

디지털 투명교정장치의 임상적 문제점 및 그 해결

배기선

선부부치과교정과의원

ORCID ID

Gi-Sun Bae,  <https://orcid.org/0009-0001-6746-4761>

ABSTRACT

Clinical limitations and its solutions of the digital clear aligner treatment

Gi-Sun Bae

Sun Orthodontic clinic

The digital clear aligner is widely used due to the convenience and efficiency of simultaneously manufacturing the entire aligner used in treatment with a single setup. However, due to the characteristics of clear aligners, which make it difficult to effectively transmit orthodontic force to the teeth compared to traditional brackets, the teeth do not move as planned, resulting in repeated refinements and increased treatment periods. The following measures have been proposed to solve these problems:

1. Partial production of Clear aligner: Manufacturing the entire aligner not all at once but in stages, typically 8-10 at a time, allows for more precise management of the individual tooth movement. Additionally, adjustments can be made promptly if treatment does not go as planned.
2. Direct 3D printing of clear aligners: Direct 3D printing offers the possibility of creating more efficient aligners that adhere more closely to the teeth than vacuum-formed ones. Moreover, effective tooth movement can be achieved by adjusting the aligner's thickness or designing structures to apply orthodontic forces as required.
3. Digital hybrid treatment: Using 3D-printed brackets with two strands of NiTi wire allows for rapid and accurate tooth movement with gentle force. In particular, the ability to manufacture clear aligners and 3D-printed brackets together in a single digital setup enables various clinical applications. This not only shortens the treatment period but also allows for better treatment results.

Key words : Digital clear aligner, 3D-printed bracket, hybrid orthodontic treatment.

Corresponding Author

Gi-Sun Bae DDS, MSD, Ph.D

Sun Orthodontic clinic, 5F, 931, Joongang-daero, Busanjin-Gu, Busan, 467210, KOREA

Tel : +82-51-868-8528 / Fax : +82-51-966-1682 / E-mail : subboat@naver.com

I. 서론

디지털 투명교정장치는 다음과 같은 과정을 통해 제작된다.

- 1) 환자의 인상 혹은 구강내 디지털 스캔으로부터 3차원 모형을 형성
- 2) 디지털 모형상에서 개개 치아들을 분리해 낸 후 치료 목표에 맞게 적절한 교합을 이루도록 배열한 셋업 모형 제작
- 3) 초기 모형에서 최종 셋업 모형까지 개개 치아들의 전체 이동량을 계산한 후 이를 장치당 최대 이동량으로 나누어 장치의 단계 수를 결정
- 4) 단계별로 만들어진 디지털 모형을 3D 프린터로 각기 출력
- 5) 출력된 단계별 모형에서 진공성형 방식으로 투명 교정장치를 제작

매 단계마다 환자의 인상을 채득하고 다음 단계로의 셋업 모형 제작을 반복해야 했던 아날로그 방식의 투명교정장치와는 달리 디지털 투명교정장치는 한 번의 인상 혹은 디지털 스캔과 한 번의 셋업으로 치료 종료시까지 여러 단계의 투명교정장치를 한꺼번에 제작

할 수 있기 때문에 많은 시간과 노력을 절약할 수 있다는 장점이 있는 반면, 이에 못지 않게 많은 임상적 문제점들을 가지고 있다. 본 저자는 디지털 투명교정장치가 가진 임상적 문제점들과 그 해결 방안에 대해 논의해 보고자 한다.

II. 본론

1. 디지털 교정장치의 임상적 문제점

1) 원래 계획했던 만큼의 치아이동이 잘 일어나지 않는다.

제한된 탄성을 가진 얇은 플라스틱 필름을 치아 전체에 씌워서 힘을 가하는 투명교정장치가 브라켓을 부착하고 교정용 호선을 사용하는 전통적 방식의 교정치료에 비해 치아 이동을 정확하게 이루기 힘들다는 것은 투명교정장치 개발 초기부터 꾸준히 지적되어 온 문제이다¹⁻⁵⁾. 초기에는 매끄러운 치아 표면에 투명교정장치가 효과적으로 교정력을 발휘할 수 없기 때문이라고 생각하여 다양한 형태의 사각형 레진 어태치먼트

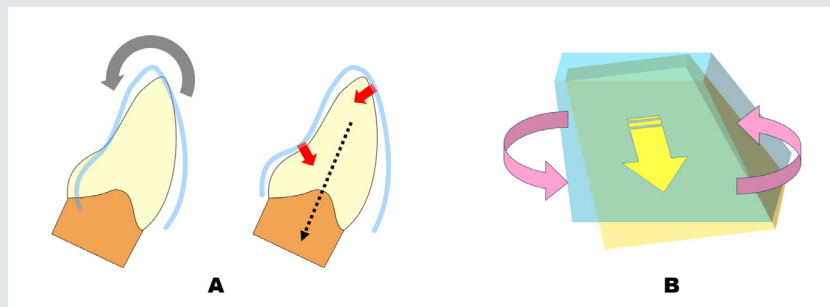


Figure. 1a. 투명교정장치의 변형에 의해 장치 하단이 벌어지며 치아에 함입력이 가해진다.
Figure. 1b. 투명교정장치로 회전을 시도할 때도 함입력이 발생할 수 있다.

를 치아 표면에 부착하는 방법들이 시행 되었지만 기대와는 달리 그리 효과적이지 못하였다⁶⁾. Brezniak⁷⁾에 의해 투명교정장치가 악궁에 장착되어 치아에 힘을 가할 때 투명교정장치의 변형이 일어나며, 특히 치은쪽이 넓게 벌어져서 치아에서 분리되기 때문에 제대로 교정력을 발휘할 수 없는 반면 대부분의 교정력이 절단면 혹은 교합면 쪽에 집중되어 해당 치아의 합입을 유발하게 된다는 사실이 밝혀지면서^{8,9)} 이러한 구조적 문제점을 해결하기 위한 다양한 방법들이 시도되었다(Fig. 1).

가장 널리 언급되는 시도는 단일 재질이던 투명장치용 시트지를 재질이 다른 세 겹의 레이어를 압축한 재질로 바꾸어서 탄성력을 높임으로서 상대적으로 교정력을 부드럽고 길게 유지함과 동시에 투명교정장치 치면에 좀 더 잘 적합되도록 하여 교정력을 좀 더 효과적으로 전달할 수 있도록 한 것이다. 환자의 장치 착용감 개선과 함께 기존 시트지에 비해 치아 이동에 효과적이라는 보고도 있었으나¹⁰⁾ Griffith 등¹¹⁾은 3중 시트지가 기존의 시트지에 비해 치료 효과에 있어 통계학적으로 유의미한 차이를 보이지 않는다고 보고하였다.

또 한 가지는 효과가 떨어진다고 알려진 기존의 사각형 레진 어태치먼트 대신 다양한 각도의 접촉면을 가진 여러 개의 작은 레진 어태치먼트들의 조합을 사용하여 치아를 이동시키는 것이다. 이러한 방법으로는 회전, 경사이동 등 다양한 치아 이동을 훨씬 효과적으로 수행할 수 있음은 물론 이론적으로는 투명교정장치와 같은 가철성 장치로는 언기 힘들다고 생각되어지는 치근 이동까지도 가능하다고 하였다. 이 역시 효과 여부에 대한 다양한 임상적 보고가 있었으나^{12~14)} Karas 등¹⁵⁾은 새로운 어태치먼트가 기존의 사각형 어태치먼트에 비해 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않는다고 보고하였다.

투명교정장치의 치료 효과에 대해 가장 자주 언급되는 연구는 2009년과 2020년 Kravitz 등에 의해 행

해진 일련의 연구일 것이다. 2009년 Kravitz 등¹⁶⁾은 인비절라인으로 전치부를 치료한 환자들의 치료전 계획(Clincheck)과 치료후 모델을 확장, 축소, 합입, 정출, 순설측 경사 및 근원심 경사, 회전 등 치아 이동별로 나누어 비교한 결과 전체적으로 목표했던 이동량의 41% 정도만 움직여서 치료 결과에 대한 예측성이 많이 떨어짐을 보고하였다. 2020년에는 전치열에 걸쳐 동일한 비교를 시행하여 11년 동안 투명장치 재료의 변화 및 다양한 어태치먼트의 개발 등 치료 예측성을 높이기 위한 여러 노력들이 실제 치료결과에 반영되었는지 알아보려고 하였다. 비교 결과는 목표 이동량의 50%로 나타나 11년전의 41%에 비해서는 개선이 이루어 졌지만 여전히 낮은 치료 예측성을 보여준다고 하였다¹⁷⁾. 2021년 Upadhyay 등¹⁸⁾도 지난 20년간 투명교정장치에 대한 다양한 임상 연구를 종합한 결과 치아 이동의 정확성이 50%에 수렴한다고 보고한 바 있으며, Sachdeva 등¹⁹⁾은 병원에서 직접 제작하는 투명교정장치의 치아 이동 정확성 역시 56% 정도로 공장에서 대량 생산하는 투명교정장치와 큰 차이를 보이지 않음을 보고하였다.

2) 반복된 리파인먼트에 의해 비용과 치료기간이 증가된다.

투명교정치료의 결과가 원래 치료계획의 절반 정도 밖에 미치지 못한다면 다시 환자 인상을 채득하거나 디지털 스캔을 한 후 셋업을 해서 투명교정장치를 새로 제작하는 리파인먼트 과정을 거치게 된다. 하지만 리파인먼트의 주 원인이 된, 계획대로 움직이지 않았던 특정 치아나 특정 형태의 치아 이동은 리파인먼트를 통해서도 잘 움직이지 않을 가능성이 높기 때문에 때에 따라서는 두 번째, 세 번째 리파인먼트를 반복해야 하는 일이 발생할 수도 있다. 또한 투명교정장치만으로는 문제 해결이 힘들다고 판단될 때 부분적으로 브라켓을 접착하여 해결해야 하는 경우도 발생하게 된

다. Arqub 등²⁰⁾은 2022년 인비절라인 치료에서 초진 시의 치료 난이도와 리파인먼트의 횟수, 치료 기간간의 연관성에 대한 연구를 통해 전체 388명의 환자 중 리파인먼트가 필요없었던 경우는 단지 33명(8.3%)에 불과했으며 나머지 환자들은 전부 한번 이상의 리파인먼트가 필요했고, 가장 흔한 리파인먼트 횟수는 3번(전체 환자의 58%)였음을 보고하였다. Kravitz 등²¹⁾은 500명의 인비절라인 환자를 대상으로 치료 도중 브라켓으로 전환이 필요했던 환자의 비율과 리파인먼트 횟수, 치료 기간 등을 조사한 결과 인비절라인 치료를 마치기 위해 환자 매 6명당 1명의 비율(17.2%)로 브라켓 접착이 필요한 것으로 보고하였다. 리파인먼트가 필요 없었던 환자의 비율은 단지 6.0%에 불과했으며 평균 리파인먼트 횟수는 2.5회, 전체 투명장치의 개수는 64.1개 였다. 또한 평균 치료기간은 22.8개월로 치료 시작단계에서 예측했던 것에 비해 5.1개월 더 길어졌다고 하였다.

원래 계획과는 달리 리파인먼트가 반복될 경우 전체 치료기간이 계속 증가하게 되어 환자와의 문제를 유발할 수도 있으며, 때로는 추가적인 장치 제작에 따른 비용이 발생할 수 있다. 디지털 투명교정장치의 경우 리파인먼트 비용이 초기비용에 포함되어 있다고는 하지만 리파인먼트의 횟수와 제작 가능한 기간을 치료 시작전에 미리 지정해야 하기 때문에 예상보다 치료 결과가 만족스럽지 못해서 리파인먼트 횟수가 늘어날 경우 추가 비용이라는 문제가 발생하게 된다. 반대로 이미 비용을 지불한 리파인먼트 횟수를 채우기 전에 충분히 치아 배열이 완료되더라도 환불이 되지 않는기 때문에 그냥 비용 손실을 감수하거나 조금 더 정교하게 마무리하자고 환자를 설득하여 불필요한 리파인먼트를 진행하는 일도 발생할 수 있다.

3) 디지털 셋업 고유의 문제점

실제 치아모형을 잘라서 셋업할 때와는 달리 디지털

셋업은 3D 모델링의 기본 포맷인 STL파일이 대상 물체의 표면을 미세한 삼각형들이 모여서 만든 얇은 껍질 형태로 인식하기 때문에 셋업 도중 치아들이 접촉하게 되면 각자의 표면을 통과해서 겹쳐지는 일이 발생하게 된다(Fig. 2). 단순히 셋업 모형 하나만을 제작할 때는 악궁 형태를 따라 개별 치아의 근원심 폭경을 서로 침범하지 못하게 막는 방법 등을 써서 치아끼리 겹치는 문제를 어느 정도 피할 수 있지만, 투명교정장치 제작을 위하여 치료전 3D 모형에서 셋업 모형까지 치아 이동량에 따라 장치 단계를 나누는 과정에서 이러한 침범을 피하기 힘든 경우가 발생하게 된다. 즉 치료전 치아 위치 A로부터 셋업후 치아 위치 B까지 이동 단계를 나눈다고 할 때, 치아간 최단 경로를 따라 치아들이 움직이기 때문에 충생 등에 의해 이동 경로상에 다른 치아가 존재할 경우 그 치아들을 통과하면서 지나가게 된다(Fig. 3a). 이러한 방법으로 3D 프린팅된 중간단계의 모형은 일부 치아들끼리 서로 겹쳐진 상태로 출력되게 되고, 이런 상태의 모형으로 제작된 투명교정장치는 당연히 구강내에 제대로 적합되기도 힘들고 적절한 치아이동을 유발할 수도 없다. 이러한 문제는 투명교정장치 제작전에 단계별 셋업 모형을 주의깊게 관찰하여 서로 겹친 부분들을 해소시켜 주거나 치아 이동경로를 직선 대신 곡선으로 하여 장애물을 회피할 수 있도록 해주는 등의 노력이 필요하지만(Fig. 3b), 대량으로 제작이 진행되는 디지털 투명교정장치의 특성상 각 단계별 모형을 일일이 살펴보고 수정하는 것이 만만치 않은 일이라는 문제점이 있다.

2. 디지털 투명교정장치의 문제점에 대한 해결방안

1) 부분적 투명교정장치 제작

몇 십단계에 이르는 투명교정장치를 모두 사용한 후 치료 목표와 비교해서 치아 이동이 부족한 부분을 대상으로 리파인먼트를 진행하는 것이 일반적이긴 하지

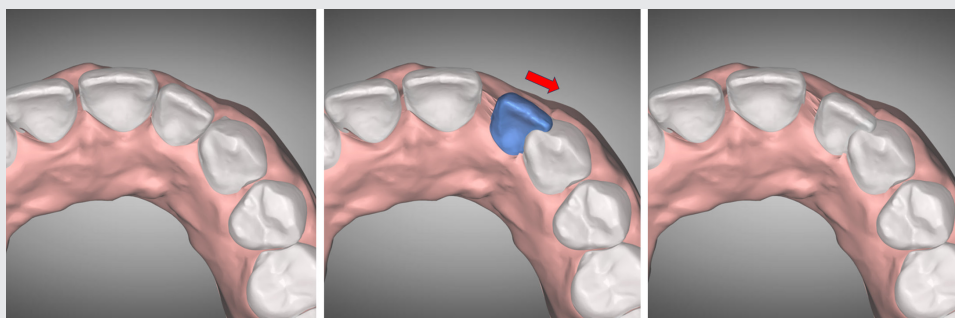


Figure. 2. 디지털 셋업 도중 치아들이 접촉하게 되면 각자의 표면을 통과해서 서로 겹쳐지는 일이 발생하게 된다.

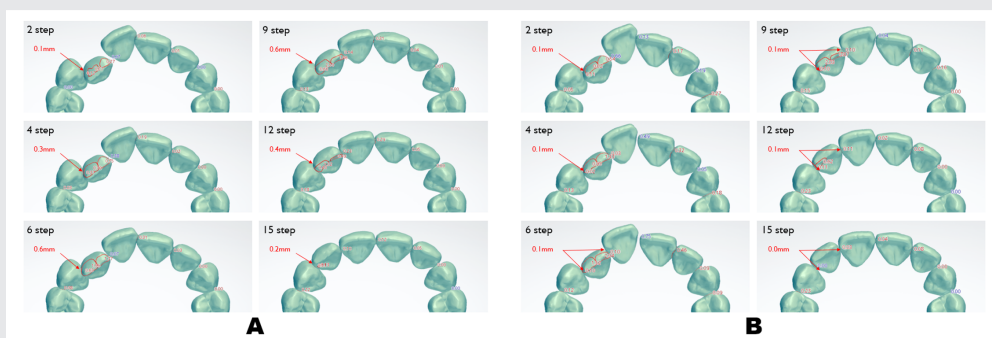


Figure. 3a. 총생이 해소되는 방향으로 우측 측절치가 이동할 때 우측 견치를 통과하면서 이동한다. 4번째 단계의 0.3mm에서부터 6번째와 9번째 단계에서는 0.6mm까지도 겹쳐지는 것을 볼 수 있다.

Figure. 3b. 우측 측절치가 이동하는 동안 우측 견치와 중절치를 이동시켜 치아들이 서로 겹치는 것을 방지하고 있다. 매 단계 치아의 이동을 주의깊게 관찰하고 조절해 주는 것이 필요하다.

만, 이 경우 리파인먼트가 필요한지 하지 않은지 판단하기까지 너무 많은 시간이 걸리는 문제가 존재한다. 따라서 치료 도중 지금 현재의 교정 진행 상태가 원래 계획했던 이동만큼 진행되고 있는지 아닌지 판단할 필요성이 대두되었다. 2008년 Sterental 등²²⁾은 제작사가 전체 투명교정장치를 한꺼번에 술자에게 제공하는 대신 10단계씩 나누어서 제공하고, 술자는 매 10단계

마다 환자의 인상을 다시 채득하여 보내면 제작사에서 이를 치료계획 당시의 해당 치료단계와 비교하여 이동 정도가 일치하고 있는지 아닌지를 판단해주는 개념을 발표하였다. 만약 치료 계획과 일치하면 원래 세트 중 다음 10단계를 보내주고, 만약 단계별 계획과 상당한 불일치가 발견될 경우 새로 셋업을 진행하여 새로운 10단계를 제작하여 보내주는 방식이며 특히 교정

치료가 익숙하지 않은 일반의들을 대상으로 추가 비용을 받고 진행해주고 있다. 이러한 중간 검증 방식을 처음 도입한 인비절라인의 경우 교정장치를 해외로부터 배송받아야 하는 우리나라는 배송비 및 배송에 걸리는 시간적인 문제 때문에 시행하지 못하고 있었다. 하지만 국내 투명교정장치 제작사들은 해외 배송 문제가 없기 때문에 대부분의 회사들에서 유사한 단계별 제작 서비스를 제공하고 있다.

부분적으로 투명교정장치를 제작할 경우 치료 도중에 평가 및 수정이 가능하다는 것 이외에도 몇 가지 장점이 존재한다. 먼저 전체 치아이동을 한꺼번에 시행하는 경우에 비해 치아이동을 부분부분 구간별로 나누어서 시행하게 되면 복잡한 치아 이동을 단순화시킬 수 있고 상대적으로 치료의 난이도를 낮출 수 있다. Arqub 등²⁰⁾에 따르면 치료 시작전 PAR index가 낮을수록 - 즉 더 간단한 치료일수록 - 더 적은 수의 리파인먼트를 필요로 한다고 보고한 바 있다. 또한 앞서 서술한 바와 같이 디지털 투명교정장치의 특성상 장치 제작과정에서 치아들이 움직이면서 서로 겹치는 일이 발생하는 것을 막기 위하여 이동 경로를 곡선으로 하는

등 개개 치아들의 움직임을 조절해야 하는 경우가 있는데, 몇 십개나 되는 전체 장치를 한꺼번에 제작하기 보다는 한 번에 8~10개 정도로 단계를 나눠서 제작할 경우 개개 치아들의 움직임을 조절하는데 있어 많은 시간과 노력을 절약할 수 있다. 무엇보다도 전체 장치를 끝낼 때까지 문제 해결을 미루지 않고 문제가 관찰되는 즉시 overcorrection 등 필요한 조치를 취한 새로운 셋업을 제작함으로써 별도의 리파인먼트 가능성을 최소화 하고 치료기간을 단축할 수 있다는 것이 단계별 장치제작의 가장 큰 장점이라 할수 있다(Fig. 4).

2) 3D 프린터로 투명교정장치를 직접 출력

3D 프린터로 치아 이동 순서에 따라 몇 십개의 셋업 모형들을 출력한 후 이를 각각 열가소성 시트지로 진공 성형하여 제작하는 기존의 디지털 투명장치 제작 방법은 베이스를 포함한 모형 전체를 일일이 출력해야 하고 또 진공 성형과 트리밍 과정을 거쳐야 한다는 점에서 재료 및 시간의 낭비가 심한 제작 과정이라고 할 수 있었다. 따라서 투명하고 탄성이 있는 재질의 레진을 사용하여 3D 프린터로 직접 투명교정장치만을 프

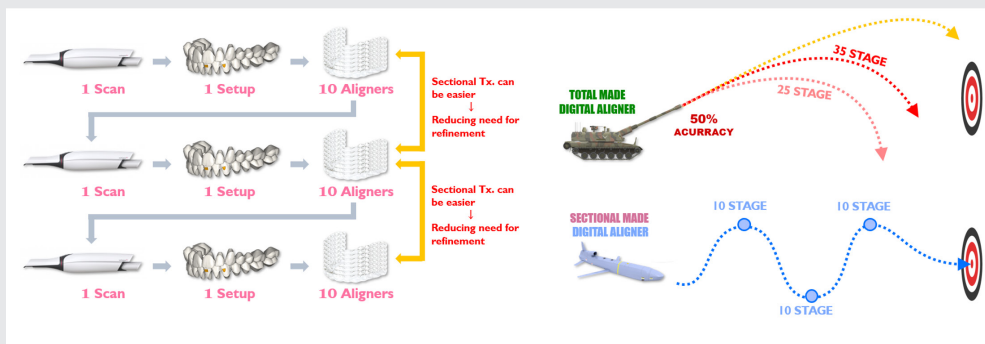


Figure. 4. 부분적 투명교정장치 제작. 디지털 스캔을 여러번 시행해야 한다는 단점이 있지만 전체 치료 단계를 부분별로 나눔으로써 치료의 난이도를 낮추고 문제 발생시 즉각적인 대응이 가능하여 리파인먼트 횟수를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

린팅 해보려는 시도들이 있었다. 초기에는 적절한 재질의 레진 프린팅 재료가 존재하지 않아 많은 시행착오가 있었으나, 최근 투명교정장치를 출력할 수 있는 레진 재료들이 개발 되면서 이를 임상에 적용하기 위한 다양한 노력들이 행해지고 있다^{23,24}.

투명교정장치를 직접 출력하게 되면 진공성형 방식으로 제작할 때에 비해 치면에 완전히 밀착되도록 장치를 출력할 수 있어 좀 더 확실한 치아이동을 이룰 수 있고 상대적으로 레진 에테치먼트의 필요성을 줄일 수 있다. 또한 레진 재료의 특성상 온도 변화에 따라 장치의 경도나 탄성도가 일정 정도 달라지기 때문에 외력에 의해 장치의 변형이 생기더라도 열을 가해 장치 형태를 원래도 되돌리거나(형성 기억) 장치 장착전에 따뜻한 물에 미리 담궈서 부드럽게 만들어 쉽게 장착하게 하고 구강내 온도로 장치의 경도가 증가하면서 교정력을 가하게 하는 것 등 여러 가지로 응용이 가능하다는 등 다양한 장점이 있다.

다만 아직은 출력 방식과 재료의 한계에 따른 파절 가능성 때문에 기존 방식의 투명교정장치에 비해 장치 두께가 두꺼워져서 환자의 불편감이 증가하고 불필요

한 구치부 함입을 유발할 수 있다는 점, 서포트 제거 및 세척, 질소 중합 등 프린팅 후과정이 까다로우며 재료 중합 정도에 따라 장치의 탄성도나 투명도가 달라지거나 비중합된 레진 잔여물에 의한 알러지 유발 가능성이 지적되는 등 아직 여러가지 한계가 존재한다. 특히 투명교정장치를 직접 프린팅할 경우 기존의 투명장치처럼 단일 두께로 장치를 만들 필요가 없기 때문에 교정력이 필요한 부위와 아닌 부위에 따라 장치의 두께를 다르게 하거나 필요한 교정력을 가할 수 있는 별도의 구조물을 디자인 하는 등 다양한 형태로 제작해 볼 수 있는 장점이 있다(Fig. 5). 하지만 아직은 투명장치 형태에 따른 교정력의 변화나 어떠한 형태의 구조물이 필요한지 등에 대한 연구도 대단히 부족할 뿐 아니라 사용할 만한 적당한 디자인 프로그램도 아직 개발중에 있기 때문에 널리 상용화되기에는 조금 시간이 걸릴 것으로 보인다.

3) 디지털 하이브리드 치료

기존의 고정성 교정장치로 치료를 하다가 치료 마지막 단계에 한두 치아의 미세한 토크 조절 등이 필요할

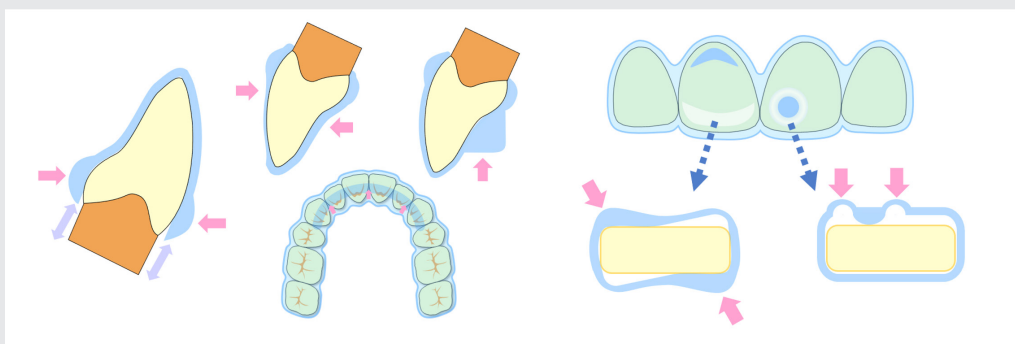


Figure 5. 3D 프린팅 투명교정장치의 다양한 응용. 장치의 일부 두께를 얇게 혹은 두껍게 만들기도 하고 치아 이동을 위한 공간을 부여하거나 치아에 힘을 가할 수 있는 구조물을 투명교정장치 자체에 내장시킬 수 있다.

경우 이를 교정용 호선만으로 해결하는 것보다 장치 제거 후 투명교정장치 한 두 단계를 사용하여 쉽게 해결이 가능한 경우가 많다. 또한 투명교정치료 도중 투명장치만으로는 원하는 이동을 얻기 힘들거나 시간이 너무 많이 걸린다고 생각될 경우 이를 가장 간단히 해결할 수 있는 방법은 브라켓을 몇 개 부착하고 교정용 호선을 사용하는 방법이다. 이처럼 투명교정장치와 고정성 교정장치를 함께 사용하는 하이브리드 치료를 통해 각각의 단점을 보완하여 보다 나은 치료 결과를 얻고 치료기간도 단축시킬 수 있다. 특히 디지털로 투명교정장치를 제작할 경우에는 치료 계획시 제작된 디지털 셋업을 브라켓 부착을 위한 간접 접착트레이 제작에 사용한다거나 브라켓 부착을 위해 제작된 셋업 모형을 이용하여 바로 투명교정장치를 제작하는 등 한번의 셋업 모형 제작만으로 브라켓과 투명교정장치를 모두 만들 수 있어서 시간과 비용적 측면에서도 장점이 있다(Fig. 6).

이러한 디지털 “하이브리드” 치료의 장점을 극대화하기 위하여 3D 프린팅 브라켓이 개발 되었다. 즉 셋업 모형을 제작하고 그 모형 상에 시판되는 일반 브라

켓을 배치한 다음 간접 접착 트레이를 만들어 이를 다시 구강내로 옮기는 기존의 방법 대신 디지털 셋업 모형상에 3D로 브라켓 형태를 디자인하고 이를 직접 3D 프린터로 출력하게 된다²⁵⁾. 3D 프린팅 브라켓의 특징은 다음과 같다(Fig. 7). 첫 번째로 한 개의 각형 슬롯을 가지는 일반적인 브라켓 형태 대신 원형 호선이 들어가는 두 개의 슬롯을 가지고 있다. 3D 프린팅으로 일반적인 형태의 레진 브라켓을 제작할 경우 각형 호선으로 토크와 같이 큰 힘이 가해지면 슬롯이 벌어지거나 파절될 가능성이 높은 반면 두 가닥의 원형 호선을 사용할 경우 상대적으로 작은 교정력으로 동일한 치아 이동을 이룰 수 있기 때문에 파절이나 슬롯 변형의 위험성을 최소화 할 수 있다. 두 번째로 별도의 결찰이 필요없는 클립 형태의 슬롯을 가지고 있다. 일반적인 형태의 슬롯을 3D 프린팅으로 제작할 경우에는 결찰에 사용된 엘라스틱 링의 힘에 의해서도 슬롯이 변형되어 호선이 들어가지 않거나 슬롯이 좁아져서 마찰력이 급격히 증가하게 된다. 또한 클립 형태의 슬롯은 결찰에 의한 마찰력을 최소화 할 수 있기 때문에 치아이동 속도를 높이는 데도 도움이 된다. 마지막으로 브라켓

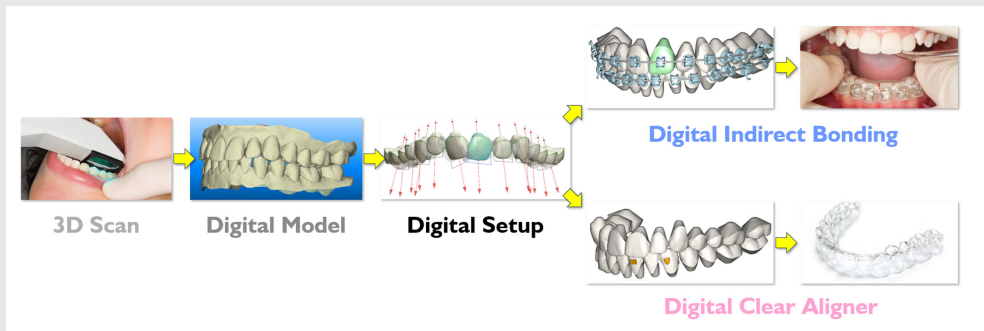


Figure. 6. 하이브리드 교정치료. 한번의 디지털 셋업으로 브라켓 부착을 위한 간접 접착 트레이와 투명교정장치를 함께 제작할 수 있어서 교정치료의 효율성을 높이고 보다 나은 치료결과를 얻을 수 있다.

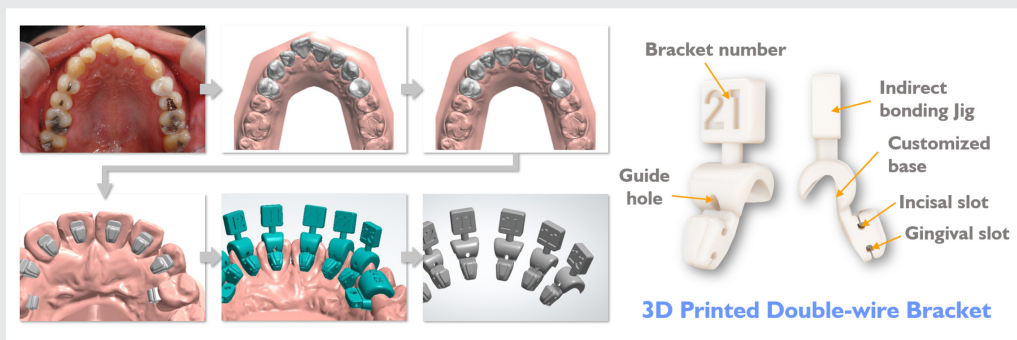


Figure. 7. 3D 프린팅 브라켓. 디지털 셋업 상에서 디자인하여 3D 프린터로 바로 출력한다. NiTi 원형호선 두 가닥이 들어갈 두 개의 클립형 슬롯을 가지고 있으며 접착용 지그가 함께 만들어져 있다.



Figure. 8. 3D 프린팅 브라켓을 이용한 치료방법.

Figure. 8a 치료전 상악의 모습

Figure. 8b 브라켓 접착 후 .010 NiTi 호선을 치은쪽 슬롯에 넣어 확장을 시도한다

Figure. 8c NiTi 호선의 탄성에 의해 상악 좌측 측절치와 우측 견치를 배열할 공간을 확보한다.

Figure. 8d 상악 좌측 측절치와 우측 견치에 브라켓을 부착하고 절단연쪽 슬롯에 .010 NiTi 호선을 넣어 치아 배열을 진행한다.

Figure. 8e 절단연쪽 슬롯에 .012 NiTi 호선을 넣어서 치아 배열을 계속한다.

Figure. 8f 토크 조절을 위해 절단연쪽 슬롯에 .014 NiTi, 치은쪽 슬롯에 .012 NiTi 호선을 삽입한다.

Figure. 8g 엘라스틱 체인으로 전치부 공극을 폐쇄하고 치료를 마무리한다.

Figure. 8h 브라켓을 제거하고 고정정 유지장치를 부착한다.

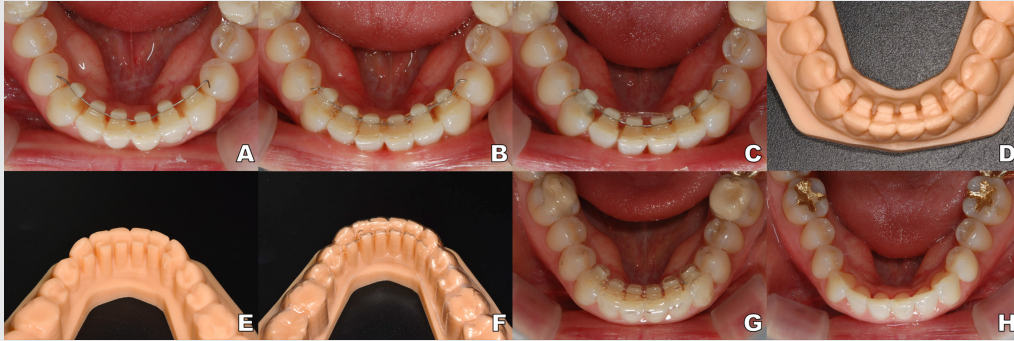


Figure. 9. 3D 프린팅 브라켓과 투명교정장치를 이용한 하이브리드 치료.
 Figure. 9a 3D 프린팅 브라켓으로 하악 전치 배열을 시행하는 과정에서 환자의 혀 내밀기 습관에 의해 전치부 공극이 발생하였다.
 Figure. 9b,c 탄성 체인을 사용하여 공극을 폐쇄하려 하였으나 환자의 습관이 고쳐지지 않아 공극이 잘 폐쇄되지 않았다.
 Figure. 9d 브라켓이 부착된 상태로 셋업 모형을 3D 프린팅 하였다.
 Figure. 9e 브라켓 하방의 언더컷이 블록 아웃된 상태로 출력된 모습.
 Figure. 9f 브라켓이 부착된 상태로 사용할 수 있는 투명교정장치를 제작하였다.
 Figure. 9g 투명교정장치가 장착된 모습.
 Figure. 9h 공극이 폐쇄되고 브라켓을 제거한 후의 모습.



Figure. 10. 3D 프린팅 브라켓을 이용한 노년층 환자의 치료. 치주 질환에 의해 치근 노출 및 심한 치아 동요도를 보여 투명교정치료로는 치료가 곤란하다고 판단하였다. 3D 프린팅 브라켓을 사용하여 빠르고 정확한 전치부 배열이 가능하다.

접착을 위한 지그가 브라켓 본체와 함께 출력되어 있기 때문에 브라켓을 쉽고 빠르고 정확하게 부착할 수 있을 뿐 아니라 필요한 치아 이동이 개별화된 브라켓 형태로 내장되어 있기 때문에 별도의 호선 조절 없이

NiTi 호선만을 사용하여 치료가 가능하다.

3D 프린팅 브라켓은 NiTi 호선의 부드러운 교정력과 자가 결찰형 슬롯의 낮은 마찰력을 통해 투명교정장치 치료에 비해 보다 빠르고 정확한 치아 배열이 가

능할 뿐 아니라(Fig. 8) 전치부 후방 이동이 요구되거나 환자의 악습관 등에 의해 특정 치아 이동이 필요할 경우 즉시 디지털 투명교정장치로 전환하여 문제를 해결할 수도 있다(Fig. 9).

디지털 하이브리드 치료의 가장 큰 장점은 투명교정 치료 도중 발생할 수 있는 다양한 문제점들을 쉽게 해결할 수 있다는 점 이외에도 투명교정이 힘든 환자에서도 다양한 적용이 가능하다는 점이다. 특히 최근 급격히 증가하고 있는 중장년-노년층 환자의 경우 상대적으로 약해진 치주 조직 때문에 정교한 치근 조절이 필요한 경우가 많지만 치은쪽이 상대적으로 잘 벌어지는 투명교정장치의 특성상 충분한 조절이 어렵고 가해지는 교정력도 너무 과한 경우가 많다. 이 때 두 가닥의 NiTi 호선과 3D 프린팅 브라켓을 사용하면 부드러운 교정력으로 정확한 치근 조절이 가능하고 상대적으로 빠르게 치근 이동을 얻을 수 있으며(Fig. 9). 필요에 따라 투명교정장치를 추가하여 치료를 마무리할 수 있다.

III. 결론

디지털 투명교정장치는 한번의 셋업으로 치료에 사용되는 전체 투명교정장치를 한꺼번에 제작할 수 있다는 편의성과 효율성 때문에 대부분의 투명교정치료에

서 널리 사용되고 있다. 하지만 고정성 교정장치에 비해 치아에 효과적으로 힘을 전달하기 힘든 투명교정장치의 특성 때문에 계획했던 만큼 치아이동이 이루어지지 않아 리파인먼트의 반복 및 치료기간의 증가를 유발하는 경우가 많다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 다음과 같은 방안들이 제시되었다.

1. 부분적 투명교정장치 제작 : 전체 투명교정장치를 한꺼번에 제작하지 않고 8~10단계씩 끊어서 제작함으로써 단계별 치아 이동양상을 좀 더 정확하게 관리하고 계획대로 치료가 진행되지 않을 경우 바로 수정이 가능하다.
2. 3D 프린터로 직접 출력 : 투명교정장치를 직접 3D 프린팅 함으로서 진공성형 제작에 비해 좀 더 치아에 밀착되게 제작이 가능할 뿐만 아니라 필요에 따라 장치의 두께를 조절하거나 교정력을 가하는 구조물을 디자인 하는 등 좀 더 효과적인 치아 이동이 가능하다.
3. 디지털 하이브리드 치료 : 두 가닥의 NiTi 호선이 들어가는 3D 프린팅 브라켓을 사용하여 부드러운 힘으로 빠르고 정확한 치아 이동을 이룰 수 있다. 특히 한 번의 디지털 셋업으로 투명교정장치와 3D 프린팅 브라켓을 같이 제작할 수 있기 때문에 다양한 임상 적용이 가능할 뿐만 아니라 치료 기간을 단축하고 더 나은 치료 결과를 얻을 수 있다.

참고 문헌

1. Joffe L. Invisalign : Early experiences. *J Orthod* 2003;30:348-52.
2. Bollen AM, Huang G, King G, Hujuel P, Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 1 : Ability to complete treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003;124:496-501.
3. Clements KM, Bollen AM, Huang G, King G, Hujuel P, Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 2 : Dental improvements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003;124:502-8.
4. Djeu G, Shelton C, Maganzini A. Outcome assessment of Invisalign and traditional orthodontic treatment compared using the American Board of Orthodontics Objective Grading System. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005;128:292-8.
5. Phan X. Clinical Limitations of Invisalign. *J Can Dent Assoc* 2007; 73:263-6.
6. Boyd RL. Influence of attachments and Interproximal Reduction on the Accuracy of Canine Rotation with Invisalign. *Angle Orthod* 2008;78:682-7.
7. Brezniak, N. The Clear Plastic Appliance : A Biomechanical Point of View. *Angle Orthod*, 2008;78:381-382.
8. Hahn W, Zapf A, Dathe H, Fialka-Fricke J, Fricke-Zech S, Gruber R, Kubein-Meesenburg D, Sadat-Khonsari R. Torquing an upper central incisor with aligners—acting forces and biomechanical principles. *Eur J Orthod*. 2010 ;32:607-13.
9. Hahn W, Engelke B, Jung K, Dathe H, Fialka-Fricke J, Kubein-Meesenburg D, Sadat-Khonsari R. Initial forces and moments delivered by removable thermoplastic appliances during rotation of an upper central incisor. *Angle Orthod*. 2010;80:239-46.
10. Bräscher, A. K., Zuran, D., Feldmann, R. E., & Benrath, J. Patient survey on Invisalign® treatment compared the Smart-Track® material to the previous aligner material. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte der Kieferorthopädie*, 2016;77(6):432-438.
11. Griffith, M., Fields, H. W., Ni, A., Guo, X., Lee, D. J., & Deguchi, T. Comparison of 2 Invisalign tray generations using the Peer Assessment Rating index. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2021;160(5):718-724.
12. Chisari J, McGorray S, Nair M, Wheeler T. Variables affecting orthodontic tooth movement with clear aligners. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2014;145:82-91.
13. Simon M, Keilig L, Schwarze J, Jung BA, Bourauel C. Forces and moments generated by removable thermoplastic aligners: incisor torque, premolar derotation, and molar distalization. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2014 ;145:728-36.
14. Gomez JP, Peña FM, Martínez V, Giraldo DC, Cardona CI. Initial force systems during bodily tooth movement with plastic aligners and composite attachments: A three-dimensional finite element analysis. *Angle Orthod*. 2015;85:454-60.
15. Karras, T., Singh, M., Karkazis, E., Liu, D., Nimeri, G., & Ahuja, B. (2021). Efficacy of Invisalign attachments: a retrospective study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2021;160(2):250-258.
16. Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E, Obrez A, Agran B. How well does Invisalign work? : A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009;135:27-35.
17. Haouili, N., Kravitz, N. D., Vaid, N. R., Ferguson, D. J., & Makki, L. Has Invisalign improved? A prospective follow-up study on the efficacy of tooth movement with Invisalign. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2020;158(3): 420-425.
18. Upadhyay, M., & Arqub, S. A. Biomechanics of clear aligners: hidden truths & first principles. *J World Fed Orthod* 2022;11(1):12-21.
19. Sachdeva, S., Tantidhnazet, S., & Saengfai, N. N. Accuracy of tooth movement with in-house clear aligners. *J World Fed Orthod* 2021;10(4): 177-182.
20. Arqub, S. A., Banankhah, S., Sharma, R., Godoy, L. D. C., Kuo, C. L., Ahmed, M., ... & Uribe, F. Association between initial complexity, frequency of refinements, treatment duration, and outcome in Invisalign orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2022;162(3):e141-e155.
21. Kravitz, N. D., Dalloul, B., Zaid, Y. A., Shah, C., & Vaid, N. R. What percentage of patients switch from Invisalign to braces? A retrospective study evaluating the conversion rate, number of refinement scans, and length of treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2023;163(4):526-530.
22. Sterental, R. (2008). A new helping-hand concept for Invisalign users. *Dentistry Today*, 2008;27(9):118-120.
23. Koenig, N., Choi, J. Y., McCray, J., Hayes, A., Schneider, P., & Kim, K. B. Comparison of dimensional accuracy between direct-printed and thermoformed aligners. *Korean J Orthod* 2022;52(4):249-257.
24. Grant, J., Foley, P., Bankhead, B., Miranda, G., Adel, S. M., & Kim, K. B. Forces and moments generated by 3D direct printed clear aligners of varying labial and lingual thicknesses during lingual movement of maxillary central incisor: an in vitro study. *Progress in Orthodontics*, 2023;24(1):23.
25. Bae, G. S., Kim, Y. I., Kim, S. S., Park, S. B., & Son, W. S. (2017). 3D-printed double-wire bracket for anterior alignment. *J Clin Orthod*, 2017;51(7):377-381.