大 韓 微 細 手 術 學 會 誌
Vol. 21, No. 2, November, 2012

천공지기저 프로펠러 피판술을 이용한 하지 재건

가톨릭대학교 의과대학 성빈센트병원 정형외과

허성우 · 배재호 · 송주현 · 이주엽

— Abstract —

Perforator-Based Propeller Flap for Lower Extremity Reconstruction

Sung-Woo Huh, M.D., Jae-Ho Bae, M.D., Joo-Hyoun Song, M.D., Joo-Yup Lee, M.D.

Department of Orthopedic Surgery, St. Vincent's Hospital The Catholic University of Korea

Purpose: To report the clinical results of the perforated-based propeller flap for lower extremity soft tissue reconstruction.

Materials and Methods: Between January 2010 and June 2012, a total of 16 defects in the lower extremities were covered with perforator-based propeller flaps. Retrospective data for location and size of the defect, flap dimension, pedicle artery, pedicle rotation, complications were obtained.

Results: Peroneal artery-based perforator flap were used in eleven cases, posterior tibial artery-based perforator flap in two cases, anterior tibial artery-based perforator flap in one case and medial plantar artery-based perforator flap in two cases. The average size of the flaps was 63 cm^2. The marginal skin necrosis of the flaps as a complication was developed in two cases, one of which was covered with split-thickness skin graft. There were no functional deficits from the donor site.

Conclusion: For the reconstruction of lower extremities, the perforator-based propeller flap could be a reasonable alternative as it is a simple, safe and versatile technique.

Key Words: Lower extremity reconstruction , Perforator flap, Propeller flap

서 론

하지, 특히 하퇴부는 외상이나 수술 후 합병증 혹은 화상 등으로 뼈나 건의 노출이 종종 발생하게 된다[1]. 또한 피부 및 근육 등 연부조직의 양에 제한이 있고, 상대적으로 이동성이 작아 국소 피판술이 실패할 가능성이 높다. 이런 이유로 하퇴부에는 비록 작은 크기의 결손부가 발생하더라도 유리 피판술을 요할 경우가 많은데, 미세수술의 발달로 다양한 방법의 재건술이 소개되고 있으며, 그 결과 또한 만족할 만하나 여전히 난제로 남아있는 영역이기도 하다. 국소 임의 피판술(local random pattern flap)은 비교적 쉬운 술기로 여길 수 있으나

※통신저자: 이 주 엽
경기도 수원시 팔달구 지동 93
가톨릭대학교 성빈센트병원 정형외과
Tel: 031-249-7186, Fax: 031-254-7186, E-mail: jylos1@gmail.com

공여부의 크기에 제한이 있으며, 이동 가능한 범위가 작은 것이 단점이다[2]. 유리 피판술(free flap)은 충분한 연부조직을 제공하며, 혈액 공급 및 결손부의 위치에 따른 제한이 적으나, 술기가 까다롭고 이로 인한 수술 시간의 연장, 수술 후 관리면에 있어 많은 제약이 따를 수 있다[3]. Kroll 등[4]이 천공지 피판술을 본격적으로 알리면서 초기엔 유리 피판술의 형태로 적용이 되었으나, 천공지에 대한 해부학의 발전과 임상 경험의 누적으로 천공지를 이용한 국소 피판술의 경우엔 풍부한 혈액공급이 가능하게 되었으며, 천공지 길이에 따라 달라질 수는 있겠지만 임의 피판술(random subcutaneous flap) 보다 넓은 이동 범위를 가질 수 있게 되었다[5].

프로펠러 피판술이라는 용어는 1991년 Hyakusoku 등[6]에 의해 최초로 보고되었다. 화상으로 인한 반흔 구축을 해결하기 위해 고안된 방법으로서 피하층을 이용한 임의 피판술(random subcutaneous flap)이었는데, 다만 그 모양이 너비에 비해 길이가 충분히 길어 피판경을 기준으로 두 부분(the two blades of the propeller)으로 구분할 수 있고, 이를 축(pivot point)으로 프로펠러가 회전하듯 피판을 90° 회전시켜 결손부를 재건한 방법이다.

이후 2006년 Hallock[7]은 근막피부 피판(fasciocutaneous flap) 형태의 프로펠러 피판술을 발표하였는데, Hyakusoku가 발표한 것과 다른 점은 천공지를 가진 축피판(Axial pattern flap)이라는 것이다. 또한 회전의 축이 되는 천공지에 대해서 피판의 한 부분이 다른 한 부분과 비대칭을 이루어, 회전을 시켰을 때 큰 부분은 결손부를 덮을 수 있으며, 작은 부분은 큰 부 분을 공여한 부분에 위치하여 공여부의 피부 봉합에 도움을 줄 수 있다. 이것이 일반적으로 알려져 있는 프로펠러 피판술의 가장 흔한 형태이다.

이에 저자들은 천공지 피판술의 한 종류인 천공지기저 프로펠러 피판술[8,9]을 이용하여, 하지에서 보일 수 있는 다양한 결손에 대한 재건술 후 양호한 결과를 얻었기에, 관련된 문헌 고찰과 함께 보고하는 바이다.

대상 및 방법

연구 대상

2010년 1월부터 2012년 6월까지 16명의 환자에서 하지 재건을 위해 천공지기저 프로펠러 피판술을 시행하였다. 10명의 환자에서 하퇴부 원위 1/3에, 2명의 환자에서 족저 부위(sole)에, 그리고 4 명의 환자에서 뒤꿈치(heel)에 연부조직 결손이 있었다. 결손부의 원인으로는 6예가 외상에 의한 만성 개방성 창상이었으며, 6예가 수술 후 발생한 감염에 의한 이차성 결손, 1예가 악성종양 제거술 후 생긴 결손, 3예는 뚜렷한 외상력 없이 당뇨족으로 인한 개방성 창상이었다. 연령분포는 23세부터 71세까지 다양하였으며, 평균 나이는 52.4세였다(Table 1).

수술 방법

마취 후 피부 절개 전, 도플러(handheld Doppler device)를 이용하여 천공지의 위치를 확인하고 표시하였다. 피판은 이들 중 하나를 기준으로 결손부를 고려해 도안하였다. 일반적으로 피판의 길이와 너비는 결손부 보다 큰 것이 좋은데, 피판을 회전 시킨 후 봉합을 하는 과정 중 피판에 가해질 수 있는 인장력을 최소화 하기 위해서다. Georgescu는 피판의 길이는 천공지로부터 결손부의 원위부까지의 길이에 1~2 cm를, 너비는 결손부의 너비에 0.5~1 cm를 추가하여 디자인 할 것을 권장했다[10]. 지혈대 적용 후, 가급적 확대경(loupe)을 사용하며, 근막하층까지 박리하여(subfascial approach) 천공지를 찾았다.

비골 동맥(peroneal artery) 천공지는 장비골근(peroneus longus)과 가자미근(soleus) 사이를 박리하여 찾았으며, 외과(lateral malleolus)로 부터 약 5 cm 근위부에서는 골간막을 뚫고 나오는 천공지를 거의 항상 발견할 수 있었다. 일반적으로 비골 동맥 천공지는 외측부에 5±2개의 천공지를 가지며, 평균 직경은 0.8±0.2 mm 이다[10].

후경골 동맥(posterior tibial artery)의 천공지는 가자미근과 장족지굴곡근(flexor digitorum longus) 사이의 근간막에서 중격천공지(seprocutaneous perforator) 형태나, 가자미근을 통해서는 나오는 근피천공지(musculocutaneous perforator) 형태로 발견할 수 있었는데, 일반적으로 약 10±4개의 천공지를 가지며, 평균 직경은 0.7±0.2 mm 이나 경골 중간 1/3 부위에서는 가장 굵은 천공지로서 1.5 mm에 이르는 것도 발견될 수 있으며, 내과(medial malleolus)의 근위부 5 cm 위치에서도 믿을 만한 중격천공지를 확인할 수 있다[5].

전경골 동맥(anterior tibial artery)의 천공지는 장족지신전근(extensor digitorum longus)과 비골근 사이의 근간막을 따라 원위부로 진행하는 것을 발견할 수 있었다. 대개 6±3개의 천공지를 가지며, 평균 직경은 0.6±0.2 mm 로서 근위부의 천공지가 비교적 크며 근피천공지의 경우 원위부에서는 후경골 동맥이나 비골 동맥의

Table 1. Clinical results of the patients and the flaps

Case	Age/Sex	Location	Etiology of defect	Defect size (cm^2)	Flap size (cm^2)	Originating artery	Pedicle rotation (°)	Donor defect*
1	68/M	Distal third	Postoperative complication (infected bursitis)	5×4	12×4	Peroneal artery	160	N/A
2	54/M	Distal third	Diabetes	6×4	16×5	Ant. tibial artery	160	FTSG
3	43/M	Heel	Postoperative complication (Achilles tendon injury)	7×4	14×4	Peroneal artery	170	N/A
4	62/M	Distal third	Postoperative complication (Infected bursitis)	4×4	10×5	Peroneal artery	160	N/A
5	45/M	Distal third	Posttraumatic defect	5×4	10×5	Peroneal artery	180	N/A
6†	71/M	Distal third	Posttraumatic defect	7×3	17×4	Post. tibial artery	170	FTSG
7	61/M	Sole	Posttraumatic defect	4×3	10×5	Medial plantar artery	180	N/A
8	23/F	Sole	Fibrosarcoma	4×3	15×4	Peroneal artery	160	N/A
9†	40/M	Distal third	Posttraumatic defect	7×5	34×5	Post. tibial artery	180	STSG
10	58/M	Heel	Postoperative complication (Chronic osteomyelitis)	5×4	15×5	Peroneal artery	170	N/A
11	36/M	Distal third	Posttraumatic defect	5×4	10×5	Peroneal artery	150	N/A
12	48/M	Heel	Postoperative complication (Chronic osteomyelitis)	7×5	10×5	Medial plantar artery	180	STSG
13	62/M	Distal third	Postoperative complication (infected bursitis)	6×4	12×5	Peroneal artery	180	FTSG
14	71/M	Heel	Diabetes	4×3	10×4	Peroneal artery	180	STSG
15	34/M	Distal third	Posttraumatic defect	4×3	12×4	Peroneal artery	180	N/A
16	62/M	Distal third	Diabetes	4×4	10×5	Peroneal artery	180	STSG

*FTSG: full thickness skin graft, STSG: split thickness skin graft, N/A: non available (= primary repair)

†This patient (case 6) showed postoperative marginal skin necrosis of flap, which were treated with STSG.

†The donor defect of this patient (case 9) was treated by STSG at postoperative 10 days when postoperative marginal skin necrosis of flap was treated with debridement and closure.

천공지 보다 그 길이가 짧은 경우가 많아 사용에 제한이 많다[10].

내측 족저 동맥(medial plantar artery)은 후경골 동맥의 말단부를 추적하며 무지외전근(abductor hallucis) 근막까지 박리하여 피판을 분리하였다. 이들 천공지의 직경은 0.6~0.8 mm 이며[11], 최근 Yang 등[12]은 뒤꿈치 재건에 이용 시 좋은 결과를 보인다 하였다.

피판경의 이동성을 높일 목적으로 천공지의 길이 확보를 위해 원천혈관(source vessel)까지 박리를 할 수 있지만, 프로펠러 피판술에서는 필요 이상으로 원천 혈관까지 박리할 필요는 없었다[13]. 박리된 천공지들 중 회전의 축이 되는 천공지 선택 시 주의해야 할 점이 있는데 가능한 결손부에 가까운 천공지를 선택해야 피판의 길이가 짧아지고, 이로 인해 피판의 생존 가능성도 증가한다는 것이다[9]. 이렇게 천공지를 선택한 후 불필요한 천공지는 결찰을 하고 피판을 공여부에서 완전히 분리한 후, 지혈대를 감압시켰다. 이 때 피판의 혈액 순환을 도모하기 위해 감압 후 즉시 회전을 시키지 않고 원위치에서 10~15분 가량 기다리며 혈액순환 상태를 확인하였다[8]. 피판을 회전시킬 때는 우선 시계방향으로 회전시켜보고, 이후 반시계 방향으로 회전시키면서 회전의 각도가 적고 혈관의 꺾임(kink)이 없는 혹은 덜한 방향을 택하였다. 결손부와 회전된 피판을 봉합하고 공여부에 생긴 결손부는 일차 봉합을 우선 시도하였으며, 과도한 조직의 긴장이 관찰된 경우 피부 이식을 하였다(Fig. 1).

결 과

천공지는 16예 모두에서 근막피부 피판술을 시행하였고, 평균 추적 관찰 기간은 6개월이었다. 비골 동맥 천공지가 11예에서, 전방 경골 동맥 천공지가 1예, 후방 경골 동맥 천공지는 2예에서, 그리고 내측1 족저 동맥 천공지는 2예에서 사용되었다. 피판의 평균 면적은 63 cm^2이었으며, 평균 회전 각도는 173°였다. 공여부는 9예에서 일

차봉합을 하였으며, 7예에서는 일차봉합이 어려워 피부이식을 하였다. 전 예에서 피판은 생존하였으며, 피판의 완전 괴사가 일어난 경우는 없었다. 16예 중 2예에서 피판 변연부에서 피부 괴사가 관찰되었다(Table 1). 증례 6에서는 피부 괴사의 크기가 약 4×3 cm^2 였으나 변연술 후 진피층이 남아있는 것으로 판단되어 추가적인 피부이식술을 시행하여 양호한 결과를 얻었다. 증례 9에서는 34×5 cm^2 크기의 프로펠러 피판술을 시행 후 발생한 공여부 결손을 이차적 피부 이식술로 치료하고자 하였으나, 수술 후 10병일 째 피판 원위부 경계를 따라 변연에서 괴사가 발생하는 듯 하여, 변연 절제술을 시행하였는데 피판의 긴장이 발생하지 않고도 창상 봉합이 가능하였으며, 동시에 공여부 결손에 대해서 피부이식을 하였다. 최종적으로 2예 모두 양호한 결과를 얻었으며, 전 예에서 피판술로 인한 공여부의 기능적 제한은 관찰되지 않았다. 수술 후 1주일은 침상 안정을 시행하였으며, 2주 째 봉합사를 제거하면서 보행을 시작하였다.

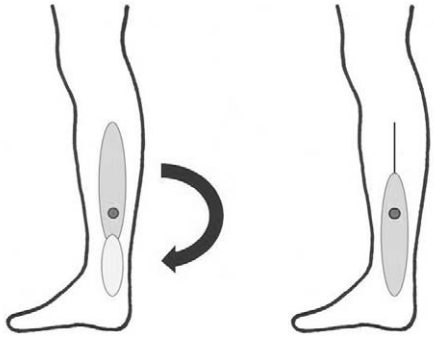

Fig. 1. Schematic drawings of propeller flap design with the perforator proximal to the defect as the pivot point.

증례 1 (Case 1)

68세 남자 환자로 좌측 족근 관절 외과에 점액낭염이 발생하여 수술적 제거술을 시행 받았으나 이차 감염 소견 보여 변연절제술을 시행하였다. 그 결과 5×4 cm^2 크기의 연부조직 결손이 발생하였고 외과 및 비골건이 노출되었다. 술 전 도플러를 이용하여 비골 동맥의 천공지를 확인하고 12×4 cm^2 크기의 방추형 모양의 피판을 일으켜 천공지를 중심으로 160° 회전한 후 결손부를 덮고 공여부는 일차 봉합술을 시행하였다(Fig. 2).

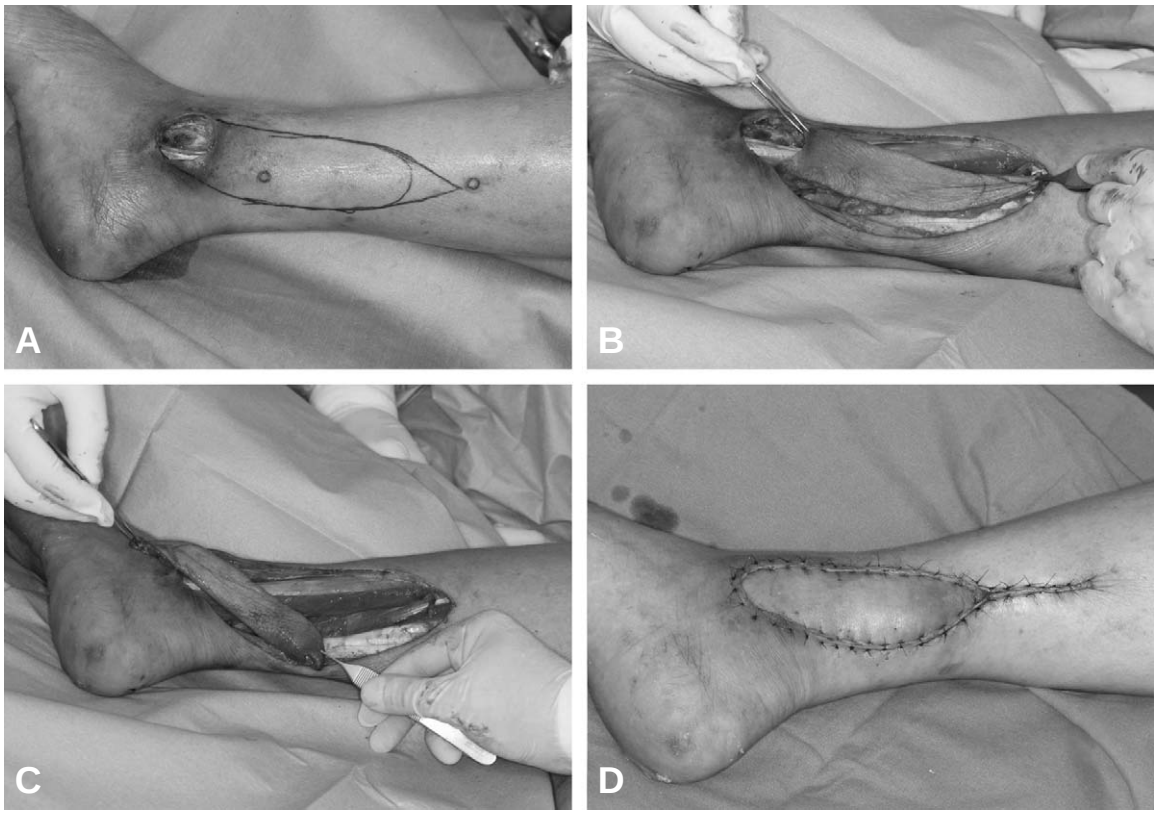

Fig. 2. Coverage of the lateral malleolus defect with peroneal artery perforator propeller flap. **(A)** The perforator is identified and the flap is designed. **(B)** After elevating the flap, **(C)** it is rotated with the perforator as a pivot. **(D)** The flap is inset and proximal wound is closed primarily.

증례 2 (Case 3)

54세 남자 환자로 우측 족근 관절의 전방부에서 6×4 cm^2 크기의 피부 결손을 주소로 방문하였다. 당뇨병으로 20년간 치료 중이었으며, 결손부 사이로 전경골건(Tibialis anterior tendon)이 노출되어 있었다. 신전건과 비골건 사이에서 전경골 동맥 천공지를 찾을 수 있었으며, 피판을 시계방향으로 160° 가량 회전 시킨 후 결손부를 덮고 공여부는 부분적으로 피부이식을 하여 일차봉합 하였다. 수술 후 3개월 째 합병증 없이 미용적으로도 양호한 결과를 얻었다(Fig. 3).

증례 3 (Case 3)

43세 남자 환자로 아킬레스건 파열로 봉합술을 시행 받은 후 감염으로 인한 피부 결손과 아킬레스 건의 노출을 주소로 내원하였다. 변연절제술 후 7×4 cm^2 크기의 연부조직 결손이 발생하였다. 비골 동맥 천공지를 이용하여 170° 회전의 프로펠러 피판술을 시행하였으며, 아킬레스건은 거상한 피판의 근막을 이용하여 재건하였다. 공여부는 일차 봉합을 시행하였다. 수술 후 추가적인 합병증 없이 양호한 결과를 얻었다(Fig. 4).

고 찰

하퇴부는 대퇴부와 달리 피부와 근육의 양에 제한이 있고, 외상이나 이차적인 감염 등에 의한 연부조직 손상이 발생하기 쉬워 뼈나 건, 수술 시 사용된 기구 등의 노출이 흔하게 발생할 수 있다. 이런 경우 단순한 피부이식만으로는 재건이 어려워, 국소 피판술이나 유리 피판술을 필요로 한다[1]. 초창기엔 하퇴부 근위 1/3에 대해서는 내측 혹은 외측 비복근을, 중간 1/3에 대해서는 가자미근을 이용한 근피판을 시행하였으나 근육의 손실을 동반하여 기능적 장애를 유발할 수도 있고, 미용적인 면에서도 단점이 제기 되었다. 더욱이 원위부 1/3에 대해서는 마땅한 근피판이 없어 유리 피판술이 고려되어야 했다[14]. 1981년

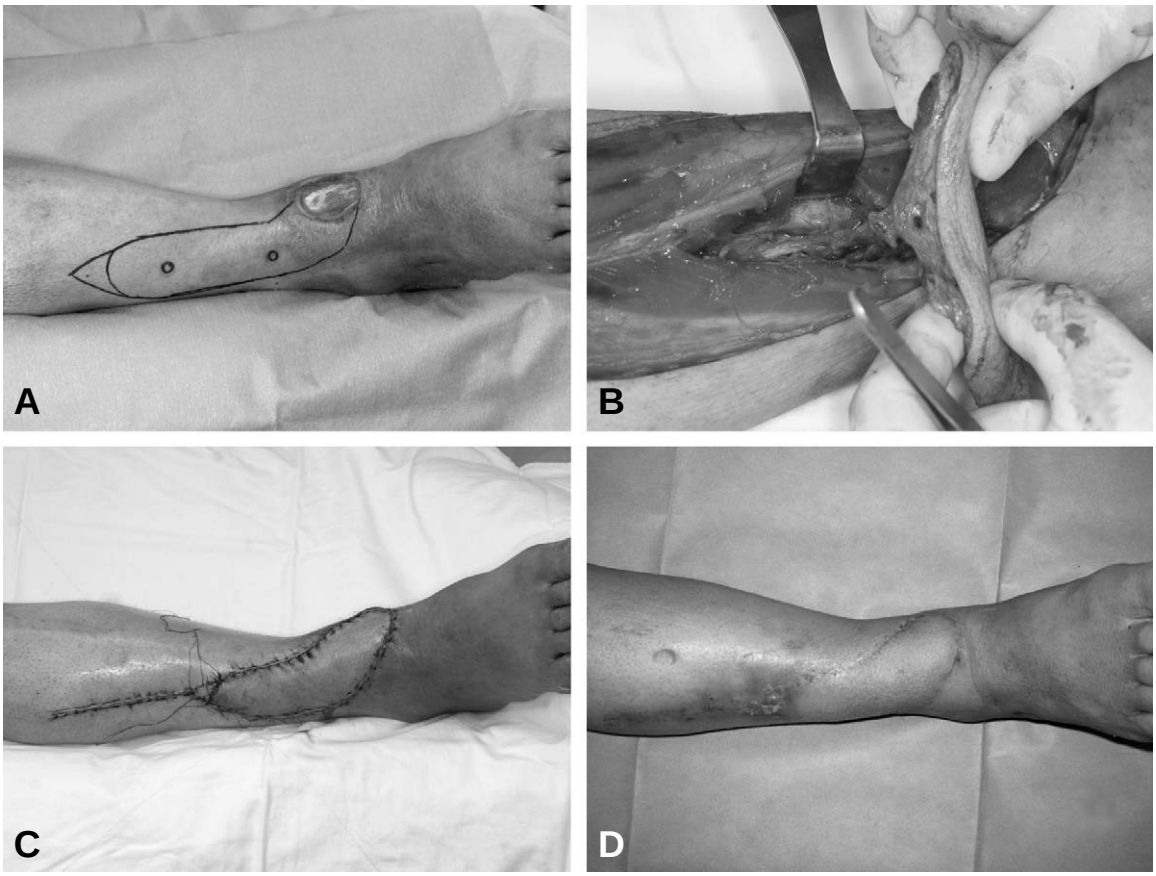

Fig. 3. Coverage of the anterior soft tissue defect of the ankle joint using anterior tibial artery perforator propeller flap. **(A)** The perforator is identified and the flap is designed. **(B)** After identifying the perforator, **(C)** the flap is rotated with the perforator as a pivot. **(D)** The picture shows complete healing of the wound.

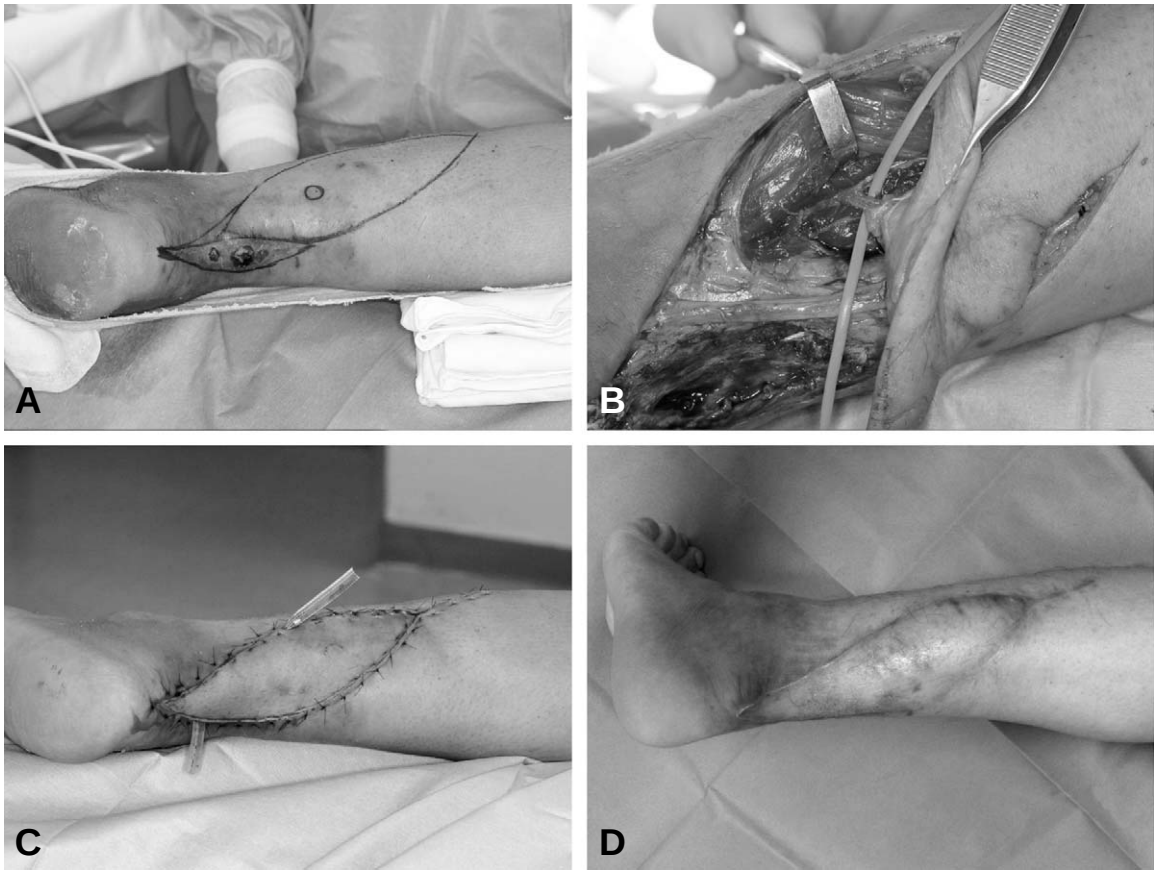

Fig. 4. Coverage of the posterior soft tissue defect with infected Achilles tendon using peroneal artery perforator propeller flap. **(A)** The perforator is identified and the flap is designed accordingly. **(B)** After identifying the perforator, **(C)** the flap is rotated with the perforator as a pivot. **(D)** The picture shows complete healing of the wound.

Ponten[15]은 근막피부피판술을 보고하면서 근육을 보존함으로써 기능적인 부분과 미용적인 부분에서 만족도를 높였다고 하였으나, 이를 통해서는 공여부 크기를 넓히는데 한계가 있었다. 반면 유리 피판술을 통해서는 충분한 범위의 재건이 가능하며, 결손부의 위치에 따른 제한이 적으나, 혈관문합으로 인한 수술의 난이도 및 수술시간 연장, 수술 후 피판의 실패율 등이 문제가 되었다[3]. 이런 과정에서 혈관 해부학이 발전하면서 천공지 피판술이 소개되고 이를 응용한 천공지기저 프로펠러 피판술이 등장하였다[7].

프로펠러 피판술은 새로운 재건 방법으로서 몇 가지 장점을 지니고 있다. 첫째, 천공지를 지니고 있어 수술 과정에서 꺾이거나 견인력에 의한 손상이 없다면 정상적인 혈액 공급이 가능하여 보다 넓은 결손부를 재건할 수 있다. 둘째, 프로펠러 피판술을 시행하는 동안 원천 혈관의 손상도 예방할 수 있고 공여부의 이환도 최소화할 수 있다. 셋째, 유리 피판술과 달리 문합과정이 필요 없으므로 수술 시간을 단축할 수 있고, 수술 후 피판술의 실패율을 크게 낮출 수 있다[3]. 넷째, 피판의 두께가 얇고, 결손부의 피부와 조직적으로나 색깔 등이 흡사한 피부로 재건할 수 있다[13]. 회전 정도에 따라 다양한 위치에서 적용할 수 있지만 상대적으로 재건 방법에 제약이 있는 하퇴부 원위 1/3에서 발생한 내·외과 주변 결손부나 아킬레스건 봉합이나 당뇨병으로 발생한 감염에 의한 연부조직 결손을 재건하는데는 쉽고 유용한 방법이다.

하지만 프로펠러 피판술을 시행하는 과정에서 가장 주의해야 할 것은, 과도한 회전에 의한 천공지의 꼬임이 없어야 하며, 천공지 주변 근막의 박리가 부족하거나, 박리 과정 생기는 혈관의 손상으로 인한 혈액 순환의 장애가 없어야 한다. 이 경우 대부분 동맥 보다는 동반 정맥이 취약하여 정맥 울혈이 보다 빈번하게 생긴다[9]. Wong[16]은 피판 회전시 천공지에 가해지는 손상을 최소화 하기 위해서는 직경이 1 mm인 천공지에 대해서는 그 길이가 3 cm을 넘을 것을 강조하였다. 또한 180° 이상 회전을 해야 하는 경우엔, 반대 방향으로 회전을 시켜 각도를 줄이는 것도 방법이다. 90° 이상의 회전을 요하는 피판술에

Fig. 5. In a propeller flap with elongated shape, blood supply from perforator to a margin would be similar to random pattern flap, which might cause a marginal skin necrosis of the flap (case 6)

서 혈전 여부는 유리 피판술에서와 같이 수술 후 첫 72시간 동안이 중요하므로 예방적으로 수술 후 3~5일간 항혈전제를 사용하는 것도 추천한다[3].

프로펠러 피판술은 하나의 천공지를 이용하는 것이기 때문에 피판의 길이가 너비에 비해 많이 길어질 경우, 해부학적 구조에 따라서는 피판의 변연부 두께가 얇아질 수도 있으며, 혹은 축성 피판술임에도 불구하고 변연부의 혈액 공급이 임의 피판술에서와 같은 과정을 겪을 수 있어 피부 괴사에 취약함을 보일 수 있다(Fig. 5). 이로 인한 피판술의 실패를 줄이기 위해서는 결손부와 가까운 곳의 천공지를 택하여 피판이 15 cm 이상 길게 도안 되는 것을 피해야 한다. 불가피하게 피판이 길어질 수 밖에 없다면 프로펠러 피판술을 시행하면서 결손부로 회전된 피판 변연부에서는 다른 천공지를 이용하여 결손부의 혈관과 추가적인 문합을 하는 방법도 고려할 수 있다[9].

결 론

하지의 연부조직 결손을 위한 재건 방법으로 천공지기저 프로펠러 피판술은 비교적 간단하고, 안전하며, 유리피판술을 대체할 수 있는 효과적인 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1) Shin IS, Lee DW, Rah DK, Lee WJ. Reconstruction of pretibial defect using pedicled perforator flaps. Arch Plast Surg. 2012; 39: 360-6.
2) Rad AN, Singh NK, Rosson GD. Peroneal artery perforator-based propeller flap reconstruction of the lateral distal lower extremity after tumor extirpation: case report and literature review. Microsurgery. 2008; 28: 663-70.
3) Ayestaray B, Ogawa R, Ono S, Hyakusoku H. Propeller flaps: classification and clinical applications. Ann Chir Plast Esthet. 2011; 56: 90-8.
4). Kroll SS, Rosenfield L. Perforator-based flaps for low posterior midline defects. Plast Reconstr Surg. 1988; 81: 561-6.
5) Schaverien M, Saint-Cyr M. Perforators of the lower leg: analysis of perforator locations and clinical application for pedicled perforator flaps. Plast Reconstr Surg. 2008; 122: 161-70.
6) Hyakusoku H, Yamamoto T, Fumiiri M. The propeller flap method. Br J Plast Surg. 1991; 44: 53-4.
7) Hallock GG. The propeller flap version of the adductor muscle perforator flap for coverage of ischial or trochanteric pressure sores. Ann Plast Surg. 2006; 56: 540-2.
8) Teo TC. The propeller flap concept. Clin Plast Surg. 2010; 37: 615-26, vi.
9) Pignatti M, Ogawa R, Hallock GG, Mateev M, Georgescu AV, Balakrishnan G et al. The “Tokyo” consensus on propeller flaps. Plast Reconstr Surg. 2011; 127: 716-22.
10) Georgescu AV. Propeller perforator flaps in distal lower leg: evolution and clinical applications. Arch Plast Surg. 2012; 39: 94-105.
11) Lai CH, Lai CS, Huang SH, Lin SD, Chang KP. Free medial plantar artery perforator flaps for the resurfacing of thumb defects. Ann Plast Surg. 2010; 65: 535-40.
12) Yang D, Yang JF, Morris SF, Tang M, Nie C. Medial plantar artery perforator flap for soft-tissue reconstruction of the heel. Ann Plast Surg. 2011; 67: 294-8.
13) Mateev MA, Kuokkanen HO. Reconstruction of soft tissue defects in the extremities with a pedicled perforator flap: series of 25 patients. J Plast Surg Hand Surg. 2012; 46: 32-6.
14) Lee TH CJ, Lee JH, Kim HH. Lower extremity reconstruction of soft tissue defects with perforator island flap. J Korean Soc Plast Reconstr Surg. 2005; 32: 435.
15) Ponten B. The fasciocutaneous flap: its use in soft tissue defects of the lower leg. Br J Plast Surg. 1981; 34: 215-20.
16) Wong CH, Cui F, Tan BK, Liu Z, Lee HP, Lu C et al. Nonlinear finite element simulations to elucidate the determinants of perforator patency in propeller flaps. Ann Plast Surg. 2007; 59: 672-8.