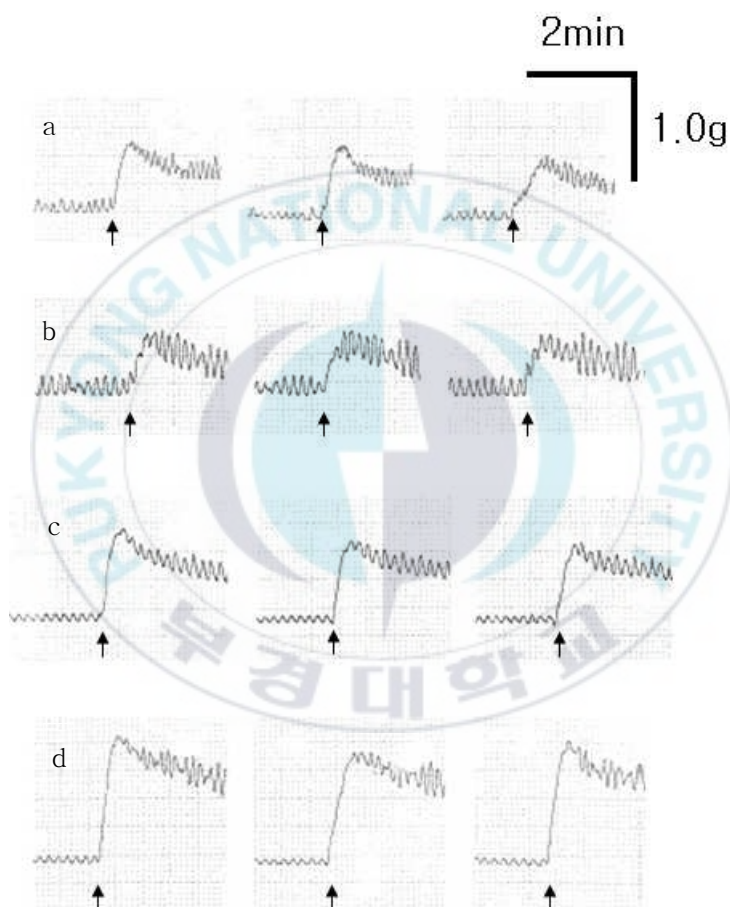


그림 14 방사선 조사 2일 경과 후 수축활성 측정

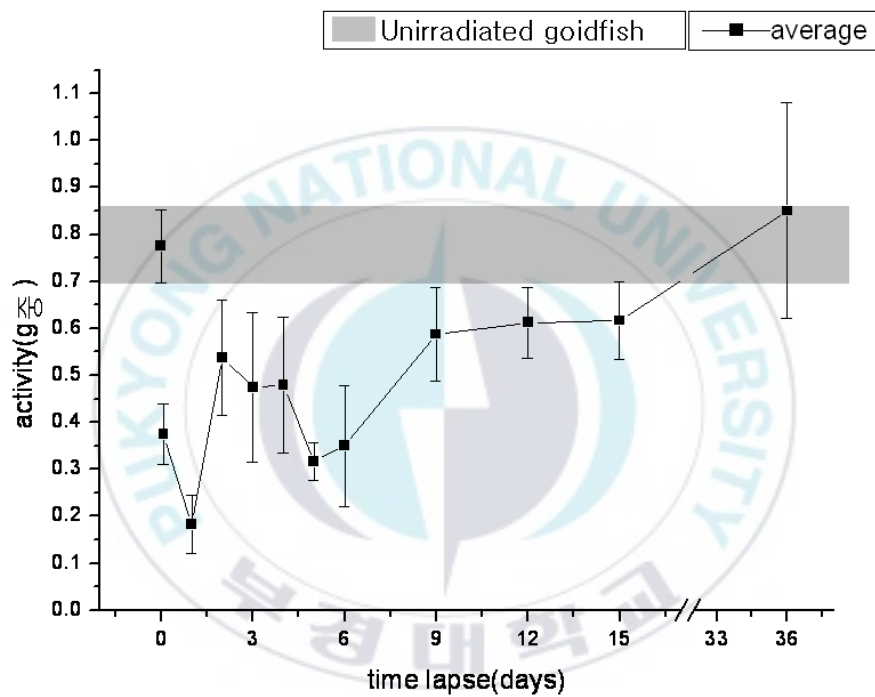


그림 15 방사선에 조사시킨 후 시간경과에 따른 수축활성

그림15에서 알 수 있듯이 방사선에 조사시킨 후 금붕어 장관의 수축은 대조군과 비교하여 1일이 지난 후 그 활성이 최저 상태로 떨어지며 2일째부터는 조금씩 회복되는 양상을 보였다.

여기서 오차가 비교적 크게 나타나는데 그 이유로 첫 번째는 금붕어는 기계가 아니고 생명체 이므로 개체마다 가지는 수축력에 차이가 있을 것이고, 두 번째로는 실험한 개체 수가 작기 때문일 것으로 예상된다. 그리고 세 번째로는 오랜 시간 방사선에 노출 되었지만 개체가 고정되어 있었던 것이 아니라 물속에서 움직이고 있었기에 금붕어 각각의 흡수선량이 서로 달라서 일 것이라 생각된다.

이렇듯 오차의 요인이 많기는 하지만 장관의 수축활성은 1일후에 최저로 떨어졌으며 이는 방사선에 의해 분명 생체에 어떠한 변화가 있었을 것이라고 여겨진다.

방사선이 생체에 조사되면 직접적으로 생체내의 분자들에 장애를 주는 경우도 있지만 그와 동시에 방사선이 물 분자(세포의80%점유)에 직접 작용해 생성된 라디칼이나 분자 생성물이 생체내의 다른 분자에 장애를 일으킨다.

본 실험에서는 금붕어를 물속에 둔 채 약 4cm정도 떨어진 곳에 방사성 동위원소인 ^{18}F 을 두었다. ^{18}F 에서 방출된 양전자는 일단 물속에 들어가서 물에 있는 여러 이온들과 결합하여 양전자 소멸을 통한 두 개의 γ 선을 낼 것이고, 금붕어 체내로 들어간 이 γ 선은 광전효과와 콤프턴효과 등으로 생성된 라디칼이나 분자 생성물이 수축활성에 관여하는 인자에 장애를 주었을 것으로 생각된다.

아세틸콜린은 무스카린 수용체와 결합하여 막전위를 탈분극시키고 이때 Ca^{2+} 이온이 세포내로 유입되면서 수축활동이 일어난다. 이러한 것에서 볼 때 방사선에 의해서 아세틸콜린의 수용체가 장애를 입었다고 해석을 할 수도 있으며, Ca^{2+} 이온이 감소했다고 생각할 수도 있다. 물론 수축에 관여하는 다른 인자들이 장애를 입었다고 볼 수도 있다.

다만 2Gy의 방사선에 노출된 금붕어의 장관의 수축은 어떠한 원인인지는 명확히 알 수는 없으나, 그 활성이 떨어졌다가 2일 이후로 회복되는 경향을 보였

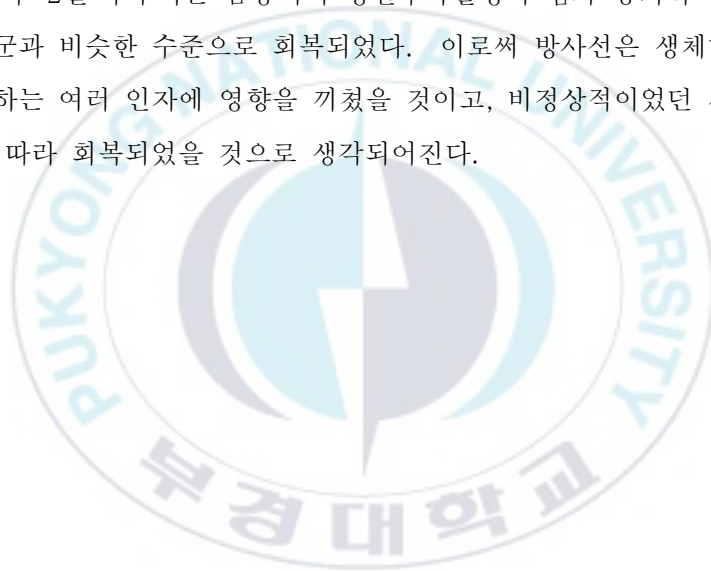
으며 30일이 지난 후에는 원래의 활성화 비슷한 수준으로 회복되었다.



V. 결 론

방사선이 장관의 수축활성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 방사성 동위원소인 ^{18}F 을 사용하여 약 2 Gy(/4hour)의 방사선에 피폭된 금붕어장관의 수축활성을 아세틸콜린을 투여하여 실험하였다.

방사선을 조사 하지 않은 대조군의 수축활성은 0.8 g중이었고, 방사선 조사 후 2시간 이후에는 0.4 g중이었다. 방사선 조사 후 1일 경과 후에는 장관수축활성이 0.2 g중으로 그 수축활성이 대조군과 비교하여 75%나 감소하였다. 방사선 조사 후 2일 후부터는 금붕어의 장관수축활성이 점차 증가하여 며칠 이후에는 대조군과 비슷한 수준으로 회복되었다. 이로써 방사선은 생체내의 수축활성에 관여하는 여러 인자에 영향을 끼쳤을 것이고, 비정상적이었던 세포가 시간이 지남에 따라 회복되었을 것으로 생각되어진다.



참고문헌

- 1) 옥치일, 방사선 물리학의 세계, 전파과학사, 2000
- 2) Fridovich: Superoxide dismutase. In: Methods of Enzymatic Analysis, edited by Bergmyer. Academic Verlag, Berlin, 58:61-97, 1986
- 3) Emerit J., Chaudiere J., CRC Hand Book of Free Radical and Antioxidants in Biomedicine, Miquel J., Quintailha A.T., Weber H.(eds.) vol.1, CRC Press, Florida, 177, 1989
- 4) Prasad K.N., Acute radiation syndromes. In Radiation biology. eds. Pizzarello D.J., Clolmbetti L.G., 205-235, CRC Press, Boca Raton, 1982.
- 5) Ohba M., Sakamoto Y., Tomita T., The slow wave in the circular muscle of the guinea-pig stomach, J. Physiol, 53:505-516, 1975
- 6) El-Sharkawy T.Y., Morgan K.G., Szurszewski H.H., Intracellular electrical activity of canine and human gastric smooth muscle, J. Physiol, 279:291-307, 1978
- 7) Demol P., Ruoff H.J., Weihsrauch T.R., Rational pharmacotherapy of gastrointestinal motility disorder, Eur J Pediatr, 148:489-495, 1989
- 8) Morimoto K. and Harrington W.F., J. Mol. Biol., 88:693, 1974
- 9) Pollard T.D. and Cooper J.A. : Ann Rev. Biochem., 55:987, 1986
- 10) Weber A. and Winicur S. : J. Biol. chim., 236:3198, 1961
- 11) Ebashi S., Kodama A. and Ebsahi F., J. Biochem., 64:465, 1968
- 12) Huxley H.E. and De Rosier D.J., J. Mol. Biol., 50:279, 1970