

## 生體制御 시스템

朴 相 嗜

연세대학교 전기과 교수, 공학박사

### 1. 머릿말

生體와 같이 그의 内部 構造나 周邊條件에 의해 變化가 複雜한 對象에 대한 研究가 여러 分野에서 協力함으로써 그 成果를 나타내고 있다.

現在 生體시스템(biosystems)의 機能과 情報 處理 機構에 관해서는 生理學, 心理學, 數學, 各種 工學등의 分野에서 研究되고 있으며, 各各 경우에 따라서 여러 가지 工學的인 모델과 시물레이션의 構成이 이루어지고 있다. Wiener의 「사이버네틱스」(cybernetics) 提唱이후 生體시스템의 機能 解析 또는 이것을 應用하는 研究가 한층 활발하게 되었고, 그 結果 많은 發展을 나타내게 되었다.

그러므로 生體制御 시스템에 대하여 生體의 物理的인 機能을 중심으로 生體시스템의 特色과 生體 機能의 모델 및 시물레이션을 概略的으로 紹介하고자 한다.

### 2. 生體시스템의 特徵

生體는 수 많은 여러 要素에 의해 構成된 複雜한 시스템이고, 이 要素들이 有機的으로 結合 協助되고 있는 것이다.

가장 명백한 協助作用은 生體에 饋還調節系(feedback control system)가 있다는 사실이다. 이것은 예를 들면 神經系와 筋肉系로 區分

하여 工學시스템에 있는 서어보機構(servomechanism)와 같은 入力의 變化에 追從하는 追値 制御系와 恒常性(homeo stasis)이라 불리는 一定한 값을 維持하는 프로세스 制御系와 같은 定値 制御系로 다를 수 있다.

그러나 生體시스템에는 많은 點에서 工學시스템과는 本質的으로 다른 特色을 가지고 있다. 그러므로 生體시스템의 特徵을 몇 가지 살펴보고자 한다.

먼저 生體시스템에는 構造나 機能으로 볼 때 階層性(hierarchy)이 있다는 것이다. 原始時代 바다에 탄생한 生命에서 현재에 이르기 까지 긴 歷史속에 規定된 發展의 階層을 나타낸 것이 있다. 편의에 따라 나누어 보면, 分子(이온에서 酵素系까지)—細胞內 構造—細胞—組織—器管—器管群—個體—個體群이라는 레벨을 생각하게 된다. 生體에는 많은 自律的인 調節系가 있으므로 이것들이 饋還에 의해 目的하는 狀態를 維持하는 階層調節을 하고 있다.

다음에 特異性(uniqueness)을 들 수 있다. 이것은 凡用性的 基盤에 세워진 特異性이 있고, 構造의 特異성에 따른 것이 있다. 예를 들면, 生殖器管系는 生殖을 위해 쓰여지고 있으며, 消化器管系와는 직접 관계가 없다. 즉 生體內의 여러 가지 器管系는 獨立性을 가지고 있으며, 同一 系統속에 並列的으로 存在한다.

生體시스템의 큰 特徵으로 適應性(adaptive)이 있다. 動的 平衡이 生物의 基礎가 되어 있는 以上, 이것은 당연하다고 여겨지고 있으나, 生體의 形態나 行動이 아주 廣範하게 適合한 目的을 지니고 있는 것은 注目할 價値가 있다. 適應性은 時間單位로 보면 秒의 레벨로 일어나는 生理的인 것에서 年月의 레벨로 代謝的인 것, 다음에 世代의 길이를 나타내는 것 까지 있다. 그러나 生體시스템은 最適의 狀態를 향하여 多樣하게 構造도 機能도 變해 가는 性質을 가지고 있는 것이다.

人工 시스템에 비하여 生體시스템에 特徵的인 性質로 冗余성(redundancy)을 들 수 있다. 人工 시스템에서는 經濟性이 重要한 問題이므로 여유를 두지 않고 꼭 맞게 設計하는 것이 많다. 그렇지만 生體시스템에서는 經濟性에 관한 아주 낭비가 많아서 生體의 構成 要素가 相當수 파괴되어도 그 機能을 維持 할 수 있고 더우기 경우에 따라서는 再生이 이루어지고 있다.

이 외에 반드시 生體시스템만의 特徵인 性質은 아니나, 非線形性(nonlinearity)을 들 수 있다. 神經細胞의 興奮이나 其他 生體 一般에 자

주 보이는 週期的인 現象도 非線形性 없이는 成立하지 않는다. 또 發生, 分化, 形態 形成 등의 問題도 一般으로 非線形性을 考慮하지 않고는 理解할 수 없다.

### 3. 生體 機能의 研究 課題

生體의 시뮬레이션 研究는 生體工學의 重要한 一面을 解決해 주고 있으며, 새로운 開發에 資料를 提供하고 있다.

예를 들면 入力刺戟—感覺器—大腦—效果器—行動을 주로 하는 神經系의 情報處理機構의 모델 또는 시뮬레이션 研究는 文字·圖形 또는 音聲의 合成, 認識裝置등을 포함하는 人工知能(artificial intelligence)이나 로보트의 開發에 이용되고, 骨格이나 內臟에 대한 모델 또는 시뮬레이션 研究는 義手義足 또는 人工臟器의 開發에 이용되고 있다.

表 1은 生體工學의 研究 課題에 대하여 整理한 것으로, 生體시스템의 基礎 研究를 왼쪽란에 또 모델 研究를 통하여 工學 應用에 쓰인다고 생각하는 것을 오른쪽란에 나타내고 있다.

表 1. 生體의 研究와 生體工學의 研究課題

		生 體 研 究	工 學 研 究
生體情報處理(神經系)	感覺情報系	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 眼光學系, 聽覺傳音系, 皮膚力學</li> <li>• 受容器의 메카니즘</li> <li>• 末梢神經系의 時空間 回路와 心理 物理 現象</li> <li>• 眼球制御系</li> <li>• 視覺領, 聽覺領등의 構造와 特徵 抽出 機能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 새로운 光學器械, 計測器械의 開發</li> <li>• 畫像工學, 音響工學에의 寄與</li> <li>• 패턴(圖形, 文字, 物體, 音聲등) 認識에 있어서 特徵 抽出 機構</li> <li>• 로보트의 感覺系</li> <li>• 水中레이더, 方向探知補助 機能 裝置</li> </ul>
	中樞情報系	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 大腦 小腦皮質의 神經網 構成 樣式</li> <li>• 뉴우론 回路網의 一般의 機能</li> <li>• 條件反射, 學習, 記憶·連想記憶·認識등의 高次心理現象의 메카니즘</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 新論理·機能素子</li> <li>• 並列型計算機</li> <li>• 패턴認識에 있어서 認識機構</li> <li>• 로보트의 頭腦, 人工知能 一般</li> <li>• 適應制御機器</li> </ul>

生體制御 시스템

運動情報系	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 發聲의 메카니즘</li> <li>• 小腦 運動 制御系의 分析</li> <li>• 手足의 運動系(運動神經系의 機序와 骨格筋의 制御)</li> <li>• 感覺入力에 대한 行動과의 關係</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 人工音聲裝置</li> <li>• 義手·義足</li> <li>• 로버트의 運動系(步行, 랜드링, 姿勢維持)</li> <li>• 人間工學에의 應用</li> </ul>
에너지變換	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 光受容, 音受容, 壓受容등의 機序</li> <li>• 生物發光, 生物電池, 超音波 발생의 機序</li> <li>• 筋收縮, 聲帶의 機序</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高能率, 高感度 에너지變換裝置</li> <li>• 生體內 電池, 生體로의 에너지 供給</li> <li>• 光, 電氣, 放射線등의 生體作用</li> </ul>
生體制御系	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 恒常性維持의 메카니즘, 內分泌의 代謝系의 機能</li> <li>• 循環系, 呼吸系, 消化器系, 排泄系등의 機能</li> <li>• 生物의 群으로서의 機能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 醫療用 電子工學(診斷, 治療)</li> <li>• 人工臟器(人工心, 人工胃등)</li> <li>• 適應制御呼吸裝置</li> <li>• 多段階制御, 適應制御, 여유성制御</li> </ul>
生體材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 生體膜, 筋, 皮膚의 物理·化學</li> <li>• 눈의 水晶體</li> <li>• 骨格의 物理·化學</li> <li>• 뉴우론의 生物物理</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 人工筋등의 材料開發</li> <li>• 렌즈의 開發</li> <li>• 高分子의 材料 開發</li> <li>• 高感度, 高密度 메모리材料</li> </ul>
遺傳工學	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 遺傳의 엔고리즘</li> <li>• 自己增殖, 自己修復의 機能</li> <li>• 歸巢本能, 生體內時計의 메카니즘</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 遺傳子의 制御</li> <li>• 自己增殖, 自己修復하는 機械</li> </ul>

4. 生體制御시스템의 보기

生體制御시스템에서 다루어지고 있는 內容을 表 1에서 取扱하였으나, 여기서는 特히 다음 몇 가지의 보기를 中心으로 다루고자 한다.

(1) 視覺系

視覺系는 眼球와 大腦皮質의 視覺領(visual cortex) 및 이 두 가지의 連絡路나 기타 附屬器 管을 말하고 있는 데, 그림 1과 같이 세가지 領域으로 크게 나뉘서 그 기능을 나타낼 수 있다.

① 눈의 生理 機能

눈은 生存을 위한 活動에 있어서 視覺을 담당

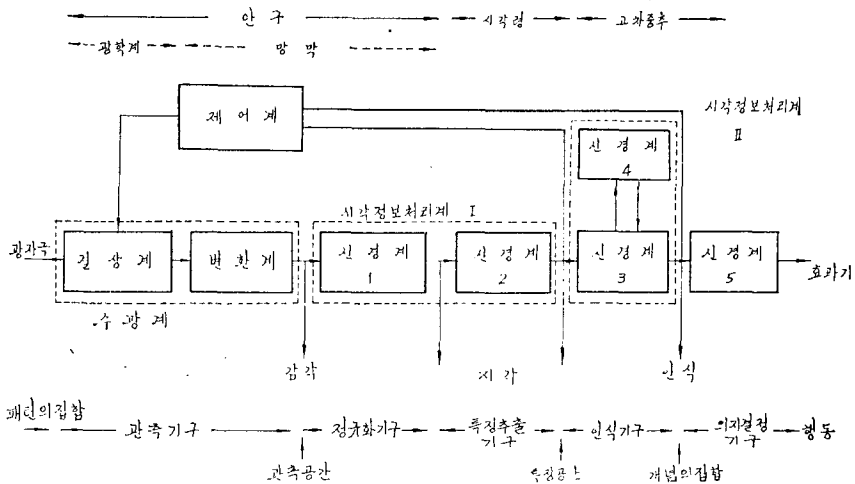


그림 1. 視覺系의 블럭 線圖



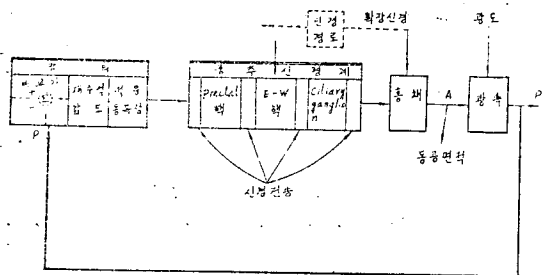


그림 4. 瞳孔反射系의 情報—흐름 블럭線圖<sup>4)</sup>

을 調節하며, 또한 瞳孔은 網膜에 도달하는 光束을 調節한다. 이때 光束이 虹채를 발견시키는데 虹채가 약간 열리며, 다량의 光束이 網膜에 도달한다. 그러면 虹채는 網膜이 가까워지도록 信號를 보내고 가까워지면 小量의 光束이 網膜에 도달하므로 虹채가 열리도록 信號를 보낸다.

이러한 사실을 간단한 方程式으로 나타내면 網膜에 도달하는 光束( $F_R$ )은 入射照度( $E_i$ )와 瞳孔面積( $A_p$ )의 곱으로 나타낼 수 있다. 그러므로 瞳孔面積은 網膜에 도달하는 光束의 函數  $A_p = f(F_R)$ 로 나타낼 수 있다.

(2) 運動 制御系

① 眼球運動系의 生理 機能

그림 5는 眼球運動系의 構造와 神經傳送 經路를 나타낸 것이다. 전두엽(frontal lobe)의 일부를 刺戟하면 眼球運動이 일어나는데, 이 領域은 전두 안구영역으로 集中되며 前頭皮質의 第 8

領域에 위치한다. 전두 안구영역을 刺戟함으로써 관찰된 眼球運動은 후두영역(occipital field)을 刺戟했을 때의 잠복시간 보다 훨씬 짧다.

眼球運動에 包含되는 모든 經路는 궁극적으로 동안(oculomotor) (III), 활차(trochlear) (IV), 외선(abducens) (VI), 神經의 뇌간핵(brainstem nuclei)에서 끝나야 한다. 왜냐하면 이것들은 外眼筋에 대한 神經 支配의 유일한 근원이 되기 때문이다.

外眼筋은 모두 6개로 되어 있으며, 이것들은 3개의 神經과 腦 사이에 柱狀으로 配列되어 있는 核에 의하여 神經刺戟을 받게 된다. 이들 核 중 가장 꼬리부분의 것은 외선 신경(abducens nerve) (VI)이고, 이것은 단지 외직근(lateral rectus muscle, LR)만을 神經刺戟하며, 제 VI 신경을 構成하고 있는 線維質은 좌측 외직근을 神經刺戟하게 된다. 외선핵에 대한 상측(rostra)은 활차핵이며, 활차신경(IV)은 모두가 交叉線維인 상사근(superior oblique muscle, SO)만을 神經刺戟한다.

한편 제 IV 및 제 VI 신경은 단지 한개의 外眼筋에 作用하기 때문에 그들의 神經 經路는 단순하고 아직은 精確한 機能이 잘 알려져 있지 않다.

다른 한편으로 動眼神經(III)은 6개의 外眼筋 중 하직근(inferior rectus, IR), 내직근(medial rectus, MR), 하사근(inferior oblique, IO), 상직근(superior rectus, SR) 등의 4개의 筋肉을 刺戟한다. 細胞核 밑부분에 있는 細胞는 내직근과 하사근을 刺戟하여 활동시키며 완전한 交叉線維로 보고 있다.

外眼筋을 콜린, 아세틸 콜린 및 니코틴 등의 반응으로도 收縮運動을 한다. 外眼筋은 幾何學的인 反應에 의하여 筋錐體를 形成한다. 이 筋

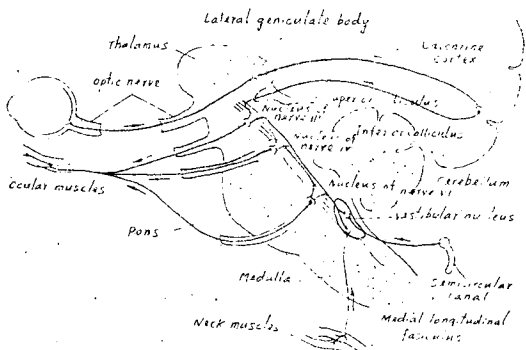


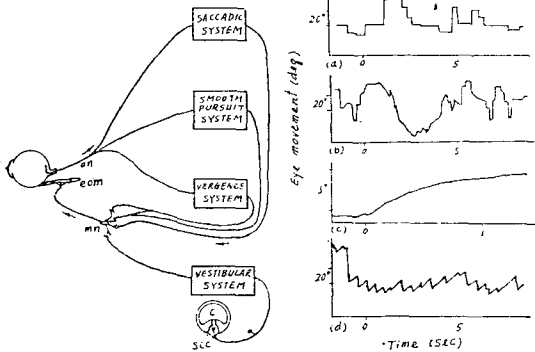
그림 5. 眼球運動系의 構造

肉은 腱(tendon)에서 발생되는 안와(orbit)의 頂點으로부터 眼球의 뒷쪽 부분까지 擴張 되어서 부착되어 있다. 6個의 外眼筋의 結合된 활동은 약 100°의 直徑을 갖는 圓形 面積內에 있는 어떤 對象物을 固定시킬 수 있게 한다.

2. 眼球運動系의 모델

이 運動系에 관한 모델은 Young과 Stark가 提案한 것이 有名하고 그림 6은 이것을 나타낸 것이다.

이 외에도 여러 사람에 의한 研究가 있으나, 특히 Robinson이 提案한 모델은 神經 生理學의 데이터를 根據로 構成한 것이기 때문에 比較的 眼球와 頭腦의 神經學의 構造와 機能을 再現시키는 데 있어서 適合하다고 생각한다.



saccadic 지연  $T_1=150$  msec dead zone  $\delta_1=0.3^\circ$   
 $\tau=200-240$ msec  
 pursuit 지연  $T_2=134$ msec 포화  $\delta_2=30$ pg/sec  
 $\zeta=0.7$   
 pursuit lag  $T_3=40$ msec 절단  $\delta_3=100$ deg/sec  $\omega_n=120$ Red/sec

그림 6. Young의 確率의 샘플 데이터 모델

(3) 循環系

① 心臟血管系의 生理 機能

生體內에서 血液循環은 끊임없이 일어나서 組織細胞에 알맞는 生活環境을 提供하고 있다.

血液의 循環은 心臟의 펌프作用에 依하여 그림 7과 같이 수행되고 있다. 卽 體循環(systemic

mic circulation)은 左心室→大動脈→組織→大靜脈→右心房의 回路로 이루어지고, 肺循環(pulmonary circulation)은 右心室→肺動脈→肺靜脈→左心房의 회로로, 그리고 血管系는 전체로서 하나의 閉鎖回路를 形成하고 있다. 따라서 血液의 力學的 條件은 (ㄱ) 心臟의 펌프로써 힘, (ㄴ) 循環血液量, (ㄷ) 血管系의 容積 또는 循環 抵抗들에 依하여 결정되고 이 條件들에 依하여 各 部位의 血液量과 血流速度가 결정된다. 어느 것이나 모두 自律神經性 또는 體液性으로 統合되어 있어서 局小的으로 어느 臟器의 血液量이 變動하더라도 전체로서 各 臟器에 대한 酸素供給에 支障이 없게끔 調節되고 있다.

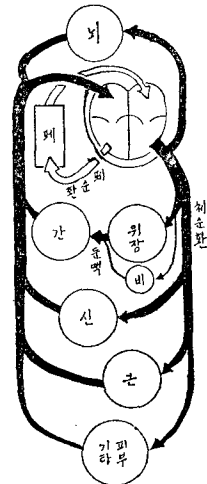


그림 7. 血液의 循環<sup>8)</sup>

② 血壓調節系의 모델

循環系 또는 心臟血管系는 心臟, 動脈系및 靜脈系로 構成되고 있다. 또한 血液을 보내는 펌프系와 이것을 運搬하는 파이프系로 構成되었다고 볼 수 있으며, 에너지와 物質을 身體의 各 部分에 運搬하기 위하여 많은 調節作用이 이루어지고 있다. 이를테면 心拍數, 心拍出量, 血壓 등의 調節系가 있고 이것들이 相互 관련되어 複合的인 調節系가 되어 神經支配에 依해 階層的

인 調節이 이루어지고 있다.

Guyton등은 오랫동안 全身 循環系를 대상으로 해서 그 血液와 血壓의 調節에 관하여 이론적 및 실험적으로 研究하였으며, 그림 8은 이러한 모델을 나타낸 보기이다.

이 모델에서 動脈壓(AP)에 대하여 간단히 살펴보기로 한다.

動脈壓이 정해지면 블럭 1의 관계에서 腎臟에 尿의 排出量(UO)이 정해지고, 體液量(E 또는 ECFV)의 변화는 尿量과 들어온 물의 양에 따라 정해져 이것을 積分(블럭 3)하면 體液量이 정해지고 블럭 4의 관계로 血液量(BV)이 정해진다.

血液量과 組織의 血壓(MSP)은 블럭 5의 관계에 의해 결정되고 組織血壓과 右心房壓(RAP)의 差를 靜脈抵抗(RVR)으로 나누면 右心房에 주어지는 血液量(VR)이 구해진다. VR은 左心室에서 大動脈에 拍出되는 心拍出量(CO)과 같다. 心拍出量과 動脈의 抵抗에 대한 곱이 動脈壓으로 된다.

이와 같은 모양으로 負饋還이 이루어져서 動

脈壓이 적당한 값으로 調整되고 있다. 이렇게 한바퀴 도는 도중 파라미터에 여러 가지의 영향이 가해져서 아주 복잡한 시스템이 構成되어진다.

블럭 9에서 15까지는 末梢血管의 自己制御에 의한 末梢血管抵抗의 制御를 나타낸 부분으로 末梢血管은 動脈壓이 변하여도 血流量을 일정하게 유지하는 作用을 자신이 가지고 있다. 블럭 16에서 19까지는 動脈壓이 올라가는 데 필요한 心拍出量이 변하는 경우의 영향을 나타낸다. 블럭 20에서 29는 自律神經에 의한 制御의 영향을 나타낸다.

(4) 呼吸系

① 呼吸運動의 生理 機能

生體가 生命을 維持하는 데 필요한 酸素를 마시고, 物質代謝의 結果로 생긴 炭酸가스를 排出하는 作用을 呼吸이라 하는데, 肺呼吸(pulmonary respiration)은 肺胞內의 空氣와 血液들 사이의 가스交換이고 組織呼吸(tissue respiration)은 血液과 組織細胞들 사이의 가스 交換을 말한다.

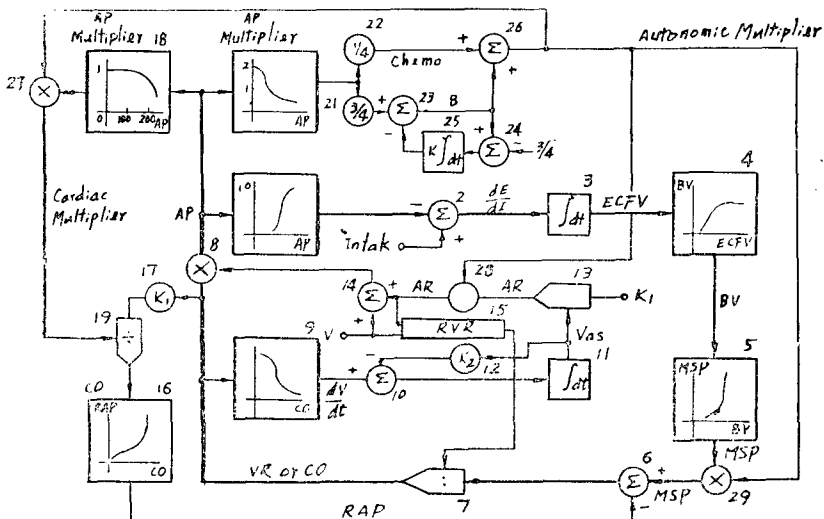


그림 8. 循環의 長時間 制御 시스템 모델<sup>3)</sup>

呼吸器管은 氣道, 肺胞, 胸廓으로 되고 氣道는 비강, 인두, 기관 및 기관지들로 되어 있다. 氣道에 있는 線毛特皮는 분비물이나 공기와 함께 들어 온 이 물을 인두(pharynx)를 향하여 배출한다.

呼吸運動은 吸入運動과 呼出運動으로 나뉘진다. 吸入運動은 主吸入筋 卽 의늑간근(external intercostal muscle)과 그것의 연골간근의 收縮에 따라 흉곽이 위로 올라가고 橫膈膜이 밑으로 가라 앉으므로써 일어난다. 또한 呼出運動은 主呼出筋 卽 내늑간근(internal intercostal muscle)의 收縮에 의한 흉곽의 하강과 補助呼出筋인 복벽근의 收縮에 의한 橫膈膜의 상승에 따라 일어난다.

따라서 呼吸運動은 生體의 요구에 따라 自動的으로 뿐만 아니라 反射的으로 더 나아가서는 수의적으로도 調節된다. 呼吸運動은 많은 筋肉

들이 협조하는 活動이고 그 活動의 週期와 크기는 꼭 肺胞 空氣의 組成을 거의 일정하게 보존하는 정도의 換氣가 되게끔 調整되어 있다.

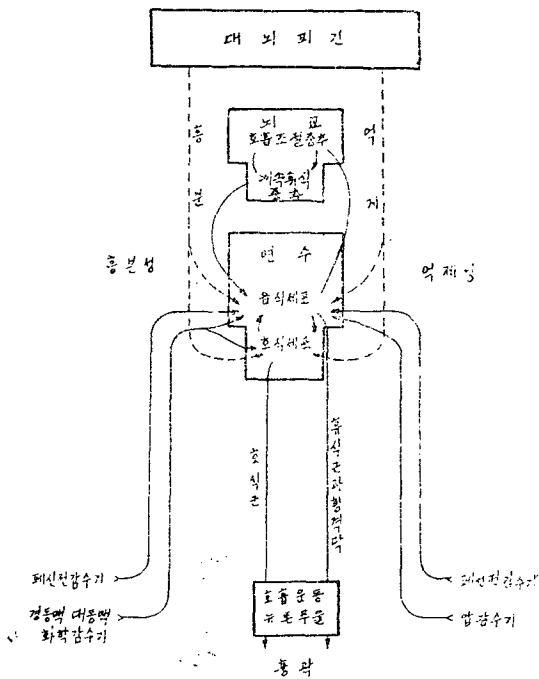


그림 9. 呼吸調節의 經路 概略<sup>3)</sup>

그림 9는 呼吸調節의 經路를 나타낸 것이다. 安定呼吸시에는 呼吸중추로부터의 자극에 의하여 呼吸중추는 수축하여 흥분이 일어난다. 肺의 伸張과 함께 肺内の 伸張 감수기가 흥분하면 그곳에서 임펄스는 미주신경(vagus nerve)을 거쳐 呼吸중추에 이르러 呼吸을 억제한다. 한편 呼吸중추로부터의 임펄스는 일부 呼吸調節中樞에 이르고 呼吸중추를 거쳐 呼吸중추에 대하여 억제적으로 작용하는 자극을 보낸다. 그 결과 週期性的의 呼吸이 일어난다.

② 呼吸調節系의 모델

呼吸調節系에 관한 研究는 Grodins를 비롯하여 많은 結果가 發表되고 있다.

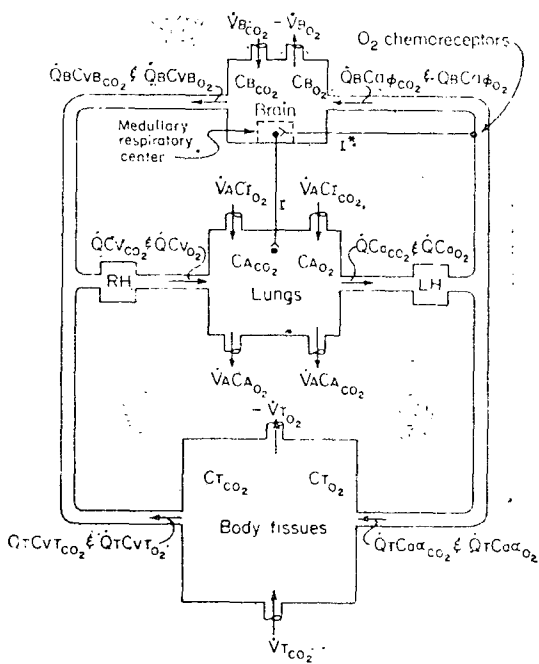


그림 10. 呼吸調節系의 모델<sup>3)</sup>



그림 9에 대한 대칭으로 나타난 모델이 그림 10과 같으며, 특히 肺, 體組織에서 이뤄지고 있는 가스 교환에 대해 Grodins가 提示한 모델이

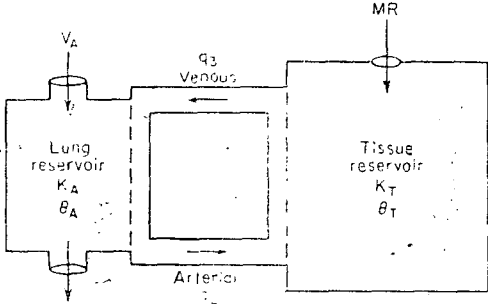


그림 11. 肺, 血液, 組織의 CO<sub>2</sub>交換系 모델<sup>1)</sup>

그림 11과 같다. 자세한 설명은 생략하므로 참고문헌을 참조하기 바란다.

### 5. 맺음 말

이상과 같이 生體制御시스템 중 神經系 및 內分泌系 등을 除外하고 簡單히 紹介하였다. 生體制御 시스템에 대한 研究가 今後에 더욱 활발하여서 成果있는 結實이 있기를 期待한다.

### 參考文獻

1. Grodins, F.S.; Control Theory and Biological Systems, Columbia Univ. Press, (1963).
2. Blesser, W.B.; A Systems Approach to Biomedicine, McGraw-Hill (1969).
3. Milhorn, H.T.; The Applications of Control Theory to Physiological System, W.B. Saunders (1966).
4. Park, S.H.; Dynamic Characteristics measurement of Pupillary-light Reflex Control Systems, Yonsei Nonchong, 9, 369/378, (1972).
5. Moses, R.A.; Adler's Physiology of the Eye, 5th ed. C.V. Mosby St. Louis (1970).
6. Nam, M.H., Park, S.H. & Choi, O.; A Review for the Eye Movement Measuring Systems, J. of Korean Ophthalmological Society, Vol. 14, No. 4, 315/325, (1973).
7. Clynes, M. & Milsum, J. H.; Biomedical Engineering Systems, McGraw-Hill (1970).
8. 차영선 ; 생리학(고찬판), 최신 의학사(1975).