

Nerve Transfer to Restore Upper Extremity Function

Seung Hoo Lee, Young Ho Lee

Department of Orthopaedic Surgery, Seoul National University Hospital, Seoul National University College of Medicine, Seoul, Korea

Received: August 14, 2017

Revised: [1] September 1, 2017
[2] September 6, 2017

Accepted: September 7, 2017

Correspondence to: Young Ho Lee
Department of Orthopaedic Surgery, Seoul National University Hospital, Seoul National University College of Medicine, 101 Daehak-ro, Jongno-gu, Seoul 03080, Korea
TEL: +82-2-2072-0894
FAX: +82-2-740-2718
E-mail: orthoyhl@snu.ac.kr

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/bync/3.0/>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The term 'Nerve Transfer' means the transfer of a normal or nearly normal fascicle or nerve branch to an important sensory or motor nerve that has sustained irreparable proximal damage. It is a kind of salvage procedure performed when the proximal part of a peripheral nerve is totally damaged and impossible to be repaired. In case of irreparable preganglionic injury, it is difficult to recovery the nerve function by only nerve graft. In this case, the uninjured nerve around the brachial plexus could be transferred to restore the function of the upper extremities. Previous studies have reported a high recovery rate for the function of the upper limb above the elbow and recent efforts have been made to restore the function of the upper limb below the elbow including hand functions. The purpose of this article is to review the type of nerve transfer to restore upper extremity function, operative technique, outcomes and complication.

Keywords: Brachial plexus, Nerve transfer, Neurotization, Reconstruction of upper extremity

서론

상완 신경총 손상이 경추 신경근 전열 손상(cervical root avulsion) 등으로 경추 척수(cervical cord) 내의 전각 세포(anterior horn cell) 등이 파괴된 경우는 신경 이식술(nerve graft)만으로는 신경을 회복시키기가 어렵다. 이런 경우, 상완 신경총 주위의 정상 신경을 이전시켜서 상지 기능을 회복시키는 수술법을 사용하게 된다.

신경 이전술의 개념은 정상적인 신경을 손상된 신경의 원위 부에 이어줌으로써 손상된 신경을 재생시키는 방법인데, 다른 말로 신경화(neurotization)라고도 한다. 어떤 말초 신경의 근

위부가 완전히 손상되어 신경을 이어줄 수 없는 경우에 시행되는 일종의 구제수술이다. 건강한 신경의 끝을 손상된 신경이 지배하는 근육 속이나 피부의 수용기 근처에 넣어주어 말단 기관이 이전된 신경에 직접 지배를 받게 하는 방법을 직접 신경화(direct neurotization)라고 하며, 비교적 가치가 적은 건강한 신경을 희생하여, 그 근위 절단 단을 보다 가치 있는 손상된 신경의 원위 절단 단에 봉합해 주는 방법을 간접 신경화(indirect neurotization)라고 한다. 상완 신경총 손상에서 시행되는 신경 이전술은 대부분 간접 신경화에 속하는 술식들이다.

본 종설에서는 간접 신경화에 속하는 술식들로서, 상완신

경총 손상에서 상지 기능의 회복을 위해 시행할 수 있는 대표적인 신경 이전술의 종류와 수술 술기, 수술의 결과, 합병증에 대해 다루고자 한다.

척추 부 신경 이전술 (spinal accessory nerve transfer)

1913년 Tuttle¹에 의하여 처음 언급되었으며, 그 후 1963년 Kotani 등이 본격적으로 사용하기 시작하였다. 쇄골상 신경총의 탐색술을 할 때와 마찬가지로, 목은 반대쪽으로 돌리고 어깨와 목을 수술대로부터 약간 들어올리면, 척추 부 신경에 쉽게 접근할 수 있다. 척추 부 신경을 확인하기 위해서는 신경 자극기를 이용해야 하므로, 근 이완제는 사용하지 않는다. 척추 부 신경은 대개 흉쇄 유돌근의 후방 경계에서 채취하며, 승모근으로의 분지까지 추적하여 그 부분에서 자르게 된다. 이후의 신경은 쇄골 상 부위에 신경화(neurotization)를 위해 사용할 수 있다. 이 접근법은 척추 부 신경에 대한 가장 보편적인 접근법이지만, 몇 가지 단점이 있다. 첫째로, 목에 큰 세로의 흉터가 생기고, 둘째로, 이러한 광범위한 접근법은 승모근의 상부를 지배하는 가지를 손상시킬 수 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 이 절개의 외측부위를 사용하는 방법이 있으며, 쇄골 위의 흉터를 줄일 수 있는 장점이 있다. 척추 부 신경은 승모근 전면의 쇄골 상부의 몇 센티미터 정도 위에서 발견할 수 있다. 비슷한 방향으로 진행되는 표재 경부 신경총과 혼동해서는 안된다. 경부 신경총으로부터 나오는 분지들은 크기가 비교적 작고, 수술 중 신경의 전기 자극에 의한 반응을 통해 척추 부 신경과 구별할 수 있다. 척추 부 신경을 자극하면 승모근의 강력한 수축을 관찰할 수 있다. 척추 부 신경은 가능한 최대한 원위부까지 박리해야 한다. 승모근의 윗부분으

로 가는 분지는 반드시 보존해야 한다. 이 분지를 확인하여 보존한 뒤 신경을 절개하여 이전술을 시행한다. 수술 전 척추 부 신경의 손상이 있는 환자는 이 수술이 금기이다. 특히 어깨 근육들이 마비된 환자들에서 승모근의 기능을 신체검진으로 평가하는 것은 어렵기 때문에, 수술 전 근전도 검사가 유용하다. 수술 중 척추 부 신경을 자극하여 승모근의 수축을 확인해 보는 것이 가장 확실한 방법이다.

1. 견갑상 신경으로의 이전술(transfer to suprascapular nerve) (Fig. 1)

견갑상 신경은 상완 신경총의 상부 간부에서 나와 경부의 후방삼각을 지나 견갑상 절흔(suprascapular notch)를 통과한 후 극상근을 지배한다. 그리고 견갑골의 경부 위를 지나 극하근을 지배한다. 견갑상 신경의 온전함을 확인하기 위해 견갑상 절흔 부위까지 손가락을 이용해 박리를 진행한다. 이는 병변의 위치가 상부 간부의 근위부일 때에도 원위부에 이차 병변이 있지는 않은지 확실히 하기 위해 시행되어야 한다. 신경 이전술을 시행하기 위해, 견갑상 신경을 상부 간부에서 분지하는 위치에서 잘라야 한다. 만약 신경의 흉터화(scarring)가 진행되지 않았다면, 더 근위부로 접근하여 상부 간부에서 더 가깝게 분리하면 가용 길이를 늘일 수 있다.

척추 부 신경의 견갑상 신경으로의 이전술의 결과는 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는다. 이러한 요인에는 수상 당시 상완신경총 손상의 유형(C5-6 vs. pan-plexus injury)^{2,3}과 함께 시행된 신경 이전술의 종류(concomitant axillary reinnervation or not)⁴ 등이 있다. 결과는 문헌에 따라 다양하다. 한 메타분석에서는 견갑상 신경으로의 이전술을 시행한 환자 92%에서 견관절의 외전의 운동 등급이 중력에 저항할 정도까지 회복이 되었다고 보고하였다. 다른 여러 보고들에

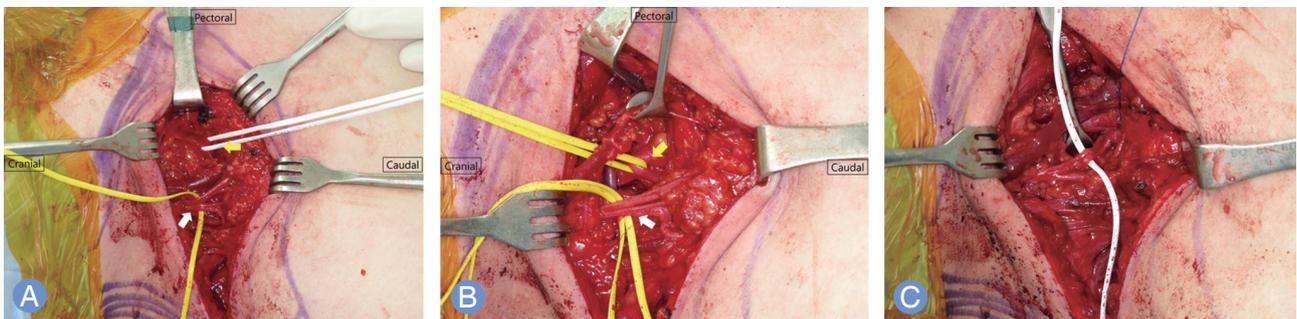


Fig. 1. Spinal accessory nerve transfer (distal motor branch) to suprascapular nerve for the patients with suprascapular nerve palsy due to brachial plexus injury. (A) Distal motor branch of spinal accessory nerve. Inferior loop (white arrow), distal motor branch of spinal accessory nerve; superior loop (yellow arrow), omohyoid muscle. (B) Superior loop (yellow arrow), suprascapular nerve; inferior loop (white arrow), distal motor branch of spinal accessory nerve. (C) Transfer distal motor branch of spinal accessory nerve to suprascapular nerve.

의하면 견관절의 외전 각도가 45°에서 122° 정도로의 회복을 보고 하고 있다^{2,4-7}. C5-6에만 마비가 있던 환자가 C5-7까지 마비된 환자에 비해 더 나은 결과를 보였으며, 당연하게도 총상완신경총 손상 환자들에서 결과가 가장 좋지 않았다^{2,7}. 수술 후 기능적 결과에는 전거근(serratus anterior)의 기능이 중요한 역할을 한다. C7이 손상되지 않은 환자들은 전거근에 대한 신경지배가 부분적으로 남아 있기 때문에, 견갑골(scapula)의 안정성이 더 우수하여, 견관절의 외전각도의 회복이 그렇지 않은 경우에 비해 유의하게 더 좋았다. 문헌마다 보고하는 결과가 다양한 이유는, 견관절 운동의 회복을 평가하는 방법이 어렵고 복잡하기 때문인 것으로 생각된다. 외회전의 회복에 대해서는 상대적으로 보고가 적은 편이며, 0°에서 118°까지 다양한 결과가 보고되고 있다^{2,7}.

2. 근피신경으로의 이전술(transfer to musculocutaneous nerve) (Fig. 2)

이 술식은 주관절의 굴곡을 재건하기 위해 사용된다⁸. 하지만 이보다는 척골신경 운동 다발이나 늑간신경을 이전하는

술식을 더 많이 사용한다. 척추 부 신경을 사용하는 경우 추가적인 신경 이식술(interposition nerve graft)이 필요하기 때문에, 결과가 더 안 좋을 수 있다⁹. 이 술식의 결과를 분석한 메타분석에서 77% 환자에서 M3의 상완 이두근 근력을, 92%에서 M4의 상완 이두근 근력을 회복한 것으로 보고된 바 있다⁹. M3의 회복만 놓고 보면, 척추 부 신경을 이용한 이전술(with an interpositional graft)과 늑간 신경을 이용한 이전술(without an interpositional graft)의 결과에 유의한 차이는 없으나(77% vs. 72%), M4까지 회복된 환자는 척추 부 신경을 이용한 군이 유의하게 더 적었다(29% vs. 41%, $p < 0.01$)⁹.

척골신경 다발을 이용한 이두근 운동 분지로의 이전술(ulnar nerve fascicular transfer to the biceps motor branch)

Oberlin 등¹⁰에 의해 처음 소개되었으며, 경추 8번-흉추 1번 신경이 보존된 환자에서 상완이두근의 회복을 위한 술식으로 널리 이용되고 있다. 첫 보고에서 4명의 환자 중 3명에서 4등

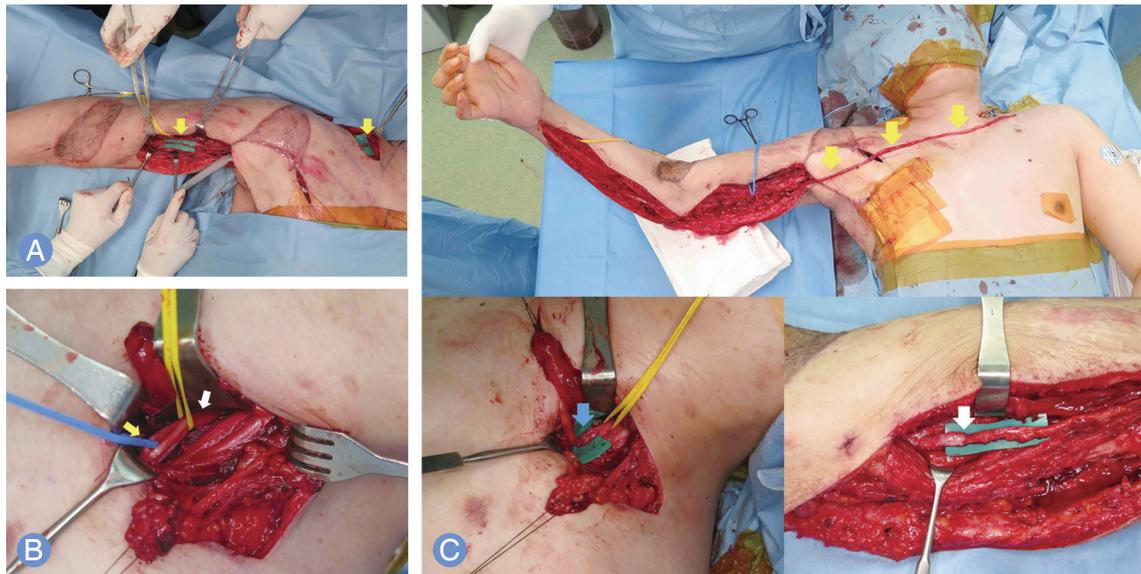


Fig. 2. This patient sustained whole arm type brachial plexus injury. His suprascapular nerve function remained, and the intercostal nerve could not be used as a donor due to damage of the chest wall. We did spinal accessory nerve (distal motor branch) transfer to musculocutaneous nerve (motor branch to brachialis and biceps muscle) with sural nerve graft. After that, contralateral C7 nerve (ventral division) transfer to median nerve using vascularized pedicled ulnar nerve graft was done. (A) Spinal accessory nerve was used to neurotize the musculocutaneous nerve (motor branch to brachialis and biceps muscle) with an interpositional sural nerve graft (yellow arrow). (B) Contralateral C7 nerve were dissected for transfer. Right loop (white arrow), C7 root; left loop (yellow arrow), anterior division. (C) Ipsilateral ulnar nerve was used as pedicled graft based on the superior ulnar collateral vessels to neurotize the median nerve. Its distal end is cut at the wrist level and mobilized in its full length to reach to contralateral C7 nerve (yellow arrows). The distal stump of the ulnar nerve is passed under the skin of the upper part of the chest to the contralateral C7 nerve. The anterior division of C7 nerve is matched and coapted to the distal end of the ulnar nerve (blue arrow). The proximal end of the ulnar nerve was sutured to median nerve (white arrow).

급 이상의 주관절 굴곡력 회복을 보고하였는데, 이 논문에서, 척골신경 다발의 일부를 사용하는데 있어 제기될 수 있는 2가지 의문에 대해 다음과 같이 기술하고 있다.

(1) 척골 신경 다발 일부를 이전한 뒤 기능적인 결손이 생기지 않는가?

(2) 척골 신경의 다발 중 무작위로 선택된 다발을 이전하게 되는데, 운동 분지를 항상 포함 할 수 있을까?

첫 번째 질문에 대해서는, 4명의 환자 중에 기능 소실을 보인 환자는 없었다고 기술하고 있으며, 두 번째 질문에 대해서는 해부학적 연구에서 상완 부위에서는 척골 신경이 운동신경과 감각신경이 서로 혼합된 상태이므로, 이 부위에서 신경 다발 일부를 이전하게 되면 반드시 운동 분지를 포함하게 된

다고 기술하고 있다.

1. 수술 술기(surgical technique)와 그 결과(expected outcomes) (Fig. 3)

상완부 근위 부위의 내측으로 종결개를 가하여 근피신경과 척골신경을 노출시킨다. 근피신경의 세 분지(motor branch to the biceps, motor branch to the brachialis, lateral antebrachial cutaneous nerve)를 확인한다. 이두근으로 가는 운동 신경의 유형을 확인한 뒤(common or separated branches pattern), 척골신경에 충분히 닿을 정도의 길이에서 이두근으로 가는 운동 신경의 분지를 자른다. 척골신경을 확인한 뒤 intraepineural dissection을 시행한다. 신경자극기를 이용하여

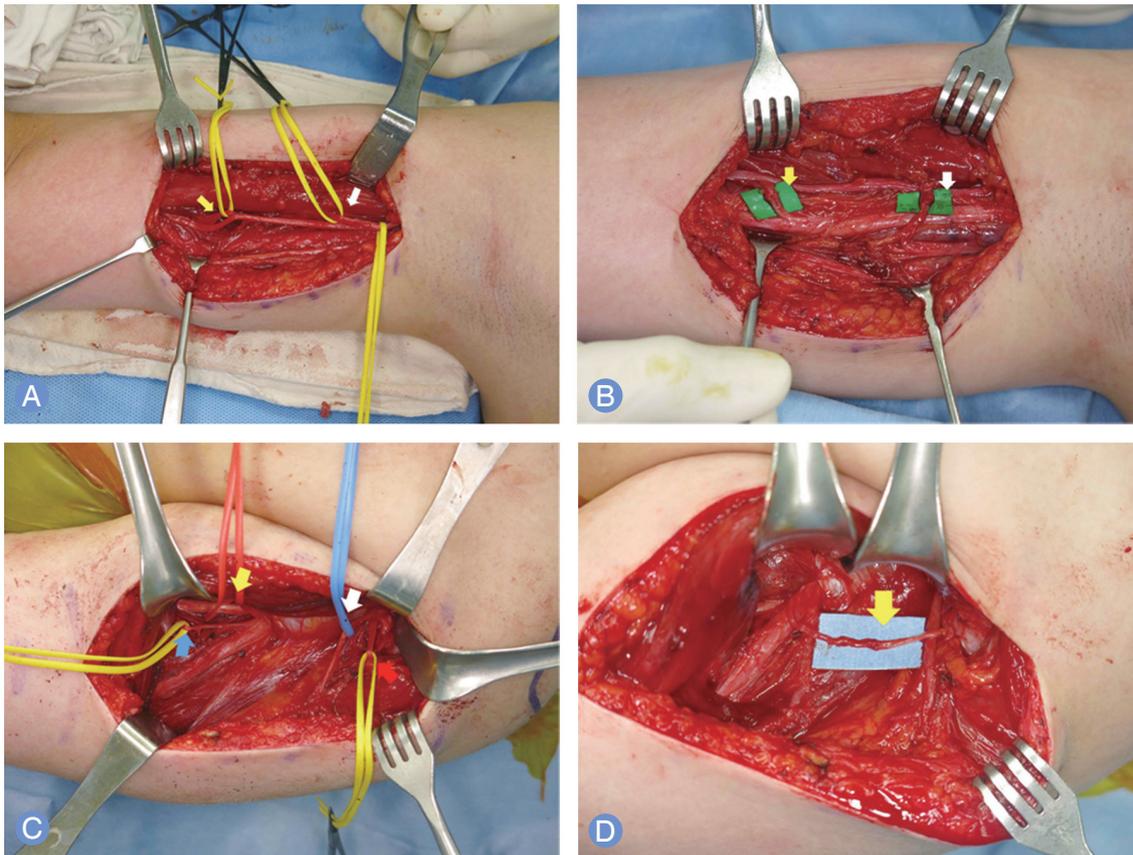


Fig. 3. This patient sustained brachial plexus injury with paralysis of musculocutaneous nerve and axillary nerve. We did ulnar nerve fascicular transfer to the brachialis motor branch and median nerve fascicular transfer to the biceps motor branch on supine position. After that, triceps motor branch was transferred to the axillary nerve. **(A)** Left loop (yellow arrow), brachialis motor branch of musculocutaneous nerve; right loop (white arrow), biceps motor branch of musculocutaneous nerve. **(B)** After ulnar nerve fascicular transfer to the brachialis motor branch (yellow arrow) and median nerve fascicular transfer to the biceps motor branch (white arrow). **(C)** Left side of inferior loop (blue arrow), triceps motor branch of the radial nerve; right side of inferior loop (red arrow), deltoid motor branch of the axillary nerve; left side of superior loop (yellow arrow), ulnar nerve; right side of superior loop (white arrow), sensory branch of axillary nerve. **(D)** After transfer of the triceps motor branch to the axillary nerve (yellow arrow).

척골신경의 신경다발을 자극하여, 주로 후내방에 위치하는 척수근굴근을 지배하는 신경다발을 찾는다. 신경자극기를 사용하지 않는 그룹도 있으며, 이 그룹에서도 별다른 합병증을 보고하지 않았는데¹¹, 이는 이 레벨의 척골신경의 다발이 중복되어 있고 섞여 있으며, 모든 다발이 감각과 운동신경 다발을 함께 포함하기 때문이다. 이두근으로 가는 운동분지의 크기에 따라, 한 가닥이나 두 가닥의 신경다발을 선택한다. 선택된 다발을 자르고, 이두근으로 가는 운동분지에 긴장이 없이 충분한 길이로 이어준다.

수술의 결과는 전반적으로 좋은 것으로 알려져 있으며, 대부분의 저자들은 이 술식의 장점으로 이두근의 빠른 신경 재 지배를 뽑는다. 수개월 후 대부분의 환자에서 이두근의 수축이 회복되는 것으로 알려져 있다. Oberlin 등¹⁰은 초기 보고에서는 4명의 환자 중 3명에서 4등급 이상의 주관절 굴곡력의 회복을 보고하였다. Leechavengvongs 등¹¹은 32명의 환자를 평균 18개월 추시한 뒤 발표한 결과에서, 30명의 환자에서 4등급의 주관절 굴곡력을, 1명의 환자에서 3등급의 회복을 보고하였다. Sungpet 등¹²은 9명의 환자를 평균 26.7개월 추시하여, 7명의 환자에서 3등급 이상의 주관절 굴곡력 회복을 보고하였다. Teboul 등¹³은 32명의 환자에 대해 수술을 시행하여 20명에서 4등급, 4명에서 3등급의 회복을 보고하였다. Sedain 등¹⁴은 9명의 환자를 평균 27.6개월 추시하여 6명의 환자에서 4등급 이상의 결과를 보고하였다.

2. 금기(contraindications)와 합병증(complications)

수술 전에 척골신경의 지배를 받은 근육의 약화나 감각 결손이 있는 환자는 금기이다. 합병증으로는 수술 후 일부 환자에서 척골신경의 지배를 받는 감각 영역에 일시적인 무감각을 호소할 수 있다. 이러한 변화는 수일에서 수개월 후 호전되며 영구적인 감각 결손이 남는 경우는 거의 없다. 간혹, 척골신경의 지배를 받는 수부의 내인근들의 일시적인 위약감이 있을 수 있다. 하지만 영구적인 운동 결손이 있다는 보고는 거의 없다. 대부분의 환자들은 수술 후 재활 프로그램을 통해 악력과 집기능력을 회복하게 된다. 이러한 근력의 회복이 재활 운동을 통해 강해진 것인지 시간이 지나면서 저절로 회복된 것인지는 아직 밝혀지지 않았다.

정중신경 다발을 이용한 상완근 운동 분지로의 이전술(median nerve fascicular transfer to the brachialis motor branch)

최근에는 주관절의 굴곡력을 회복시키기 위해 이중 신경 이

전술(double-nerve transfer)이 소개되었다^{15,16}. 이 술식은 상기 서술한 이두박근을 회복시키기 위한 척골신경 이전술에 더해, 주관절의 두 번째로 강한 굴곡근인 상완근까지 재신경화 시킨다. 이러한 이중 신경 이전술을 통해, 몇몇 보고에서는 더 나은 결과를 보고하였다^{15,16}. 또한, 5번-7번 경추 신경 손상 환자에서 손과 전완부의 근력 약화 패턴에 따라 척골신경 대신에 정중신경의 일부 다발을 신경 이전술에 사용할 수 있다. 이 술식에 대해 부정적인 저자들도 있으나, 별 다른 합병증 없이 좋은 결과를 얻었다는 저자들도 있다. 최근의 이슈는 주관절의 굴곡력을 회복시키기 위해 단일 신경 이전술과 이중 신경 이전술 중 어느 것이 더 적절한 지에 대한 문제이다. 한 보고에서 단일 신경 이전술을 시행한 환자와 이중 신경 이전술을 시행한 환자에서 이두박근과 상완근의 토크 힘(torque strength)을 각각 비교하였는데, 전반적으로 단일 신경 이전술을 시행한 환자들이 이중 신경 이전술을 시행한 환자를 능가하지는 못하였으나, 통계적인 차이는 없었다¹⁷. 또 다른 전향적 비교연구에서도 두 군간에 주관절 굴곡력의 차이는 없었다. 따라서, 이중 신경 이전술을 시행할 때는 이 술식이 환자에게 꼭 필요한지 신중하게 생각하고 결정해야 한다.

1. 수술 술기와 그 결과(Fig. 3)

척골신경의 다발을 이용한 이전술에서와 같은 절개를 사용하여 정중신경과 상완근의 운동 신경 분지를 노출시킨다. 근 피신경은 상완부의 근위부에서 잘 찾을 수 있다. 이두박근의 운동 분지를 확인한 뒤, 이로부터 몇 센티미터 정도 원위부로 따라가면 상완근으로의 운동 분지를 찾을 수 있으며, 이 후에는 외측 전완 피부신경(lateral antebrachial cutaneous nerve)이 된다. 상완근으로 가는 운동 신경의 분지는 이 신경이 근육 내로 들어가는 것을 보면 확인할 수 있다. 상완근으로의 운동 신경 분지는 이두박근으로의 운동 신경 분지가 갈라지는 원위부 직후까지 따라가서 자른다. 정중 신경은 상완동맥과 정맥 근처에서 발견할 수 있다. 신경자극기를 이용하여 손목의 굴곡을 일으키는 요 수근 굴근을 지배하는 신경다발을 확인하여 지도화를 하는 것이 좋다. 표재지굴근을 지배하는 신경다발을 사용하는 그룹도 있다. 선택된 신경 다발을 충분한 길이로 얻어 원위부에서 자른 뒤, 상완근의 운동 신경 분지에 봉합하여 준다.

Mackinnon 등은 2011년에 29명의 환자를 대상으로 이중 다발 이전술(double fascicular transfer)을 시행한 결과를 발표하였다¹⁸. 평균 연령은 37세(범위, 17-68세)였으며, 평균 추시 기간은 19개월(범위, 8-68개월)이었다. 8명의 환자에서 5등급, 15명에서 4등급, 4명에서 3등급의 주관절 굴곡력 회복을

보였으며 공여부의 합병증은 없었다.

2. 금기와 합병증

정중신경의 지배를 받는 근육의 위약이 있는 환자는 이 술식의 금기이다. 합병증으로는 척골 신경 다발 이전술과 같이 일부 환자들은 정중 신경의 감각 신경 지배 영역에 일시적인 감각 저하를 호소할 수 있다. 하지만 이는 수일이나 수개월 후 저절로 호전되며 영구적인 결손을 남기는 경우는 거의 없다. 때로, 환자들은 정중 신경의 지배를 받는 수부 내재근의 위약감을 호소할 수 있는데, 마찬가지로 영구적인 장애로 남는 경우는 거의 없다.

삼두근으로의 운동분지를 이용한 액와신경으로의 이전술(transfer of the triceps motor branch to the axillary nerve)

널리 이용되는 술식으로, 주로 C5-6 손상 환자에서 삼두근의 근력이 강한 경우에 전관절 부위 근육의 재신경화를 위해 이용된다.

1. 수술술기와 그 결과(Fig. 3)

액와신경(axillary nerve)의 전방 분할을 찾아, 사각공간을 향해 박리해 간 뒤 최대한 근위부에서 자른다. 신경의 크기에 따라 액와 신경을 한 개 혹은 그 이상의 삼두근 운동 분지를 이용하여 재신경화 시킨다. 주로 액와 신경의 전방 분지의 재신경화를 시행한다. 이론적으로는 전체 신경을 타겟으로 하여 재신경화를 시키면 소원근(teres minor muscle)까지 재신경화를 시킬 수 있어, 외회전력을 더 증진시킬 수 있다.

다음으로, 삼두근의 장두와 외측두 사이로 들어가서 요골 신경과 삼두근의 세 두로의 분지를 확인한다. 보통 삼두근의 장두로의 운동 분지를 사용하게 되며, 신경 자극기를 통해 확인하는 것이 좋다¹⁹. 이 운동분지를 끊기 전에, 액와 신경의 전방 분할까지 닿기 위해 어느 정도의 길이가 필요한지 결정해야 한다. 필요하다면 대원근의 근막을 이완시켜 신경 근위부의 가동범위를 더 증가시킬 수 있다. 이후, 삼두근 장두의 운동 부지를 액와 신경의 전방 분할에 직접 봉합하여 준다. 저자에 따라서는 다른 두로의 운동 분지의 사용을 추천하는 그룹도 있으며, 어느 분지를 사용해도 삼두근의 근 위약이 발생하는 경우는 드물다.

회복의 지표가 되는 삼각근의 수축은 대개 6개월 정도 지난 후에 확인할 수 있다. Leechavengvongs 등¹⁹은 이 술식을 척추 부 신경을 전갑 상 신경으로 이전하는 술식과 같이 시행하

여 평균 124°의 외전 각도를 보고하였다. C5-6 견열 손상 환자들에서 C5-7 손상 환자들에 비해 좋은 결과를 보였다. 액와신경 단독 손상의 경우 이 술식으로 평균 3.5등급의 외전력 회복을 보였다. 삼각근의 근력은 환자의 나이, 수상일로부터 수술 일까지의 시간, body mass index와 연관이 있는 것으로 보고된 바 있다²⁰.

2. 금기와 합병증

수술 전에 삼두근의 근력 약화가 있는 환자는 금기이다. 특히, C7의 부분 손상 환자에서는 삼두근의 세 두에 대해 각각 근전도를 시행하여 확인하는 것이 좋다. 합병증으로는 수술 직후에 일시적인 삼두근의 위약을 호소할 수 있으나, 이러한 증상은 대개 환자의 힘을 주려는 노력이 부족하거나 통증이나 합병증에 대한 두려움으로 일시적으로 이러한 현상을 보이는 경우가 대부분이다.

반대쪽의 정상 C7 신경근을 이용한 신경 이전술(contra-lateral C7 nerve transfer)

Contralateral C7 nerve transfer는 1986년 Gu²¹에 의해 처음 소개되었으며, 총 상완 신경총 손상의 견열 손상 환자에서 공여부의 신경의 길이가 짧거나 부족한 경우에 사용되었다. 이 술식에서 견측의 제7번 경추 신경의 전체 혹은 일부를 환측 상지의 손상된 신경에 이어주었다. 이론적으로 7번 경추 신경의 지배를 받는 근육들은 6번과 8번에 의해 교차 지배되며 5번 경추 신경과 1번 흉추 신경에 의해서도 일부 지배를 받는다²². 그러므로 견측의 7번 경추 신경을 이전술에 사용해도 견측의 기능에는 크게 지장이 없다. 이 술식의 장점은 7번 경추 신경에 유수 신경(myelinated nerve)의 수가 다른 공여 신경에 비해 많기 때문에 신경화 능력이 더 뛰어나다는 점이다²³. 단점으로는 타겟 근육까지의 거리가 멀고, 공여부의 상지에 기능 장애가 발생할 수 있다는 점이다. 그 결과에 대해서는 아직 논란의 여지가 있는데, 몇몇 저자들은 좋은 결과를 보고하며, 총 상완신경총 견열 손상에서 좋은 옵션으로 주장하고 있으며^{24,25}, 다른 저자들은 좋지 않은 결과를 보고하며, 믿을만한 술식이 아니라고 주장하고 있다^{26,27}.

1. 해부학(surgical anatomy)

해부학적 변이가 있긴 하지만, 상완 신경총은 C5부터 T1까지 다섯 가지의 척추 신경의 신경근이 분지와 합지를 계속하면서 만들어진다. 각각의 척추 신경에서 하나 이상의 주요 신경에 축색을 내기 때문에, 바꾸어 말하면 각각의 주요 신경은

하나 이상의 척추 신경에서 축색을 받게 된다. 정중신경과 근피신경, 척골신경은 주로 제 7번 경추 신경의 지배를 받지만 다른 척추 신경에 의해 교차 지배를 받게 된다(주로는 C6과 C8). 따라서 C7을 사용해도 개별 근육의 유의한 기능 소실이 잘 일어나지 않기 때문에, 신경 이전술시 공여 신경으로 사용할 수 있는 것이다.²⁸

2. 반대쪽 경추 7번 신경의 박리와 이전술(contralateral C7 nerve dissection and transfer) (Fig. 2)

C7은 중간 간부에서 전방 분할과 후방 분할로 나누어지게 되며 그 운동 기능은 신경 자극기를 이용해 확인하는데, 만약 C7 전체를 이용할 계획이라면, 신경이 분할되기 전 부분을 자극하여 주관절과 손목관절이 신전되는지 확인하면 된다. 남은 정상적인 상지의 영구적인 약화와 같은 파괴적인 결과를 미리 인지하기 위해, 만약 C7을 자극했을 때 손 근육이 조금이라도 수축을 한다면 이를 사용해서는 안될 것이다. 반대측 C7의 절반만을 이전술에 사용할 경우에는 대흉근의 최고 수축을 유발하는 쪽을 사용하여 원위부에서 자른다.

척골신경을 유경 혈관 부착 신경 이식술로써 이용한다면, 손목부위에서 자르고 상 척측 측부 동맥 위치(superior ulnar collateral artery level)까지 박리하여 움직일 수 있게 한다. 가장 원위단을 흉부의 피하터널을 이용하여 반대쪽 제7번 경추 신경까지 옮긴 뒤 신경봉합을 시행한다. 혈관부착 신경의 끝에서는 반드시 출혈이 확인되어야 한다. 근위단은 목표로 하는 신경(예, 정중신경)까지 닿을 정도의 길이를 남겨둔 채로 자르고 난 뒤 목표 신경에 봉합하여 준다. 원위 척골 신경의 손상 등으로 혈관화 척골 신경을 사용할 수 없는 경우, 혈관 부착 요골 신경이나 비복 신경 이식술을 이용할 수 있다. 어깨근육을 목표로 하는 경우 척골신경을 유리 혈관화 신경 이식술로 사용할 수 있다. 이 경우, 척골신경의 근위단을 반대쪽 7번 경추 신경에 이어주고, 상 척측 측부 동맥과 정맥은 동측 흉배(thoracodorsal) 동, 정맥이나 반대쪽 목 가로 동,정맥 중(transverse cervical artery and vein) 중 가능한 부분에 이어 준다. 척골신경의 원위단은 상부 흉부부위의 피하터널을 이용하여 쇄골상부나 하부에 목표로 하는 신경이 이어준다(예, suprascapular nerve or posterior cord). 또 다른 방법으로는 비복 신경 이식술을 이용하여 반대쪽 제7번 경추 신경을 목표로 하는 신경으로 이어주는 방법이 있다.

3. 수술 후 관리(postoperative care)

처음 3주간은 수상부위 쪽 상지를 고정해놓는다. 시간이 경과함에 따라 티벨 징후를 통해 신경이 재생되어 내려오는 것

을 추적할 수 있다. 목표 근육까지 길이가 길기 때문에 재생에는 수년이 걸릴 수 있다. 신경의 재지배가 이루어진 후, 신경 이전술을 시행한 근육의 재교육을 시작한다. 대개 반대측 C7을 이용한 신경이전술은 견측 어깨의 내전, 내회전 그리고 신전과 견측 주관절의 신전에 의해 신경이전술을 시행한 근육의 활성화를 시킬 수 있다. 이후 환자가 견측 상지의 움직임 없이도 신경이전술을 시행한 근육들을 움직일 수 있도록 훈련하는 재활프로그램을 시작한다.

4. 합병증

수술 직후, 견측 견관절의 신전과 내전, 주관절의 신전, 전완부의 회내전, 손목관절의 신전과 수부의 운동에 일시적인 결손이 생길 수 있다. 광배근(latissimus dorsi muscle)의 위약감을 종종 호소하기도 한다. 대개 6개월안에 완전히 회복되며, 영구적인 기능 장애는 드물다.^{28,29} 감각 결손은 이 술식을 시행한 모든 환자에서 발견되며 수개월 내 좋아지는 경우도 있고 영구적으로 남는 경우도 있다. 최근에 systematic review³⁰에서는 74%의 환자(897명 중 668명)에서 감각 이상을 호소하였으며, 98%에서 저절로 회복되었다고 하였다. 20%의 환자(592명 중 118명)에서 공여부의 위약감을 호소하였으며, 91%에서 회복되었다. C7 전체를 사용한 경우, 감각 이상은 79% (371명 중 293명), 부분만 사용한 경우 67% (405명 중 271명)로 전체를 사용한 경우에서 더 많았다. 위약감은 전체를 사용한 경우에서 29% (195명 중 56명), 부분 이전술을 시행한 경우 15% (375명 중 58명)로 마찬가지로 전체를 이용한 경우에 더 흔했다. 이러한 결과는 2014년 Tu 등³¹에 의해 발표된 prospective randomized control study의 결과와도 일치한다. C7을 사용한 환자들은 대개 감각이나 운동의 완전한 소실보다는 감각 저하와 위약감을 호소하게 되는데 이는, C7에 의해 지배되는 고유 감각 영역이나 단일 근육이 없기 때문이다. C7에서 나오는 신경은 대개 종말 분지로 가기 전에 다른 신경근과 섞이게 된다.

드물기는 하지만 약 2% 정도의 환자에서는 영구적인 장애가 남을 수 있다.^{27,29,31-35} 이 중, 2명에서는 수부 근육의 위약감이 3등급 이하로 떨어져 건 이전술을 시행하였다는 보고도 있었다.^{27,31} 수부의 내재근은 C8과 T1의 지배를 받기 때문에³⁶, 이러한 경우는 술기 자체의 문제보다는 해부학적 변이가 그 이유가 될 수 있다.

반대쪽의 C7 신경 이전술을 계획하고 있다면, 이러한 합병증과 수술로 얻을 수 있는 결과에 대해 환자와 환자 가족과 충분한 논의가 선행되어야 한다. 문헌상으로는 합병증은 드물다고 하지만, 항상 정상쪽 팔에 합병증이 발생할 수 있는 가능성

이 존재한다. 이러한 잠재적인 위험과 합병증에 대한 충분한 이해와 동의 없이는 절대로 이 수술을 시행해서는 안 된다.

5. 수술의 결과

1998년에 Gu 등²⁸은 3년 추시에서 8명 중 5명에서 3등급 이상의 손목굴곡력과 수지굴곡력의 회복을 보고하였다. 가장 최근인 2013년 보고에서는 7년 추시에서 51명 중 25명의 환자에서 3등급 이상의 손목굴곡과 수지굴곡력을 회복했다고 보고하였다³⁷. 총 상완신경총 손상 환자에서 무지구근의 재신경화는 5년 추시에서 32명 중 5명에서 회복을 보고하였다³⁸.

하지만 96명의 환자를 대상으로 한 보고에서는 3년 추시에서 오직 20%-30%의 환자만이 유의한 수부의 기능을 회복하였다고 보고하였다³⁹. Sammer 등²⁷의 보고에 의하면, 40개월 추시에서 15명 중 단 한명도 기능적인 쥐기 동작을 회복하지 못하였다고 하였다. 최근의 systematic review³⁰에 의하면 전체적으로 3등급 이상의 근력 회복은 절반 이하라고 하였다(손목굴곡, 3등급 38%; 4등급 11%; 수지굴곡, 3등급 36%; 4등급 7%). 하지만 감각 회복은 절반이상에서 3등급 이상으로 회복되었다(56%).

해부학적으로 12개월에서 18개월이 지나면 탈신경화 된 근육은 위축되고 운동 종말판(motor end plate)는 소실되는 것으로 알려져 있다⁴⁰. C7을 이용한 신경 이전술은 목표한 근육까지 신경의 축삭이 재생되기 위해서는 30 cm 이상의 거리를 건너가야 한다⁴¹. 축삭은 하루에 1 mm 정도 재생되기 때문에, 30 cm까지 재생되기 위해서는 10개월 이상이 소요된다. 또 다른 문제로는, 환자가 3등급 이상의 근력을 회복하더라도, 기능적으로 손을 사용할 수 있을 정도가 되느냐의 문제이다. 첫째로, 수부의 내인근이 소실된 상태로, 중력에 저항하여 수지를 굴곡할 수 있겠는가에 대한 문제이다. 둘째로, 대부분의 환자가 반대쪽 C7의 지배를 받는 근육을 활성화 시키지 않고, 수지의 독립적인 움직임일 할 수 있느냐의 문제이다. 건측 어깨와 팔꿈치의 운동을 환측의 수지의 기능으로 전환되는 것에는 뇌가소성 과정이 필요한데 이 과정이 어렵고 시간이 많이 걸린다. 그러므로 환자의 운동기능회복을 단순히 등급으로 평가하는 것은 환자가 느끼는 회복의 정도를 반영한다고 보기 어렵다.

결론

상완 신경총 손상에서 신경 이전술의 역할은 점점 커지고 있다. 주관절 상부에 대해서는 이미 좋은 결과들이 많이 보고되었으며, 점차 주관절 하부와 수부 기능의 회복에서도 좋은

결과를 얻기 위한 연구들이 진행되고 실정이다. 만족할만한 기능 회복을 보여주지 못하는 경우도 있지만, 지난 수년간의 발전은 수술 결과를 상당히 개선시켰으며, 현재에도 활발한 연구가 진행되고 있는 바 앞으로 그 발전이 주목되는 분야이다.

CONFLICT OF INTEREST

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

REFERENCES

1. Tuttle HK. Exposure of the brachial plexus with nerve-transplantation. *JAMA*. 1913;61:15-7.
2. Bertelli JA, Ghizoni MF. Transfer of the accessory nerve to the suprascapular nerve in brachial plexus reconstruction. *J Hand Surg Am*. 2007;32:989-98.
3. Suzuki K, Doi K, Hattori Y, Pagsaligan JM. Long-term results of spinal accessory nerve transfer to the suprascapular nerve in upper-type paralysis of brachial plexus injury. *J Reconstr Microsurg*. 2007;23:295-9.
4. Cardenas-Mejia A, O'Boyle CP, Chen KT, Chuang DC. Evaluation of single-, double-, and triple-nerve transfers for shoulder abduction in 90 patients with supraclavicular brachial plexus injury. *Plast Reconstr Surg*. 2008;122:1470-8.
5. Chuang DC, Lee GW, Hashem F, Wei FC. Restoration of shoulder abduction by nerve transfer in avulsed brachial plexus injury: evaluation of 99 patients with various nerve transfers. *Plast Reconstr Surg*. 1995;96:122-8.
6. Malessy MJ, de Ruyter GC, de Boer KS, Thomeer RT. Evaluation of suprascapular nerve neurotization after nerve graft or transfer in the treatment of brachial plexus traction lesions. *J Neurosurg*. 2004;101:377-89.
7. Uerpaiojkit C, Leechavengvongs S, Witoonchart K, Malungpaishorpe K, Raksakulkiat R. Nerve transfer to serratus anterior muscle using the thoracodorsal nerve for winged scapula in C5 and C6 brachial plexus root avulsions. *J Hand Surg Am*. 2009;34:74-8.
8. Songcharoen P, Mahaisavariya B, Chotigavanich C. Spinal accessory neurotization for restoration of elbow flexion in avulsion injuries of the brachial plexus. *J Hand Surg Am*. 1996;21:387-90.
9. Merrell GA, Barrie KA, Katz DL, Wolfe SW. Results of nerve

- transfer techniques for restoration of shoulder and elbow function in the context of a meta-analysis of the English literature. *J Hand Surg Am.* 2001;26:303-14.
10. Oberlin C, Beal D, Leechavengvongs S, Salon A, Dauge M, Sarcy J. Nerve transfer to biceps muscle using a part of ulnar nerve for C5–C6 avulsion of the brachial plexus: anatomical study and report of four cases. *J Hand Surg Am.* 1994;19:232-7.
 11. Leechavengvongs S, Witoonchart K, Uerpairojkit C, Thuvathakul P, Ketmalasiri W. Nerve transfer to biceps muscle using a part of the ulnar nerve in brachial plexus injury (upper arm type): a report of 32 cases. *J Hand Surg Am.* 1998;23:711-6.
 12. Sungpet A, Suphachatwong C, Kawinwonggowit V, Patradul A. Transfer of a single fascicle from the ulnar nerve to the biceps muscle after avulsions of upper roots of the brachial plexus. *J Hand Surg Br.* 2000;25:325-8.
 13. Teboul F, Kakkar R, Ameer N, Beaulieu JY, Oberlin C. Transfer of fascicles from the ulnar nerve to the nerve to the biceps in the treatment of upper brachial plexus palsy. *J Bone Joint Surg Am.* 2004;86:1485-90.
 14. Sedain G, Sharma MS, Sharma BS, Mahapatra AK. Outcome after delayed Oberlin transfer in brachial plexus injury. *Neurosurgery.* 2011;69:822-7.
 15. Liverneaux PA, Diaz LC, Beaulieu JY, Durand S, Oberlin C. Preliminary results of double nerve transfer to restore elbow flexion in upper type brachial plexus palsies. *Plast Reconstr Surg.* 2006;117:915-9.
 16. Mackinnon SE, Novak CB, Myckatyn TM, Tung TH. Results of reinnervation of the biceps and brachialis muscles with a double fascicular transfer for elbow flexion. *J Hand Surg Am.* 2005;30:978-85.
 17. Carlsen BT, Kircher MF, Spinner RJ, Bishop AT, Shin AY. Comparison of single versus double nerve transfers for elbow flexion after brachial plexus injury. *Plast Reconstr Surg.* 2011;127:269-76.
 18. Ray WZ, Pet MA, Yee A, Mackinnon SE. Double fascicular nerve transfer to the biceps and brachialis muscles after brachial plexus injury: clinical outcomes in a series of 29 cases. *J Neurosurg.* 2011;114:1520-8.
 19. Leechavengvongs S, Witoonchart K, Uerpairojkit C, Thuvathakul P. Nerve transfer to deltoid muscle using the nerve to the long head of the triceps, part II: a report of 7 cases. Nerve transfer to biceps muscle using a part of the ulnar nerve in brachial plexus injury (upper arm type): a report of 32 cases. 2003;28:633-8.
 20. Bahm J, Noaman H, Becker M. The dorsal approach to the suprascapular nerve in neuromuscular reanimation for obstetric brachial plexus lesions. *Plast Reconstr Surg.* 2005;115:240-4.
 21. Gu YD. Cervical nerve root transfer from the healthy side in the treatment of brachial plexus root avulsion. *Zhonghua Yi Xue Za Zhi.* 1989;69:563-5.
 22. Chuang DC, Wei FC, Noordhoff MS. Cross-chest C7 nerve grafting followed by free muscle transplantations for the treatment of total avulsed brachial plexus injuries: a preliminary report. *Plast Reconstr Surg.* 1993;92:717-25.
 23. Chuang DC. Neurotization procedures for brachial plexus injuries. *Hand Clin.* 1995;11:633-45.
 24. Gu Y, Xu J, Chen L, Wang H, Hu S. Long term outcome of contralateral C7 transfer: a report of 32 cases. *Chin Med J (Engl).* 2002;115:866-8.
 25. Gu YD. Contralateral C7 root transfer over the last 20 years in China. *Chin Med J (Engl).* 2007;120:1123-6.
 26. Oberlin C, Durand S, Belheyyar Z, Shafi M, David E, Asfazadourian H. Nerve transfers in brachial plexus palsies. *Chir Main.* 2009;28:1-9.
 27. Sammer DM, Kircher MF, Bishop AT, Spinner RJ, Shin AY. Hemi-contralateral C7 transfer in traumatic brachial plexus injuries: outcomes and complications. *J Bone Joint Surg Am.* 2012;94:131-7.
 28. Gu YD, Chen DS, Zhang GM, et al. Long-term functional results of contralateral C7 transfer. *J Reconstr Microsurg.* 1998;14:57-9.
 29. Songcharoen P, Wongtrakul S, Mahaisavariya B, Spinner RJ. Hemi-contralateral C7 transfer to median nerve in the treatment of root avulsion brachial plexus injury. *J Hand Surg Am.* 2001;26:1058-64.
 30. Yang G, Chang KW, Chung KC. A systematic review of outcomes of contralateral C7 for the treatment of traumatic brachial plexus injury: part 2-donor-site morbidity of contralateral C7 transfer for traumatic brachial plexus injury. *Plast Reconstr Surg.* 2015;136:480e-489e.
 31. Tu YK, Tsai YJ, Chang CH, Su FC, Hsiao CK, Tan JS. Surgical treatment for total root avulsion type brachial plexus injuries by neurotization: a prospective comparison study between total and hemicontralateral C7 nerve root transfer. *Microsurgery.* 2014;34:91-101.
 32. Liu J, Pho RW, Kour AK, Zhang AH, Ong BK. Neurologic deficit and recovery in the donor limb following cross-C7 transfer in brachial-plexus injury. *J Reconstr Microsurg.* 1997;13:237-42.

33. Chuang DC, Cheng SL, Wei FC, Wu CL, Ho YS. Clinical evaluation of C7 spinal nerve transection: 21 patients with at least 2 years' follow-up. *Br J Plast Surg.* 1998;51:285-90.
34. Sungpet A, Suphachatwong C, Kawinwonggowit V. Sensory abnormalities after the seventh cervical nerve root transfer. *Microsurgery.* 1999;19:287-8.
35. Wang SF, Li PC, Xue YH, Yiu HW, Li YC, Wang HH. Contralateral C7 nerve transfer with direct coaptation to restore lower trunk function after traumatic brachial plexus avulsion. *J Bone Joint Surg Am.* 2013;95:821-7.
36. Kimura J. Intrinsic hand muscles are innervated by C8 and T1, not C6 and C7, roots. *Ann Thorac Surg.* 2000;69:665.
37. Gao KM, Lao J, Zhao X, Gu YD. Outcome of contralateral C7 nerve transferring to median nerve. *Chin Med J (Engl).* 2013;126:3865-8.
38. Wang L, Zhao X, Gao K, Lao J, Gu YD. Reinnervation of thenar muscle after repair of total brachial plexus avulsion injury with contralateral C7 root transfer: report of five cases. *Microsurgery.* 2011;31:323-6.
39. Waikukul S, Orapin S, Vanadurongwan V. Clinical results of contralateral C7 root neurotization to the median nerve in brachial plexus injuries with total root avulsions. *J Hand Surg Br.* 1999;24:556-60.
40. Gorio A, Carmignoto G, Millesi H, Mingrino S. Reformation, maturation and stabilization of neuromuscular junctions in peripheral nerve regeneration. In: Gorio A, editor. *Posttraumatic peripheral nerve regeneration.* New York: Raven Press; 1981. 481-92.
41. Lin H, Lv D, Hou C, Chen D. Modified C-7 neurotization in the treatment of brachial plexus avulsion injury. *J Neurosurg.* 2011;115:865-9.

상지 기능 회복을 위한 신경 이전술

이승후 · 이영호

서울대학교병원 정형외과

정상적인 신경을 손상된 신경의 원위부에 이어 줌으로써 손상된 신경을 재생시키는 방법을 신경 이전술(nerve transfer) 이라고 한다. 어떤 말초 신경의 근위부가 완전히 손상되어, 신경을 이어줄 수 없는 경우에 시행되는 일종의 구제 수술이다. 상완 신경총 손상이 경추 신경근 견열 손상 등으로 척수 내의 전각세포 등이 파괴된 경우는 신경 이식술만으로는 신경을 회복시키기 어렵다. 이러한 경우 상완 신경총 주위의 정상 신경을 이전시켜 상지 기능을 회복시키는 수술법을 사용할 수 있다. 기존 연구들에 의하면 주관절 상부의 기능에 대해서는 높은 회복율이 보고되고 있으며, 최근에는 주관절 이하 부위 뿐 아니라 수부 운동기능까지도 회복시키려고 노력하고 있다. 이에 본 종설에서는 상지 기능의 회복을 위해 시행될 수 있는 신경 이전술의 종류와 수술 술기, 수술의 결과, 합병증 등에 대해 다루고자 한다.

색인단어: 상완신경총, 신경 이전술, 신경화, 상지 재건

접수일 2017년 8월 14일 **수정일** 1차: 2017년 9월 1일, 2차: 2017년 9월 6일

게재확정일 2017년 9월 7일

교신저자 이영호

서울특별시 종로구 대학로 101

서울대학교병원 정형외과

TEL 02-2072-0894 **FAX** 02-740-2718

E-mail orthoyhl@snu.ac.kr