

어리호박벌, 쇠족범잠자리, 넓적사슴벌레의 날개근육의 형태학적 차이

문혜정*, 반영훈, 조현국¹, 박원학, 이종욱
영남대학교 이과대학 생물학과, ¹경운대학교 안경광학과

Morphological Differences of the Flight Muscle among *Xylocopa appendiculata circumvolans* Smith, *Davidins lunatus* B. and *Serrognathus platymelus castanicdor* M.

Hye-Jung Moon*, Young-Hun Ban, Hyun Gug Cho¹,
Won-Hark Park and Jong-Wook Lee

Department of Biology, Yeungnam University, Kyongsan, Kyungbuk, 712-749, Korea

¹Department of Visual Optics, Kyungwoon University, Gumi, Kyungbuk, 730-852, Korea

(Received August 26, 2002; Accepted September 14, 2002)

ABSTRACT

The present study was performed to compare the morphological differences of flight muscles among 3 species from insects (*Xylocopa appendiculata circumvolans* Smith, *Davidins lunatus* B. and *Serrognathus platymelus castanicdor* M.) by investigating ultrastructural observation and stereological analysis.

Xylocopa appendiculata circumvolans Smith has the most flight hours. In addition, the number and arrangement of mitochondria and the structure of sarcomere were similar to those of vertebrates. However sarcomere structure of *Davidins lunatus* B. was irregular and the sarcomere length was longer than that of *Xylocopa appendiculata circumvolans* Smith. In *Serrognathus platymelus castanicdor* M. which has the least flight hours, the length of sarcomere appeared longer than that of *Davidins lunatus* B.

In results of stereological analysis, *Serrognathus platymelus castanicdor* M. had the highest volume density of myofibrils in all species. The volume and numerical density of mitochondria and the volume density of sarcoplasmic reticulum were highest *Xylocopa appendiculata circumvolans* Smith and *Davidins lunatus* B. respectively.

This study suggests that the flight hours and flight pattern by different ecological habitats may cause the morphological changes of flight muscle.

Key words : Flight muscle, Sarcomere, Stereological analysis

* Correspondence should be addressed to Hye-Jung Moon, Department of Biology, Yeungnam University, Kyongsan, Kyungbuk, 712-749, Korea.
Ph.: 053-810-2371, FAX: 053-815-3061, E-mail: huryzia@yumail.ac.kr
Copyright © 2002 Korean Society of Electron Microscopy

서 론

곤충의 운동 중 비행은 에너지를 가장 많이 요구하는 것으로 알려져 있다(Wegener, 1996). 생태계 내에서 곤충들의 다양한 비행은 적의 위협에서 벗어나거나, 먹이를 취하거나, 이동, 짝짓기 등의 수단으로 이용된다(Marden, 2000). 비행에 필요한 날개근육은 그 비행형태와 생태적 특징에 따라 다양한 형태로 존재한다고 알려져 있다(Delcarpio et al., 1983).

곤충의 날개근육은 자연상태에서 가장 활동적인 근육으로(Van der Horst et al., 1993) 기능적으로 다른 9~10개의 근육들에 의해 신체의 움직임이 조절되며, 종에 따라 근육배열에 차이를 보인다고 하였다(Ross et al., 1982). Otten (1987), Trombitas & Tigyi-Sebes (1984)는 곤충 날개근육에서 근절의 길이에 따른 근섬유의 모양과 근절 수축 시의 모델을 제시함으로써 근절의 수축에 의해 발생하는 힘은 근원세사의 중첩되는 수와 관계가 있다고 하였으며, Royuela et al. (2000)은 근원세사의 길이는 수축속도에 반비례한다고 하였다.

곤충의 날개근육의 크기는 매우 다양하며 그 크기와 구성성분에 따라 비행능력이 결정되는데 대개 체중의 12~16%를 차지하고 있다(Marden, 2000). 체중에 대한 날개근육의 비율이 증가할수록 비행능력이 증대된다고 볼 수 있으며(Harrison & Roberts, 2000), 날개근육의 발달정도에 따라 사립체 밀도, 에너지 저장률이 높아지게 된다(Wells & Ellington, 1994).

곤충의 날개 운동은 두 가지로 분류되는데(Richards & Davies, 1979), 하나의 신경자극에 대해 근육이 직접적으로 반응하여 수축·이완하는 동시성 날개근육(synchronous direct-flight muscle)과 받는 신경자극의 수보다 더 높은 비율로 근육이 수축·이완하는 비동시성 날개근육(asynchronous indirect-flight muscle)으로 구분할 수 있다(Chapman, 1980; Candia Carnevali & Reger, 1981). 이러한 기능적 차이를 형태학적 관점에서 볼 때, 근절의 구조와 크기, 근형질세망 그리고 근형질세망과 가로소관의 결합형태를 달리한다고 하였다(Josephson & Ellington, 1997; Malamud et al., 1998; Trombitas & Pollack, 1995).

따라서 곤충의 생활습성의 차이는 곧 비행량과 비행형태의 차이로 나타날 것이며, 본 연구에서는 생활습성에 있어서 많은 차이를 보이는 어리호박벌, 쇠족범잠자리 그리고 넓적사슴벌레의 3종을 대상으로 근육구조의 조직화(organization) 양상을 미세구조적 관찰과 입체해석학적 분석을 통하여 알아보려고 하였다.

재료 및 방법

1. 채집 및 동정

채집은 포충망을 주로 이용하였으며, 채집시기는 5~7월로, 경북 경산시 소재 영남대학교에서 채집하였다. 채집된 종은 한국곤충생태도감(Bae et al., 1998; Kim et al., 1998; Lee et al., 1998)으로 동정하여 전문가에게 의뢰하였다.

2. 재 료

어리호박벌 (*Xylocopa appendiculata circumvolans* Smith), 쇠족범잠자리 (*Davidins lunatus* B.), 넓적사슴벌레 (*Serrognathus platymelus castanicdor* M.)

3. 실험방법

1) 광학현미경적 관찰

가슴 주위에 있는 날개근육을 고정시키기 위해서 먼저 2.5% glutaraldehyde를 조직 속으로 주입시킨 후, 조직을 세절하여 2.5% glutaraldehyde(0.1 M phosphate buffer, pH 7.4, 4°C)에 2~4시간 전고정시키고, 0.1 M phosphate buffer (pH 7.4)로 수세한 후 1% osmium tetroxide로 90분간 후고정시켰다. 고정이 끝난 조직을 0.1 M phosphate buffer (pH 7.4)로 수세한 후, 알코올의 농도를 순차적으로 증가시켜 탈수시키고, propylene oxide로 치환하여 epoxy resin에 침투 및 포매 시킨 다음 37°C에서 12시간, 60°C에서 48시간동안 열중합시켜 불력을 제작하였다. 만들어진 조직은 초박절편기(Reichert Supernova)를 이용하여 1 μm로 박절한 후 1% toluidine blue로 염색하여 광학현미경(Olympus, BH-2)으로 관찰하였다.

2) 전자현미경적 관찰

광학현미경적 관찰을 위해 제작된 시료를 60~90 nm로 초박절하여 uranyl acetate와 lead citrate로 이중 염색 후 가속전압 75 kV에서 투과전자현미경 (Hitachi, H-600)으로 관찰하였다.

3) 입체해석학적 관찰

(1) 양 생가를 위한 표본의 선택

근원섬유, 미토콘드리아의 양적 조사를 위해 근원섬유의 종단면으로 잘려진 표본을 무작위로 선택하여 4,000배로 촬영하고 인화 과정에서 3배로 확대하여 12,000배의 사진을 얻었다.

(2) 체적 밀도 (volume density)

근원섬유와 미토콘드리아의 체적 밀도의 측정은 10d (d = 10 mm)인 단일 격자 test grid를 사용하여 Loud et al. (1978)의 방법에 의해 근원섬유의 장축에 대해 19°의 기울기로 grid를 배치하여 Park et al. (1989)의 점계수법 (point counting method)으로 계수한 후 다음 식을 적용하였다.

$$V_v = \frac{V_c}{V_T} = \frac{P_c}{P_T}$$

(V_v = 체적 밀도, V_c = 대상물의 체적, V_T = 전체 체적, P_c = intersection 된 대상물 점의 수, P_T = 전체 점의 수)

(3) 수 밀도 (numerical density)

미토콘드리아의 수 밀도 계산은 10d (d = 10 mm)인 단일 격자 test grid를 사용하여 계수한 후 다음 식에 적용하였다.

$$N_v = \frac{1}{1.58} \times \frac{N_A^{3/2}}{V_v^{1/2}}$$

(N_v = 수 밀도, N_A = V단위 면적당 대상물의 수, V_v = 단위 체적)

4. 통계처리

계수되어진 모든 표본은 SPSS WIN 통계 프로그램을 이용하여 기초통계량을 조사하였다.

결 과

1. 광학현미경적 관찰결과

1) 어리호박벌 (*Xylocopa appendiculata circumvolans* Smith)

어리호박벌은 근섬유의 장축을 따라 규칙적이고 조밀한 Z대가 관찰되었고 근절이 짧게 나타났다. 세포 내 간질(interstitium)이 거의 없고, 근섬유를 따라 배열된 많은 수의 사립체를 관찰할 수 있었다(Fig. 1a). 근섬유 폭(muscle fiber width)은 매우 넓게 나타났다.

2) 쇠족범잠자리 (*Davidins lunatus* B.)

쇠족범잠자리의 근섬유는 가로무늬의 배열이 일정한 곳과 그렇지 않은 곳이 관찰되었다. 드물게 타원형의 핵들이 관찰되었고, 근절의 길이는 길게 나타났다(Fig. 1b). 근섬유 폭은 여러 형태로 관찰되었다.

3) 넓적사슴벌레 (*Serrognathus platymelus castanicdor* M.)

넓적사슴벌레는 근섬유의 가로무늬가 일정하게 나타났다, Z대가 굵고 근절의 길이는 길게 나타났다. 사립체는 거의 관찰되지 않았으며, 넓은 세포간질을 볼 수 있었다(Fig. 1c). 근섬유 폭은 어리호박벌보다 좁고, 쇠족범잠자리보다 넓게 관찰되었다.

2. 전자현미경적 관찰결과

1) 어리호박벌 (*Xylocopa appendiculata circumvolans* Smith)

어리호박벌은 매우 규칙적인 형태의 근원섬유가 일직선상의 배열을 보였으며, 사립체는 근원섬유 사이의 간질을 완전히 채우고 있었으며 크기와 모양이 다양하였다(Fig. 2). 심근의 종단면에서 관찰되는 Z대에 의해 분리되어 잘 배열된 근절이 관찰되었으며 근절의 길이는 매우 균일하였다.

세포 내 간질은 거의 없이 가로소관과 근형질세망이 소수 관찰되었다.

2) 쇠족범잠자리 (*Davidins lunatus* B.)

쇠족범잠자리는 긴 형태의 사립체가 연결되어 근

Table 1. Results of stereological analysis of insect flight muscle

Groups	Volume density ($\mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$)			Numerical density (Number/ μm^2)
	Myofibril	Mitochondria	Sarcoplasmic reticulum	Mitochondria
<i>Xylocopa appendiculata circumvolans</i> Smith	0.597 ± 0.0122 (n=104)	0.299 ± 0.0122 (n=105)	0.006 ± 0.0004 (n=140)	11.039 ± 0.0647 (n=105)
<i>Davidins lunatus</i> B.	0.518 ± 0.0120 (n=90)	0.259 ± 0.0093 (n=90)	0.073 ± 0.0067 (n=90)	8.718 ± 0.4725 (n=90)
<i>Serrogathus platymelus castanicdor</i> M.	0.735 ± 0.0713 (n=92)	0.056 ± 0.0030 (n=89)	0.012 ± 0.0007 (n=75)	0.960 ± 0.0641 (n=89)

Each value represents mean + S.E.

Table 2. Comparison of muscle fiber length & width among insect flight muscle

Groups	Muscle fiber length (μm)	Muscle fiber width (μm)
<i>Xylocopa appendiculata circumvolans</i> Smith	100 μm 이상 (n=40)	61.23 ± 1.019 (n=40)
<i>Davidins lunatus</i> B.	44.35 ± 3.245 (n=40)	1.50 ± 0.096 (n=40)
<i>Serrogathus platymelus castanicdor</i> M.	33.55 ± 3.121 (n=40)	2.53 ± 0.092 (n=40)

Each value represents mean + S.E.

원섬유의 장축을 따라 배열되어 있었다. 일정한 길이의 근절이 관찰되었고, Z대 주위에서 지방소적(lipid droplet)이 다수 나타났다(Fig. 3). 근형질세망은 근원세사와 사립체를 둘러싸면서 서로 연결된 창모양의 라멜라 구조로 관찰되었다. 가로소관도 근원섬유 전체에 골고루 분포하였다.

3) 넓적사슴벌레 (*Serrogathus platymelus castanicdor* M.)

넓적사슴벌레는 근절의 길이가 길고, Z대가 지그재그형태로 나타났으며, H대가 관찰되지 않았다(Fig. 4). 넓은 세포 내 간질에서 소수의 사립체를 관찰할 수 있었고, 근형질세망은 거의 관찰되지 않았다.

3. 입체해석학적 관찰결과

어리호박벌, 쇠족범잠자리, 넓적사슴벌레의 날개근육 내에 포함된 근원섬유, 사립체, 근형질세망을 양적으로 분석한 결과는 Table 1과 같다.

각 군의 근섬유 길이(muscle fiber length)와 폭(width)을 측정된 결과는 Table 2와 같다.

Table 3. Comparison of the length of sarcomere among insects flight muscle

Groups	Length of sarcomere (μm)
<i>Xylocopa appendiculata circumvolans</i> Smith	2.237 ± 0.0087 (n=140)
<i>Davidins lunatus</i> B.	2.885 ± 0.0260 (n=120)
<i>Serrogathus platymelus castanicdor</i> M.	7.993 ± 0.1702 (n=120)

Each value represents mean + S.E.

비행량의 차이에 따른 심근조직의 수축 정도를 알아보기 위해 근절의 길이를 측정된 결과, 넓적사슴벌레에서 7.993 ± 0.1702 μm , 쇠족범잠자리에서 2.885 ± 0.0260 μm , 어리호박벌에서 2.237 ± 0.0087 μm 순으로 근절이 짧게 나타났다(Table 3).

고 찰

본 연구는 비행량과 비행형태가 다른 곤충의 날개근육 차이를 형태학적 측면에서 알아보려고 하였다. 실험에 사용한 3종의 곤충은, 몸길이 20 mm 정도의 대형종으로 꽃을 찾아다니며 꽃가루를 채집하는 종으로 주로 육상생활을 하며 두 쌍의 날개를 동시에 움직여 매우 활발히 비행하는 어리호박벌(벌목, 꿀벌과), 배 길이 30~33 mm, 뒷날개길이 25~28 mm 정도의 대형종으로 유충시기에는 수서 생활을 하지만 성체가 되면 육상생활을 하며, 날개는 사냥이나 이동의 수단으로 이용하는데 비행 시 두 쌍의 날개를 독립적으로 움직여 고속비행을 하는 쇠족범잠자리(잠자리목, 부채장수잠자리과), 몸길이 25~35 mm의 대형

중으로 육상생활을 하며 날개를 거의 사용하지 않으며, 1쌍의 앞날개는 경편형태로 변형되어 비행시 뒷날개만을 사용하는 넓적사슴벌레(딱정벌레목, 사슴벌레과)로 하였다.

대부분의 곤충은 동시성 날개근육으로, 조직학적 관점에서 근형질세망(sarcoplasmic reticulum)의 양이 많고 근육전체에 분포해 있으며 I대(I band)가 넓게 관찰(Josephson, 1984; Malamud et al., 1988; Mizisin & Ready, 1986)되는 반면, 벌, 사슴벌레, 파리 등이 속하는 비동시성 날개근육(Josephson & Ellington, 1997; Josephson et al., 2000)은 근형질세망의 양이 적고 분포양상도 제한적이며 I대가 좁게 나타난다. 이러한 날개근육 수축의 자극전도 측면에서 동시성 날개근육과 비동시성 날개근육에서 나타나는 형태적 차이는, 수축요소의 배열이 아니라 근형질세망의 양과 분포에서 기인하며 가로소관(t tubule)과도 관계가 있다(Candia Carnevali & Regar, 1981; Chapman, 1980; Hagopian & Spiro, 1967). 또한 동시성 날개근육은 직접 날개의 기부에 꽃혀 있어 직근이라 하며, 비동시성 날개근육은 가슴을 구부림으로써 간접적으로 날개를 움직이므로 간접근이라 한다(Chapman, 1980).

곤충 날개근육의 가로소관은 Z대(Z band)에 위치하며(Trombitas & Pollack, 1995), 근섬유 내에서 근형질세망과 가로소관의 결합형태에는 이조체(diads), 삼조체(triads), 사조체(tetrads)로 형성되어 있으며(Delcarpio et al., 1983), 잠자리 날개근육의 경우 하나의 근섬유(single muscle fiber) 내에 각기 다른 이조체, 삼조체, 사조체가 혼재하고 있었다(Smith, 1965).

한편, 동일 개체의 날개근육과 다리근육을 비교해 보면, 빠르게 움직이는 곤충 날개근육의 근절(sarcomere)은 느리게 움직이는 다리근육의 근절보다 짧게 나타남을 알 수 있었다(Mandelstam & Nasledov, 1977).

날개근육의 조직학적 및 미세구조적 관찰 결과, 각 실험군에서 매우 다른 형태로 나타났다. 어리호박벌은 포유류의 골격근 형태와 유사하였다. 쇠족범잠자리는 근원섬유가 다발을 이루지 않고 근원섬유 자체가 근육을 구성하는 단일날개근육(single flight muscle)으로 관찰되었다(Delcarpio et al., 1983). 넓적사슴벌레에서는 H대가 관찰되지 않았다.

근수축에 필요한 에너지 생산에 관계하는 사립체는 어리호박벌과 쇠족범잠자리에서 근원섬유의 장축을 따라 근원섬유 사이에서 매우 조밀하게 관찰되었고, 넓적사슴벌레에서는 소수 관찰되었다. 대사적으로 가장 활성이 큰 곤충의 날개근육이 가지는 특징 중 하나가 많은 수의 사립체를 가진다는 것이다(Eisner et al., 1977; Harrison & Roberts, 2000). 날개를 사용하는 빈도에 비례하여 활동성이 많을수록 에너지원의 공급에 필요한 사립체가 많이 관찰되어 근육수축에 필요한 ATP를 생성하는 효소도 많이 존재하는 것으로 판단되었다(Smith, 1965).

쇠족범잠자리에서는 다른 2종에서 볼 수 없는 지방소적이 관찰되었다. 날개근육 수축시 주요에너지원은 탄수화물이며, 에너지를 저장시켜두는 형태인 지방은 적은 양만이 필요하다(Borror et al., 1981). 메뚜기에서는 장시간 비행시, 연료소비형태가 탄수화물에서 지질로 변해감이 확인되었다(Van der Horst et al., 1993; Wegener, 1996). 쇠족범잠자리보다 훨씬 더 잦은 날개 진동수를 가지는 어리호박벌에서는 지방소적이 거의 관찰되지 않았다. 이것은 어리호박벌이 이동시 단거리를 자주 비행하는 운동패턴을 보이는 반면, 쇠족범잠자리는 어리호박벌과 달리 gliding을 하며, 에너지를 많이 소비하는 형태인 정지비행을 할 뿐만 아니라(Chapman, 1980), 어리호박벌보다 몸크기에 대한 날개의 비율도 훨씬 크므로 그만큼 에너지가 많이 요구되는 것으로 판단되었다.

Trombitas & Tigyi-Sebes(1979)는 곤충의 날개근육에서 굵은 세사(thick filament)와 Z대 사이의 상호연결이 관찰된다고 하였고, Deatherage et al.(1989)은 곤충들마다 Z대 구조는 다른 형태로 나타나며 근육의 생리적 상태에 따라 다양하게 관찰된다고 하였는데, 어리호박벌의 Z대는 매우 조밀하고 굵게 관찰되어, Z대의 단백질 배열이 복잡하고 조밀하게 나타남을 알 수 있었다(Deatherage et al., 1989).

입체해석학적 연구에서, 근원섬유의 체적밀도는 넓적사슴벌레에서 가장 높게 나타났으며, 어리호박벌, 쇠족범잠자리 순으로 낮게 나타났다. 사립체의 체적밀도는 어리호박벌이 가장 높았으며, 쇠족범잠자리, 넓적사슴벌레 순으로 낮게 관찰되었다. 뿐만 아니라 사립체 내막의 조밀도가 포유류보다 곤충에서 더 높

다고 알려져 있는데 (Trombitas & Tigyi-Sebes, 1977) 이것은 곤충의 근육이 높은 산소 요구도를 가진다는 것을 암시해 주고 있다. 그렇지만 곤충의 사립체 체적밀도는 섬유 체적당 35~40%를 넘지 않으며, 비행시 근섬유를 보호하는 역할도 담당하는 것으로 알려져 있다 (Wells & Ellington, 1994). 또한 평상시 날개를 거의 움직이지 않는 넓적사슴벌레는 사립체의 수가 적어 에너지 소비가 별로 없다고 판단되었다 (Park et al., 1992).

근형질세망의 체적밀도는 쇠족범잠자리에서 가장 높았으며, 넓적사슴벌레, 어리호박벌의 순으로 나타났다. 비행량이 가장 많은 어리호박벌은 사립체 함량이 높은 반면, 근형질세망이 적은 비율로 나타났다. 벌목은 비동시성 날개근육을 가져 근형질세망의 비율이 적지만, 한번의 신경자극으로도 여러 근육이 동시에 수축·이완하므로, 높은 비행량을 감당해 낼 수 있다 (Carnevali & Regar, 1981; Chapman, 1980; Hagopian & Spiro, 1967). 어리호박벌보다 적은 비행량을 나타내는 쇠족범잠자리에서는 사립체 함량이 어리호박벌과 유사하였으나, 어리호박벌과 비교하여 볼 때 근형질세망의 양은 훨씬 높게 나타났다. 동시성 날개근육을 가지는 쇠족범잠자리는 어리호박벌보다 근원섬유와 사립체의 양은 낮게 나타났지만 상대적으로 근형질세망의 양이 높게 나타나 저장된 Ca^{2+} 양이 많을 것으로 판단되었고, 이로 인해 근수축시 다량의 Ca^{2+} 를 방출해 날개근육의 수축·이완을 용이하게 해줄 것으로 사료되었다 (Josephson, 1984; Josephson & Ellington, 1997; Josephson et al., 2000).

근섬유 길이와 폭은 어리호박벌에서 현저히 높게 측정되어 비행량이 가장 많음이 확인되었다.

실험군 3종에서 근절의 길이를 측정해 본 결과 비행량이 큰 변이로 작용하였는데, 어리호박벌에서 그 길이가 가장 짧게 나타났으며 (Josephson & Ellington, 1997), 뒷날개만으로 드물게 이동하는 넓적사슴벌레는 근절이 가장 길게 나타났다. 근절의 길이가 짧을수록 근육의 수축·이완은 빨리 일어나므로 (Otten, 1987), 어리호박벌은 근육수축이 매우 빨리 일어나며, 넓적사슴벌레는 느린 근육수축을 나타낼 것이라 사료되었다.

이상의 실험결과를 종합해 볼 때, 비행량과 비행형

태는 곤충에 있어서 날개근육의 형태적 변화를 초래하고, 근육의 기능·생리적 구조는 종의 서식습성과 밀접한 연관성이 있는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- Bae YJ, Lee SY, Lee WK: Insects' life in Korea. Apterygota, Exopterygota (in part), Aquatic insects. I. pp. 56, 1998.
- Borror et al.: An introduction to the study of insect. 5th, pp. 51 71, 1981.
- Candia Carnevali MD, Reger JF: Slow acting flight muscles of saturniid moths. J Ultrastruct Res 79 : 241 249, 1981.
- Chapman RF: The insects; structure and function. The English University Press, pp. 243 273, 1980.
- Deatherage JF, Cheng NQ, Bullard B: Arrangement of filaments and cross links in the bee flight muscle Z disk by image analysis of oblique sections. J Cell Biol 108(5) : 1775 1782, 1989.
- Delcarpio JB, Baerwald RJ, Magnuson LJ: Multiple SR T tubule junctions in a single insect flight muscle fiber. J Ultrastruct Res 84 : 151 160, 1983.
- Eisner, Thomas, Wilson, Edward Osborne: The flight muscles of insects. Printed in the United States of America, pp. 41 49, 1977.
- Hagopian M, Spiro D: The sarcoplasmic reticulum and its association with the T system in an insect. J Cell Biol 32 (3): 535 545, 1967.
- Harrison JF, Roberts SP: Flight respiration and energetics. Annu Rev Physiol 62 : 179 205, 2000.
- Josephson RK: Contraction dynamics of flight and stridulatory muscles of tettigoniid insects. J Exp Biol 108 : 77 96, 1984.
- Josephson RK, Ellington CP: Power output from a flight muscle of the bumblebee *bombus terrestris*. I. Some features of the dorso ventral flight muscle. J Exp Biol 200 : 1215 1226, 1997.
- Josephson RK, Malamud JG, Stokes DR: Power output by an asynchronous flight muscle from a beetle. J Exp Biol 203 : 2667 2689, 2000.
- Kim JI, Lee SY, Lee WK: Insects' life in Korea. Coleoptera III. pp. 36 37, 1998.
- Lee JW, Lee SY, Lee WK: Insects' life in Korea. Hymenoptera, Diptera, Mecoptera, Neuroptera, Dermaptera IV. pp.

- 123, 1998.
- Loud AV, Anversa P, Giacomelli F, Wiener J: Absolute morphometric study of myocardial hypertrophy in experimental hypertension. I. Determination of myocytesize. Lab Invest 38: 586-596, 1978.
- Mandelstam luE, Nasledov GA: Functional features of the locomotor muscles of the locust. Neurofiziologija 9(5): 532-538, 1977.
- Malamud JG, Mizisin AP, Josephson: The effects of octopamine on contraction kinetics and power output of a locust flight muscle. J Comp Physiol A 162: 827-835, 1988.
- Marden JH: Variability in the size, composition, and function of insect flight muscles. Annu Rev Physiol 62: 157-178, 2000.
- Mizisin AP, Ready NE: Growth and development of flight muscle in the locust (*Schistocerca nitens* Thünberg). J Exp Zool 237: 45-55, 1986.
- Otten E: Optimal design of vertebrate and insect sarcomeres. J Morphol 191(1): 49-62, 1987.
- Park GA, Lee WT, Park MK, Lee JE: Basic Histology. Korea Medical Publishing Co. pp. 257-283, 1992.
- Park WH, Chung HJ, Kim DH: Effect of chlorambucil on cardiac ultrastructure of mouse. Korean J Electron Microscopy 16(1): 47-62, 1989. (Korean)
- Richards OW, Davies RG: Imms' general textbook of entomology. volume 1. Structure, physiology and development, pp. 86-93, 1979.
- Ross HH et al.: A textbook of entomology. 4th, pp. 170-173, 1982.
- Royuela M, Fraile B, Arenas MI, Paniagua R: Characterization of several invertebrate muscle cell types; a comparison with vertebrate muscle. Microsc Res Tech 41: 107-115, 2000.
- Smith DS: The flight muscles of insect. pp. 41-49, 1965.
- Trombitas K, Pollack GH: Visualization of the transverse cytoskeletal network in insect flight muscle by scanning electron microscopy. Cell Motil Cytoskeleton 32(3): 226-232, 1995.
- Trombitas K, Tigyi Sebes A: Insect Flight Muscle. Elsevier, Amsterdam, pp. 79-90, 1977.
- Trombitas K, Tigyi Sebes A: The continuity of thick filaments between sarcomeres in honey bee flight muscle. Nature 27: 281(5729): 319-320, 1979.
- Trombitas K, Tigyi Sebes A: Cross bridge interaction with oppositely polarized actin filaments in double overlap zones of insect flight muscle. Nature 309(5964): 168-170, 1984.
- Van der Horst DJ, Van Doorn JM, Passier PC, Vork MM, Glatz JF: Role of fatty acid binding protein in lipid metabolism of insect flight muscle. Mol Cell Biochem 123(1-2): 145-152, 1993.
- Wegener G: Flying insects: model systems in exercise physiology. Experientia 52(5): 404-412, 1996.
- Wells DJ, Ellington CP: Beyond the vertebrates: achieving maximum power during flight in insects and hummingbirds. Adv Vet Sci Comp Med 38B: 219-232, 1994.

< 국문초록 >

비행량과 비행형태가 다른 곤충 날개근육의 차이를 형태학적 관점에서 알아 보고자 어리호박벌(벌목, 꿀벌과), 쇠족범잠자리(잠자리목, 무채장수잠자리과), 넓적사슴벌레(딱정벌레목, 사슴벌레과)의 3종을 실험에 이용하였다. 실험군은 광학현미경적 방법, 투과전자현미경적 방법, 입체해석학적 방법을 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

광학현미경적 관찰 결과, 비행량이 많은 어리호박벌은 매우 규칙적인 분포를 나타내는 근원세사 사이에서 많은 수의 사립체가 관찰되었고, 근절도 짧게 나타났다. 쇠족범잠자리는 근절이 길어 어리호박벌과 비행형태의 차이가 있음을 반영했다. 날개근육을 거의 사용하지 않는 넓적사슴벌레는 사립체가 거의 관찰되지 않았고, 근절은 매우 길게 나타났다.

전자현미경적 관찰 결과, 어리호박벌과 넓적사슴벌레에서 적은 수의 근형질세망과 가로소관이 관찰되었고, 쇠족범잠자리에서는 근형질세망이 많이 분포하였으며 지방소적이 많이 관찰되었다.

입체해석학적 관찰 결과, 근원섬유의 체적밀도는 넓적사슴벌레에서 가장 높았으며, 어리호박벌, 쇠족범잠자리의 순으로 낮게 나타났다. 사립체의 체적밀도는 어리호박벌에서 가장 높았으며, 근형질세망의 체적밀도는 쇠족범잠자리에서 가장 높게 관찰되었다. 사립체의 수밀도는 어리호박벌에서 가장 높았다.

따라서 비행량과 비행형태에 따른 곤충 날개근육의 형태학적 차이는 운동량과 운동형태에 영향을 미치는 서식습성에 의해 변화되는 것으로 나타났다.

FIGURE LEGENDS

- Fig. 1.** Light micrograph of flight muscle of 3 species insects, Toluidine blue, scale bar = 50 μm .
Longitudinal section of flight muscle showing the structure of the muscle fiber.
a. *Xylocopa appendiculata circumvolans* Smith
b. *Davidins lunatus* B.
c. *Serrognathus platymelus castanicdor* M.
- Fig. 2.** Electron micrograph of flight muscle of *Xylocopa appendiculata circumvolans* Smith, uranyl acetate and lead citrate, scale bar = 2 μm .
The sheetlike contractile fibrils alternate with dense mitochondria. Identification of A band (A), I band (I), H band (H) and Z line (Z) was clear.
- Fig. 3.** Electron micrograph of flight muscle of *Davidins lunatus* B., uranyl acetate and lead citrate, scale bar = 2 μm .
The sarcomeres are well aligned and a few lipid droplets (L) were found in cytoplasm of myocytes.
- Fig. 4.** Electron micrograph of flight muscle of *Serrognathus platymelus castanicdor* M., uranyl acetate and lead citrate, scale bar = 2 μm .
H band was not found and also mitochondria (M) were rarely observed in cytoplasm.





