



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2023년 2월
석사학위논문

반복적인 prestretching을 통한
교정용 탄성체인의 탈부하 과정 초기의
급격한 힘 감쇠 및 이력현상의 개선

조선대학교 대학원

치 의 학 과

정 재 찬

반복적인 prestretching을 통한 교정용 탄성체인의 탈부하 과정 초기의 급격한 힘 감쇠 및 이력현상의 개선

Repetitive prestretching decreases hysteresis
and abrupt force drops during the initial unloading phase
of orthodontic elastomeric chains

2023년 2월 24일

조선대학교 대학원

치 의 학 과

정 재 찬

반복적인 prestretching을 통한
교정용 탄성체인의 탈부하 과정 초기의
급격한 힘 감쇠 및 이력현상의 개선

지도교수 임 성 훈

이 논문을 치의학 석사학위신청 논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

치 의 학 과

정 재 찬

정재찬의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 조형훈 (인)

위원 조선대학교 교수 임성훈 (인)

위원 조선대학교 교수 정서린 (인)

2022년 12월

조선대학교 대학원

목 차

표 목 차	ii
도 목 차	iii
영문초록	iv
I. 서론	1
II. 재료 및 방법	2
III. 결과	4
IV. 고찰	11
참고문헌	14

표 목 차

Table 1. The average force, hysteresis and unload/peak ratio during repeated extension of Generation II power chain (Ormco) and the percentage of the residual force to the force at the first extension	5
Table 2. The average force, hysteresis and unload/peak ratio during repeated extension of Memory chain (AO) and the percentage of the residual force to the force at the first extension	6
Table 3. The average force, hysteresis and unload/peak ratio during repeated extension of Energy chain (RMO) and the percentage of the residual force to the force at the first extension	7
Table 4. The average force of the three manufacturers for each cycle	8
Table 5. Hysteresis by the manufacturers in repeated extensions	10

도 목 차

Fig. 1. Universal testing machine and 37°C circulating water bath setup.	2
Fig. 2. Load-deflection curves of orthodontic elastomeric chains.	
(A) Generation II power chain (Ormco, Glendora, CA, USA)	
(B) Memory chain (American Orthodontics, Sheboygan, MI, USA)	
(C) Energy chain (RMO, Denver, CO, USA)	4

ABSTRACT

Repetitive prestretching decreases hysteresis and abrupt force drops during the initial unloading phase of orthodontic elastomeric chains

Jung, Jae-Chan

Advisor : Lim, Sung-Hoon. D.D.S., M.S.D., Ph.D.

Department of Dentistry

Graduate School of Chosun University

This study evaluated the effect of repetitive prestretching on hysteresis and abrupt force drops during the initial unloading phase(1-mm-unloading/peak force ratio) of elastomeric chains. Thirty samples of closed-type elastomeric chains were tested for each group of generation II power chain, energy chain, and memory chain. Elastomeric chains were elongated to a 100% extension from their original length of 12.5 mm and unloaded. Forces during the five loading and unloading cycles were determined. The memory chain showed significantly lower hysteresis than the generation II power chain and energy chain. Both loading and unloading forces were decreased significantly with repetitive prestretching. However, unloading forces decreased less than the loading force, thereby reducing the hysteresis. All three products showed the greatest hysteresis in the first cycle, which decreased significantly following repeated prestretching. The 1-mm-unload/peak ratio increased significantly until the 4th cycle, the cycle after triple prestretching.

Conclusively, repetitive prestretching of elastomeric chains further decreased hysteresis and abrupt force drop during the initial 1-mm unloading, up to triple prestretching.

Key Words: Hysteresis; Orthodontic elastomeric chain; Prestretching;
Repetitive prestretching; Unloading

I. 서론

교정학 영역에서 탄성 체인은 치아의 움직임에 필요한 힘을 가하기 위해 다양한 형태로 사용되고 있다. 탄성 체인은 폴리우레탄으로 제작되며, 사용하기 쉽고 상대적으로 위생적이며 저렴하다는 등의 장점이 있다. 그러나 시간에 따른 힘 감소, 구강 내 용액 흡수, 변색 등의 단점이 있다[1 - 3]. 폴리우레탄과 같은 점탄성 재료는 하중 시에 비해 탈부하 시에 상대적으로 힘이 감소하게 되며, 이렇게 부하 시와 탈부하 시의 힘이 차이나는 현상을 이력 현상(hysteresis)이라고 한다[4,5]. 구강 내에 적용된 후 상대적으로 빠른 시간 내에 상당한 크기의 힘이 소실되는데, 이전 연구들[2 - 8]에 따르면 첫 24시간 내에 초기 힘의 50~75%가 소실되며, 이후 4주까지는 10~20%의 힘이 추가로 감소되어 초기 힘의 30~40%만 남게 된다. 몇몇 연구들은 이러한 힘의 감소를 줄여 좀 더 일정한 힘을 가하기 위해 prestretching을 시행할 것을 추천하였다[2,8 - 11].

이전의 탄성 체인에 대한 연구는 일정 길이로 신장된 상태에서 시간에 따른 힘의 변화에 주목하였고, 반복적인 prestretching 시의 이력 현상의 변화 및 탈부하 과정의 힘 변화에 대한 연구는 부족했다. 본 연구의 목적은 반복적인 prestretching이 이력 현상과 탈부하 초기의 힘 감소에 미치는 효과를 조사하는 것이었다.

II. 재료 및 방법

이 실험에는 Generation II power chain (Ormco, Glendora, CA, USA), Memory chain (American Orthodontics, Sheboygan, MI, USA), Energy chain (RMO, Denver, CO, USA)의 세 가지 종류 투명 폐쇄형(closed type) 탄성 체인을 사용하였다. 세 가지 제품 모두 5칸(12.5mm) 길이로 30개씩 표본을 준비하였다. 모든 제품의 시험은 생리식염수를 채운 수조 내에서 시행하였으며, $37^{\circ}\text{C}\pm 1$ 의 온도로 유지되는 항온순환수조에서 중탕함으로써 온도를 유지하였다. 만능시험기(LF plus, Lloyd, Fareham, UK)를 사용하여 20mm/min의 크로스헤드 속도로 원래 길이의 100%만큼 신장시킨 후 본래 길이로 돌아오는 사이클을 5회 반복하며 부하 시와 탈부하 시의 부하-변위 곡선을 측정하였다(Fig. 1). 1회 prestretching한 탄성 체인을 임상에서 적용할 때의 효과는 두 번째 사이클에서 관찰할 수 있으며, 2회 prestretching한 것의 효과는 세 번째 사이클에서, 3회 prestretching한 것의 효과는 네 번째 사이클에서, 4회 prestretching한 것의 효과는 마지막 사이클인 다섯 번째 사이클에서 관찰할 수 있다.

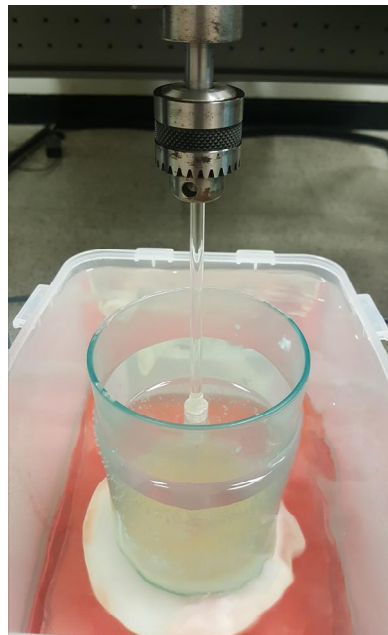


Fig. 1. Universal testing machine and 37°C circulating water bath setup.

임상에서 탄성 체인의 적용 후 치아 이동으로 탄성 체인의 신장 길이가 1 mm 감소된 후의 남은 힘과 이력 현상의 양을 측정하기 위해 11.5mm 신장 시점의 부하, 탈부하 힘을 부하-변위 곡선으로부터 구하였다. 이력 현상의 크기는 이 부하, 탈부하 힘의 차이로 구하였다. 또한 각 반복 사이클 시 최초의 사이클 대비 감소된 힘의 백분율과 12.5mm 최대 신장 시점의 힘에 대한 11.5mm 시점의 탈부하 시의 힘의 비 (1-mm-unload/peak force ratio)를 계산하였다. 정규성 검정을 위해 Shapiro-Wilk test를 사용하였으며, 세 제품 모두에서 모든 계측 항목에서 정규성 검정이 충족되었다. 각 제품 사이의 힘 차이와 반복적인 신장 과정에서의 힘 차이, 이력 현상 크기를 비교하기 위해 repeated measures analysis of variance를 사용하였으며, 사후 검정으로는 Tukey HSD test를 사용하였다. 유의 수준은 $p=0.05$ 로 설정하였다.

Ⅲ. 결 과

세 제품 모두 비슷한 형태의 부하-변위 곡선을 보였으며 상당한 양의 이력 현상을 보였다(Fig 2). 첫 번째 신장 시, 최대 신장 시(12.5mm 신장)의 힘 수준은 Energy chain에서 398.8gf으로 가장 컸고, Generation II power chain에서 378.2gf, Memory chain에서 366.1gf 순이었다(Tables 1 to 3). 반복 신장 시에도 첫 번째 반복 시와 동일하게 Energy chain, Generation II power chain, Memory chain 순으로 힘이 컸으며, 이 차이는 모든 사이클에서 통계적으로 유의하였다(Table 4)($p < 0.001$).

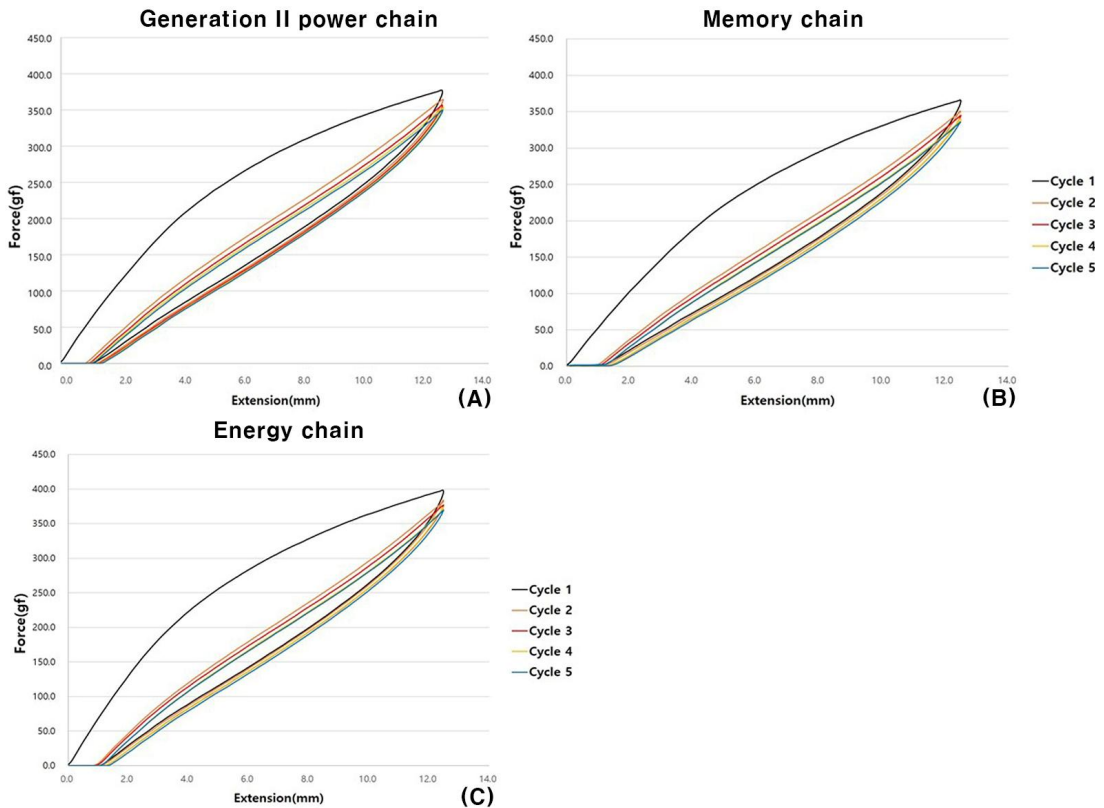


Fig. 2. Load-deflection curves of orthodontic elastomeric chains.

(A) Generation II power chain (Ormco, Glendora, CA, USA)

(B) Memory chain (American Orthodontics, Sheboygan, MI, USA)

(C) Energy chain (RMO, Denver, CO, USA)

Table 1. The average force, hysteresis and unload/peak ratio during repeated extension of Generation II power chain (Ormco) and the percentage of the residual force to the force at the first extension

Cycle	12.5 mm peak	11.5 mm load	1 mm unload	Hysteresis	1-mm-unload/peak ratio
1 st cycle	378.2±11.3 ^a	365.1±10.6 ^a	309.6±8.5 ^a	55.6±2.5 ^a	81.9±0.41% ^d
	100%	100%	100%	100%	
2 nd cycle	365.5±10.9 ^b	332.5±9.5 ^b	303.2±8.4 ^b	29.3±1.5 ^b	83.0±0.42% ^c
	96.6±0.33%	91.1±0.46%	97.9±0.45%	52.8±2.2%	
3 rd cycle	358.6±10.1 ^c	323.1±9.3 ^c	299.8±8.4 ^c	23.6±1.5 ^c	83.5±0.38% ^b
	94.8±0.42%	88.5±0.46%	96.7±0.45%	42.5±2.1%	
4 th cycle	354.3±10.5 ^d	318.1±9.3 ^d	297.0±8.5 ^d	21.2±1.4 ^d	83.8±0.36% ^a
	93.7±0.37%	87.1±0.40%	95.9±0.48%	38.1±1.8%	
5 th cycle	351.2±10.4 ^e	314.6±9.0 ^e	295.1±8.7 ^e	19.5±1.3 ^e	84.0±0.35% ^a
	92.9±0.42%	86.2±0.45%	95.3±0.56%	35.1±2.7%	

Values are presented as mean±standard deviation. unit: gram-force (gf).

^{a,b,c,d,e}Different letters indicate significant statistical differences among cycles ($p < 0.05$, Tukey HSD test).

Table 2. The average force, hysteresis and unload/peak ratio during repeated extension of Memory chain (AO) and the percentage of the residual force to the force at the first extension

Cycle	12.5 mm peak	11.5 mm load	1 mm unload	Hysteresis	1-mm-unload/peak ratio
1 st cycle	366.1±5.3 ^a	353.3±5.3 ^a	298.8±4.5 ^a	54.5±1.6 ^a	81.6±0.35% ^d
	100%	100%	100%	100%	
2 nd cycle	352.8±5.1 ^b	318.7±4.9 ^b	291.5±4.4 ^b	27.2±1.2 ^b	82.6±0.25% ^c
	96.4±0.37%	90.2±0.38%	97.6±0.45%	49.9±2.2%	
3 rd cycle	346.3±5.1 ^c	309.6±4.9 ^c	287.8±4.6 ^c	21.8±1.0 ^c	83.2±0.35% ^b
	94.6±0.44%	87.6±0.45%	96.3±0.36%	39.8±2.3%	
4 th cycle	341.2±4.8 ^d	304.4±4.8 ^d	284.9±4.5 ^d	19.5±1.4 ^d	83.6±0.36% ^a
	93.2±0.45%	86.2±0.42%	95.3±0.51%	36.0±2.7%	
5 th cycle	338.0±4.8 ^e	300.6±4.5 ^e	282.5±4.3 ^e	18.2±1.3 ^e	83.7±0.39% ^a
	92.3±0.40%	85.1±0.44%	94.5±0.59%	33.6±2.8%	

Values are presented as mean±standard deviation. unit: gram-force (gf).

^{a,b,c,d,e}Different letters indicate significant statistical differences among cycles ($p < 0.05$, Tukey HSD test).

Table 3. The average force, hysteresis and unload/peak ratio during repeated extension of Energy chain (RMO) and the percentage of the residual force to the force at the first extension

Cycle	12.5 mm peak	11.5 mm load	1 mm unload	Hysteresis	1-mm-unload/peak ratio
1 st cycle	398.85±8.1 ^a	385.6±7.9 ^a	326.4±7.1 ^a	59.2±1.5 ^a	81.8±0.37% ^d
	100%	100%	100%	100%	
2 nd cycle	385.3±8.0 ^b	349.0±7.3 ^b	320.5±7.2 ^b	28.6±1.0 ^b	83.2±0.28% ^c
	96.6±0.33%	90.5±0.37%	98.2±0.37%	48.3±1.8%	
3 rd cycle	379.1±8.4 ^c	340.0±7.4 ^c	316.8±7.5 ^c	23.2±1.3 ^c	83.6±0.33% ^b
	95.0±0.42%	88.2±0.38%	97.0±0.45%	39.2±2.3%	
4 th cycle	374.5±8.3 ^d	334.6±7.7 ^d	314.3±7.5 ^d	20.3±1.4 ^d	83.9±0.36% ^a
	93.9±0.50%	86.8±0.46%	96.3±0.46%	34.3±2.2%	
5 th cycle	371.5±8.7 ^e	330.9±7.8 ^e	312.1±7.8 ^e	18.8±1.3 ^e	84.0±0.39% ^a
	93.1±0.55%	85.8±0.50%	95.6±0.54%	31.7±2.1%	

Values are presented as mean±standard deviation. unit: gram-force (gf).

^{a,b,c,d,e} Different letters indicate significant statistical differences among cycles ($p < 0.05$, Tukey HSD test).

Table 4. The average force of the three manufacturers for each cycle

Cycle		12.5 mm peak		11.5 mm load		1mm unload	
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
1 st Cycle	Ormco	378.2 ^b	11.3	365.1 ^b	10.6	309.6 ^b	8.5
	AO	366.1 ^c	5.3	353.3 ^c	5.3	298.8 ^c	4.5
	RMO	398.8 ^a	8.1	385.6 ^a	7.9	326.4 ^a	7.1
2 nd Cycle	Ormco	365.5 ^b	10.9	332.5 ^b	9.5	303.2 ^b	8.4
	AO	352.8 ^c	5.1	318.7 ^c	4.9	291.5 ^c	4.4
	RMO	385.3 ^a	8.0	349.0 ^a	7.3	320.5 ^a	7.2
3 rd Cycle	Ormco	358.6 ^b	10.1	323.1 ^b	9.3	299.5 ^b	8.4
	AO	346.3 ^c	5.1	309.6 ^c	4.9	287.8 ^c	4.6
	RMO	379.1 ^a	8.4	340.0 ^a	7.4	316.8 ^a	7.5
4 th Cycle	Ormco	354.3 ^b	10.5	318.1 ^b	9.3	297.0 ^b	8.5
	AO	341.3 ^c	4.8	304.4 ^c	4.8	284.9 ^c	4.5
	RMO	374.5 ^a	8.3	334.6 ^a	7.7	314.3 ^a	7.5
5 th Cycle	Ormco	351.2 ^b	10.4	314.6 ^b	9.0	295.1 ^b	8.7
	AO	338.0 ^c	4.8	300.6 ^c	4.5	282.5 ^c	4.3
	RMO	371.5 ^a	8.7	330.9 ^a	7.8	312.1 ^a	7.8

Unit: gram-force (gf). SD, standard deviation.

^{a,b,c}Different letters indicate significant statistical differences among manufacturers ($p < 0.05$, Tukey HSD test).

다섯 번의 사이클에서 얻어진 부하-변위 곡선 상에서 11.5mm 신장했을 때의 힘 변화를 관찰하였을 때, 사이클이 반복될수록 부하 시의 힘은 감소하였는데, 특히 두 번째 사이클의 신장 시 큰 폭으로 감소하였고, 그 이후 반복 신장 시에는 상대적으로 적은 양의 힘이 감소하였다(Tables 1 to 3). 반면, 탈부하 시의 힘은 첫 번째 이후의 사이클들에서 큰 양의 감소는 보이지 않았으며, 신장이 반복될수록 소폭의 감소만을 보였다. 두 번째 사이클에서 부하 시의 힘 변화를 관찰하면, Generation II power chain은 첫 번째 사이클에 비해 32.6gf이 감소하여 91.1%의 힘이 잔존하였으며, Memory chain은 34.6gf

감소하여 90.2%, Energy chain은 36.6gf 감소하여 90.5%의 힘이 잔존하였다. 두번째 사이클에서 탈부하 시의 힘 변화를 관찰하면, 첫번째 사이클에 비해 Generation II power chain은 6.4gf 감소하여 97.9%의 힘이 잔존하였으며, Memory chain는 7.3gf 감소하여 97.6%, Energy chain는 5.9gf 감소하여 98.2%의 힘이 잔존하였다. 다섯 번째 사이클에서는 Generation II power chain은 탈부하 시에는 95.3%의 힘이 잔존하였으며, Memory chain은 94.5%의 힘이 잔존하였고, Energy chain은 95.6%의 힘이 잔존하였다.

11.5mm 신장 시의 이력 현상을 측정하였을 때 세 제품 모두 첫 번째 사이클에서 가장 큰 이력 현상을 보였으며, 이후 두번째 사이클에서 이력 현상이 크게 감소하였으며, 다섯 번째 사이클로 갈수록 이력 현상이 조금씩 감소하였다(Tables 1 to 3). 다섯 번째 사이클에서는 Generation II power chain 19.5gf, Memory chain 18.2gf, Energy chain 18.8gf의 이력 현상을 보였다. 반복 신장에 따른 이력 현상의 감소량은 세 제품 모두에서 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 첫번째 cycle에서 Memory chain의 이력 현상은 Energy chain에 비해 유의하게 낮았으나($p < 0.001$), Generation II power chain과는 유의한 차이가 없었으며($p = 0.721$), Energy chain은 Generation II power chain에 비해 이력 현상이 높았다($p < 0.001$)(Table 5). 2번째와 3번째 사이클에서는 Memory chain의 이력 현상이 다른 두 제품에 비해 유의하게 낮게 나타났으며($p < 0.001$), Generation II power chain과 Energy chain은 유의한 차이를 보이지 않았다(Table 5). 4번째와 5번째 사이클에서는 Memory chain의 이력 현상이 Generation II power chain에 비해 유의하게 낮았으나 Energy chain과는 유의한 차이가 없었으며, Generation II power chain과 Energy chain은 유의한 차이가 없었다.

Table 5. Hysteresis by the manufacturers in repeated extensions

Cycle	Generation II power chain (Ormco)		Memory chain (AO)		Energy chain (RMO)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
1 st cycle	55.6 ^{bc}	2.5	54.5 ^c	1.6	59.2 ^a	1.5
2 nd cycle	29.3 ^a	1.5	27.2 ^b	1.2	28.6 ^a	1.0
3 rd cycle	23.6 ^a	1.5	21.8 ^b	1.0	23.2 ^a	1.3
4 th cycle	21.2 ^a	1.4	19.5 ^b	1.4	20.3 ^{ab}	1.4
5 th cycle	19.5 ^a	1.3	18.2 ^b	1.5	18.8 ^{ab}	1.3

Unit: gram-force (gf). SD, standard deviation.

^{a,b,c}Different letters indicate significant statistical differences among manufacturers ($p < 0.05$, Tukey HSD test).

12.5mm 최대 신장 시점의 힘에 대한 11.5mm 시점의 탈부하 시의 힘의 비 (Peak/unload ratio)는 실제 교정 치료 시 교정력에 의해 치아가 1 mm 움직였을 때의 힘의 감소를 나타내는 지표인데, 사이클이 반복될수록 이 비율이 증가하여 탈부하 과정에서의 힘의 감소가 적어지는 것으로 나타났다. 세 가지 제품 모두에서 4번째 사이클까지는 통계적으로 유의하게 peak/unload ratio가 증가하였으나, 4번째와 5번째 사이클 사이에는 유의한 차이가 없었다(Tables 1 to 3). 이러한 결과는 prestretching을 한 번 하는 것보다는 두 번 하는 것이, 두 번 하는 것보다는 세 번 하는 것이 치아 이동 과정에서의 힘 감소를 줄일 수 있으며, 세 번 하는 것과 네 번 하는 것 사이에는 유의한 차이가 없다는 것을 나타낸다.

IV. 고 찰

탄성 체인의 물리적 특성에 관한 연구는 많이 있지만[2-5], 탄성 체인을 특정 길이로 신장시켰을 때의 부하 시의 힘과 일정 길이로 신장된 상태에서의 힘 감쇠에 주목하였다. 몇몇 연구[5,6,12]는 실제 임상에서의 상황과 유사하게 공간 폐쇄가 진행되는 조건에서 잔존 힘을 측정하였다. Hershey 와 Reynolds[6]에 의하면 공간 폐쇄를 가정하지 않을 경우 4주 후 초기 힘의 40%가 잔존하였으나 0.25mm/week의 속도로 공간 폐쇄 시 32%, 0.5mm/week의 속도로 공간 폐쇄 시 25%의 힘만 잔존한다고 보고하였다. Motta 등[12]도 0.5mm/week의 속도로 공간 폐쇄를 가정하였을 경우, 4주 후 초기 힘의 45%만 잔존한다고 보고하였다.

몇몇 연구는 탄성 체인의 힘 감쇠를 줄이고 좀더 일정한 힘을 치아에 적용하기 위해 prestretching을 하여 적용할 것을 제안하였다[2,8-11]. Wong[2]은 탄성 체인 본래 길이의 1/3배만큼 prestretching 하는 것을 주장하였으며, Brooks와 Hershey[11]는 prestretching이 탄성 체인의 열에 의한 힘 감쇠를 감소시킨다고 보고하였다. Brantley 등[8]은 증류수에서 prestretching 후 즉각적으로 사용 시 거의 일정한 힘을 보여준다고 보고하였다. Young과 Sandrik[10]은 장시간 prestretching한 상태로 두지 않고 빠르게 prestretching 후 회복시켰을 시 24 시간 후 대조군에 비해 Alastic CK chain(3M Unitek, Monrovia, CA, USA)은 17~25%까지 잔존 힘이 증가한다고 보고하였다. Chang 등[9]은 제품에 따라 150-200% 신장을 빠른 속도로 3회 시행할 경우 영구 변형의 증가 없이 잔존 응력이 증가한다고 보고하였다.

다양한 prestretching 방법이 실험되어 왔지만 장시간 공기 또는 식염수 내에서 신장 상태로 두는 방법은 임상 환경에서 사용하기 어려우므로, 이번 실험에서는 Young과 Sandrik[10], Chang[9]의 연구와 같이 일정 길이로 즉각적으로 늘렸다가 줄이는 방식의 prestretching을 가정하였다. Chang[13]의 실험에서 본래 길이의 100%만큼 prestretching할 경우에 초기 힘과 3주 경과 후의 힘 감쇠가 모두 감소한다는 점에 근거하여, 이번 실험에서는 100% prestretching을 계획하였다. 실제 임상적 상황에서 제1 소구치 발치 후 공간 폐쇄 시 사용되는 길이와 같이 5-unit의 탄성 체인(12.5mm)을 100% 신장 후 본래 길이로 회복하는 것을 5회 반복하며 부하 시와 탈부하 시의 힘을 측

정하였다. Prestretching을 시행했을 때 이력 현상 및 1-mm-unload/peak ratio가 감소되어, 보다 지속적인 교정력을 발휘하는 데 도움이 되는 것으로 나타났다. 이는 Baty 등[3], Kim 등[7]의 연구에서 prestretching이 임상적으로 큰 이득이 없다고 한 것과는 상반되는 결과이다. 이력 현상의 크기는 반복 신장에 따라 유의하게 감소하였으므로 prestretching을 반복 시행할수록 탈부하 시의 힘이 더 완만하게 감소하는 효과가 있었으며, 특히 1-mm-unload/peak ratio에 있어서는 세 번의 prestretching까지는 효과가 증가하였으나, 이후의 prestretching에서는 유의한 차이가 나타내지 않았다. 따라서 임상적으로 prestretching을 적용 시 3회까지 적용하는 것은 치아 이동에 따른 교정력의 급격한 감소를 약간 줄이는 데 도움이 될 것이다.

공간 폐쇄가 진행되며 발생하는 이력 현상에 의한 탈부하 과정의 급격한 힘 감소를 고려한다면 탄성 체인을 적용하면서 느낄 수 있는 교정력보다 훨씬 더 약한 힘이 실제 치아 이동에 적용된다. Hershey와 Reynolds[7]의 연구에서 고정된 신장 길이에서 측정하는 것보다 1mm의 공간 폐쇄를 가정하였을 때 4주 후 8%의 힘이 추가로 감소하였다. 이는 이번 연구에서 1mm 폐쇄 가정(11.5mm 신장) 시 15.2%(Generation II power chain), 16.5%(Energy chain), 15.4%(Memory chain)의 이력 현상에 의한 힘 감소 양에 비하면 상대적으로 적은 수치이다. 첫번째 사이클에서 큰 이력 현상이 나타난 후 상대적으로 적은 양의 이력 현상으로 안정화되는 현상은 Mullins effect로 잘 알려진 고무 유사 재료의 특징적인 응력 연화 현상이다. 임상적으로 정확한 크기의 힘을 적용하기 위해서는 이력 현상의 양을 예측하는 것이 중요하나 Mullins effect를 완벽히 설명하는 구조 모델은 확립되지 않았다. 교정용 탄성 체인은 Maxwell-Weichert model에 가까운 점탄성을 보인다고 보고되었다[14].

이력 현상을 줄이기 위해서는 본 연구에서처럼 원래 길이의 100% 길이만큼 신장시킴으로써 prestretching을 시행하는 방법도 도움이 되지만, 탄성 체인을 적용하면서 필요한 길이에서 단지 2mm 정도만 더 신장시킨 후 적용하여도 탈부하 초기의 급격한 힘 감소를 피할 수는 있다. 이는 부하-변위 곡선 상에서 탈부하 과정 초기의 약 2mm에서 급격한 힘의 감소가 발생한 후 이후 완만하게 힘의 감소가 일어나기 때문이다. 향후 이와 같이 적은 양의 prestretching을 시행한 경우와 본 연구에서처럼 prestretching 양을 100%로 한 것의 차이에 대한 조사가 이루어지는 것이 바람직하다. 또한 이번 연구에서는 시간에 경과에 따른 변화를 측정하지 않았는데, 탄성 체인의 탈부하 시의 힘과 이력 현상에 대해 좀

더 이해하기 위해서는, 구강 환경에 노출된 시간 경과에 따른 탄성 체인의 탈부하 곡선의 변화에 관한 연구가 필요하다.

결론적으로 100% prestretching을 시행하는 것은 탄성 체인의 이력 현상과 탈부하 초기의 급격한 힘 감소를 줄이는 데 도움이 되며, 3회까지 prestretching을 반복할수록, 이러한 이점을 증가시킬 수 있다.

* 본 논문의 일부는 Oral Biol Res 2022;46(2):71-77에 게재되었음.

참고 문헌

1. Langlade M. Optimization of orthodontic elastics. New York: GAC International Inc; 2000.
2. Wong AK. Orthodontic elastic materials. *Angle Orthod*. 1976;46(2):196 - 205. doi: 10.1043/0003-3219(1976)046<0196:OEM>2.0.CO:2.
3. Baty DL, Storie DJ, von Fraunhofer JA. Synthetic elastomeric chains: A literature review. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 1994;105(6):536 - 42. doi: 10.1016/S0889-5406(94)70137-7.
4. Lim HC, Lim SH. Comparison of physical characteristics of elastomeric chains. *Oral Biol Res*. 2011;35(1):22 - 9. doi: 10.21851/obr.35.1.201103.22.
5. De Genova DC, McInnes-Ledoux P, Weinberg R, Shaye R. Force degradation of orthodontic elastomeric chains-A product comparison study. *Am J Orthod*. 1985;87(5):377 - 84. doi: 10.1016/0002-9416(85)90197-6.
6. Hershey HG, Reynolds WG. The plastic module as an orthodontic tooth-moving mechanism. *Am J Orthod*. 1975;67(5):554 - 62. doi: 10.1016/0002-9416(75)90300-0.
7. Kim KH, Chung CH, Choy K, Lee JS, Vanarsdall RL. Effects of prestretching on force degradation of synthetic elastomeric chains. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 2005;128(4):477 - 82. doi: 10.1016/j.ajodo.2004.04.027.
8. Brantley W, Salander S, Myers C, Winders R. Effects of prestretching on force degradation characteristics of plastic modules. *Angle Orthod*. 1979 Jan;49(1):37 - 43. doi: 10.1043/0003-3219(1979)049<0037:EOPOFD>2.0.CO:2.
9. Chang JH, Hwang CJ, Kim KH, Cha JY, Kim KM, Yu HS. Effects of prestretch on stress relaxation and permanent deformation of orthodontic synthetic elastomeric chains. *Korean J Orthod*. 2018;48(6):384 - 94. doi: 10.4041/kjod.2018.48.6.384.
10. Young J, Sandrik JL. The influence of preloading on stress relaxation of orthodontic elastic polymers. *Angle Orthod* 1979;49:104 - 9. doi: 10.1043/0003-3219(1979)049<0104:TIOPOS>2.0.CO:2.

11. Brooks DG, Hershey HG. Effects of heat and time on stretched plastic orthodontic modules. *J Dent Res* 1976;55:363. (Abstract)
12. Motta AFJ da, Cury-Saramago A de A, Nojima LI. In vitro evaluation of force delivered by elastomeric chains. *Dent Press J Orthod.* 2011;16(6):e1-8. doi: 10.1590/S2176-94512011000600007.
13. Chang HF. Effects of instantaneous prestretching on force degradation characteristics of orthodontic plastic modules. *Proc Natl Sci Counc Repub China* 1987;11:45-53.
14. Stevenson JS, Kusy RP. Force application and decay characteristics of untreated and treated polyurethane elastomeric chains. *Angle Orthod.* 1994;64:455 - 64. doi: 10.1043/0003-3219(1994)064<0455:FAADCO>2.0.CO;2.