

외상성 두개골 감압술 후 냉동 보관된 자가골을 이용한 두개골 성형술시 골흡수에 대한 분석

한림대학교 의과대학 신경외과학교실

김상욱 · 박세혁 · 강정한 · 김문규 · 조병문 · 오세문

Analysis of Cranioplasty Using Frozen Autologous Bone Following Post-Traumatic Decompressive Craniectomy

Sang-Uk Kim, MD, Se-Hyuck Park, MD, Jeong-Han Kang, MD,
Moon-Kyu Kim, MD, Byung-Moon Cho, MD and Sae-Moon Oh, MD

Department of Neurosurgery, Hallym University College of Medicine, Seoul, Korea

Objective: We conducted this study to evaluate outcome of delayed cranioplasty using frozen autologous bone flap following decompressive craniectomy in patients with traumatic brain injury. **Methods:** In 27 patients, 30 sites have undergone cranioplasty using frozen autologous bone flaps in the past 3 years. After decompressive craniectomy, bone flaps were stored at -40°C for 3 to 316 days (mean, 55.6 days). Bone flaps were thawed at room temperature before cranioplasty and repositioned. Serial follow-up of skull x-ray and/or computed tomography was performed to monitor bony resorption and other complications. Follow-up periods ranged from 9 to 46 months (mean, 20 months). **Results:** There was no surgically related complications. In 9 sites (30%), postoperative bone resorption was noted. Among them 3 sites underwent ventriculoperitoneal shunt (VPS) with multiple skull fractures and 2 sites underwent VPS without multiple skull fractures and 2 sites was with multiple bone fracture alone. In 7 sites with multiple skull fractures, resorption developed in 4 sites (57.1%) and 5 sites (83.3%) had resorption out of 6 sites with VPS. However, the aesthetic results were not dissatisfactory and a second cranioplasty was not indicated. **Conclusion:** Cranioplasty using frozen autologous bone following post-traumatic decompressive craniectomy is associated with a high incidence of bone resorption, especially in patients with multiple skull fracture or VPS, even though the aesthetic results were not dissatisfactory. The most important factor for successful bone union was manipulation of bone flap in cranioplasty to facilitate bone resorption followed by accretion. Further improvements are required to perform cranioplasty in patients with VPS. (J Kor Neurotraumatol Soc 2010;6:13-17)

KEY WORDS: Autologous bone · Bone resorption · Cranioplasty · Decompressive craniectomy · Traumatic brain injury.

서 론

외상성 뇌손상 환자에서 두개강 내압의 조절을 위한 두개골 감압술은 일반적으로 많이 사용되고 있다. 이후 환자의 상태가 안정되면 뇌조직의 기계적 보호와 미용적 문

제로 두개골 성형술이 필요한데, 수술이 간편하고 미용적으로 원래의 상태와 동일하여야 하며 자가골과 같은 특성을 갖는 골편이 이상적인 두개골 성형술의 조건이 된다.

두개골 감압술 후의 두개골 성형술은 이전부터 그 재질이나 방법에 대해 여러 가지 연구가 이루어져 왔으며, 현재 일반적으로 생체 재질로는 냉동 보관된 자가골, 비생체 재질로는 methylmethacrylate가 많이 이용되고 있다.^{14,27)} 냉동 보관된 자가골은 두개골 성형술에 가장 이상적인 재료로써^{25,26)} 비교적 보관 방법이 용이하고,^{11,29)} 결손 부위의 모양과 정확하게 맞으며, 이물질에 대한 거

Received: April 2, 2010 / **Revised:** April 5, 2010

Accepted: May 19, 2010

Address for correspondence: Se-Hyuck Park, MD
Department of Neurosurgery, Hallym University College of Medicine,
150 Seongnae-gil, Gangdong-gu, Seoul 134-701, Korea
Tel: +82-2-2224-2236, Fax: +82-2-473-7387
E-mail: sehyuck@hallym.or.kr

부반응 없이 두개골에 잘 유합될 수 있다. 저자들은 27명의 외상성 뇌손상에서 두개골 감압술 후 냉동 보관된 자가골을 이용한 두개골 성형술을 받은 환자를 대상으로, 그 방법 및 결과에 대해 검토하고자 한다.

대상 및 방법

2005년 4월부터 2008년 6월까지 두개골 감압술을 받은 외상성 뇌손상 환자에서 냉동 보관된 자가골을 이용하여 두개골 성형술을 시행한 27명의 환자에서, 양측을 포함한 30개의 증례를 대상으로 하였다. 제거된 두개골은 항생제가 섞인 생리식염수로 충분히 세척한 후 다수의 천공을 내어, 멸균된 비닐로 밀봉 포장하여 초저온 냉동고에서 영하 40℃로 보관하였다. 두개골 제거 후 뇌압이 조절되고 신경학적 상태가 안정되면 두개골 성형술을 시행하였으며, 냉동 보관된 골편은 수술 1시간 전에 상온에서 자연 해동시키고 두개골에 붙어 있는 연조직을 깨끗이 제거하여 사용직전까지 항생제가 섞인 생리식염수에 담가 놓았다. 이전의 반흔을 따라 그대로 피부절개를 시행하여 두피, 골막 및 경막을 박리한 후 두개골의 전두부와 정중선에 밀착하여 miniplate 또는 skull button으로 고정하였다.

두개골 성형술을 시행한 환자에서 감염, 골흡수 및 기타 합병증 소견을 판단하기 위해 이학적 검사와 주기적인 혈액 검사 및 단순 두개골 촬영, 전산화 단층 촬영을 시행하였다. 골편의 골흡수 여부는 수술 직후와 추적 조사 시의 단순 두개골 촬영상 및 전산화 단층촬영상과 비교하여 이식 골편과 두개골과의 간격이 20% 이상 증가한 경우,³⁹⁾ 임의로 3개의 횡단면을 선택하여 이식 골편과 두개골에서 각각 5번의 Hounsfield unit (HU) 수치를 측정 한 후, 그 평균 수치가 5% 이상 감소한 경우^{7,24)}와 두개골의 윤곽을 비교하여 흡수 및 위축에 의한 이식 골편의 면적 감소와 골편이 가라앉은 경우로 판단하였다.

결 과

두개골 성형술을 받은 환자의 연령은 18세에서 78세 (평균 50.6세)로 연령 분포는 50대가 가장 많았고, 성별은 남자 20명, 여자 7명이었다 (Table 1). 두개골 감압술의 원인 질환은 급성 경막하 혈종이 27예, 뇌좌상 2예 및 뇌좌상을 동반한 급성 경막상 출혈이 1예였다. 제거술 후 골편의 냉동 보존 기간은 3일에서 316일 (평균 55.6일)이었으며, 3개월 미만이 27예 (90%)로 대부분

TABLE 1. Demographic and operative details in 27 patients taken cranioplasty using frozen autologous bone

Characteristic	Value
No. of patients	27
Male	20
Female	7
Mean age (years) (range)	50.6 (18–78)
Cause of craniectomy (sites)	
Acute subdural hemorrhage	27
Cerebral contusion	2
Cerebral contusion with epidural hemorrhage	1
Mean duration of freezing of bone flap (days) (range)	55.6 (3–316)
0–3 months	27
>3 months	3
Mean postoperative follow-up period (months) (range)	20 (9–46)
Laterality of craniectomy (patients)	
Left	17
Right	7
Both	3
Operative region (sites)	
Fronto-temporal bone	5
Fronto-temporo-parietal bone	25
Multiple skull fractures (sites)	
Yes	7
No	23
Ventriculoperitoneal shunt (sites)	
Yes	6
No	24

이었다. 추적 조사 기간은 9개월에서 46개월 (평균 20개월)이었다. 골편 제거 및 두개골 성형술 부위는 좌측이 17예, 우측이 7예, 양측이 3예로 양측의 경우에는 동시에 좌우측 모두 성형술을 시행하였다. 골편의 절제 범위는 전두-측두-두정부가 25예 (83.3%), 전두-측두부가 5예 (16.7%)로 감압을 위해 넓은 범위의 골편을 제거한 경우가 많았다. 고정술이 필요한 다발성 두개골 골절이 동반된 경우는 30예 중 7예 (23.3%)이며, 수두증이 동반되어 뇌실-복강 단락술을 두개골 성형술 이전에 시행한 환자는 30예 중 6예 (20%)가 있었다.

모든 증례에서 수술 직후 감염 및 혈종 등의 합병증은 없었다. 급성 경막하 출혈의 1예에서 환자 상태가 안정적이고 뇌압 감시 장치에서도 두개강 내압 상승 징후가 보이지 않아, 개두술 후 3일째 두개골 성형술을 시행하였다. 30예 중 9예 (30%)에서 두개골 성형술 후 8개월에서 12개월 (평균 9.5개월) 사이에 골흡수가 보이기 시작했고, 시간이 지남에 따라 조금씩 증가되었다 (Table 2). 대부분의 환자에서 20% 이상의 골간격 증가와 평균 HU 수치의

TABLE 2. Summary of 8 patients showing postoperative bone resorption

No.	Age	Sex	Cause of craniectomy	Multiple Fx	VPS	Time of initial resorption (mo)	Gap of bone (%)	Change of HU (%)	Image finding
6	52	M	Acute SDH			10	28	8	Res. & Atro.
9	69	M	Cbr contusion			10	22	14	Res. & Atro.
11*	18	M	Acute SDH	Yes	Yes	8	45	20	Depr. bone
12	67	F	Acute SDH		Yes	9	20	9	Res. & Atro.
22	20	F	Acute SDH			12	30	11	Res. & Atro.
23	50	M	Acute SDH	Yes	Yes	8	25	10	Res. & Atro.
24	68	M	Acute SDH		Yes	9	29	8	Res. & Atro.
25	57	M	Acute SDH	Yes		10	24	13	Res. & Atro.

*bilateral cranioplasty. Cbr: cerebral, Depr. bone: depressed cranioplasty bone, F: female, Fx: fracture, HU: Hounsfield unit, M: male, Res. & Atro.: resorption & atrophy, Rt: right, SDH: subdural hematoma, VPS: ventriculoperitoneal shunt

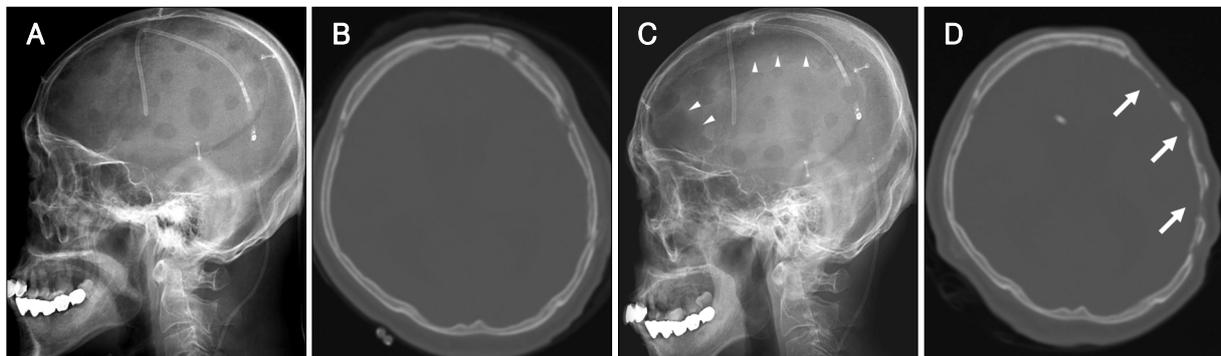


FIGURE 1. Case 24. A 68-year-old male patient presenting with acute subdural hemorrhage. A and B: Plain lateral skull film (A) and CT image (B) obtained immediately after cranioplasty. VPS catheter was seen. C and D: At 9 months after cranioplasty, plain lateral skull film (C) and CT image (D) showing bone resorption. Radiolucent lesion in the frontal and parietal area (C, arrowheads) and thinning of the bone flap (D, arrows) were observed. VPS: ventriculoperitoneal shunt.

TABLE 3. The results of postoperative bone resorption with the presence of multiple skull fractures and ventriculoperitoneal shunt

		Bone resorption (%)		Total (%)
		Yes	No	
Multiple skull fractures (sites)	Yes	4 (57.1)	3 (42.9)	7 (100)
	No	5 (21.7)	18 (78.3)	23 (100)
VPS (sites)	Yes	5 (83.3)	1 (16.7)	6 (100)
	No	4 (16.7)	20 (83.3)	24 (100)
		9 (30.0)	21 (70.0)	30 (100)

VPS: ventriculoperitoneal shunt

감소, 이식 골편의 흡수 및 위축이 관찰되었다 (Figure 1). 골흡수는 모두 넓은 범위의 골편 (전두-측두-두정부)을 제거한 경우에서 발생하였고, 다발성 골절이 동반된 7예 중 4예 (57.1%)에서 골흡수가 관찰되었다. 두개골 성형술 환자 중 뇌실-복강 단락술이 동반된 경우에 골흡수는 6예 중 5예 (83.3%)로 높은 빈도를 보였다 (Table 3).

고 찰

개두술시에 두개강 내압 상승이 예상되는 경우 골편을 제거하는 방법은 외상 환자뿐만 아니라 뇌부종이 동반된

질환의 수술시에도 흔히 사용되고 있는 방법이다. 이러한 두개골 결손이 있는 경우 뇌손상의 위험과 외형상의 결함을 초래하므로, 이의 교정은 뇌의 보호 및 성형적 차원뿐만 아니라 두통, 간질, 수두증, syndrome of the trephined 등을 교정하기 위해서 필요하다.^{19,40)}

두개골 성형술에 가장 이상적인 물질은 생착 가능하고 수술이 용이하면서 사용하기 편리하여야 하며, 단단하고 안정적이며 방사선 투과성이 있어야 한다. 또한 비용 및 관련된 합병증이 적어야 하며, 미용적인 측면도 만족시켜야 한다.^{12,34)} 냉동 보관된 자가골을 이용한 두개골 성형술은 1950년대에 처음으로 시도된 이후, 광범위하게 사용되었는데,^{1,11,29)} 최소 영하 28℃ 이하에서 보관해야만 골편을 완전히 얼릴 수 있다고 한다.⁵⁾ 냉동 보관 방법은 보존 기간에 관계없이 골형성성의 변화 및 모양의 변화가 없고,^{6,35)} 단백질의 자가 분해 억제와 면역 반응을 줄일 수 있으며,⁹⁾ 골편의 재활성화에 필요한 하버스관(Haversian canal)과 구조 단백질도 손상되지 않아^{2,21,30,35)} 환자가 안정될 때까지 장기간 보존가능하다.

자가골 이식에 있어서 골편의 개형(remodeling)은 잠행치환(creeping substitution)이라 불리는 골흡수와 유

착의 단계를 거쳐 일어나는 것으로 알려져 있는데,³²⁾ 이는 이식된 골편은 극히 신선한 골편이라 하더라도 골세포는 재생하는 것이 아니라 대부분 사멸되며, 골이식이 성공한다는 것은 이식된 골편이 흡수되어 그 후 새로운 골로 치환된다는 것이다. 이러한 과정은 혈관의 재생(revascularization)에 의해 발생하는데, 혈관 재생은 골형성에 매우 필수적인 역할을 하며^{10,23)} 골막을 제거하거나 무기염(inorganic salt)을 첨가하는 경우 촉진되는 것으로 알려져 있다.^{8,13,37,42)} 따라서 이식 골편이 이식부에 잘 부착하기 위해서는 여러 가지 조건이 필요하지만 가장 중요한 점은 이식 골편이 살아 있어야 하며, 이식 부위의 혈관 상태가 좋아야 하고, 골편과 두개골이 인접하여 결손부위가 없어야 한다.^{3,35)} 골랍(bone wax) 같은 이물질은 혈관이 형성되어 들어가는 것을 방해하기 때문에 이식 골편의 생착이 어려워진다고 알려져 있다.^{18,24,43)}

냉동 보관된 자가골을 이용한 두개골 성형술의 합병증으로는 초기에 발생하는 감염 및 혈종과 지연성인 골흡수, 불유합, 연조직의 박리 및 피부괴사 등이 있다.^{15,28)} 일반적으로 감염이 없을 경우, 두개골 성형술은 두개골 제거 후 6개월 이후에 시행하는 것이 원칙이다. 이는 냉동 보관된 자가골은 이미 죽어 있는 조직이기 때문에 수술 후 감염의 원인이 될 수 있기 때문이다. 그러나 환자의 신경학적 상태가 안정되어 초기에 두개골 성형술을 시행하게 되면 두피, 골막과 경막의 유착이 진행되지 않아 박리가 용이해 수술 시간이 단축되어 감염률을 낮출 수 있다고 생각된다. 이식 골편에 붙어 있는 골막 등의 연조직에 의해 감염이 발생한다고는 할 수 없지만, Hwang 등²⁰⁾은 수술 후 두개골에 붙어있는 연조직에 의한 염증성 반응으로 이차감염의 위험성이 높아지므로, 연조직을 깨끗이 제거하여 사용하면 감염률을 낮출 수 있다고 하였다.

골흡수는 감염과 더불어 가장 빈번한 합병증이며, 장기간의 추적 조사에서 50% 이상으로 알려져 있다.^{16,22,33)} 압열 멸균기의 사용,¹⁷⁾ 다발성 골절에 의한 여러 조각의 골편³¹⁾ 및 뇌실-복강 단락술 동반 시행여부²⁾ 등은 골흡수를 조장하는 인자로 작용된다. 이와는 다르게 1990년 Osawa 등³⁰⁾은 수술 후 감염을 줄이기 위하여 영하 80°C에서 냉동 보관된 자가골을 압열 멸균기를 사용한 27예의 두개골 성형술시 단 2예에서만 골조직의 부분적인 흡수소견이 관찰되었다고 하였다. 그러나 압열 멸균기를 사용했을 때 골조직의 흡수가 더 진행되고,⁴¹⁾ 골단백질을 변형시키며 혈관 생성을 방해하며,³⁵⁾ 감염을 줄인다는 증거가 없기³⁶⁾ 때문에 일반적으로 오염의 증거가 없다면 압열 멸균기를 사용하는 것은 바람직하지 않다.

골흡수는 모두 전두-측두-두정부의 넓은 범위의 골편을 제거한 경우 발생하였다. 또한 다발성 골절이 동반된 7예 중 4예 (57.1%)에서 골편의 골흡수가 관찰되었고, 이는 넓은 골편과 다수의 골편에 의해 골단면의 면적이 증가하여 흡수가 조장되어 골재생이 원활하게 이루어지지 않은 것으로 보인다. 두개골과 골편이 단단하게 인접하도록 고정하면 빈도를 낮출 수 있을 것으로 사료된다.

수술 후 수두증이 동반되어 뇌실-복강 단락술을 두개골 성형술 이전, 이후 또는 동시에 시행한 경우에 있어서 이식 골편의 흡수 및 위축은 높은 빈도로 나타났다 (83.3%). 이는 뇌실-복강 단락술에 의한 두개 내압의 변화로 이식된 골편이 두개골과 충분히 밀착되지 않아 골형성을 저해하여 발생한 현상으로 생각되어진다.

골흡수를 줄이기 위한 여러 가지 연구가 진행되어 왔는데, 1990년 Babin 등⁴⁾은 냉동 보관된 골편에 다수의 천공을 시행하였고, 모든 천공에서 골생성 및 하버스관의 확장이 관찰되었다고 보고하였다. 2002년 Shimizu 등³⁹⁾은 냉동 보관시 dimethylsulfoxide를 사용하여 골흡수 및 골용해를 억제할 수 있다고 하였다. 2007년 Schmidt 등³⁸⁾은 개두술시 골편을 제거하지 않는 변형된 개두술(hinged craniotomy)을 제안하였다.

본 연구에서 자가골의 대부분에 보존시 천공을 만들고, 두개골 성형술의 골신생이나 주위 조직으로부터의 조직 침입에 의한 골편의 고정 및 안정을 유도하였다. 8예에서 골흡수가 관찰되었고 모두 감염을 위해 넓은 골편을 제거한 경우였다. 다발성 두개골 골절이 동반되어 골편과 주위 두개골과의 간격이 벌어져 있거나, 수두증이 병발하여 뇌실-복강 단락술을 시행한 경우에 골흡수는 높은 빈도를 보였다. 골신생이나 골편의 고정 및 안정이 불충분하여, 장기간의 경과에서 골편의 골흡수, 골위축 및 골함몰이 발생한 것으로 생각된다.

결론

외상성 두개골 감압술 후 냉동 보관된 자가골을 이용한 두개골 성형술에서 골편의 골흡수는, 임상적 및 미용적으로 만족할 만한 결과를 보인다 할지라도, 비교적 높은 빈도로 발생한다. 특히 다발성 두개골 골절이나 뇌실-복강 단락술이 동반되어 있는 경우, 골편의 골흡수는 높은 비율로 관찰된다. 성공적인 골유합을 위해서는, 골흡수와 골유착의 단계가 잘 일어날 수 있도록 골편과 두개골이 단단하게 인접하여 고정하는 것이 중요하며, 뇌실-복강 단락술이 동반되는 경우 골흡수를 예방하기 위해 이에 대한

추가적인 연구가 필요하다.

중심 단어: 자가골 · 골흡수 · 두개골 성형술 · 감압성 두개골 절제술 · 외상성 뇌손상.

REFERENCES

- 1) Abbott KH. Use of frozen cranial bone flaps for autogenous and homologous grafts in cranioplasty and spinal interbody fusion. *J Neurosurg* 10:380-388, 1953
- 2) Asano Y, Ryuke Y, Hasuo M, Simosawa S. [Cranioplasty using cryopreserved autogenous bone.] *No To Shinkei* 45:1145-1150, 1993
- 3) Baadsgaard K, Medgyesi S. Muscle-pedicle bone grafts: an experimental study. *Acta Orthop Scand* 35:279-293, 1965
- 4) Babin SR, Simon P, Belloeq JP, Babin-Boilletot A, Kempf JF. [The value of perforating cryopreserved massive bone allograft. Histologic data of an allograft removed after 27 months.] *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 76:137-140, 1990
- 5) Bassett CA. Clinical implications of cell function in bone grafting. *Clin Orthop Relat Res* 87:49-59, 1972
- 6) Bok WK, Hong SK, Min KS, Lee MS, Kim YG, Kim DH. Cranioplasty using frozen autologous bone. *J Korean Neurosurg Soc* 33:166-169, 2003
- 7) Boris P, Bundgaard F, Olsen A. The CT (Hounsfield unit) number of brain tissue in healthy infants. A new reliable method for detection of possible degenerative disease. *Childs Nerv Syst* 3:175-177, 1987
- 8) Burwell RG. The fate of bone graft in Apley AG (ed): in *Recent Advances in Orthopaedics*. Baltimore: Williams & Wilkins, pp115-207, 1969
- 9) Chalmers J. Transplantation immunity in bone homografting. *J Bone Joint Surg Br* 41-B:160-179, 1959
- 10) Deleu J, Trueta J. Vascularization of bone grafts in the anterior chamber of the eye. *J Bone Joint Surg Br* 47:319-329, 1965
- 11) Elliott H, Scott HJ. The bone-bank in neurosurgery. *Brit J Surg* 39:31-34, 1951
- 12) Firtell DN, Grisius RJ. Cranioplasty of the difficult frontal region. *J Prosthet Dent* 46:425-429, 1981
- 13) Freiberg RA, Ray RD. Studies of devitalized bone implants. *Arch Surg* 89:417-427, 1964
- 14) Goldberg VM, Stevenson S. Natural history of autografts and allografts. *Clin Orthop Relat Res*:7-16, 1987
- 15) Gooch MR, Gin GE, Kenning TJ, German JW. Complications of cranioplasty following decompressive craniectomy: analysis of 62 cases. *Neurosurg Focus* 26:E9, 2009
- 16) Grant GA, Jolley M, Ellenbogen RG, Roberts TS, Gruss JR, Loeser JD. Failure of autologous bone-assisted cranioplasty following decompressive craniectomy in children and adolescents. *J Neurosurg* 100:163-168, 2004
- 17) Hancock DO. The fate of replaced bone flaps. *J Neurosurg* 20:983-984, 1963
- 18) Holmstrand K. Biophysical investigations of bone transplants and bone implants: an experimental study. *Acta Orthop Scand Suppl* 26:1-92, 1957
- 19) Huh HY, Yoo DS, Huh PW, Cho KS, Kim DS, Kim MC. Effect of cranioplasty on the cerebral hemodynamics and stroke volume. *J Korean Neurosurg Soc* 33:13-18, 2003
- 20) Hwang KH, Kim TY, Kim JM. Autogenous cranioplasty using deepfreezing bone flap. *J Korean Neurosurg Soc* 27:159-164, 1998
- 21) Itoh Y. [Clinicopathological study of cranioplasty using freeze-preserved autogenous skull.] *J Tokyo Med Coll* 49:550-564, 1991
- 22) Iwama T, Yamada J, Imai S, Shinoda J, Funakoshi T, Sakai N. The use of frozen autogenous bone flaps in delayed cranioplasty revisited. *Neurosurgery* 52:591-596; discussion 595-596, 2003
- 23) Kiehn CL, Cebul F, Berg M, Gutentag J, Glover DM. A study of the vascularization of experimental bone grafts by means of radioactive phosphorus and the transparent chamber. *Ann Surg* 136:404-411, 1952
- 24) Kim MS, Kim JD, Kang DW. Measurement of hard tissue density of head phantom based on the HU by using CBCT. *Korean J Oral Maxillofac Radiol* 39:115-120, 2009
- 25) Kulali A, Kayaalp S. Single-table autogenous calvarial grafting for cranioplasty. *J Craniomaxillofac Surg* 19:208-211, 1999
- 26) Lee C, Antonyshyn OM, Forrest CR. Cranioplasty: indications, technique, and early results of autogenous split skull cranial vault reconstruction. *J Craniomaxillofac Surg* 23:133-142, 1995
- 27) Machado L, Zide MF, Kent JN. Experimental evaluation of hydroxylapatite and hydroxylapatite in a collagen and crelatin matrix as cranioplasty implant materials. AAOMS Meeting, 1985
- 28) Moreira-Gonzalez A, Jackson IT, Miyawaki T, Barakat K, DiNick V. Clinical outcome in cranioplasty: critical review in long-term follow-up. *J Craniofac Surg* 14:144-153, 2003
- 29) Odom GL, Woodhall B, Wrenn FR. The use of refrigerated autogenous bone flaps for cranioplasty. *J Neurosurg* 9:606-610, 1952
- 30) Osawa M, Hara H, Ichinose Y, Koyama T, Kobayashi S, Sugita Y. Cranioplasty with a frozen and autoclaved bone flap. *Acta Neurochir (Wien)* 102:38-41, 1990
- 31) Ozaki F. [Clinical and experimental study for cranioplasty with autogenous frozen bone graft.] *J Wakayama Med Soc* 45: 217-225, 1994
- 32) Phemister DB. The fate of transplanted bone and regenerative power of its various constituents. *Surg Gynecol Obstet* 19:303-333, 1914
- 33) Posnick JC, Goldstein JA, Armstrong D, Rutka JT. Reconstruction of skull defects in children and adolescents by the use of fixed cranial bone grafts: long-term results. *Neurosurgery* 32:785-791; discussion 791, 1993
- 34) Prolo DJ. Cranial defects and cranioplasty in Wilkins RH, Rengachary SS (eds): *Neurosurgery*, ed 2. New York: McGraw-Hill, pp 2783-2795, 1996
- 35) Prolo DJ, Burres KP, McLaughlin WT, Christensen AH. Autogenous skull cranioplasty: fresh and preserved (frozen), with consideration of the cellular response. *Neurosurgery* 4:18-29, 1979
- 36) Prolo DJ, Oklund SA. The use of bone grafts and alloplastic materials in cranioplasty. *Clin Orthop Relat Res*:270-278, 1991
- 37) Ray RD, Holloway JA. Bone implants: preliminary report of an experimental study. *J Bone Joint Surg Am* 39-A:1119-1128, 1957
- 38) Schmidt JH 3rd, Reyes BJ, Fischer R, Flaherty SK. Use of hinge craniotomy for cerebral decompression. Technical note. *J Neurosurg* 107:678-682, 2007
- 39) Shimizu S, Morikawa A, Kuga Y, Mouri G, Murata T. [Cranioplasty using autogenous bone cryopreserved with dimethylsulfoxide (DMSO).] *No Shinkei Geka* 30:479-485, 2002
- 40) Stiver SI. Complications of decompressive craniectomy for traumatic brain injury. *Neurosurg Focus* 26:E7, 2009
- 41) Tabaddor K, LaMorgese J. Complication of a large cranial defect. Case report. *J Neurosurg* 44:506-508, 1976
- 42) Urist MR. Bone: formation by autoinduction. *Science* 150:893-899, 1965
- 43) Urist MR, Silverman BF, Buring K, Dubuc FL, Rosenberg JM. The bone induction principle. *Clin Orthop Relat Res* 53:243-283, 1967