

성견 하악골 상행지 수직 골절단술후 조기 기능시의 골치유에 관한 연구

이상휘 · 박형식*

경상대학교 의과대학 치과학교실
연세대학교 치과대학 구강악안면외과학교실*

Abstract

BONE HEALING PROCESS IN EARLY MOBILIZATION AFTER VERTICAL RAMUS OSTEOTOMY OF THE MANDIBLE IN ADULT DOGS

Sang-Hwy Lee, Hyung-Sik Park*

Dept. of Dentistry, Medical College, Gyeongsang National University

*Dept. of Oral & Maxillofacial Surgery, College of Dentistry, Yonsei University**

This investigation is an experimental study of the bone healing and remodeling process after Vertical Ramus Osteotomy(abbreviated as VRO) with early mobilization in adult dogs. Nineteen dogs were divided into three groups. Normal Control Group($N=2$) was free of surgery. Experimental Group I($n=5$) received only VRO without any intentional movements of distal fragments, and Experimental Group II($n=12$) got VRO and backward driving of distal fragments. Animals were killed serially and the operated sites were reviewed grossly and histopathologically after the plain radiographs and Magnetic Resonance Images(abbreviated as MRI) were taken.

The obtained results are as follows :

1. The early bone healing after VRO occurred mainly by the fusion of endosteal and subperiosteal calluses, and osteoinduced calluses from the cortices of fragments in intramembranous bone formation process. And the cartilaginous bone formations, which were considered to be associated with early functional movements of the mandible, were evident at the junction of these calluses.
2. The overlapping cortices of each fragment were fused by the osteoinduced calluses after decreased mobility of fragments mainly achieved by the subperiosteal calluses at the lateral and posterior part of pterygomasseteric sling.
3. Osteocytes in the cortices of fragments were dead by ischemia and the marrow tissues were predominantly replaced by fibrous tissues in early stages. Active revascularization in the cortex and formation of new bone in the marrow, seen as the cancellous bones, were observed almost simultaneously and they were maintained until the 8th week when bone unions were confirmed.

4. Morphology of the mandible was changed by remodeling of the bone with reattachments of adjacent muscles after the 8th week. Callus in the gap was changed more and more into the compact bone after the 8th week, which united the proximal and distal fragments securely.
5. Low or iso-signal intensity at the cortex of fragments in early stages of MRI was being increased from the 4th week till the 12th week after VRO. The marrow spaces had high signal intensities on the T2-weighted images in early stages, but they returned to normal T1 and T2 high signals after the 12th week.
6. Signal intensities of the interfragmentary gap were high at the early stages and were gradually decreased to low signals at the 24th week. Atrophy of the masseter muscles with the high signal spots suggesting the increased vascularity was seen from the 2nd week, but the recovery of muscular volume with disappearance of high signal spots were also observed after the 8th week.

In summary, the overlapped fragments made by VRO were completely healed by true bony union in adult dogs, even though they had cortex to cortex overlapping and early mobilizations had been allowed. Development of calluses through the intramembranous bone formation, and the cartilaginous bone formations at the union of them were mainly involved in the early bone healing. Direct communication of the marrows of the both segments was not found in this investigation, and more advanced study will be needed to explain the details of the fate of bony union after VRO.

Key words : VRO, Mandible, Vertical, Ramus, Osteotomy, Bone, Healing, Remodeling, MRI, Dog

I. 서 론

하악골 상행지 수직 골절단술(Vertical Ramus Osteotomy of the Mandible, 이하 VRO로 약칭)은 악안면 기형증 하악골 전돌증을 외과적으로 치료하기 위해 하악골을 후방 이동시킬 때 사용되는 대표적인 술식의 하나이다^{2,55,73)}. 통상 하악골 S상 절흔(sigmoid notch)으로부터 하방으로 하악공(mandibular foramen)을 피해 하악각부의 하연까지 수직 방향으로 골절단하고 원심 골편(distal fragment)을 후방으로 이동시키므로 하악골 과두부를 포함하는 근심 골편(proximal fragment)이 원심 골편의 외측에 중첩된다^{12,30)}.

일반적으로 골절편이 정상적으로 치유되기 위해서는 분리된 골절편들을 피질골과 골수강이 서로 맞닿게 고정시켜 일차 가골(primary callus)의 형성을 촉진시키고 이들이 안정된 상태에서 치유되도록 유도하는 것이 기본적 개념이다. VRO의 경우에도 골절편의 치유를 안정시키기 위해 초기에는 강선

(wire)을 이용한 콜간 고정법이 주로 사용되어 왔으며^{4,17)} 골내 강성 고정술(internal rigid fixation)이 발달하면서 나사못(screw)³⁴⁾이나 금속 소강판(mini-plate)³⁵⁾을 이용한 강성 고정술이 사용되기도 하였다. 그러나 최근에는 의교근 피개(pterygomasseteric envelope)내에서의 골절편들은 일반 장골에서와 달리 고정 없이도 잘 치유된다는 점과 강성고정에 의해 근심 골편이 위치한 관절 과두가 비정상적인 위치에 놓이면 술후 측두하악관절 장애(temporomandibular disorder) 등의 부작용이 발생할 수 있다는 관점에서 콜간 고정 없이 치유를 유도하는 방법이 선호되고 있는 추세이며 이미 1985년 미국에서의 통계조사 결과⁵¹⁾에 의하면 VRO시 골편간의 고정을 하지 않는 경우가 73%에 달하는 것으로 조사되었고 최근 Bell¹¹⁾도 VRO시 하악골 후퇴량이 큰 경우 등 특별한 경우를 제외하고는 강성 고정이 필요하지 않다고 하였다.

VRO후 콜간 고정을 하지 않은 경우 골절편이 움직이는 상태에서 치유되므로 골편간의 비유합 등의 위험성도 제기될 수 있으나 지금까지 비유합이 발

생한 예에 대한 임상적 보고는 거의 없었다. 또한 근·원심골편 사이에서 일어나는 골치유는 일반적인 골치유 환경과는 달리 피질골끼리 충첩되고 골막이 일단 박리된 상태에서 재배치되면서 치유되므로 일반적인 골치유와는 다른 과정을 거치게 된다. 1966년 Boyne¹⁵⁾은 원숭이를 대상으로 VRO 및 골간 고정 시행 후 골치유 현상을 관찰한 바 가골에 의한 골치유 과정이 확인되었고 수술 4주 시기에 골치유가 끝났다고 보고한 바 있으나 Huebsch와 Wellington³⁵⁾은 성견 하악 골에서 VRO후 골간 고정 10주 후에도 골치유 소견을 볼 수 없었다고 하여 비유합의 위험성을 주장한 바 있다. Reizik⁵⁹⁾은 원숭이의 하악각 부위를 질단하고 골편을 뒤집어 피질골끼리 접촉을 시킨 채 나사못(screw)을 이용 강성 고정한 뒤 7주 후의 실험 결과를 보고하면서 0.8mm 이상의 피질 골간 간극이 존재하면 골치유는 어려우므로 곧유합을 유도하기 위해 피질골 제거술과 함께 강성 골간고정이 필요하다고 한 바 있다. 그러나 Bell과 Kennedy⁸⁾는 원숭이에서 VRO후 골간 고정 없이 조기 운동 시킨 후 골편에서의 근육 부착 여부에 따른 근·원심골편에서의 재혈관화(revascularization)와 조직학적 변화에 관해 연구하고 실험 12주후 골치유 및 재혈관화가 완성된 것을 보고하였는데 이 실험에서 사용한 실험 방법은 골절단후 근심 골편을 전방 이동시켜 골편간의 충첩을 유도한 것이므로 실제 임상에서의 원심 골편 이동 상황과는 차이가 있었다. 이처럼 VRO후의 골치유 과정에 관해 몇몇 선학들의 실험적 연구가 진행된 바 있지만 실제 임상에서와 같이 하악골을 후방 이동시킨 후 조기 운동시의 골절편 치유의 과정을 시기별로 연구한 논문은 매우 드문 실정이다.

또한 골절단술과 하악골 후방 이동 후 골유합 상태에서 일어나는 골구조 및 형태의 변화 즉 골개조(bone remodeling)에 관하여는 주로 임상적 연구가 이루어졌을 뿐이어서 Shepherd⁶⁰⁾은 30명 환자에서 VRO 약 5년뒤 하악지의 변화를 두부 계측 방사선사진

등으로 관찰하고 골개조된 하악지의 형태 변화를 기술하면서 연조식과의 관련성을 제시하였으며, Westesson 등⁸¹⁾은 VRO 약 2년뒤 근·원심골편 및 인접 근육 등에서의 골개조 양상을 자기 공명 영상(Magnetic Resonance Imaging, 이하 MRI로 약칭)으로 연구하여 협·설측 피질골의 비후와 골수강의 감소, 근육 조직의 지방화 및 근위축 소견 등을 보고한 바 있다.

이상의 문헌 고찰을 통해 보면 통상의 외상성 골절편 치유과정과는 근본적으로 여건이 다른 VRO후 비고정 상태에서 조기 운동시의 골편 치유과정과 관련된 골간 고정방법, 악간 고정 기간, 악골 운동 시기 및 예후에 대하여는 임상적 경험에 의존해 왔다고 해도 과언이 아니며 임상적 여건과 유사한 상태에서의 골치유 및 골개조 양상에 관한 실험적 연구는 미흡한 실정으로 이를 실험적으로 규명하는 작업이 임상적 활용도에 비해 오히려 늦은 감이 있다. 이에 저자는 임상적 상태와 비슷한 여건 하에서의 골치유 및 골개조의 과정을 실험적으로 규명하기 위해 성견의 하악골 상행지에 VRO로 골절단후 하악골 원심 골편을 후방으로 이동시켜 피질골간의 골충첩을 시킨 뒤 하악지 근·원심 골편과 골편 간극에서의 골치유 및 골개조의 시기별 변화 과정을 육안, 광학 현미경, 일반 방사선 사진 및 자기 공명 영상 관찰을 통해 연구한 바 그 결과를 보고하는 바이다.

II. 실험재료 및 방법

가. 실험 재료

실험 재료로는 체중 15Kg내외의 치열 교환이 끝난 잡종 성견 19마리를 사용하였으며 이들을 3개의 군으로 나누어 정상대조군(2마리)은 여하한 수술없이 관찰하였고 실험 제1군(5마리)은 대조군으로 하악골 양측에 VRO를 시행하되 하악골은 후퇴시키지 않은 채 골접촉을 유지하였으며, 실험 제2군(12마리)은

표 1. 실험군의 구분 및 관찰 시기

실험 군	실험 기간(week)	실험 동물(마리)
정상대조군		2
실험 1군(대조군)	2, 4, 8, 12, 24	5
실험 2군(수술군)	1, 2, 3, 4, 8, 12, 24	12

수술군으로 양측 상행지에 VRO를 시행하고 하악골을 후퇴시켜 근·원심 골편을 중첩시켰다(표1 참조).

나. 실험방법

1. 수술전 준비 및 방사선 사진 촬영

수술전 일반 방사선 사진 영상을 얻기 위하여 Panex EC(Morita Co, Japan)를 이용 100KVp와 75~90mA의 조건하에서 정면 및 측면의 두부 계측 방사선 사진(cephalometric radiograph)을 얻었다. 수술 후 비교적 안정된 교합을 얻기 위해 양측 상악 및 하악 제 1대구치 교합면의 삭제를 통한 교합 조정을 시행하였으며 감염의 기회를 줄이기 위해 외과적 접근부위인 악하부위(submandibular area)에 광범위한 면도와 소독을 실시하였다.

실험동물은 공히 수술 1일전 Ketamine Hydrochloride(Ketamine, 유한양행, 한국)를 15mg/Kg로, N-3-propionyl phenothiazine(Combelen, 한국바이엘화학, 한국)을 0.05ml/Kg로, 또한 Atropine sulfate(황산 아트로핀, 대우약품, 한국) 0.5mg을 죽근 근육주사하여 전신마취시킨 후 복와위(prone position)로 수술전 MRI를 촬영하였다. 사용된 기종은 1.5Tesla Magnetom 63SP 4000(Siemens Medical System, Erlangen, 독일)이었으며 시상면(sagittal plane)으로 TR 570, TE 15, FOV 170cm, thickness 3.0mm의 조건하에서 T1 강조영상을 촬영하고 이를 이용, 활령평면을 결정한 뒤 수평면(axial plane)의 T1(TR 450, TE 15, FOV 170cm, ACQ 2, thickness 3.0mm, matrix 170×256), T2(TR 2600, TE 90, FOV 170cm, ACQ 1, thickness 3.0mm, matrix 170×256) 및 양자(proton) 강조영상(TR 2600, TE 20, FOV 170cm, ACQ 1, thickness 3.0mm, matrix 170×256)을 얻었다.

2. 수술

실험 동물은 전신마취후 수술부를 통상의 방법으로 소독하고 소독포로 감싼 뒤 구강외 접근법으로 악하부위를 절개한 후 근육 및 골막을 충분히 박리하고 협측으로 하악골 하연 및 상행지를 노출시켰다. 설측의 하치조 신경 혈관을 보호하면서 하악골 과두 전방 절흔으로부터 하방으로 하악각돌기(angular process) 정방 2~3cm의 하악각 근처 하연까지 치과용 드릴로 계속적인 생리식염수 냉각세척 하에서 수직 골절단술을 시행하였다. 아울러 성견의 특징상

오체들기로 인한 후방 이동의 방해를 피하기 위해 오체들기 절단술(coronoidotomy)을 시행하였다(그림1 참조).

실험 제1군은 골절단이 완료된 상태에서 하악골의 후퇴나 클간 고정 없이 충분한 세척후 절개 및 박리된 연조직을 통법에 따라 층별 봉합하였다. 실험 제2군은 하악골 후퇴를 원활히 하기 위해 원심 골편의 상부 골절단선 일부를 절제하였고 반대측도 같은 방법으로 골절단 및 골절제술을 시행하였다(그림 1 참조).

하악골 체부와 정중부를 포함한 원심 골편은 약 7~15mm 후방으로, 과두를 포함하는 근심 골편은 측방으로 위치시켰고, 이 때 하악 제 1대구치는 상악 제 2 대구치와 교합되도록 하였다. 하악골의 후퇴와 안정된 교합을 확인한 뒤 실험기간중 골편의 중첩을 유지하되 골편의 자유로운 움직임을 허용하기 위해 양측 원심 골편에 구멍을 뚫어 근심 골편 하악각돌기 상부를 환상으로 경유하도록 1-0 Nylon(Etilon, Ethicon co., 영국)으로 느슨하게 환상 결찰하고 봉합하였다. 수술을 마친 실험동물은 수술 창상을 보호하면서 악골 운동을 제한하도록 고안된 입마개를 착용시켜 1주일간 악간 고정하였다.

3. 결과 관찰

술후 1주일간 입마개를 이용한 악간고정 상태를 계속 유지시키면서 수액 정맥 주사를 통해 영양,

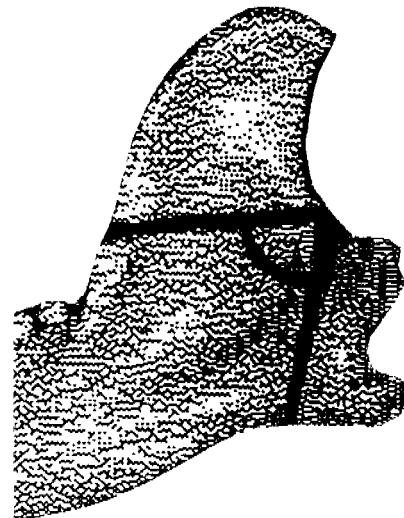


그림 1. 본 연구에서 사용된 골절단 및 골절제 모식도.

수분공급을 하였으며 동시에 감염을 막기 위해 ampicillin 500mg/day를 정맥주사하였다. 실험 8일째 입마개를 풀어 악간고정을 해체한 뒤 일반방사선사진을 이용, 하악골 측면 및 하연을 촬영하고 근·원심 골편의 위치변화에 의한 회귀현상이 발생하였는지 확인하였다. 그 뒤 약 3일간은 완전 유동식 그 이후 약 3~4일간은 죽을 섭취시켰으며 실험 3주째부터 시판되는 고형 사료로 사육하였다.

4. 실험동물의 방사선 사진촬영 및 회생

회생전 실험동물은 공히 MRI 및 두부 계측 방사선사진을 수술 전과 같은 조건하에서 동일한 약제를 이용해 마취하고 촬영하였다. 관찰 기간이 길었던 실험 24주 실험동물에서는 실험 18주 시기에 MRI 및 일반방사선 사진 검사를 부가적으로 실시하였다. 실험 제1군의 실험동물들은 수술 2, 4, 8, 12, 24주에 각각 1마리씩, 실험 제2군은 술후 1, 2, 3, 4, 8, 12, 24주에 각각 1마리 또는 2마리씩, 정상대조군은 약 1주일 사육후 각각 과량의 potassium chloride를 정맥주사하여 회생시켰다. 각 실험동물은 피부를 제거한 뒤 중첩 부위의 근막, 근육, 골막 및 하악골 상행지를 포함하는 전 조직을 절제하고 일정한 거리에서 교합필름을 이용하여 방사선 사진 촬영후 10% 중성 formalin에 고정하였다.

5. 조직 표본 제작

적출한 조직은 diamond wheel을 장착한 crystal cutter(Maruto co., Japan)를 이용하여 하악 과두 하방에서 하연까지의 하악지를 하악 평면에 수평되도록 약 5mm 두께로 자른 뒤 약 1주일간 10% formalin에 다시 고정하였다. Nitric acid로 2주간 탈회시킨 후 통법에 따라 paraffin에 포매하고 5μ 두께의 절편을 만든 뒤 hematoxyline-eosin 염색 후 광학 현미경을 이용해 관찰하였다.

III. 실험 결과

가. 술후 결과

실험동물은 모두 특기할 염증이나 술후 합병증 없이 비교적 잘 치유되었으며, 그 중 4마리에서 수술 창상의 열개가 발생되었지만 1주일 내로 완치되었고, 실험 3~4주부터는 고형사료를 섭취하는 정도로 회복되었다. 실험 4주까지는 실험동물 대부분에서 약 1~2kg의 체중 감소가 발생되었으며, 그 뒤로는 0~5

kg의 체중 증가가 있었지만 사육 시기와는 관련이 없었다.

나. 육안 소견

실험 제2군은 모두 양호한 하악골 운동을 보였으며 골절단부를 중심으로 한 가관절(pseudoarthrosis) 운동 등 비정상적 골치유 소견은 관찰되지 않았다. 3마리의 실험동물에서 하악골 후퇴 후 개교증이 발생되어 전 실험기간동안 지속되었으며 후퇴된 하악골이 전방으로 회귀되는 경향을 보였다. 실험 24주군 1마리에서 하악골의 편위와 비대칭 소견을 보였으나 다른 동물들에서는 관찰되지 않았다. 실험 제1군의 실험동물들도 특기할 합병증은 발생되지 않았으며 교합은 정상적으로 유지되어 하악골 후퇴나 개교증의 소견은 없었다.

실험 제2군 탈회전 조직의 단면 육안소견에서는 근·원심 골편 주위로 광범위한 신생골의 형성이 실험 제2군의 4주 표본에서까지 관찰되었으며 특히 설측보다는 협측이나 후방에서, 과두하방보다는 하악골 하연 근처에 많았다. 실험 8주 이후 실험 제2군의 실험동물에서는 근·원심 골편의 골 연속성으로 인하여 이전 수술 부위를 확인하기 어려웠고 실험 4주 이후부터는 신생골의 양이 점차 감소되었다.

실험 제1군의 육안 소견에서는 실험 4주까지 실험 제2군에서보다 많은 골 형성이 관찰되었으며 골편 연속성의 회복도 빨라 실험 4주에서 확인되었다. 실험 8주 이후로는 육안 소견상 정상에 가까운 하악골 형태를 보였다.

다. 일반 방사선 사진 소견

실험 2주부터 실험 제1군 및 제2군의 수술부위에서 방사선 불투과성이 크게 증가하였다. 실험 제1군의 경우 실험 4주부터, 실험 제2군의 경우 실험 8주부터 골절단부의 확인이 어려웠지만 하악골 비대칭이 발생하였던 1예는 실험 24주까지도 골절단선이 남아 있었다. 또 오췌돌기 절단술을 시행한 부위에서는, 실험 제1군 및 제2군 모두에서 수직 골절단부보다 뼈를 골치유 양상을 나타내 실험 4주째에는 골절단선의 소실이 대부분 나타났지만 부분적 방사선 투과성 부위를 보이기도 하였다.

라. 광학 현미경 소견

1. 정상대조군

피질골 부위에서는 하버스관(Haversian canal)과 그 주위의 끌판(lamellae) 구조가 관찰되고 그 사이에 골와(lacunae)와 골세포(osteocyte)가 존재하여 골원(Osteon 또는 Haversian system)을 이루는 정상적인 치밀골 형태를 보였다. 골수강 부위는 주로 지방세포(fat cell)로 구성되어 있었으며 조혈세포(hematopoietic cell)들은 관찰되지 않았다(사진부도 1).

2. 실험 제1군

(1) 실험 2주 소견

피질골 및 골수강은 근심 골편 후방의 신생골 형성이 활발하였고 골절단 양쪽 골막 하부에서 자라오는 신생골 즉 골막하 가골(subperiosteal callus)이 서로 마주보며 증식하고 있는 소견이었다. 골수강 내에서는 지방세포가 없어지며 소성 결합조직(loose connective tissue)으로 대치되는 부위가 관찰되었고 일부 섬유화가 일어난 부위에서도 신생골 형성에 의한 망상골이 함께 관찰되었다. 근·원심 골편 간극은 섬유소(fibrin)나 결합조직(connective tissue)으로 채워져 있었고 일부에서는 모세 혈관의 증식도 보였다(사진부도 2).

(2) 실험 4주 소견

피질골이나 골수에서 골소주(trabeculae)와 주변의 소성 결합조직으로 구성된 망상골(cancellous bone)이 관찰되었으며 근·원심 골편 사이의 간극은 완전히 망상골로 채워져 연결되어 있었다. 골편 주위의 신생골 형성은 아주 왕성하여 근·원심 골편을 둉글게 둘러싸고 있었으며 하방으로 갈수록 신생골의 양이 많았다. 그리고 후방에 형성된 신생골 중 일부에서는 골소주가 감소하면서 주위 결합조직 부위가 증가되고 세포간질액(interstitial fluid)의 증가로 세포 간격이 넓어지는 변화를 보였으나 염증세포의 침윤은 없었다(사진부도 3).

(3) 실험 8주 소견

피질골과 골수강 부위의 골소주가 감소하여 주위에 형성되었던 신생 가골도 함께 감소하여 골절단부 근처에만 남아 있었다. 골수강이 만들어지고 있는 부위에서는 지방세포와 조혈세포들이 크게 증가되어 있었고 그 바깥쪽으로는 골의 밀도가 높아져 치밀골과 유사하였다.

(4) 실험 12주 소견

신생골이 크게 감소하여 거의 정상적인 성견의 하악골 형태를 갖추었고 골절단면도 확인하기 어려웠다. 골수강 부위에서는 더욱 골소주가 감소하여 지방세포와 조혈세포로 구성된 골수강이 형성되었으나 아직 그 부위가 충분히 크지 못했다. 그리고 그 바깥쪽은 더욱 치밀골에 가까워지면서 연속된 피질골이 둘러싸고 있었다.

(5) 실험 24주 소견

실험 12주에서와 마찬가지로 주변의 신생골이 없어져 정상적인 하악골 형태를 보였으며 골수강은 완전히 하나로 연결되어 있었고 골절단의 흔적은 찾기 어려웠다(사진부도 4).

3. 실험 제2군

(1) 실험 1주 소견

근심 골편에서는 골세포가 없이 빈 골와가 전반적으로 관찰되었으며 골내 혈관 증식이나 골형성 소견은 관찰되지 않았다. 골수강내 출혈과 염증으로 인해 골수강은 넓어졌고 근·원심 골편 사이의 골편 간극이나 골편 주위 공간은 섬유소나 혈종(hematoma)으로 채워져 있었다.

(2) 실험 2주 소견

실험 동물 2마리의 골반용에 차이가 있었다. 한 마리에서는 실험 1주 소견과 마찬가지로 근심 골편에서 피질골의 골와가 비어 있으면서 골세포가 사라진 소견이 광범위하게 나타났지만 원심 골편의 경우 골절단부에서 가까운 부위로 한정되었다. 또 피질골내 혈관이 많아지기 시작했으며 특히 원심 골편의 끝쪽이 심하였다. 근·원심 골편의 골절단부에서는 혈관증식과 함께 골소주와 조골세포(osteoblast) 등으로 구성된 신생 가골 형성이 관찰되었고 골수강 내에서는 아직 지방세포들이 계속 관찰되었다. 골편 간극은 약간의 염증세포 침윤, 부종과 함께 결합조직과 섬유소로 채워져 있었고 원심 골편의 외측으로부터 연골이 포함되지 않은 신생골 형성이 왕성하게 일어나고 있었다. 골치유 부위와 주변 근육과의 경계부위는 불명확하지만 치밀 결합조직(dense connective tissue), 섬유아세포(fibroblast) 및 교원질(collagen)이 생성되어 주변과 구분되었다(사진부도 5).

다른 한 마리에서는, 피질골이 광범위하게 골소주 및 풍부한 소성 결합조직으로 이루어진 망상골의

형태로 변환되었고 특히 원심 골편의 골절단부위에서 더욱 뚜렷하였다. 골수강 내에서는 신생 골소주의 증식이 일어나고 소성 결합조직과 다양한 크기의 모세혈관으로 채워져 있었다. 근심 골편의 후방과 원심 골편의 내외측에서 연골 없는 신생골의 형성이 더욱 많이 이루어졌고 근심 골편 외측의 골막 하방에서 망상골과 일부 연골을 포함하는 신생골 즉, 골막하 가골이 독립적으로 성장하는 소견이 관찰되었다. 그러나 같은 시기 실험 제1군에 비하여는 가골 형성이 많지 않았다(사진부도 6).

(3) 실험 3주 소견

피질골 부위에서 골소주의 밀도는 점차 낮아지고 골소주 주위의 결합조직부위는 넓어져 주변 신생골 형성부위와 유사하게 되었다. 특히 근·원심 골편의 외측과 근심골편 하방의 피질골은 주변 신생 가골과 혼재되어 있었다. 그러나 원심 골편의 내측 피질골 부위는 망상골로의 변화가 적었다.

근심 골편 외측으로 생긴 골막하 가골은 독립적으로 성장하고 있었으나 아직 근·원심 골편과 연결되지 못하였고 그 주위는 치밀 결합조직과 하방의 세포 증식층을 포함하는 두꺼워진 골막이 비교적 균일하게 둘러싸고 있어 주변 균육조직과 경계를 이루고 있었다.

(4) 실험 4주 소견

피질골 골소주내의 빈 골와는 근·원심 골편 전체에 계속 남아 있었으나 염증이나 부종, 출혈 등의 소견은 관찰되지 않았다. 실험 3주에 비하여 골수강 부위에서 부분적으로 골소주가 감소하며 소성 및 치밀 결합조직과 지방세포가 증가하였으나 하방으로 내려갈수록 피질골과 골수강을 구분하기 어려웠다. 골소주 주위의 결합조직 내에서는 혈관의 분포가 더욱 증가하였고 원심 골편의 골절단부 근처에서 가장 뚜렷하였다(사진 부도 7).

근·원심 골편 사이에는 일부 결합조직이 남아 있었지만 대부분 원심 골편 외측에서 형성된 신생 막성 가골이 성장하면서 근심 골편 주위에서 생긴 가골과 골결합을 이루었고, 이 골결합 부위에서는 연골이 관찰되었다. 그러나 부분적으로는 교근의 일부가 골결합 부위 사이에 잔존하여 신생골에 의한 골결합이 지연되는 소견도 관찰되었다. 근·원심 골편들 후방에 독립적으로 생긴 골막하 가골 형태의 신생골은 근·원심 골편들을 연결하고 있었으며 이

연결 부위에서도 신생 연골이 관찰되었다. 일부 근심 골편의 하방에서는 많은 염증세포와 파골세포(osteoclast)에 의한 골흡수 소견을 보였고 실험 2주부터 관찰되기 시작한 하악골 근처에서의 신생 가골 형성은 더욱 왕성해졌다.

(5) 실험 8주 소견

신생골이 크게 감소하면서 파골세포의 의한 골흡수가 전반적으로 관찰되기 시작하였으나 근심 골편 대부분의 피질골내 골와에서는 골세포가 관찰되지 않았다. 근·원심 골편의 골수자리에 생겼던 망상골의 골소주는 이전보다 더욱 감소하였고 골수강이 재형성되면서 일부 출혈(congestion) 소견과 함께 지방세포와 조혈세포들이 증가하며 조혈 골수로 변화되는 양상을 보였다.

골편 간극에서는 골소주와 함께 약간의 치밀 또는 소성 결합조직이 남아있는 망상골 형태가 유지되었다. 하방에서는 신생 가골이 골편 주위로 광범위하게 존재하고 있었지만 위쪽에서는 신생골이 골편 간극과 후방에 한정되었고 근심 골편의 전방에서는 교근의 일부가 골편에 부착되었다. 아직도 골편 후방에서는 결합조직 부위가 증가되고 세포간질액이 증가되어 세포 사이 간격이 넓어져 보이는 변화가 남아 있었으며 일부 골소주 사이에서는 조혈세포 및 지방세포도 관찰되었다. 하치조 신경혈관 주위에서 관찰되었던 신생골은 크게 감소되었다.

(6) 실험 12주 소견

실험 8주에 시작된 전반적인 골흡수 소견의 지속과 함께 골와는 대부분 골세포로 채워졌다.

근·원심 골편들의 피질골 부위는 실험 8주에 비해 오히려 골치밀도가 감소되어 골편 간극 부위 망상골들과 구분이 어려웠으며, 골수강 자리에서는 실험 8주에 비해 지방세포가 증가하였고, 골편 간극에서는 망상골 형태가 유지되면서 이전 시기보다 골치밀도가 증가하였다. 또한 덩어리가 된 하악골의 외부를 따라 골의 밀도가 높아져 치밀골화되면서 피질골과 유사한 형태를 띠게 되었다(사진부도 8).

(7) 실험 24주 소견

하나로 합쳐진 근·원심 골편 주위로 매끄러운 외형을 보이는 치밀골 형태의 피질골이 둘러싸고 있었다. 이전에 망상골로 채워져 있던 골편 간극 부위는 완전히 하나의 치밀골로 바뀌었으며 과두 하방 근처에서는 결합조직 부위가 정상보다 늘어난

피질골이 관찰되었다. 근·원심 골편의 골수강 부위는 혈관과 함께 주로 지방세포와 조혈세포 등으로 이루어졌으며 위쪽에서는 그 부위가 작았으나 아래쪽에서는 아직도 정상보다 큰 골수강으로 관찰되었다. 또한 근·원심 골편 후방에서는 실험 12주까지 관찰되었던 신생골 및 신생 골수강이 관찰되지 않았다. 전체적으로 실험 12주에 비해 상당히 성숙된 골형태를 나타냈으나 정상하악골이나 실험 제1군의 24주 소견에 비해 아직도 미성숙된 풀의 형태를 보였다(사진부도 9).

마. 자기 공명 영상 소견

촬영된 MRI에서 T1 강조 영상으로는 주로 해부학적 특성을, T2 강조 영상으로는 주로 병리학적 소견을 관찰할 수 있었고 변화 소견이 광학현미경 관찰 소견과 부합되는 변화를 나타내 보였으며 주변 연조직 특히 근육에서의 변화를 뚜렷하게 관찰할 수 있었다.

1. 정상대조군

저신호강도(low signal intensity 또는 hypotonicity)를 보이는 피질골 부위와 그 안쪽 고신호강도 (high signal intensity 또는 hypertonicity)의 골수강이 T1강조 영상에서 관찰되었으며 T2강조 영상에서는 골수강이 고신호강도로 나타났다(사진부도 10).

2. 실험 제1군

(1) 실험 2주 소견

T2 강조 영상에서 피질골이 정상 피질골의 신호 강도보다 증가된 신호강도를 나타냈고 골수강은 T1 강조 영상에서 저신호강도, T2 강조 영상에서 고신호강도를 보였으며 골편 간극은 T1강조 영상에서 등신호강도(iso-signal intensity 또는 isotonicity), T2 강조 영상에서 고신호강도를 나타내었다(사진부도 11).

(2) 실험 4주 소견

근심 골편 후방에 형성된 신생 가골 형성 부위 일부의 T2 강조 영상에서는 고신호강도가 관찰되었으며(사진부도 12), 이는 광학현미경상의 신생골 형성 부위 중 골소주가 감소하면서 주변 소성 결합 조직과 그 안의 넓은 세포 간격 및 세포간질액을 보이는 부위에 해당되었다.

(3) 실험 8주 소견

정상적인 하악골의 피질골 및 골수강에 일치하는 신호강도로 나타났지만 골절단부는 T1과 T2 강조 영상에서 주변 근육과 비교하여 등신호강도의 선으로 남아 있었다.

(4) 실험 12주 소견

정상적인 하악지의 형태를 보였고, 골수강 부위는 T1 강조 영상에서 고신호 강도를 보였고 T2 강조 영상에서도 고신호강도를 나타내 보였으나 이전 시기보다 감소되었으며 골절단 부위는 발견할 수 없었다.

(5) 실험 18주 및 24주 소견

실험 12주와 마찬가지로 정상적인 하악지의 형태와 T1, T2 강조 영상에서 피질골은 저신호강도, 골수강은 고신호강도를 나타냈다(사진부도 13).

3. 실험 제2군

(1) 실험 2주 소견

치유 반응이 느렸던 실험동물에서는 정상과 거의 비슷한 피질골 및 골수강의 소견을 보여 T1 및 T2 강조 영상에서 피질골은 주위 근육에 비해 저신호강도, 골수강은 고신호강도를 나타냈다. 근·원심 골편의 골절단면은 근육과 같은 등신호강도를 보였으며 이는 광학현미경상의 신생 가골 형성 부위에 해당되었다. 또 근·원심 골편 주위는 T1 강조영상에서 등신호강도를 보였지만 T2 강조영상에서 고신호강도를 보였으며 광학현미경상의 혈종 또는 결합 조직의 부위와 일치하였다(사진부도 14).

치유 반응이 빨랐던 실험 동물에서는 T2 강조 영상에서 피질골의 신호강도가 정상 피질골 신호강도 보다 증가하여 근심 골편의 아래 끝쪽이 근육과 거의 비슷한 등신호강도를 보였으며 조직학적으로는 피질골이 망상골 형태로 바뀌는 부위였다. T1 강조 영상에서 근·원심 골편의 골수강은 근육보다 약간 낮은 저신호강도를 보였지만 T2 강조 영상에서는 불균질한(heterogenous) 고신호강도 부위가 관찰되었으며 이는 신생골이 만들어지면서 주위 지방세포들이 소성 결합조직으로 바뀌는 부위에 해당되었다. T2 강조 영상의 근·원심 골편 주변 고신호강도 부위내 끗곳에서 저신호강도를 보이는 부위가 생겨났고 조직 소견상 차밀 결합조직내 골막하 가골에 해당되었다. 그리고 근·원심 골편 사이의 간극은 T1 강조 영상에서 등신호강도, T2 강조 영상에서 고신

호강도를 나타냈으며 광학현미경상의 결합조직 혹은 혈종이 나타난 부위에 해당되었다(사진부도 15).

실험 제2군 2주의 내측 익돌근(medial pterygoid muscle)에서는 큰 변화가 보이지 않았지만 외측의 교근 부위에서는 특히 하방의 곳곳에서 다양한 크기의 고신호 강도를 가지는 점들이 T2 강조 영상에서 관찰되었고 이는 수술전 시기에 관찰되지 않았던 것으로 정맥에 해당되는 소견이었다.

(2) 실험 4주 소견

근·원심 골편의 피질골 부위는 원래의 신호강도를 회복하여 T1, T2 강조 영상에서 정상적인 저신호 강도를 보이며 골수강 부위를 감싸고 있었다. 골수강 부위는 T1 강조 영상에서 주위 근육보다 약간 높은 고신호강도를, T2 강조 영상에서 근심 골편의 경우 아주 높은 고신호강도로, 원심 골편의 경우 약간 높은 고신호강도로 관찰되었고 이는 광학현미경상의 근심 골편부의 소성 결합조직과 드문 지방세포, 원심 골편부의 많은 지방세포 형성 부위에 해당되었다. 골편 간극 부위는 T1, T2 강조 영상 모두에서 고신호강도를 나타냈으며 광학현미경상의 치밀 결합조직 부위였다. 그 주변으로 T1 강조 영상에서 약간 낮은 저신호강도, T2 강조 영상에서 고신호강도를 보이는 부위가 있었며 이는 광학현미경상의 신생 가골 형성 부위에 해당되었다. 그리고 근·원심 골편 후방의 신생풀이 형성되었던 일부 부위에서는 T2 강조 영상의 고신호강도가 나타나기 시작하였다(사진부도 16).

실험 2주 교근에서 점점이 산재되어 보이던 고신호강도의 점들은 이 시기에서는 굽고 뚜렷한 고신호강도의 점들로 관찰되었으며 증가된 혈관 소견에 해당되었다.

(3) 실험 8주 소견

피질골 부위는 T1 강조 영상에서 저신호강도로 계속 관찰되었고 T2 강조 영상에서는 인접 근육보다 약간 높은 고신호강도를 보였으며 광학현미경상 골소주와 소성 결합조직으로 이루어진 망상을 부위에 해당되는 소견이었다. 골수강에서는 이전 시기와 다르게 T1 강조 영상과 T2 강조 영상에서 비슷하게 고신호 강도로 관찰되었으며 지방세포와 소성 결합조직이 존재하는 부위였다.

근·원심 골편의 간극 부위는 T1 강조 영상에서 저신호강도, T2 강조 영상에서 약간 높은 고신호강

도로 나타났으며 실험 4주에 비해 신호강도가 감소되었다. 근·원심 골편 후방의 신생 골수 형성 부위는 여전히 T1 강조 영상에서 저신호강도, T2 강조 영상에서 고신호강도를 보였으나 실험 4주에 비해서는 넓이가 감소되었고 골편 간극 부위와 마찬가지로 광학현미경상 소성 결합조직이 관찰된 부위였다.

(4) 실험 12주 소견

골수강 부위는 실험 8주와 큰 차이가 없었으나 T2 강조 영상에서 근·원심 골편 피질골 부위는 이전에 비해 신호강도가 증가하여 주변 골수강 신호강도와 비슷한 등신호강도로 바뀌어 경계를 알기 어려웠다. 반면 골편 간극에서는 신호강도가 점차 감소되면서 등신호강도로 보였으나 양쪽 골편 골수강 부위의 고신호강도는 여전히 분리되어 보였다. 그리고 합쳐진 근·원심 골편 및 신생풀의 바깥쪽에는 T1 강조 영상에서 피질골에 가까운 저신호강도를 보이는 얇은 층이 연속적으로 둘러싸고 있었으며 조직학적으로 치밀골 부위에 해당되었다. 실험 4주 시기 이후 골편의 후방에서 고신호강도를 보이던 골수강 형성부위는 실험 12주 들어 신호강도가 감소하여 주위와 같아졌고, 교근내 점점이 보이던 고신호 강도도 관찰되지 않았다(사진부도 17).

(5) 실험 18주 및 24주 소견

T1, T2 강조 영상에서 높은 신호강도로 보이는 근·원심 골편내 골수강이 피질골 또는 골편 간극 부위의 저신호강도에 의해 나뉘어 보이기는 하지만 이 부위의 저신호강도가 실험 18주에서 24주로 가면서 계속 강화되어 실험 24주에서는 근·원심 골편 골수강의 고신호강도가 분리되어 보였다(사진부도 18).

IV. 총괄 및 고찰

성견 하악골 및 주변 연조직의 해부학적 특성은 사람과 유사한 점이 있다. 하악골 상행지의 형태가 비슷한 것은 물론 교근 및 내측 익돌근이 하악골 상행지의 내·외측을 감싸면서 삼각건(sling)을 이루고 이 근육들은 사람에서와 같이 풍부한 근섬유들로 이루어져 있다. 하악골은 하치조 혈관에 의해 혈류를 공급받되 저작근 부착 부위에서는 해당 근육들로부터 공급받게 된다. 하치조 혈관 및 저작근으로 가는 혈관은 상악동맥(internal maxillary ar-

tery)에서 갈라지며 이 동맥은 하악골 상행지의 후면을 지난다⁸⁵⁾.

그러나 성견 하악골 상행지가 사람과 다른 점들 중 하나는 오훼돌기(coronoid process)가 발달하고 S자형 절흔(sigmoid notch)이 거의 없어 하악과두에서 오훼돌기로 바로 연결된다는 점이다. 그러므로 성견에서는 하악골 후퇴를 위한 VRO시행시 단순히 수직 골절단술만으로 적절하게 하악골을 후퇴시킬 수 없으므로 이전에 성견을 대상으로 VRO가 시행되었던 실험들^{35, 79)}에서는 실질적인 하악골 후퇴가 어려웠으리라 생각된다. VRO를 처음으로 발표한 Caldwell⁶⁾은 사람에서 VRO시 하악골 후퇴량이 10 mm이상일 경우 오훼돌기 절단술(coronidotomy)과 동시에 S자형 절흔(sigmoid notch)의 일부를 함께 골절제하는 방법을 제시한바 있고, Smith와 Chambers⁶⁹⁾, Alling⁴⁾, Shepherd⁶⁶⁾는 VRO관련 술식의 회고에서 비슷한 골절단 방법을 소개하였다. 본 연구에서는 하악골을 확실히 후방으로 이동시키기 위해 VRO와 오훼돌기 절단술을 시행한 뒤 원심 골편의 상방 일부를 췌기(wedge) 형태로 절제하여 인공적으로 S자형 절흔을 만들도록 함으로써 하악골 후퇴를 가능하게 할 수 있었다(그림 1 참조). 성견의 경우 아주 발달된 오훼돌기와 측두근을 가졌으므로 오훼돌기 절단술후 측두근의 오훼돌기를 통한 원심 골편의 혈류 공급에 영향을 줄 수 있고 이것이 치유 과정에 영향을 주지 않을까 우려되었지만, 본 연구 결과 특별한 골치유 자연 소견이 관찰되지 않았는데 이는 하악골 원심 골편부는 하치조혈관에 의해 주된 혈류 공급을 받으므로 측두근의 분리와 오훼돌기 절단이 골치유에 직접적인 영향을 주지는 않았던 것으로 생각된다.

실험 동물은 실험적 모두 정상 교합 상태를 가지고 있었고, 실험 목적을 위해 하악골을 후방 이동시킨 후 이로 인해 발생된 개교증(open bite)이 수술종 또는 술후 생기는 경우가 있었으며 실험동물에 따라 정도의 차이가 있었다. 정상에서는 가위교합(scissor bite)되던 하악 제1대구치가 원심 골편의 후방 이동에 따라 상악 대구치와 교합되면서 구치부의 교합이 높아졌고 여기에 설골상근(suprahyoid muscle)등에 의한 근육의 견인 작용 및 불안정한 골절단부의 고정 상태등이 영향을 미쳐 개교증이 발생된 것으로 생각되었다. 비록 실험 동물의 교합 상태가 술후 개

교증을 보였어도 본 연구는 골편의 중첩과 골편 동요 상태에서의 치유 경과를 관찰하기 위한 것이므로 개교증이 유지된 상태로 실험을 진행하였으며 경과 관찰중의 개교증이 치유 과정을 규명하는데 영향을 주었다고는 사료되지 않는다.

본 연구의 광학현미경 관찰 소견은 수술후 치유 과정중 대체로 일관된 골치유의 진행과 골개조 현상을 보여 주었으나, 일부 실험동물간 또는 같은 실험동물이 좌·우측간에 차이를 보여 주기도 하였다. 그러나 그 차이가 초기 소견을 제외하고는 실험 결과를 해석하는데 영향을 줄 정도로 크지 않았다. 다만 실험 제2군중 2주째의 실험동물 2마리에서 골치유 속도 및 반응에 차이가 있었는데 이는 아마 골막 박리 및 수술 외상에 의한 골괴사와 주변의 혈류 공급 차이에 의한 것으로 추정된다.

성견 하악골은 발생과정에서 사람에서와 같이 막성 골형성(intramembranous bone formation) 과정을 거치는 것으로 알려져 있다⁵²⁾. Weiss⁸⁰⁾, Richany 등⁶³⁾, Bourne¹⁴⁾, Radden과 Fullmer⁵⁷⁾, McLean⁴⁷⁾등은 막성을 발생 부위에서의 골치유는 막성골에 의한다 했지만 Hall과 Jacobson³¹⁾, Aurlick⁶, Granstrom²⁸⁾, Pritchard⁵⁶⁾, Sutro와 Jacobson⁷¹⁾등은 하악골이나 두개골 등의 골절 등에서 골치유시 연골이 나타날 수 있다고 하였다. VRO후에 Boyne¹⁵⁾은 실험 10일경 골막하 가골이 나타난다 하였고 Bell과 Kennedy⁸⁾도 골막 하방에서 골형성이 일어난다고 하여 비슷한 관찰 소견을 보고하였지만 가골의 종류 및 생성부위에 대해 언급하지는 않았다. 본 연구에서는 실험 제2군 2주째부터 근·원심 골편 골절단부의 골수에서 막성을 형성에 의한 골내막 가골(endosteal callus)의 형성과 함께 골편 주변의 광범위한 부위에서 역시 막성을 형성에 의한 골막하 가골로 추정되는 신생골이 관찰되었으며 일부에서는 연골성 골형성 과정이 있는 연골 세포도 관찰되었는데 이들 연골은 주로 가골들의 연결 부위에서 관찰되어 가골들의 결합에 역할을 하는 것으로 추정된다.

본 연구에서 실험 2주째에 과두 하방 뿐 아니라 근심 골편의 아래 끝쪽까지 골고루 신생골 형성이 보였고 근심 골편의 경우 골수강이 넓어지지 않고 세포증가도 많지 않은 상태에서 외방으로 골형성이 일어났는데(사진 부도 5 참조), 이렇게 형성된 신생골은 소위 골내막 가골이라고 불리는 가골로 해

석되었다. Boyne¹⁵⁾은 실험 20일째 소견에서 골절단부에 생긴 골형성을 보고하였지만 가골의 개념으로 설명하지 않았으며 실험 25일 후에야 본 실험과 유사한 골형성 소견을 보였다고 하였고, Bell과 Kennedy⁸⁾는 실험 2주후 과두 하방에서의 골수내 다발성 골형성과 함께 골수내 세포의 증가를 보고한 바 있다. Kernek와 Wray³⁸⁾와 Tonna와 Cronkite⁷²⁾는 쥐 경골(rat tibia) 골절 후의 치유에 관한 연구에서 골내막 가골의 역할은 크지 않다고 하였다. 반면 Hansen-Leth³⁴⁾와 Hulth와 Olerud³⁷⁾는 실험 2주째 골절단부(amputation)에서 골막하 가골과 함께 골내막 가골이 나타나기 시작하여 이중 골내막 가골이 실험 3~4주경 절단면을 막는 봉합 가골(sealing callus)의 역할을 한다고 하였는데, 본 연구에서는 VRO후 초기에 근·원심 골편에서 골내막 가골 형태로 나타나는 신생골은 일반적인 골절의 치유에서와 같이 골유합에 기여하지 못하였으므로 골절단부(amputation)의 경우와 같이 알려진 골수강을 막는 봉합가골(sealing callus)로 작용한 것으로 추정된다.

본 연구에서는 골절편 치유 부위에 주로 막성골 형태의 골막하 가골 형성이 두드러졌는데 실험 2주째에 골막하 가골이 주로 근·원심 골편의 후방 및 교근 주위에서 독립적으로 형성되고 3~4주를 지나면서 이들이 서로 만나며 인접한 골편 사이를 연결해 주어 골유합이 일어나는 것으로 관찰되었다(사진 부도 7 참조). 따라서 본 연구 결과 VRO후의 골유합은 골편 주위에 광범위하게 생성된 골막하 가골 등의 성장에 의해 발생되므로 골편의 유합을 위해 피질골 제거술(decortication) 또는 강성 고정으로 밀접한 골접촉과 함께 골편간의 이동이 전혀 없게 해야 한다는 Reitzik⁵⁹⁾, Alling⁴⁾, Caldwell¹⁶⁾ 등의 주장은 본 연구의 결과와 일치되지 않는다. 이러한 골막하 가골의 형성과 기원에 관하여는 광범위한 의견의 일치가 있어왔으며^{38, 50, 53, 72, 75)} 본 연구에서도 골막 하방에서 섬유아세포(fibroblast)와 유사한 조골세포들의 증식이 크게 증가하면서 골막하 가골이 증가되는 것으로 관찰되었다.

본 연구에서 신생 가골은 골막 하방의 결합조직 부위에서 독립적으로 만들어 지기도 하였으나 골절 단면에 가까운 근·원심 골편의 내·외측에서도 생성되었고, 그 형태는 장골이나 하악골 골절시 골막 하방에서 생성되는 지지가골(anchoring callus)⁴⁰⁾의

형태와 유사하였다. 골막에서 상당히 떨어져 있으면서도 골을 형성한다는 점을 고려한다면 이 부위에서의 막성 골형성에 의한 가골형성은, Daum 등²³⁾, Simmons⁶⁷⁾, Hall³¹⁾, Reitzik⁵⁹⁾의 주장과 같이 수술시 남아있던 골막에 의하였거나, McClemente⁴⁵⁾, Urist⁷⁶⁾, Albenius와 Johnell³⁾ 등의 주장과 같이 골유도(osteoinduction)에 의해 인접 결합조직의 섬유아세포가 변화되어 생긴 것으로 사료된다. 본 연구만으로는 정확한 세포 기원을 알기 어려우나 신생가골 형성부위가 비교적 일정한 것으로 보아 남아 있던 골막에 의해서만 단독적으로 생기기는 어려울 것으로 생각되며, 따라서 주변 혈류동의 영향을 받으며 골유도에 의해 형성되거나 남아 있던 골막과 골유도가 복합적으로 작용하여 신생 가골이 발생되는 것으로 추정된다(사진 부도 5, 6 참조).

또한 본 연구에서는 막성골 형성 과정의 골막하 가골이 주로 발견되었지만 이들 막성 가골 형성 부위 중간에서나 가골의 결합시에는 막성골이 아닌 연골성 골형성이 관찰되었다. 가골내 연골세포의 형성에 관해 Ham³²⁾, Gergis와 Pritchard²⁶⁾는 일반 골형성과 그 기원세포가 같지만 혈류공급 저하에 따르는 산소공급 부족시 연골이 형성된다고 하였으며 Urist와 McLean⁷⁷⁾은 기계적 자극에 의한다고 하였고 Alvenius와 Johnell³⁾, Luedke와 Angevine⁴²⁾은 골절의 종류, 종(species), 움직임(mobility)에 따라 차이가 있다고 하였다. 본 연구에서 실험 초기에 골막하 가골내에서 연골이 형성된 것은 급속한 골생성 과정에서 부족한 혈류공급에 의한 것으로 사료된다(사진 부도 2, 6 참조). 또한 연골 형성이 골편의 움직임과 관련 있다는 사실도 이미 널리 알려진 사실이지만^{3, 42, 48)} 이전의 Boyne¹⁵⁾과 같이 VRO후 계속 악간고정을 시행한 경우나 Bell과 Kennedy⁸⁾와 같이 수술 직후 하악골 운동을 허용했던 실험 모두에서 보고된 바 없었고 다만 Huebsch와 Wellington³⁵⁾의 실험에서만 실험 4주 시기의 가골에 연골이 포함되었다고 하는 사실이 알려졌을 뿐으로 이들에서의 연구 결과와는 매우 다르다. 본 연구에서 나타난 연골에 의한 가골의 연결은 실험동물 하악골의 조기운동에 따른 골편의 움직임과 관련이 깊으리라 예상되며 이는 임상 결합에서 VRO후 약 2주간의 악간고정후 조기 하악골 운동을 시킴에도 부정유합이나 위관절 운동없이 양호한 골치유를 보이는 결과⁸³⁾

²⁴⁾에 대한 해석이 될 수 있으리라 사료된다.

한편 실험 4주까지의 골반옹에서 가장 두드러진 점은 이미 언급한 신생가골 형성과 함께 근·원심 골편의 골절단면 근처에서 일어나는 피질골 및 골수강의 변화였다. 원심 골편은 골절단면 근처에서, 근심 골편은 거의 전 길이에 걸쳐 피질골의 골세포가 소실되고 골와는 빈 채로 남게되는 허혈성 골괴사(ischemic bony necrosis) 또는 피질골 괴사(cortical infarct)가 실험 1주부터 관찰되어 8주까지 지속되는 것으로 나타났다. 이러한 시설은 Boyne¹⁵⁾, Huebsch와 Wellington³⁵⁾의 연구에서는 언급된 바 없었으나 Bell 등은 하악골에서 VRO후나 다른 술식후 실험 6주까지 관찰된다고 보고한 바 있고^{8, 9, 10)}, 다른 이들은 장골에서도 같은 소견을 보고하면서^{20, 25, 61)} 약 2개월 경과시 소실된다고 하여 비슷한 소견을 나타내 주었다. 이러한 피질골의 골괴사는 골절단시 드릴 등에 의해 발생된 열의 영향과 골막 박리와 골수 절단을 통한 혈류의 공급이 상실되면서 인접 연조직으로부터의 즉각적인 재혈관화(revascularization)가 늦어져 생기는 것으로 알려져 있다^{6, 9, 10, 24, 25, 29, 60, 61, 66)}. 피질골의 괴사와 함께 일부 실험동물에서 실험 2주째 및 3주째에 특히 근심 골편 아래골쪽에서 골수의 허혈성 괴사에 의한 것으로 추정되는 골수강 지방세포내 부종과 섬유화(치밀 결합조직으로의 대치)가 관찰되었고 이때는 재혈관화 및 초기 신생 가골의 형성이 지연되는 것이 관찰되었다. 그러나 4주째 실험동물 근심 골편 아래 끝쪽 한 부위에서만 골괴사후 파골세포에 의한 심한 골흡수 소견을 보였을 뿐 다른 부위에서는 관찰되지 않았다(사진 부도 2, 6, 7 참조). Bell과 Kennedy⁸⁾는 이러한 VRO후의 골괴사 현상을 미세혈관 조영술에 의한 연구에서 지적한 바 있고, Walker⁷⁸⁾ 및 Hall가 McKenna³⁰⁾는 골절단선을 이전보다 전방으로 하면서 골막박리를 최소화하여 골괴사를 막아야 한다고 하였다. 이와 관련된 임상에서의 직접적인 관찰 결과는 의외로 많지 않아 Hall과 McKenna³⁰⁾는 VRO의 약 5%에서 골괴사가 발생한다 하였으며 VRO후 하악각 증가의 원인으로 Shepherd⁶⁶⁾은 근육부착 감소로 인한 혈류 감소로 골흡수가 발생된다고 한 바 있다. 그러나 Rhinelander⁶¹⁾, Mckibbin⁴⁶⁾은 괴사골 또는 사골(dead bone)이 반드시 흡수되지 않으며 혈관의 재분포후 신생골로 대치될 수 있다고 하였는데, 본 실험의 조직

검사 소견에서 골흡수는 단지 한 부위에서만 관찰되었고 나머지 부위에서는 골형성 과정이 활발하게 진행되어 일치된 결과를 보였다. 본 실험의 결과를 직접 인간에게 적용하는 것은 무리이겠으나 임상적으로도 수술후 골괴사 등의 합병증 발생 빈도가 높지 않은 것으로 보아 인간의 VRO후에도 근심 골편 아래골쪽에 허혈성 골괴사가 일어나기는 하지만 대개 심한 골흡수 없이 재혈관화에 의해 신생골로 대치되며 치유되는 것으로 사료된다.

본 연구에서 골괴사가 일어난 피질골 내에서는 실험 2주째부터 혈관의 종식이 크게 일어나며 망상골로 변화되고 그 이후에도 망상골은 계속 유지되었다. 또한 혈관종식이 일어나면서 피질골이 망상골로 변화하는 시기에, 골수강에서도 새로운 골소주를 포함하는 신생골이 형성되었으며 이에 따라 피질골과 같은 형태의 망상골로 변화하였다. 피질골내 혈관의 종식 소견은 파골세포의 작용과 기존의 하버스관(Haversian canal)으로의 재혈관화에 의한 것으로 생각되었는데 Bell과 Kennedy⁸⁾는 실험 3주 시기에 골수내에서 골형성이 일어나며 조혈세포가 생긴다 하였고 Boyne¹⁵⁾은 VRO 10일 뒤 골원(osseotone)의 개조(remodeling) 현상이 일어나며 실험이 종료된 30일째까지 계속되었다고 하여 본 실험의 소견과 유사한 소견을 제시한 바 있다. 이러한 피질골의 혈관증가 및 피질골 골수의 신생골 형성에 의한 망상골로의 변화는 하악골이나 장골의 골절 치유시에서는 보고된 바가 거의 없으나 본 실험에서는 뚜렷이 나타난 점이 특이하며 이는 VRO후 골개조의 중요한 단서가 될 수 있다고 본다. Hansen-Leth³⁴⁾는 골절단(amputation)후 골절단부 근처에서 골수의 해면성(spongiosity)이 증가한다고 하였고 Hansen-Leth와 Reimman³³⁾, Hulth와 Olerud³⁷⁾, Richany 등⁶³⁾은 혈관이 증가된다는 소견을 제시한 바 있다. 또한 Foster 등²⁵⁾, Richany 등⁶³⁾, Danckwardt-Lilliestrm²²⁾등은 골절단후, Cavadiad와 Trueta²⁰⁾는 골절후, 무혈 또는 혈류감소 상태에서 골수강내 골형성 육아조직(osteogenic granulation tissue)이 형성되고 여기에서 망상골이 형성된다고 하였다. 이상의 의견에 견주어 본 연구에서 실험 2주 이후 발생된 골수 및 피질골의 변화가 골절단(amputation) 후의 변화에서 처럼 골절단부를 막기 위한 국소적 보상 반응인지, 아니면 외상에 따른 전반적 혈류

감소로 인해 보상적으로 혈류 증가와 망상골로의 변화가 일어난 것인지 단정할 수는 없겠으나 위의 현상이 복합적으로 작용한 것이 아닌가 한다. 한편 본 연구에서 망상골로 변화된 피질골부는 주변에서 새로 형성된 신생 가골과 형태는 일치하였지만 골밀도의 차이나 주행방향의 차이에서 구분될 수 있었는데 실험 8주 이후에는 구분이 거의 어려워졌으며, 동시에 바깥쪽 망상골의 골밀도가 높아져 피질골에 가까워지고, 내부 망상골 밀도는 낮아져 골수의 형태에 가까워지는 골의 개조 과정을 보여 주었다(사진 부도 8 참조).

본 연구에서는 실험 3주 후 막성 골형성에 의한 가골에 의해 골편들이 연결되면서 실험 4주 경과 시에는 실험 제1군의, 실험 8주째에는 실험 제2군의 근·원심골편 사이 간격이 대부분 막성 가골에 의해 상당 부분 채워지고 일부 잔존 부위에만 치밀 결합 조직의 소견을 보였으며 일반 방사선 사진에서도 실험 8주째에 골절선의 소실이 주로 관찰되어 조직 검사 소견과 일치되었다. 이러한 결과로 보아 VRO 후 일정 기간이 될 때까지 연조직의 개입없이 골유합이 잘 이루어지는 것은 골편 사이 간극에 채워지는 막성 가골의 역할이 크다고 추정되지만 막성 가골이 연조직의 개입을 실제로 막는지, 막는다면 그 기전은 무엇인지를 관하여는 좀더 구체적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

실험 제1군에서의 골치유는 실험 8주까지 실험 제2군과 큰 차이가 없이 막성 신생골 형성에 의한 가골이 형성되고 이들이 근·원심 골편을 연결하면서 골치유가 진행되었다. 그러나 근·원심 골편의 골수강이 서로 마주보고 있고 혈류의 공급도 수술군보다 좋기 때문인지 피질골의 골파사가 적게 일어났고 골막하 가골의 형성 및 이들에 의한 골편의 연결도 빨라 수술군보다 앞선 골치유 소견을 보였다(사진 부도 3 참조).

실험 8주군의 골편 간극이 망상골로 완전히 채워지면서 왕성해진 골개조 현상은 실험 12주째에 상당히 진행되어 실험 24주째에는 하악골 후연부가 외측으로 휘어지면서 두꺼워진 형태의 성연 하악골 모습을 보였다. 또 근육의 재부착과 함께 풍부한 파골세포가 이미 형성되어 있던 가골 부위를 주로 흡수하였고, 근·원심 골편 사이의 간극에서 두 골편을 연결해 주던 망상골 형태의 골은 골치밀도가

높아지며 골수강이 좁아져 치밀골 형태로 바뀌게 되었는데 이 변화는 두 골편이 밀착되어 가까이 위치한 아래골쪽에서 더욱 뚜렷하였다(사진 부도 8, 9 참조). 이러한 골개조 현상에 대하여 Bell과 Kennedy⁸⁾는 VRO 후 12주까지의 치유를 관찰하여 연속적인 피질골 형성과 원심 골편의 내측이나 골유합 부위에서의 골개조를 보고한 바 있으나 그 기간이 짧아 본격적인 형태 개조의 경과적 관찰에는 미흡하였고 그보다 실험기간이 짧았던 Boyne¹⁵⁾, Huebsch와 Wellington³⁵⁾에서는 더욱 그러하였다. 현재까지 이러한 골개조에 의한 장기적 형태 변화의 연구는 임상 연구 분야에 한정되어 보고된 바, 이와 박⁸³⁾은 약 1년간의 관찰로 1년 이내 골절선 소실을, Rosenquist⁶⁵⁾는 2년 동안의 관찰에서 근심 골편의 흡수(8주)와 골간극에서의 골형성(1년)의 소견을 보고하였다. 또 Shepherd⁶⁶⁾는 VRO 약 5년 후의 하악골 형태변화에 관한 연구에서 골유합후 골흡수가 일어나며, 하악 상행지 크기가 크게 감소하였고 부착되는 근육이 감소하고 퇴축함에 따라 골에 대한 혈류감소로 골흡수가 일어난다 하였다. 그러나 이미 언급한대로 VRO 후의 골흡수는 만성적인 혈류량 감소에 의한 것이 아니며 더구나 본 연구에서 근육이 충분한 재부착을 보이고 골유합이 어느 정도 완성되었던 실험 4주 이후에야 골흡수가 시작되고 골개조가 일어났던 것으로 미루어, 일시적인 골파사에 의한 골흡수성 골개조도 가능하지만 대부분의 경우 하악골 기능의 활성화로 인한 골개조 현상에 의해 골흡수가 지속적으로 일어난 것으로 사료된다. 또한 본 실험 MRI 소견상 내측 익돌근보다는 교근의 면적이 감소하는 것으로 나타났고 Westesson 등⁸¹⁾도 저작근의 위축을 보고하였는데 이는 골막 박리후 분리된 근육의 괴사 또는 변성에 의한 것이라기 보다는 기능의 저하에 따른 변화로 생각된다. 악간 또는 사지 고정후의 근육 퇴축에 관하여는 많은 연구가 시행되어 기능 저하에 따른 급속한 근육의 위축 현상은 이미 충분히 보고된 바 있으며^{7 13 44, 58)} 본 실험의 VRO 후 초기에는 수술로 인한 외상이나 악간고정 등에 의해, 그 이후로는 교합변화에 따른 저작효율의 감소로 저작근의 기능이 크게 감소되어 근육이 위축된 것으로 추정된다. 그러나 실험 12주 및 24주군에서는 교근의 면적이 상당히 회복되어 정상과 비슷한 것으로 관찰되어서 기능 회복시 근육도 회복될 수 있

음을 암시해 주었는데 이는 Westesson 등¹⁸⁾의 관찰 결과인 근육의 영구적 위축과 비교되어 매우 흥미롭다. 비록 Westesson은 인간에서의 MRI 관찰이고 본 연구는 성견에서의 관찰로써 종(species)의 차이는 있겠으나 본 연구에서 나타난 근육의 크기 회복은 향후 좀더 관심있게 연구되어야 할 것으로 사료된다.

골개조 현상에 대하여 McKibbin⁴⁶⁾은 골절 치유 후기 또는 정상 회복 시기의 골개조 과정에서는 골치유에서와 같이 골흡수와 골첨가가 연속적으로 일어난다고 하였고, Aeo와 Chao⁵⁾는 골치유시 골막하 가골의 감소가 피질골의 치유정도와 관련이 있다고 하였다. Moss⁴⁹⁾는 골성장과 발달이 주위 근육 및 연조직 영향에 의한다는 소위 기능기질이론(functional matrix theory)으로 해석하였으며, Wolff⁵²⁾는 골기능 자체의 변화가 골내부 구조와 외부형태의 변화를 초래한다고 하였고 Steinberg 등⁷⁰⁾은 골기능의 변화시 골내에서 생체전기가 바뀌어 골개조될 수도 있다고 설명한 바 있다. 본 연구만으로는 골유합후 발생된 골개조의 원인에 관하여 정확히 알기 어렵지만 실험 8주 이후 일어난 골개조 양상들은 골치유가 진행되면서 가골 등에 의해 하악골이 원래의 골강도와 기능을 일단 회복하게 되면 정상적인 기능 운동과 근육의 영향을 받아 골조직이 변화되어 가는 과정으로 생각해 볼 수 있을 것 같다.

원심 골편 내측의 내측 익돌근 하방에서 생긴 골막하 가골은 하치조 신경이 하악공으로 들어가는 입구에까지 생성되어 실험 8주 이전까지 지속되는 양상을 보였다. 이렇게 생성된 신생골이 하치조 신경에 미치는 영향을 정확히 평가하기는 어려우나, 좁은 하악공 내에서 골이 형성된다면 신경에 압박 등 영향을 충분히 미칠 수 있을 것으로 생각되었으며 따라서 이러한 현상은 수술후의 일시적인 감각 이상의 원인으로 해석할 수 있다고 보았다. 본 연구에서는 뚜렷하게 초기부터 신생가골이 신경관 주위로 형성되어 있었지만 골치유가 어느 정도 완성되는 실험 8주 이후로는 이러한 신생가골의 침착을 보기 어려워 가골이 일시적 감각 이상의 원인에 대한 해석을 해 줄 수 있는 것으로 사료되었다. 따라서 지금까지 VRO후 발생된 감각 이상의 원인으로는 변위된 근심 골편⁶⁴⁾이나 상행지의 해부학적 형태에 따른 기계적 자극⁷⁴⁾, 또는 일반적으로 수술시 발생하는 외과적 자극을 생각해 왔으나 앞으로는 골치유시

가골 형성의 영향도 함께 고려해야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서 골조직의 대사 및 화학적 조성 변화와 인접 연조직의 변화를 관찰하기 위해 사용한 MRI는 골치유 분야에서 아직 널리 이용되지 못하고 있는 실정이지만 본 연구에서는 목적에 맞게 골 및 연조직의 변화를 잘 제시해 주었다. Longaker 등⁴¹⁾은 MRI가 조직학적 소견과 일치되는 특정적 양상을 보이며 특히 T2 강조 영상이 골형상(morphology)에 관한 더 많은 정보를 준다고 하였으나 골치유 분야에서는 아직 충분한 연구가 되지 못하였다고 하였으며 Markel 등⁴³⁾은 골치유를 수량적으로 나타내기 위해 여러 진단방사선 사진술을 비교한 결과 MRI가 가장 뒤떨어진다고 하였으나 Adam 등¹⁾은 대퇴 곽두에서의 골절편 치유를 조직소견 및 MRI로 관찰하고 MRI가 골편의 치유에 따른 안정성(stability)을 가장 잘 나타내 주는 방법이라 한 바 있다.

본 연구에서 실험 2주째부터 T2 강조 영상에서 피질골 부위는 신호강도가 증가하면서 인접 근육의 신호강도에 가까운 등신호강도를 보였는데 이는 조직학적 소견에서 혈관과 소성 결합조직 부위를 포함하는 망상골로의 변화 소견과 일치되는 것으로 해석되었다. 그러나 실험 4주째부터는 피질골 부위의 조직학적 변화가 없음에도 MRI에서는 이전 시기와 다르게 T2 강조 영상에서 저신호강도로 관찰되고 이후 점차 신호강도가 증가되는 소견을 보여 수분의 함유 정도나 혈류 등과 관련된 수소 이온 농도의 변화가 있었으리라 추정되므로 조직학적으로 안정된 상태에서도 골대사가 진행되고 있음을 시사해 준다. 또한 골치유 반응이 늦었던 한 마리 실험 동물을 제외하고는 골수강 부위가 T1 강조 영상에서 저신호강도로, T2 강조 영상에서는 등신호 또는 고신호강도로 관찰되었는데 이러한 변화는 지방세포를 포함하는 골수강 부위가 수술후 혈류 감소에 따른 허혈성 골괴사를 제시해 주는 소견으로 해석된다. 실험 4주째에는 근심 골편 골수강 부위에서 고신호강도가 관찰되고 특히 T2 강조 영상에서 고신호강도의 골수강을 나타내 지방세포와 함께 관찰된 소성 결합조직 등의 수분 함량이 크게 증가된 것을 의미하는 것으로 생각되었는데 태생기의 양을 대상으로 골치유를 MRI로 연구한 Longaker 등⁴¹⁾의 연구에서도 10일 경과시의 골수부는 고신호강도를 보이며 이후

점차 감소한다고 보고하면서 이는 수분과 지방을 포함하는 골수의 초기 재형성을 간접적으로 의미한다고 한 바 있다. 근·원심 골편의 골수강은 실험 8주이후 T1 강조 영상에서 고신호강도를 보여 정상에 가깝게 회복됨을 암시하였는데 조직학적으로도 지방세포와 조혈세포를 일부 포함하는 정상적인 골수강의 형태를 보이게 되어 일치되는 결과로 생각된다(사진 부도 15, 16, 17 참조).

한편 실험 제1군의 경우 실험 12주 이후 근·원심 골편이 정상적으로 연결되면서 하나의 연속된 피질골 및 골수강을 보이는 MRI 소견을 나타내 주었고 골절단 부위는 확인하기 어려웠으며 실험 18주 및 24주 소견도 마찬가지였다. Adam 등¹⁾의 연구에서는 골절선에 관한 MRI 소견이 조직 소견과 일치하지 않아 골유합이 일어났음에도 MRI상에서는 저신호강도의 골절선으로 나타난다고 하면서 그 이유를 아직은 알 수 없지만 골조직의 화학조성 차이이거나 양자분포의 차이에 의한 것일 수 있다고 보고한 바 있다. 그러나 본 연구에서는 조직학적 소견과 MRI 소견이 비교적 잘 일치하였으며 골절단부에서 생성된 골이 망상골이나 치밀골인 경우 MRI에서 저신호강도의 선으로 나타났지만 실험 24주까지 장기적으로 관찰하였을 때는 골개조 동에 의해 그 조성이 변화되어 균일한 골수강을 보였으며 MRI 소견에서도 골절단선이 없는 정상적인 골수강으로 관찰되었다(사진 부도 12 참조).

본 연구에서 근·원심 골편 사이의 간극에서는 신생 가골에 의한 골유합이 일어나는 실험 4주 이전까지는 T1 및 T2 강조 영상에서 고신호강도를 보여 다양한 수분을 포함하는 심유조직으로 이루어져 있음을 제시하여 주었다. 그리고 시간이 경과함에 따라 점차 신호강도가 감소하여 실험 24주째에는 T1 및 T2 강조 영상에서 정상 피질골에 상응하는 저신호강도로 관찰되었다(사진 부도 15, 17, 18 참조). 이러한 소견은 조직학적 검사상 점차 치밀골화 되어 가는 변화와 부합되었으나 피질골과 골편 간극의 구분이 어려웠던 조직학적 소견과 달리 MRI T2 강조 영상의 신호강도 차이 소견으로 보아 구성 성분의 차이가 실험 24주째에도 존재하므로 이후에도 골조직의 변화가 있을 수 있음을 암시해 주는 것으로 사료된다.

실험 2주째부터 근육 특히 교근내에서 고신호강

도의 산재된 점이 관찰되었고 이는 바로 정맥에 해당하는 것이어서 근육내 혈관의 증가를 알 수 있었지만 내측 익돌근에서는 교근에 상당하는 큰 변화가 없었다. 하악각 부위에서의 혈류공급은 주로 부착된 근육에 의하며^{18, 19, 21, 24, 36)}, 골절후 골막 혈관(*periosteal vessel*)이 새로 생겨 처음 4주간 유지되고²⁰⁾ 골절 치유 초기에는 골막하 가골이나 골절부에 혈류를 공급해 주는 것이 근육으로 가는 혈관에서 분지된 골막 혈관이라는 사실^{61, 62)} 등은 본 실험의 MRI 소견에서 추정되는 치유 과정중의 근육내 혈관 증가를 잘 뒷받침해 준다. 그러나 시상분할 골절단술에 관한 실험적 연구²⁷⁾에서는 수술후 내측 익돌근과 측두하악 관절낭의 혈류량이 증가하는데 비해 교근의 혈류는 오히려 감소하는 것으로 나타나 본 연구의 VRO 후 혈관 증가 소견과는 차이가 있다.

MRI T2 강조 영상에서는 가골이 등신호강도로 나타났으나 실험 4주째와 8주째의 근·원심 골편 후방 부위 가골 내에서는 아주 높은 신호강도로 관찰되었다(사진 부도 11, 15 참조). 고신호강도의 이 부위는 이미 언급한 바와 같이 조직학적으로 가골내 골소주가 감소하며 소성 결합조직 및 모세혈관이 많아지고 결합조직내 세포 사이 수분이 증가하며 세포 간격이 넓어지면서 일부에서는 조혈세포도 포함하게 되는 부위에 해당된다. 따라서 수분 증가와 골수강으로의 전환에 따라 유동성 양자(proton)가 많아짐에 따라 MRI의 신호강도가 증가함은 당연하지만, 근·원심 골편의 후방은 원래 골수강이 없었던 부위이며 혈관 분포가 풍부한 근육의 하방도 아니어서 그 이유를 이해하기 어려우나 교근과 내측 익돌근 사이인 이 부위는 성견에서도 상악 동맥 및 정맥(*internal maxillary artery*와 *vein*)이 위치하는 부위이므로⁶³⁾ 골치유 과정중 상악동맥 및 정맥에 의한 골절편으로의 재혈관화가 비교적 용이하다고 할 수 있고, 신생골의 특성상 수분 함량이 높아 MRI에서 고신호강도로 나타날 수 있다고 사료된다. 또한 골치유가 어느 정도 끝나는 본 실험 24주의 실험 동물에서는 이러한 소견이 관찰되지 않아 근·원심 골편에서의 골치유 과정에서 근·원심 골편을 연결 시켜주고 혈액 등을 공급하여 주는 등의 중요한 역할과 관련이 있으리라 추측되며 향후 이에 관한 좀 더 깊은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

V. 결 론

저자는 하악골 상행지 수직 골절단술후 비고정 및 조기 운동시 골절편 접촉부위의 골치유 및 골개조 양상을 규명하고자 성견 19마리를 3개의 군, 즉 정상대조군(2마리), 실험 제1군(5마리), 실험 제2군(12마리)으로 구분하여 하악골 상행지 수직 골절단술을 양측으로 시행한 후 실험 제1군은 골절단 접촉 상태에서, 실험 제2군은 골절편의 피질골 중첩 상태에서 시기별로 광학현미경, 일반 방사선사진 및 자기 공명 영상 검사로 치유과정을 비교 관찰한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 피질골 중첩 상태의 골치유는 초기에 골수강으로부터 성장된 골내막 가골, 피질골로부터 유도된 신생 가골 및 골절편 주위에 광범위하게 생성된 골막하가골이 막성 신생골 형성 과정을 통해 성장해 실험 4주째에 연결됨으로써 이루어졌다. 이들 가골간의 연결은 연골성 골형성 과정이 주된 역할을 담당하였으며 하악골의 조기 운동과 밀접한 관계를 갖는 것으로 추정되었다.
2. 피질골간 중첩 부위의 골유합은 주위 가골들, 특히 골중첩부 후방 및 교근 주위의 골막하 가골들의 성장 및 결합에 따른 골편 동요 감소후 피질골 부위에서 유도 및 생성된 신생 가골간의 결합에 의하였다.
3. 골절단술후 2주째에는 피질골의 골세포가 소멸되고 골수강이 섬유조직으로 대치되는 골괴사가 현저하였으나 피질골내 왕성한 혈관 재생과 골수강의 신생골 형성이 동반되어 전체가 망상골의 형태로 변환되었고 이는 골유합이 확인된 실험 8주까지 계속 유지되었다.
4. 실험 8주 이후에는 골세포등을 동반한 골흡수 과정을 통한 골개조가 일어났고, 주위 근육은 하악골 상행지에 뚜렷하게 재부착되었다. 또한 골편 간극 부위에서는 이전 망상골 형태의 가골이 점차 치밀골로 변화되며 골편이 유합되었다.
5. 자기 공명 영상 소견에서 실험 초기에는 피질골의 신호강도가 정상 피질골의 신호강도와 같거나 증가된 소견으로 관찰되었으며 신호강도는 실험 4주 이후 실험 12주까지 점차 증가되었다. 골수강의 신호강도는 실험 초기에 T1 강조영상에서

정상보다 저신호강도를 보였으나 실험 12주 이후 고신호강도를 나타냈고 T2 강조 영상에서는 실험 초기의 고신호강도가 점차 낮아졌다.

6. 자기 공명 영상 소견상 골편 간극 부위는 실험 초기에 고신호강도를 보였으며 점차 신호강도가 감소하여 실험 24주째에서는 피질골에 상용되는 저신호 강도를 나타냈다. 교근내에서는 실험 2주째부터 혈관 충식에 따른 고신호강도의 점들이 출현하였고 전반적인 근육의 위축 현상이 관찰되었으나 실험 8주 이후에는 고신호 강도의 점들이 소멸되면서 근육의 크기가 점차 정상으로 회복되었다.

이상의 결과를 종합해 보면 성견에서 하악골 상행지 수직 골절단술후 조기 운동시 골편 중첩 하에 서의 골치유는 주로 막성 신생골 형성과정을 거치는 가골들과 이들의 연골성 결합에 의해 초기 유합이 이루어지며 피질골 및 골수강의 조직학적 변화와 함께 가골들의 골흡수 과정을 통한 일련의 골개조를 겪으며 양호하게 이루어졌고, 비고정시에도 골편간 결합을 완성시키는데 문제가 없음이 증명되었다. 또한 자기 공명 영상에서의 관찰 결과로 보아 초기에 피질골 및 골수강의 변화가 왕성하며 실험 후기에는 중첩된 양 골편 피질골이 강력하게 결합됨이 증명되었고, 수술에 영향을 받았을 것으로 추정되는 교근도 초기에는 근육의 위축 현상을 보였으나 점차 정상 크기로 회복되었다. 그러나 중첩된 피질골이 하나의 골수강으로 연결되는 증거는 발견하지 못하여 향후 보다 장기적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Adam, G., Buhne, M., Prescher, A., et al. : Stability of osteochondral fragments of the femoral condyle, magnetic resonance imaging with histopathologic correlation in an animal model. *Skeletal Radiol* 20 : 601 – 606, 1991
2. Akin, R.K., Waltes, P.J. : Experience with the intraoral vertical subcondylar osteotomy. *J Oral Surgery* 33 : 342 – 345, 1975
3. Albenius, P., Johnell, O. : Repair of intramembranous bone fractures and defects in Rats. *J*

- Cranio Maxfac Surg 19 : 15-20, 1991
4. Alling, C.C. : Correction of mandibular prognathism by open oblique sliding osteotomies of the rami. J Oral Surgery 23 : 199-211, 1965
 5. Aro, H. T., Chao, E.Y.S. : Bone healing patterns affected by loading, fracture fragment stability, fracture type, and fracture site compression. Clin Orthop Rel Res 293 : 8-17, 1993
 6. Aurlick, N., Murnane, T.W., Doku, H.C. : Microangiographic studies of experimental mandibular fractures in rabbits. J Oral Surg 29 : 180, 1971
 7. Bell, W.H., Gonyea, W., Finn, R.A., et al. : Muscular rehabilitation after orthognathic surgery. Oral Surg 56 : 229-235, 1983
 8. Bell, W.H., Kennedy III, J.W. : Biological basis for vertical ramus osteotomies-a study of bone healing and revascularization in adult rhesus monkeys. J Oral Surg 34 : 215-224, 1976
 9. Bell, W. H., Levy, B.M. : Revascularization and bone healing after anterior mandibular osteotomy. J Oral Surg 28 : 196-203, 1970
 10. Bell, W.H., Schendel, S.A. : Biologic basis for modification of the sagittal ramus split operation. J Oral Surg 35 : 362-369, 1977
 11. Bell, W.H. : Modern practice in orthognathic and reconstructive surgery, Vol III, Chap. 61 mandibular prognathism, pp.2110. W. B. Saunders co., 1992
 12. Bell, W. H. : Surgical correction of dentofacial deformities, vol. II, Chap. 11 mandibular excess, pp. 844. W.B. Saunders co., 1980
 13. Booth, F. W. : Physiology and biochemical effect of immobilization on muscle. Clinical Orthop Rel Res 219 : 15-20, 1970
 14. Bourne, P.J. : Physiology of bone and responses of osseous tissue to injury and environmental changes. J Oral Surg 28 : 12, 1970
 15. Boyne, P.J. : Osseous healing after oblique osteotomy of the mandibular ramus. J Oral Surg 24 : 125, 1966
 16. Caldwell, J.B. : Surgical correction of extreme mandibular prognathism. J Oral Surgery 26 : 253-258, 1968
 17. Caldwell, J.B., Letterman, G.S. : Vertical osteotomy in the mandibular rami for correction of prognathism. J Oral Surg 12 : 185, 1954
 18. Castelli, W. : Vascular architecture of the Human adult mandible. J Dent Res 42 : 786-792, 1962
 19. Castelli, W.A., Huelke, D.F. : The arterial system of the head and neck of the rhesus monkey with emphasis on the external carotid system. Am J Anat 116 : 149-170, 1965
 20. Cavadias, A.X., Trueta, J. : An experimental study of the vascular contribution to the callus of fracture. Surg Gyn Obst April : 731-747, 1965
 21. Cohen, L. : Further studies into the vascular architecture of the mandible. J Dent Res 39 : 5, 1960
 22. Danckwardt-Lillieström, G. : Reaming of the medullary cavity and its effect on diaphyseal bone. Acta Orthop Scand suppl. 128, 1969
 23. Daum, W.J., Simmons, D.J., Chang, S.L., et al. : Effects of fixation devices on radiostrontium clearance in the intact femur. Clin Orthop 194 : 306, 1985
 24. Epker, B.N. : Vascular consideration in orthognathic surgery. Oral Surg 57 : 467-472, 1984
 25. Foster, L.N., Kelly, Jr. R. P., Watts, Jr. W. M. : Experimental infarction of bone and bone marrow. J Bone Joint Surg 33(A) : 396-406, 1951
 26. Girgis, F.G., Pritchard J.J. : Experimental production of cartilage during the repair of fractures of the skull vault in rats. J Bone Joint Surg 40(B) : 274-281, 1958
 27. Grammer, F.C., Meyer, M.W., Richter, K.J. : A radioisotope study of the vascular response to sagittal split osteotomy of the mandibular ramus. J Oral Surg 32 : 578-582, 1974
 28. Granström, G., Nilsson, P., Rockert, H.O.E. : Early tissue reactions after circulatory and ske-

- letal damage to the mandible of the rat. *Scand J Plast Reconstr Surg* 16 : 141–149, 1982
29. Granström, G., Nilsson, L.P. : Experimental mandibular fracture : Studies on bone repair and remodelling. *Scand J Plast Reconstr Surg* 21 : 159–165, 1987
30. Hall, H. D., Mckenna, S.J. : Further refinement and evaluation of intraoral vertical ramus osteotomy. *J Oral Maxillofac Surg* 45 : 684–688, 1987
31. Hall, B.K., Jacobson, H.N. : The repair of fractured membrane bone in the newly hatched chick. *Anat Rec* 181 : 55–70, 1975
32. Ham, A.W. : Histological study of the early phases of bone repair. *J Bone Joint Surg* 12 : 827, 1930
33. Hansen-Leth, C., Reimann, I. : Amputations with and without myoplasty on rabbits with special reference to the vascularization. *Acta Orthop Scand* 43 : 68–77, 1972
34. Hansen-Leth, C. : Bone vascularization and bone healing in the amputation stump. *Acta Orthop Scand* 50 : 39–47, 1979
35. Huebsch, R.F., Wellington, J.S. : Osseous healing in dog mandibles with and without decortication. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 23 : 236–240, 1967
36. Huelke, D.F., Castelli, W.A. : The blood supply of the rat mandible. *Anat Rec* 153 : 335–342, 1973
37. Hulth, A., Olerud, S. : Studies on amputation stumps in rabbits. *J Bone Joint Surg* 44(B) : 431–434, 1962
38. Kernek, C.B., Wary, J.B. : Cellular proliferation in the formation of fracture callus in the rat tibia. *Clin Orthop Rel Res* 91 : 197–209, 1973
39. Kraut, R.A. : Stabilization of the intraoral vertical osteotomy using small bone plates. *J Oral Maxillofac Surg* 46 : 908–910, 1988
40. Kruger, G.O. : Textbook of Oral and Maxillofacial Surgery, 6th edition, chap. 18, Mosby co., 1984
41. Longaker, M.T., Moelleken, B.W., Cheng, J.C., et al. : Fetal fracture healing in a Lamb model. *Plast Reconstr Surg* 90 : 161–173, 1992
42. Luedtke, W.E., Angevine, D.M. : Factors influencing the formation of cartilage in the healing of experimentally induced fractures. *Arch Patho* 49 : 474–478, 1950
43. Markel, M.D., Wiikenheiser, M.A., Morn, R.L., et al. : Quantification of bone healing. *Acta Orthop Scand* 61 : 487–498, 1990
44. Mayo K.H. Ellis, E., Carlson, D.S. : Histochemical analysis of the masseter and temporalis muscles in Macaca mulatta after mandibular advancement using rigid or nonrigid fixation. *J Oral maxillofac Surg* 48 : 381–384, 1990
45. McClement, P., Templeton, R. W., Pritchard, J.J. : Repair of bone gap. *J Anat* 95 : 616, 1961
46. McKibbin, B. : The biology of fracture healing in long bone. *J Bone Joint Surg* 60B : 150–161, 1978
47. McLean : Calcification and ossification. *J Bone Joint Surg* 23 : 283, 1941
48. Mindell, E. R., Rodbard, S., Kwasman, B.G. : Chondrogenesis in bone repair, a study of the healing fracture callus in the rat. *Clin Ortho Rel Res* 79 : 187, 1971
49. Moss, M. L., Salentifin, L. : The primary role of functional matrices in facial growth. *Am J Orthod* 61 : 479, 1969
50. Najjar, T.A., Kahn, D.S. : Experimental model for the study of osteogenesis and remodelling. *J Dent Res* 50 : 960–965, 1971
51. Niebergall, C.F., Mercuri, L.G. : Intraoral vertical subcondylar osteotomy : A national survey. *J Oral Maxillofac Surg* 43 : 450–452, 1985
52. Noden, D.M., Lahunta, A. : The embryology of domestic animals, developmental mechanisms and malformations. Chap. 9, Williams and Wilkins co., 1985
53. Oni, O.O.A., Stafford, H., Gregg, P.J. : A study

- of diaphyseal fracture repair using tissue isolation technique. *Injury* 23 : 467, 1992
54. Paulus, G.W., Steinhauser, E. W. : A comparative study of wire osteosynthesis versus bone screws in the treatment of mandibular prognathism. *J Oral Surg* 54 : 2-6, 1982
55. Phillips, C. : Skeletal alterations following TORSO to BSSO procedures. *Int J Adult Orthod Orthog Surg* 1 : 203-212, 1986
56. Pritchard, J.J. : Bone healing. The Scientific Basis of Medicine Annual Reviews 186, 1963
57. Radden, B.G., Fullmer, H.M. : Morphological and histochemical studies of bone repair in the cat. *Arch Oral Bio* 14 : 1423, 1969
58. Raustia, A. M., Oikarinen, K.S. : Changes in electric activity of masseter and temporal muscles after mandibular sagittal split osteotomy. *Int J Oral Maxillofac Surg* 23 : 180-184, 1994
59. Reitzik, M. : Cortex-to-cortex healing after mandibular osteotomy. *J Oral Maxillofac Surg* 41 : 658-663, 1983
60. Rhinelander, F.W., Philips, R.S., Steel, W.M., et al. : Microangiography in bone healing. *J Bone Joint Surg* 50(A) : 643-661, 1968
61. Rhinelander, F.W. : The normal microcirculation of diaphyseal cortex and its response to fracture. *J Bone Joint Surg* 59(A) : 784-800, 1968
62. Rhinelander, F.W., Baragry, R.A. : Microangiography in bone healing, I. undisplaced closed fractures. *J Bone Joint Surg* 44A : 1273-1298, 1962
63. Richany, S.F., Sprinz, H., Kraner, K., et al. : The role of the diaphyseal medulla in the repair and regeneration of the femur shaft in the adult cat. *J Bone Joint Surg* 47A : 1565, 1965
64. Rosenquist, B. : Medial displacement of proximal segments, a complication to oblique sliding osteotomy of the mandibular rami. *Int J Oral Maxillofac Surg* 19 : 226-229, 1990
65. Rosenquist, B., Selvic, G., Rune, B., Petersson, A. : Stability of the osteotomy site after oblique sliding osteotomy of the mandibular rami. *J Cranio MaxFac Surg* 15 : 14-19, 1987
66. Shepherd, J.P. : Changes in the mandibular ramus following osteotomy-a long term review. *Br J Oral Surg* 18 : 189, 1980
67. Simmons, D.J. : Fracture healing perspectives. *Clin Orthop Rel Res* 200 : 100-113, 1985
68. Sklans, S., Taylor, R. G., Shklar, G. : Effect of diphenylhydantoin sodium on healing of experimentally produced fractures in rabbit mandibles. *J Oral Surg* 25 : 310-319, 1967
69. Smith, A.E., Chambes, F.W. : Mandibular prognathism corrected by newly devised osteotomy of the ramus. *JADA* 64 : 328-345, 1962
70. Steinberg, M., Bosch, A., Schwan, A. Jr., et al. : Electric potentials in stressed bone. *Clin Orthop Rel Res* 61 : 294, 1968
71. Sutro, C.J., Jacobson, S.A. : Histologic study of reparation of experimentally produced defects in calvariums of rats. *Arch Path* 28 : 313, 1939
72. Tonna, E.A., Cronkite, E.P. : Cellular response to fracture studied with tritiated thymidine. *J Bone Joint Surg* 43A : 352-362, 1961
73. Tornes, K., Gihuus-Moe, O.T. : The surgical technique of vertical subcondylar osteotomy for correction of mandibular prognathism, a 10 year survey. *Acta Odont Scand* 45 : 203, 1987
74. Tuinzing, D.B., Greebe, R.B. : Complication related to the intraoral vertical ramus osteotomy. *Int J Oral Maxillofac Surg* 14 : 319-324, 1985
75. Uddströmer, L., Ritsila : Healing of membranous and long bone defects. *Scand J Plast Reconstr Surg* 13 : 281-287, 1977
76. Urist, M.R. : Bone formation by autoinduction. *Science* 150 : 893, 1965
77. Urist, R.M., McLean, F.C. : Calcification and ossification. *J Bone Joint Surg* 23 : 1-16, 1941
78. Walker, D.G. : Bell's Personal communication, 1978 : in Bell, W.H. : Surgical correction of dentofacial deformities, vol. II, Chap. 11 mandibular excess, pp.844 W.B.Saunders co., 1980
79. Wang, X., Brand, J.W., Staples, A.F., Randolph,

- M.M. et al. : Adaptation and remodelling of the mandibular condyle following vertical ramus osteotomy in dogs. Int J Adult Orthod Orthognath Surg 9 : 65－76, 1994
80. Weiss, L. : Cell and tissue biology, 6th edition, Urban and Schwarzenberg, 1988
81. Westesson, P.L., Dahlberg, G., Hansson, L.G., et al. : Osseous and muscular changes after vertical ramus osteotomy, a magnetic resonance imaging study. Oral Surg Oral Med Oral Path 72 : 139－145, 1991
82. Wolff, J. : Das Gesetz der Transformation der Knochen. (The law of transformation of bones.) Berlin, Hirschwald : in Treharne, R.W. : Review of Wolff's law and its proposed means of operation. Orthop Rve 10 : 35, 1981
83. 이병인, 박형식 : 하악전돌증 환자의 구내 하악골 상행지 수직 골절단술후 골절편들의 장기 형태 개조에 관한 임상적 연구. 석사학위 논문, 연세 대학교, 1995
84. 허진영, 김기정, 이병인, 박형식 : 구내접근법의 하악골 상행지 수직 골절단술후의 기능적 불리 치료에 대한 환자의 적응도 및 개교합 경향에 관한 임상적 연구. 대한구강악안면외과학회 제36 회 종합학술대회 초록, 1995
85. 김무강, 김종섭, 김창기 등 : 개의 해부 지침, 정문각(Miller's Guide to the dissection of the dog, Evans, H.E., Lahunta, A., 3rd edition의 번역)

사진부도 설명

- Fig. 1. 정상대조군 하악골의 탈회표본 소견. 주로 지방세포로 구성된 골수강이 피질골에 의해 둘러싸여 있다. 조직 사진중 우측 사진($\times 10$)은 좌측 $\times 2.5$ 조직 합성 사진의 사각형 부위에 해당함. (P : 근심골편, D : 원심골편, G : 골편간극, C : 가골)(hematoxylin-eosin stain, $\times 2.5$ 합성 및 $\times 10$).
- Fig. 2. 실험 제1군 2주 하악골의 탈회 표본 소견. 골절단 양쪽 교근골막하부에서 신생 가골의 형성이 관찰된다.(hematoxylin-eosin stain, $\times 2.5$ 합성 및 $\times 10$).
- Fig. 3. 실험 제1군 4주 하악골의 탈회 표본 소견. 막성 신생 가골에 의해 골편 주위와 골편 간극이 채워진다.(hematoxylin-eosin stain, $\times 2.5$ 합성 및 $\times 10$).
- Fig. 4. 실험 제1군 24주 하악골의 탈회 표본 소견. 정상에 가까운 피질골 및 골수강의 형태를 보이나 골수강은 아직 정상보다 커져있다.(hematoxylin-eosin stain, $\times 2.5$ 합성 및 $\times 10$).
- Fig. 5. 실험 제2군 2주 하악골의 탈회 표본 소견. 골절단부에 골내막 가골의 형성이 보인다.(hematoxylin-eosin stain, $\times 2.5$ 합성 및 $\times 10$).
- Fig. 6. 1실험 제2군 2주 하악골의 탈회 표본 소견. 근·원심 골편의 골수강과 피질골 부위가 망상골 형태로 변환된 것이 관찰된다.(hematoxylin-eosin stain, $\times 2.5$ 합성 및 $\times 10$).
- Fig. 7. 실험 제2군 4주 하악골의 탈회 표본 소견. 근·원심 골편 주위로 가골이 둘러싸고 있으며 골편 간극은 신생 가골로 채워지고 있다.(hematoxylin-eosin stain, $\times 2.5$ 합성 및 $\times 10$).
- Fig. 8. 실험 제2군 12주 하악골의 탈회 표본 소견. 완전히 유합된 골편 간극과 함께 골흡수로 변화된 하악골 형태를 보인다.(hematoxylin-eosin stain, $\times 2.5$ 합성 및 $\times 10$).
- Fig. 9. 실험 제2군 24주 하악골의 탈회 표본 소견. 근·원심 골편의 골수강이 치밀골화되어 있는 골 편간극부위 골에 의해 나뉘어 있다.(hematoxylin-eosin stain, $\times 2.5$ 합성 및 $\times 10$).
- Fig. 10. 정상 대조군 하악골의 자기 공명 영상 소견. 정상적인 저신호강도의 피질골내에 고신호 강도의 골수강이 관찰된다. 조직사진 부도와 같은 부위의 자기 공명 영상. (T2 : T2 강조 영상, T1 : T1 강조영상)
- Fig. 11. 실험 제1군 2주 하악골의 자기 공명 영상 소견. 피질골의 저신호 또는 등신호강도 및 골수강의 고신호강도가 T2 강조 영상에서 보인다.(T2 : T2 강조 영상, T1 : T1 강조영상)
- Fig. 12. 실험 제1군 4주 하악골의 자기 공명 영상 소견. 근·원심 골편 후방으로 고신호강도 부위가 T2 강조 영상에서 관찰된다.(T2 : T2 강조 영상, T1 : T1 강조영상)
- Fig. 13. 실험 제1군 24주 하악골의 자기 공명 영상 소견. 정상과 같은 신호강도의 골수강 및 피질골 부위를 보인다.(T2 : T2 강조 영상, T1 : T1 강조영상)
- Fig. 14. 실험 제2군 2주 하악골의 자기 공명 영상 소견. 골절단부에서 등신호강도의 가골 형성 부위가 T2 강조 영상에서 관찰된다.(T2 : T2 강조 영상, T1 : T1 강조영상)
- Fig. 15. 실험 제2군 2주 하악골의 자기 공명 영상 소견. T2 강조 영상에서 근·원심 골편이 고신호강도 배경의 등신호강도(신생 가골 혈성부위)에 의해 둘러싸여 있다.(T2 : T2 강조 영상, T1 : T1 강조영상)
- Fig. 16. 실험 제2군 4주 하악골의 자기 공명 영상 소견. 근심 골편내 골수강과 골편 간극은 고신호 강도, 피질골은 저신호강도로 T2 강조 영상에서 관찰된다.(T2 : T2 강조 영상, T1 : T1 강조영상)
- Fig. 17. 실험 제2군 12주 하악골의 자기 공명 영상 소견. 골편 간극 부위가 T2 강조 영상에서 등신호강도로 나타난다.(T2 : T2 강조 영상, T1 : T1 강조영상)
- Fig. 18. 실험 제2군 24주 하악골의 자기 공명 영상 소견. 정상적인 골수강의 신호강도가 골편 간극 부위의 저신호강도에 의해 나뉘어져 있다.(T2 : T2 강조 영상, T1 : T1 강조영상)

사진부도 1

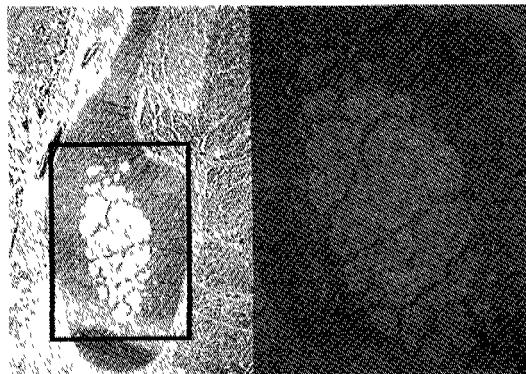


Fig. 1

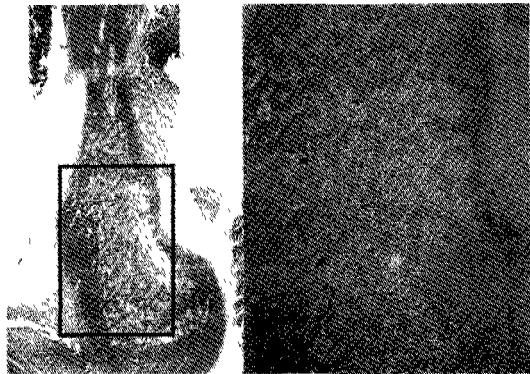


Fig. 4

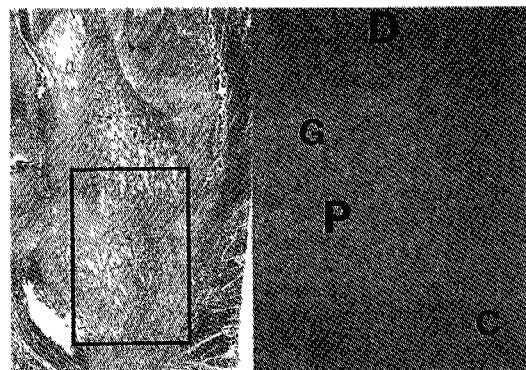


Fig. 2



Fig. 5

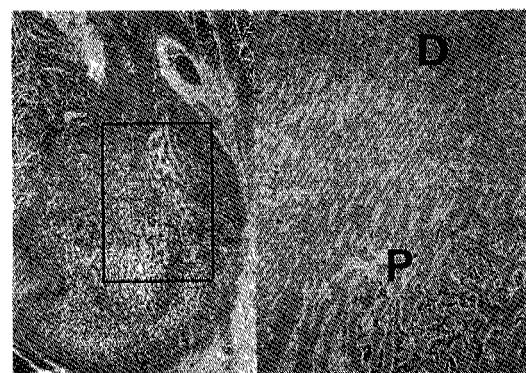


Fig. 3

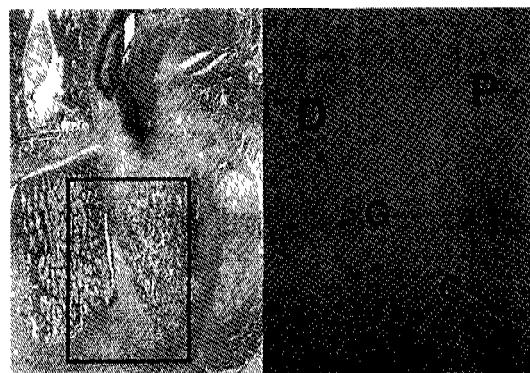


Fig. 6

사진부도 2

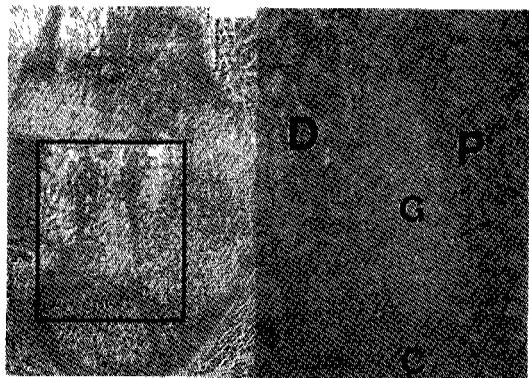


Fig. 7



Fig. 10

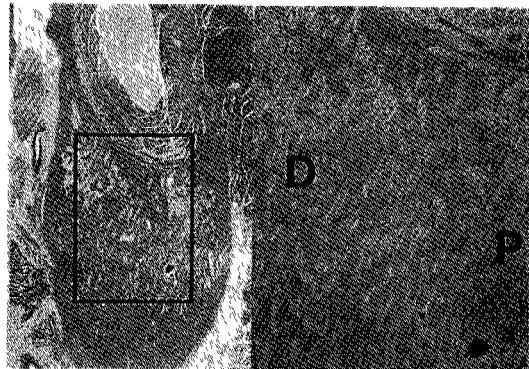


Fig. 8



Fig. 11

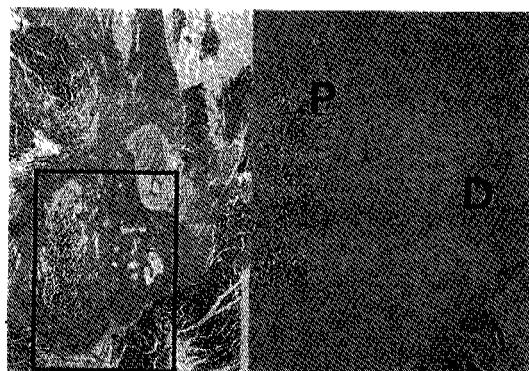


Fig. 9



Fig. 12

사진부도 3



Fig. 13

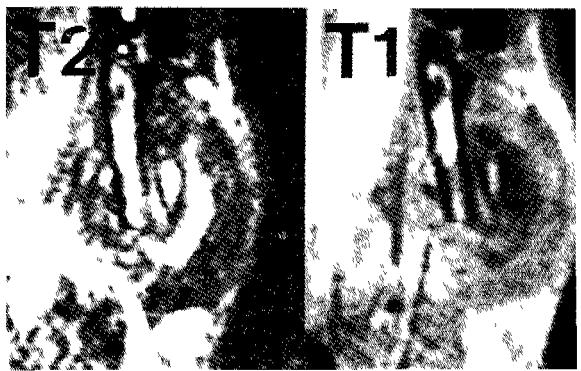


Fig. 16



Fig. 14

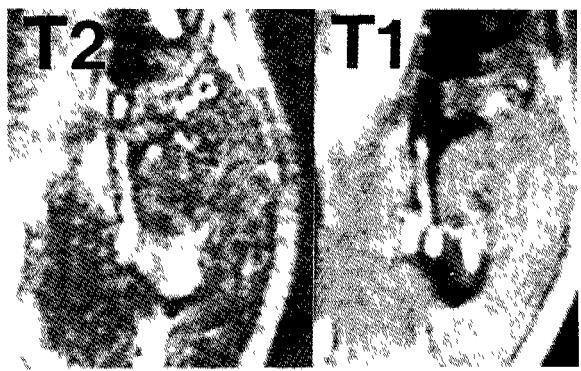


Fig. 17

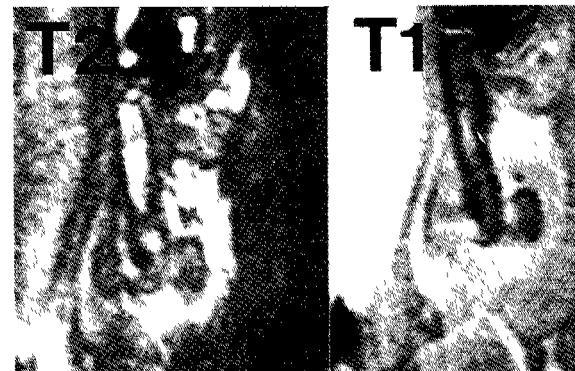


Fig. 15



Fig. 18