

# 스플라인 함수를 이용한 한국인 키 기준 성장 곡선 구성과 최종 키 예측 연구

안 홍 석<sup>a</sup> · 이 신 재<sup>b</sup>

본 연구는 청소년의 교정 치료 시 중요한 교정 환자의 성장 평가 및 잔여 성장량 예측 방법을 개발하기 위하여 시행되었다. 이를 위하여 한국인의 전국적 표본 자료 중에서 2 ~ 20세 남자 4,893명, 여자 4,987명의 키 자료를 이용하여 성별 연령별 키에 대한 성장 곡선을 3차 스플라인 함수(NCSF)로 구현하였다. 이후 성장 예측 알고리즘을 개발하고 이를 임의로 선택된 200명의 종단 성장 자료를 이용하여 검증하였다. 검증에는 최종 키 예측 정확성과 검증 표본의 모든 연령에 대한 키 예측 오차 분석 및 NCSF 성장 곡선의 적합성 검사가 포함되었다. 그 결과 NCSF 성장 곡선은 기존 성장 곡선을 표현하는데 매우 적합한 것으로 나타났으며 최종 키 예측 정확성도 높았다. 또한 예측 정확성은 남자 보다 여자가 유의하게 높았다. 이러한 결과에도 불구하고 검증 표본의 모든 연령에 대한 키 예측 오차의 양상이 독립성과 정규성이 부족한 단점도 나타났다. 결론적으로 본 연구 결과 도출된 NCSF 성장 곡선을 이용한 성장 예측 방법의 높은 정확성에도 불구하고 개인의 종단 성장에 좀 더 적합한 성장 모형의 개발이 필요할 것으로 생각되었다. (대치교정지 2007;37(1):16-28)

**주요 단어:** 기준 성장 곡선, 스플라인 함수, 성장 예측

## 서론

치과교정학 분야에서 성장과 발육에 관한 주제는 치아, 치열 및 악골과 전신 성장과의 연관성을 통하여 교정 진단과 치료 계획에 중요한 정보를 얻을 수 있기 때문에 각별히 중요한 연구 분야로 여겨져 왔다. 교정 진단 시 성장기 환자가 처음 내원하여 수완 부골 방사선 사진과 같은 전신 성장의 지표와 악골 성장에 관한 정보를 얻게 되면 앞으로 키가 얼마나 클 것인가에 대하여 묻는 부모를 접하는 경험은 드물지 않다. 실은 꼭 교정 치료 때문이 아니더라도 미래에 대하여 궁금해 하는 것이 본성이거니와 아이가 자라서 얼마나 키가 클 것인가 알고 싶어하는 것은

오히려 당연한 의문일 것이다. 이러한 의문에 각별히 많은 집착을 보이는 부모는 대부분 작은 키를 걱정하게 되는 경우가 대부분인 듯 하며 이런 부류의 가족 내 근심 사항이 지나치면 심리적으로 좋지 않은 영향을 주기도 한다.<sup>1</sup> 만일 신뢰성이 높게 최종 성인키를 예측할 수 있다면 의학적 측면 뿐 아니라 심리적 측면에서도 그러한 가족에게도 도움을 줄 수 있는 일이다.

성장 연구의 다양한 방법들 중 골령(bone age)을 이용하는 방법이 잘 알려져 있으며,<sup>2,3</sup> 그 중 TW2<sup>4</sup> 골령은 성장 연구의 고전으로 통한다. 키 성장 연구에 사용된 지표들은 다양하여 체형(somatotype)이나 2차 성장<sup>5,6</sup> 부모의 키와 몸무게,<sup>3,7</sup> 머리 둘레,<sup>8</sup> 무릎 길이,<sup>9,10</sup> 앞손키와 피부 두께<sup>11</sup> 등 다양한 방법이 이용되고 있다. 이 중에서 골령 이용은 치과교정학 임상에서도 보편적인 방법이었다. 그러나 이 방법은 추가적인 방사선 노출이 필요한 것과 이를 활용하기 위한 전문적인 훈련이 필요한 것이 단점이다. 또한 성장 질환이 없지만 연령에 비해 성숙도가 다른 경우 적용이 곤란하며,<sup>12</sup> 무엇보다도 성장을 평가하고 예측하는데 대한 정확성이 적고 예측력에 미치는 영

<sup>a</sup>학부생, 서울대학교 치과대학.

<sup>b</sup>조교수, 서울대학교 치과대학 치과교정학교실.

교신저자: 이신재.

서울시 종로구 연건동 28.

서울대학교 치과대학 치과교정학교실.

02-2072-3019; e-mail, nonext@snu.ac.kr.

원고접수일: 2006년 7월 5일 / 원고최종수정일: 2006년 8월 31일 /

원고채택일: 2006년 9월 2일.

향이 극히 적다는 것이 가장 큰 단점이다.<sup>7,11,13</sup>

이러한 점 때문에 오늘날 대부분의 성장 연구는 골령 대신 실제 연령인 역령(chronological age)을 사용하고 있으며,<sup>14</sup> 연구 방법 중 가장 안정된 신체 지표라 할 수 있는 “키”가 가장 많이 이용된다.<sup>3,11</sup> 키는 골격의 크기를 반영하며 가장 좋은 인류학적 계측 변수로서 골과 근육의 질량과 높은 상관관계를 지니고 있으며 인종적, 성별에 따른 차이뿐만 아니라 어린이의 성장을 저해하는 바람직하지 않은 영양 상태에 대한 정보도 제공 해줄 수 있고,<sup>15</sup> body mass index (BMI)<sup>8</sup>처럼 키를 이용한 여러 신체 지수의 기준이 되기 때문에 중요시되어 왔으며 골령 대신 현재의 키와 성인키를 비교함으로써 생물학적 성숙도에 관한 정보를 얻을 수 있기에<sup>3,11</sup> 많은 나라에서 키 성장 및 예측과 관련된 체계적인 연구가 지속되어 왔다.

키 성장을 체계적인 바탕 하에 연구하려면 성장을 묘사하는 곡선을 구현해야만 한다. 여기에는 필연적으로 곡률 표현을 위한 다소 복잡한 수학적 함수 공식이 수반된다. 성장은 일정한 시간표대로 진행되는 것이 아니라 시간에 따른 속도가 다르기 때문이다. 선학들에 의해 다양한 비선형 함수들, 즉 BTI,<sup>16</sup> PB,<sup>17-19</sup> SS,<sup>20</sup> JPPS,<sup>21</sup> WIM,<sup>22</sup> WWHLA 모형<sup>23</sup> 등이 보고 된 바 있으며 최근에는 혼합 엑스퍼트 모형<sup>24</sup>이 소개되기도 했다. 현재 한국인의 기준 성장 곡선<sup>25</sup>은 성장을 연령 군 별로 도식화하여 시각화한 것일 뿐이며 연령에 대응된 수치가 결여되어 있다. 이에 따라 다양한 성장기 연령에 대한 추정 역시 시각적 직관에 의존할 뿐이므로 전산화 환경에 적합한 프로그램 제작에 사용될 수 없으며 성장을 예측하기에도 부족하다. 본 연구에서 사용된 3차 스플라인 함수는 여러 개의 3차 다항 함수의 곡선 조각을 이어 연속으로 연결한 다항식을 사용하는 방법으로 전산 알고리즘 제작에 사용될 요건을 갖추고 있다.<sup>26</sup> 이는 각 별히 교정학 분야에서 치열궁 형태 묘사<sup>27,28</sup>나 교정 후 재발의 평가<sup>29</sup>에 쓰이기도 했으며, 인구 집단의 횡단 성장 자료를 정확히 묘사할 수 있는 장점이 있기 때문에 기준 성장 곡선을 구성하기 위해 사용되곤 했다.<sup>30</sup> 성장을 평가하거나 예측할 때 연령에 따라 연속적인 함수를 구성하는 것이 필수적이며 이는 매우 복잡한 연산 과정을 포함하게 된다. 오늘날 임상 진료실에서 진단과 치료 계획 수립 시 필수품으로 널리 보급되어 있는 컴퓨터를 이용하면 연산의 복잡성은 문제가 되지 않으므로, 성장 분석을 위한 프로그램 제작 시 주안점은 단지 높은 정확성을 구

가할 수 있느냐에 있다.

본 연구의 궁극적인 목적은 교정 치료 시 방사선 사진에 의존하지 않고 성장기 환자의 성장 평가 및 최종 키 예측 수치 및 시각 정보를 제공할 수 있는 간편한 프로그램을 만들기 위함이었다. 이를 위하여 우선 한국인의 최신 키 성장 자료를 자연 3차 스플라인 함수(NCSF, natural cubic spline function)에 적용시켜 연속적인 곡선으로 구현하고, NCSF 성장 곡선을 이용한 최종 성인키 예측 알고리즘을 작성, 이를 실제 종단 성장 자료에 적용하여 예측 정확성을 평가해 보고자 하였다.

## 연구방법

### 연구대상

한국인 표준 키 성장 곡선을 구현하기 위한 자료는 대한민국 산업자원부 기술표준원에서 0 ~ 90세의 한국인 19,700명을 대상으로 연구한 SIZE KOREA 2004 자료에 근거하였으며, 이 중 2 ~ 20세의 남자 4,893명, 여자 4,978명의 키 측정 자료를 인용하였다. 이후 구현된 NCSF 곡선을 실제 종단 성장 자료에 적용하여 최종 성인키 예측 정확성을 측정하기 위한 검증 표본은 서울 북부 중산층 거주 지역의 고등학교의 학생들 중에서 임의로 선택한 200명(남 100명, 여 100명)을 대상으로 하였다. 검증 표본 중 발육 장애를 포함하는 특이한 전신 질환이 있는 표본은 제외하였으며, 평균 6.7세(6.3 ~ 7.3)부터 평균 17.7(17.3 ~ 18.3)세 까지 키를 매년 측정한 자료를 사용하였다.

### 연구방법

#### NCSF를 이용한 키 성장 곡선의 함수화

SIZE KOREA 2004 프로젝트의 수행 결과 한국인의 인체 측정치에 대한 새로운 자료가 수집된 결과에 기초하여 한국인의 2 ~ 20세의 남녀 키의 제 1, 5, 10, 25, 50, 75, 90, 95, 99 백분위수를 연령 별로 산출한 뒤, NCSF를 이용하여 각 연령별 백분위수간의 구간을 보간 하여 연속적인 9개의 성장곡선을 구성하였다.

먼저  $x_i$ 세에서  $x_{i+1}$ 세 사이의 구간  $[x_i, x_{i+1}]$  ( $x_i = i+2, i=0, \dots, 17$ )을 다음과 같은 3차

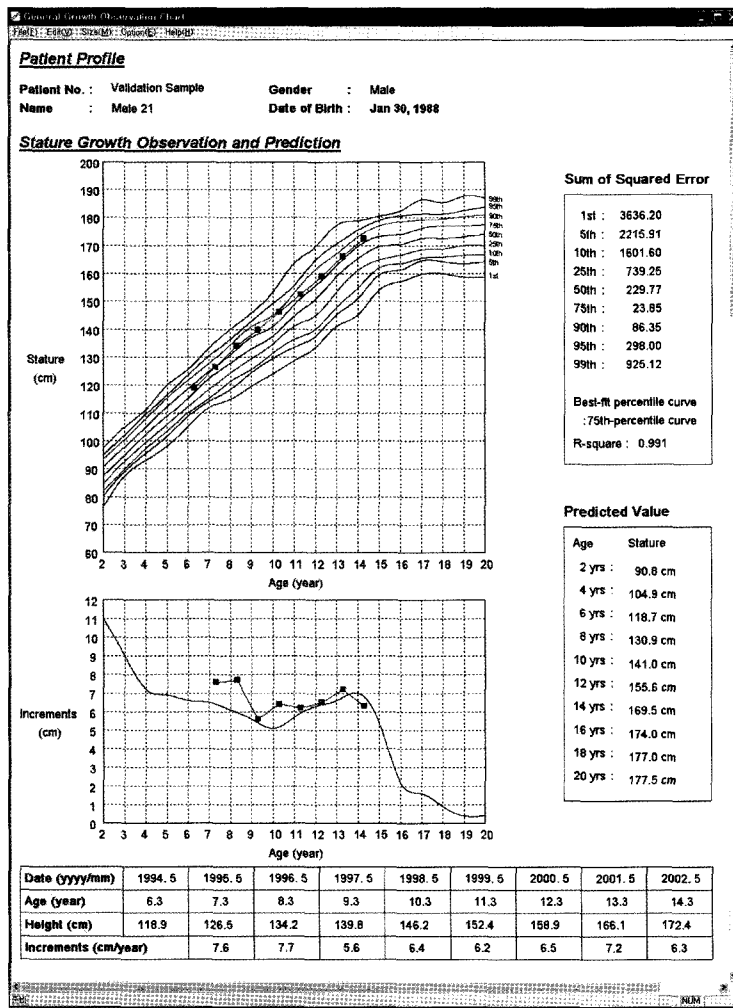


Fig 1. The reference natural cubic spline (NCSF) stature growth curves and growth curve fitted to the data of validation sample, male No. 21 presents predicted stature and its accuracy. The NCSF curves are constructed so as to pass through each real observed data point of the stature growth curve.

함수  $S_i(x)$ 로 보간 하였다.  $S_i(x) = a_{i1}(x-x_i)^3 + a_{i2}(x_{i+1}-x)^3 + a_{i3}(x-x_i) + a_{i4}(x_{i+1}-x)$ . 이 때  $S_i(x)$ 는 다음과 같은 조건을 만족한다.

- ①  $S_i(x_i) = y_i$ ,  $y_i$ : 산출된 키의 백분위수 중  $n$ 이  $x_i$  세의 값,  $i=0, \dots, 18$ ;
- ②  $S_i(x_{i+1}) = S_{i+1}(x_{i+1})$ ,  $i=0, \dots, 17$ ;
- ③  $S'_i(x_{i+1}) = S'_{i+1}(x_{i+1})$ ,  $i=0, \dots, 17$ ;

$$④ S'_i(x_{i+1}) = S'_{i+1}(x_{i+1}),$$

$$i = 0, \dots, 17;$$

$$⑤ S''(x_0) = S''(x_{18}) = 0$$

그 후, 각 구간별로 형성된  $S_i(x)$ 를 이용하여 다음과 같이 최종적인 성장곡선  $S(x)$ 를 구성하였다.

$$S(x) = \sum_{i=0}^{17} I_{[x_i, x_{i+1}]}(x) S_i(x),$$

$$I_{[x_i, x_{i+1}]}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in [x_i, x_{i+1}] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

### 성장 예측 및 분석 프로그램 제작

위에서 구성된 NCSF에 의한 키 성장 곡선을 검증 표본을 대상으로 성장 양상을 검증하고 성장 관측치를 기준 곡선에 대비시켜 도표화하고 예측에 필요한 연산을 수행하기 위하여 Microsoft Visual C++ (Microsoft, Redmond, WA, USA)을 이용하여 본 연구에 필요한 프로그램을 제작하였다. 이어서 누년 자료가 구비된 200명의 자료를 먼저 남녀를 구분하여 학생들의 생년월일과 키 측정 날짜를 고려하여 키 측정 시 나이를 소수점 첫째 자리까지 계산하고, 이를 성장 예측 자료로 사용하였다.

본 연구에서 설정한 성장 예측 방법은 두 단계로 이루어졌다. 첫 번째 단계(Step 1)에서는 NCSF를 이용한 성장 곡선을 실제 종단 자료에 적합하였을 때의 적합성을 평가하고, 이를 개선 시키고자하는 시도를 하였으며, 두 번째 단계에서는 초등학교 1학년에서 중학교 3학년까지 대략 7세에서 15세 사이에 측정된 키만을 이용하여 각 표본의 성장을 가장 잘 설명할 수 있는 적절한 곡선을 선택한 후 이 곡선을 적절히 변환시켜서 최종 성인 키를 예측하고, 그 정확성을 평가하였다. 이러한 작업을 위하여 IBM 호환용 컴퓨터 프로그램(프로그램 등록번호 2006-01-199-002767)을 제작하여 사용하였다. Fig 1과 같이 컴퓨터 상에서 개인의 성장을 기준 곡선에 대비시켜 시각화하고 예측된 성인 키 값과 아울러 예측 정확성을 출력할 수 있도록 구성되었다.

Step 1: Reference curve selection

첫 번째 단계는 표준 성장 곡선을 선택하는 것으로 정의할 수 있으며 그 알고리즘은 다음과 같다. 주어진 종단 자료의 계산된 나이와 키를 다음과 같이 표시하고,

$X = (x_1, x_2, \dots, x_{12})$ ,  $x_i$ : 계산된 키 측정 시의 나이 ( $x_i < x_{i+1}$ )

$Y = (y_1, y_2, \dots, y_{12})$ ,  $y_i$ :  $x_i$  세의 키

구성해 놓은 9개의 표준 성장곡선을 백분위수 별로 작은 것부터  $y = f_k(x)$  ( $i = 0, \dots, 8$ )로 나타냈을 때, 주어진 자료  $X, Y$ 를 가장 잘 설명할 수 있는 곡선을 다음과 같이 오차의 제곱합이 가장 적도록, 최소 오차 분산을 추정하여 선택한다.

$$y = f_k(x), k = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \sum_{j=1}^{12} (y_j - f_i(x_j))^2$$

이러한 방법으로 선택된 곡선의 오차 분석의 결과를 토대로 하여 예측의 정확성과 곡선의 설명력을 향상시키고자 하는 시도를 하였다. 먼저 곡선의 설명력을 높이기 위하여 다음과 같이 곡선  $y = f_k(x)$ 에 오차들의 평균을 더한  $y = f_k(x) + \bar{e}$ 를 주어진 종단 자료를 설명하는 새로운 성장곡선으로 설정하여 위의 결과와 비교하였다.

$$y = f_k(x) + \bar{e},$$

$$k = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \sum_{j=1}^{12} (y_j - f_i(x_j))^2,$$

$$e_i = y_i - f_k(x_i).$$

Step 2: Modification of Step 1 by the last error value

두 번째 단계는 Step 1의 방법을 시행한 후 각 입력 자료와 성장 곡선 사이의 오차를 분석하여 최종 키 예측치에 이를 반영하는 방법으로 정의할 수 있으며 그 알고리즘은 다음과 같다.

먼저 7세 ~ 15세만의 자료를 이용하여 Step 1에서와 같이 성장을 가장 잘 설명할 수 있는 곡선  $y = f_k(x)$ 을 선택한다.

$$y = f_k(x), k = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \sum_{j=1}^9 (y_j - f_i(x_j))^2$$

예측의 정확성을 높이기 위하여 다음과 같이 곡선  $y = f_k(x)$ 에 가장 최근의 오차( $y_9 - f(x_9)$ )를 더하여 다음과 같이 최종 키( $\widehat{y}_{12}$ )를 예측하고 실측

치( $y_{12}$ )와 비교하였다.

$$\widehat{y}_{12} = f_k(x_{12}) + e_9,$$

$$k = \underset{i}{\operatorname{argmin}} \sum_{j=1}^9 (y_j - f_i(x_j))^2,$$

$$e_i = y_i - f_k(x_i)$$

또한 정확성이 향상된 정도를 평가하기 위하여 이를 최종 키를  $\widehat{y}_{12} = f_k(x_{12})$ 로 예측하였을 때의 결과와 비교하였다.

통계 분석

NCSF 성장모형을 이용하여 예측된 모든 연령별 키 예측 정확성, 모형 적합성 및 오차분석을 시행하였으며 우선 200명 개개인의 키-연령 자료를 이용하여 최종 키 예측 정확성을 측정하였다.

우선 검증 표본의 실제 누년 키 측정 자료와 선택된 NCSF 곡선의 적합성은 선형 회귀 분석과 같은 분산비를 사용할 수 없기 때문에 변형된 결정계수인

$$R^2(1 - \frac{SSE}{SST})$$

값과 표준오차를 이용하여 판단하였다. 또한, 예측된 모든 연령별 키 예측 정확성에 대한 오차 분석은 실측값과 예측치간의 오차에 대한 정규성과 편향을 검토하였으며, 표준오차의 평균을 구한 후, Durbin-Watson statistic<sup>31,32</sup>을 이용, 오차들 간의 자기상관관계(autocorrelation)에 관한 분석을 시행하였다.

최종 키 예측 정확성은 기존 연구자들의 연구와 비교할 수 있도록 실측치와 예측치 사이의 상관계수, 평균 오차, 평균 절대값 오차, 표준오차, 평균 백분율 절대값 오차를 이용하여 분석하였으며, 마이크로 소프트웨어 엑셀을 이용하여 예측 정확성에 관한 남녀간의 차이를 t-test를 통해 검증하였다.

연구성적

예측 모형 적합성: 예측된 모든 연령별 키 예측 정확성과 오차분석 (Step 1)

검증 표본 200명의 7 ~ 18세의 키를 측정한 종단 자료 각각에 대해 그것을 가장 잘 설명하는 기준 곡선  $y = f_k(x)$ 를 선택하고 주어진 자료에 적합시킨 적합성 지수인  $R^2$ 는 남자의 경우 평균 0.981이었으며 여자는 0.972로 높은 예측 모형 적합성을 보였다.

**Table 1.** Comparison of error analysis between reference curve selection method (Step 1) and modification by mean error value (Step 2). Frequency distribution of quality of model fit as  $R^2$ , each standard errors of estimates (SEE), and autocorrelation coefficient ( $d$ )

	Boys		Girls	
	Step 1	Step 2	Step 1	Step 2
Quality of model fit, $R^2$				
$R^2 < 0.96$	6	4	18	18
$0.96 \leq R^2 < 0.97$	8	6	9	7
$0.97 \leq R^2 < 0.98$	21	15	35	18
$0.98 \leq R^2 < 0.99$	38	36	26	28
$0.99 \leq R^2 \leq 1$	27	39	12	29
Total subjects	100	100	100	100
Standard errors of estimates, SEE, between predicted and observed statures				
$0 \leq SEE < 1$	1	2	2	10
$1 \leq SEE < 2$	31	42	33	40
$2 \leq SEE < 3$	45	38	46	32
$3 \leq SEE < 4$	17	15	11	11
$4 \leq SEE$	6	3	8	7
Total subjects	100	100	100	100
Autocorrelation coefficients, Durbin-Watson statistics ( $d$ ), among the prediction errors				
$d < d_L$	81	62	89	77
$d_L < d < d_U$	12	21	4	9
$d < d_U$	7	17	7	14
Total subjects	100	100	100	100

$d_L$ , lower critical value of Durbin-Watson statistics at 5% significance level = 0.97;  $d_U$ , upper critical value of Durbin-Watson statistics at 5% significance level = 1.33.

예측 모형 적합성을 증진시키기 위하여  $y = f_k(x) + \overline{e}$  로 곡선을 보완한 결과,  $R^2$ 는 남녀 평균 각각 0.984 및 0.977로 약간 개선되었으며 이는 남녀 모두 매우 높은 키 성장 곡선의 설명력을 보여주는 결과였다 (Table 1).

검증 표본의 모든 연령별 실제 키와 연령별 예측치 간 오차,  $e = y_i - f_k(x_i)$ 의 평균 표준오차는 남자 2.48, 여자 2.38이었으며 수정된 곡선의 오차인  $e' = y_i - f_k(x_i) - \overline{e}$ 에서는 남자 2.24, 여자 2.13

으로 약간 개선된 것으로 나타났다. 이는 남녀 모두 매우 적은 표준오차로써 높은 연령별 키 예측 정확성을 보여주는 결과였다 (Table 1).

검증 표본의 모든 연령별 키에 대한 예측 오차에 대한 정규성과 편향을 검토한 결과 오차의 정규성을 확인할 수 없었고 오차가 서로 독립적이 아닌 것으로 보였다. 양의 자기상관관계가 있는 경우가 많았던 것이다. 이를 위하여 자기상관관계의 정도를 밝히기 위해 Durbin-Watson test를 시행한 결과 곡선  $y = f_k(x)$ 에서는 남녀 각각 100개의 자료 중 남자

**Table 2.** Accuracy measures for final stature prediction model and comparison of prediction accuracy between boys and girls. Some accuracy values from other previous models are also described

	Boys (n = 100)	Previous models	Girls (n = 100)	Previous models	p value
Correlation between observed final stature and predicted final stature					
	0.88	0.79 ~ 0.81*	0.95	0.79 ~ 0.81*	
Observed final stature - predicted stature (cm)					
Mean	0.76		1.06		0.3197
Standard deviation	2.55		1.56		
Median	0.20		0.68		
Minimum ~ maximum	-4.3 ~ 6.8		-2.2 ~ 4.6		
Absolute error (cm)					
Mean	2.13	2.7 <sup>†</sup>	1.3	2.0 <sup>†</sup>	0.0003
Standard deviation	1.58		1.28		
Median	1.87		0.85	2 ~ 3, 2.0 <sup>‡</sup>	
Minimum ~ maximum	0.1 ~ 6.8	2.3 ~ 5.3 <sup>†</sup>	0.0 ~ 4.6	1.9 ~ 3.7	
Standard errors of estimates (SEE, cm)					
	2.65	2 ~ 3, 2.5 <sup>†</sup>	1.88	4.2, 2.8, 3.3 ~ 4.0*	
Mean percent error for absolute difference					
	1.2%	2.3%*	0.8% <sup>†</sup>	2.7%*	0.0002

Sources: \* Lera et al, 2005;<sup>10</sup> † de Waal et al, 1996;<sup>37</sup> ‡ Roche et al, 1975 (sex pooled);<sup>3</sup> § Khamis and Roche, 1994 (sex pooled);<sup>7</sup> || Walker, 1974 (sex pooled);<sup>6</sup> ¶ Beunen et al, 1997 (sex pooled).<sup>11</sup>

81개, 여자 89개 이상이 자기상관이 있는 것으로 판정되었다. 이는 수정 모형인  $y = f_k(x) + \overline{e}$  에서도 역시 남녀 각각 62개, 77개 이상이 자기상관이 있는 것으로 나타나 수정에 의해 Durbin-Watson test 결과도 개선되어 오차의 자기상관성을 보이는 표본의 개수가 줄어들었으나, 여전히 상당히 많은 개수의 자료가 오차의 자기상관성을 보이고 있어 이는 여전히 문제로 남았다 (Table 1).

#### 최종 키 예측 정확성 (Step 2)

검증 표본의 최종 키는 대략적으로 SIZE KOREA 2004에서 보고된 전국적 표본의 19세 키의 분포와 유사한 양상이었으나, 최종 키 평균은 검증 표본이 전국 표본에 비하여 남녀 모두 2 cm 가량 컸다.

검증 표본의 최종 키의 예측치와 실측치의 상관관계는 남자 0.88, 여자 0.95 이었으며 예측치와 실측치의 차이의 평균은 남자 0.76 cm, 여자 1.06 cm로 나타났다. 이는 예측치 약간 작게 평가하는 경향이 있다는 것을 의미했다. 예측 모형의 정확성을 판단하는데 더 의미 있는 절대값 오차의 경우 남자 2.13 cm, 여자 1.38 cm로 나타났으며, 예측 정확성 판별에 가장 많이 이용되는 표준오차의 경우 남자 2.65 cm, 여자 1.88 cm으로 대체로 남자 보다 여자의 예측 정확성이 더 높게 나타났다 (Table 2). 결국 최종 키 예측 오차가 실제 키에서 차지하는 비중을 백분율로 환산해 보았을 때, 남자 1.2%, 여자 0.8%의 평균 백분율 절대값 오차를 보였다.

곡선  $y = f_k(x)$ 의 오차인  $e = y_{12} - f_k(x_{12})$ 와 예측 정확성이 향상된 곡선  $y = f_k(x) + e_7$ 의 오

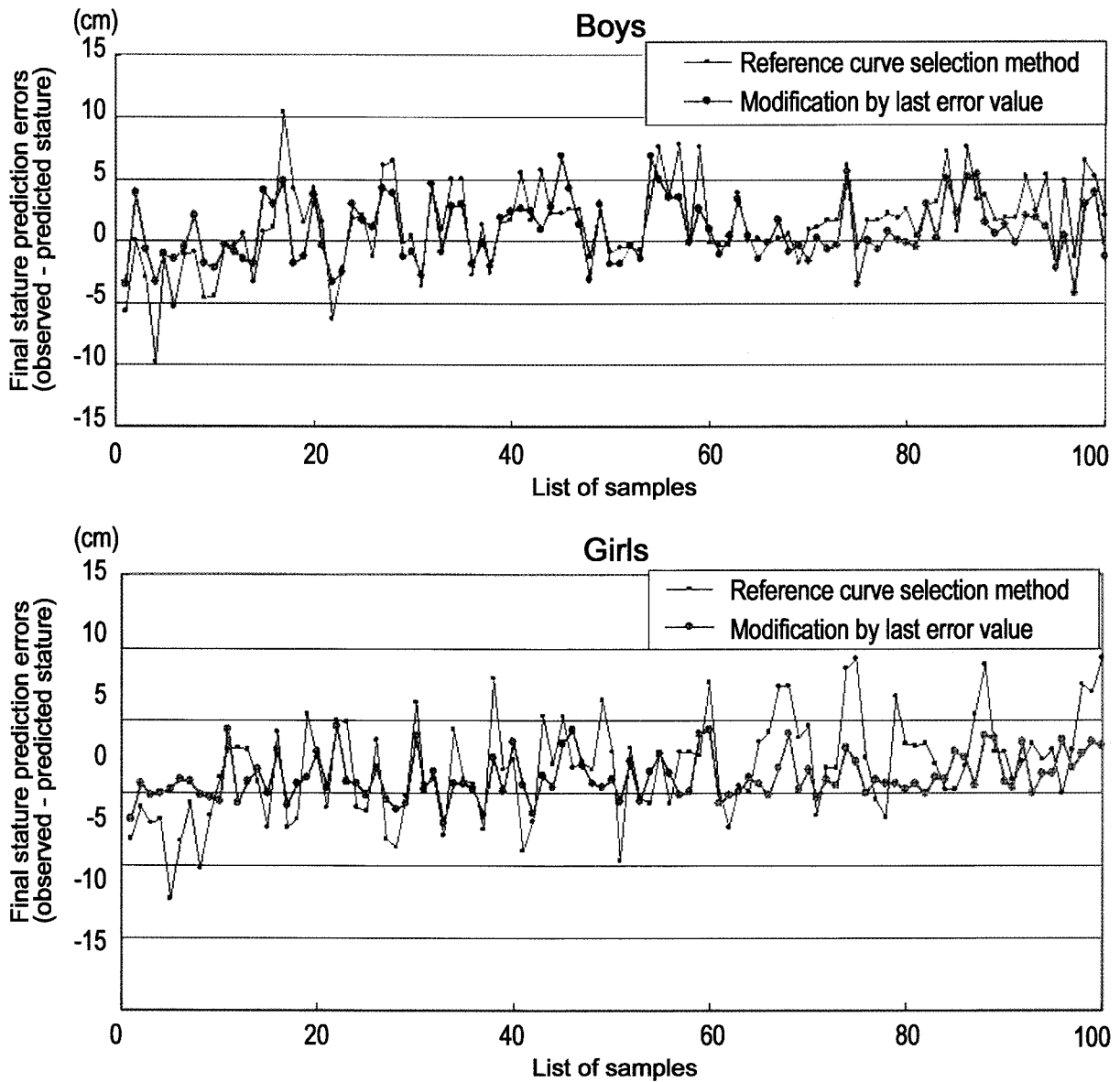


Fig 2. Plot of prediction errors (observed - predicted stature) for validation samples that were listed in ascending order of observed stature. Those errors in Step 1, reference curve selection, are decreased in Step 2, modification by last error value.

차인  $e' = y_{12} - f_k(x_{12}) - e_7$ 를 검증 표본 남녀별로 작은 키에서 큰 키까지 순서대로  $e, e'$ 를 대비시킨 error plot을 작성하여 최종 키 예측 정확성을 도식화한 결과 (Fig 2), 전반적으로 오차가 적으며 대부분의 오차들이  $\pm 5$  cm 범위 안에 들어가 비교적 정확한 최종 키 예측이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한, 예측 시 작은 키나 큰 키에 상관없이 예측의 편향되지 않음을 알 수 있었다.

**고찰**

성장과 발육 지표를 평가하고 이를 활용하여 성장기 환자의 악안면 골격에 대한 잔여 성장량을 파악하는 것이 교정치료 시 성장 연구의 목적인 바 다른 학문 분야에서도 중요 시 되어 왔다. 성장 연구 중 종단 자료를 채득하는 형태로 계속되고 있는 가장 길고 체계적인 연구는 1880년부터 줄곧 독일 예나

(Jena)의 소아과 의사들에 의해 시행되고 있는 인류학적 연구인 것으로 보인다.<sup>33</sup> 소아과 의사들은 어린이의 골격을 신장시키거나 성숙도를 높이기 위하여 사용되는 호르몬 치료 시 성장 예측의 중요성을 강조해 왔으며,<sup>34</sup> 때로는 키를 이용하여 조산아의 정상 성장 진행을 관찰하거나,<sup>35</sup> 터너 증후군과 같은 비정상 성숙도를 지니는 환자의 치료 효과를 평가하는데 이용되기도 했다.<sup>36</sup> 영양 상태 평가와 영양 필요를 결정하는 영양학이나 보건학 관계자들,<sup>8-10,23</sup> 특정 운동 분야에 재능 있는 어린이를 선별하는 목적으로 성장 예측의 분야에 관심을 갖는 스포츠 과학 전문가들,<sup>11,22</sup> 성장과 발육에 적합한 수학적 모형으로 개발하기 위한 통계학자나 공학 전문가들<sup>17</sup> 또한 성장 연구에 많은 노력을 기울여 왔다. 특정 인구 집단의 체질이나 체격을 파악하여 의복, 가구와 같은 산업 표준치 정보를 제공할 목적과 결부되어 국가차원의 정밀한 대단위 연구들이 시행되기도 한다. 이렇듯 성장에 관한 문제는 개인적인 차원을 훨씬 넘는 중대한 문제로 다루어져 각 나라마다 많은 비용을 들여 주기적인 대규모 조사 사업을 주기적으로 시행하고 있는 분야인 바, 성별, 인종적 차이가 뚜렷하게 드러나는 것이 잘 알려져 있기 때문에 유전학 및 인류학적인 정보 역시 포함하게 된다. 성장은 성별 및 인구 집단 별로 현저한 차이가 있기 때문에 성장 표준 혹은 지표는 연구 대상 개인 혹은 집단의 인종, 지역 및 시간적 요소가 일치되어야 한다. 평가에는 기준이 필요하고 성장의 평가는 소속된 인구 집단의 기준과 비교하는 일이 필요하기 때문이다. 또한 같은 인구 집단 내에서도 경제적 여건과 같은 사회적 환경이나 전쟁 상황과 같은 시대상에 따른 성장의 특성에 주목한 연구들<sup>18,33</sup>도 인간 성장에 관한 흥미로운 인류학적 고찰을 포함하고 있다. 각별히 성장 표준을 따르지 않는 예외적으로 - 그러나, 비정상적인 성장은 아닌 - 큰 키를 보이는 어린이에 대한 성장 모형도 보고된 바 있다.<sup>37</sup> 최근 우리사회에서 큰 화두로 떠오르고 있는 노인의 영양과 건강과 같은 노인 복지를 평가할 목적으로 시행된 키 예측 연구<sup>9,10</sup> 역시 향후 우리 사회에서 필요할 연구 주제로 보인다.

골령을 이용하는 성장 연구의 방법은 비록 오래 동안 사용되어온 방법이지만 여러 가지 단점이 있기 때문에 오늘날 출판되는 연구들은 주로 키와 역령을 사용하는 것으로 보인다. 골령은 우선 방사선 사진이 필요하다는 점에서 의사나 환자 보호자에

게 일정한 부담감을 준다. 골령에 의한 성장 추정 방식의 문제점은 오래 전부터 문제 시 되어 왔다. 골령의 근간인 골격 성숙도가 생물학적 성숙도에 대한 유일한 추정치 임에도 불구하고 특정 시점의 성장 속도에 대한 정보일 뿐 잔여 성장량이나 향후 성장 추정치에 대한 정보가 극히 적다는 것이 가장 큰 문제이며, 골령을 사용하지 않고 성인키를 예측할 때 정확성과 신뢰성의 손실이 미미하다.<sup>7,13,14</sup> 또한 정상적인 골격 성숙도를 보이는 환자에게 적용할 수 있을 뿐, 성장 질환은 없지만 조숙하거나 만기 성장하는 어린이에 대해 사용될 수 없으며, 터너 증후군과 같은 성장 질환이 있는 경우에도 사용할 수 없다.<sup>36</sup> 이처럼 골령을 사용하지 않을 때의 장점이 사용할 때보다 더 많기 때문에 역령을 사용하면서 다른 방법을 매개하는 성장 연구가 다양하게 소개된 것으로 보인다.

성장을 예측하기 위해 체형 분류(somatotype)를 이용하기도 하지만 반대로 체형을 객관적으로 결정하기 위해 키 성장 자료가 사용되기도 한다.<sup>6</sup> 부모의 키를 정보로 삼는 경우도 있었다. 하지만 대개 병원에 환자와 같이 오는 보호자는 어머니만인 경우가 많다. 그렇기 때문에 키만으로 예측을 시도하는 것은 간편성 및 실질적 면에서 장점이 된다. 또한 골령과 부모의 키 등 다양한 변수를 성장 예측 모형에 포함시키는 연구 방법에 대비하여 키만으로 예측하는 방법 역시 비교적 정확하며,<sup>14</sup> 체중의 경우도 큰 도움이 되지 않는다. 체중은 개인의 일생을 통해 변이가 많기 때문이다. 얇은키와 두피 두께, 삼두근 피부 두께를 골령 대신 포함시켜 성인 키를 예측하였던 바 그 정확성은 골격연령을 사용하는 것과 다르지 않다는 연구도 있었다.<sup>11</sup> 그러나, 이 역시 간편하게 키 성장 측정을 하는 것과는 달리 또 다른 연구 축적물을 필요로 하며 보편화된 방법이 아니다. 2차 성징을 통해 성숙도를 측정할 수 있긴 하겠지만, 이는 사춘기 때만 가능하다. 또한 2차 성징을 정확히 평가하는 과정에 문화적인 장벽이 있다는 것을 간과할 수 없다. 이 밖에 성인의 경우 무릎길이를 키 예측에 사용하기도 한다.<sup>9,10</sup> 이 방법은 주로 직립이 곤란한 60세 이상의 노년층에 대한 연구 방법으로 이용되고 있다. 성인의 경우 그 길이가 무척 안정적이고 키와 높은 상관관계가 있기 때문이다. 결국 키가 성장 연구의 주된 방법으로 자리 잡게 된 데에는 키 성장 자료 채득의 간편성 뿐만 아니라 키 성장 연구가 다른 방법들 보다 우월하기 때문이다.



우리나라에서는 매년 봄 각급 학교 단위로 어린이에 대한 주기적인 키 측정을 시행하고 있다. 어린이에 대한 몇 개의 누년 키 성장 자료는 현재 성장이 정상적으로 진행하고 있는지 알려줄 수 있으며 이러한 측정 자료가 있다면 방사선 사진을 촬영, 분석하는 비용과 번거로움이 없이 성인 키를 예측하는 가장 유용한 방법으로 생각된다.

본 연구에서 사용된 검증 표본 최종 키의 “최종”의 의미는 엄밀히 고등학교 3학년 봄, 체질 검사 당시의 키를 의미하는 것이었다. 키는 성인이 되어서도 계속 변화가 있기 때문에 이에 최종 키에 대한 명확한 기준이 필요하다. 기존 연구들에서 정의된 “최종” 혹은 “성인” 키는 대개 두 가지 방식으로 규정되어 있었다. 전자는 성장의 잔여량에 따라 시점을 정의하는 방법으로서 연간 성장량이  $1\text{ cm}^{17}$  이하로 떨어지는 시점으로 규정되기도 하며, 대개 남자는 16세, 여자는 14세 때 98% 정도의 성장량을 보이기 때문에  $2\text{ cm}$  이하로 떨어지는 시점을 최종 키로 정의한<sup>15,22</sup> 방식이 있다. 후자는 특정한 연령을 성인키로 설정한다. 17세를 최종(성인) 키로 규정한 경우도 있고,<sup>19</sup> 남자는 20세, 여자는 18세를 최종(성인) 키로 규정한 학자도 있으며,<sup>6</sup> 심지어 18세 이상일 때도 키가 크기 때문에 30세 키를 사용한 경우도 있었다.<sup>11</sup> 그러나 “최종(성인)”의 정의를 남녀 공히 18세 연령으로 정의하는 것이 통법이라 한다.<sup>7,38,39</sup> 최종 키의 정의가 다양한 이유는 연구에 필요한 적절한 표본 크기를 확보하면서 사춘기 최대 성장기를 지난 것을 구하기 위한 이유도 작용했을 것으로 보였다. 이러한 선학들의 최종 연령 설정 방식에 비추어 본 연구 표본의 최종 키 설정은 적절했던 것으로 보인다.

연령 범위에 따라 성장 연구의 방법도 달라진다. 실제로 2세 이하 유아의 성장 평가와 예측에 적절히 사용될 수 있는 방법<sup>19</sup>도 있으며 각별히 노인들을 대상으로 고안된 예측 모형<sup>9,10</sup>들도 있었다. 본 연구는 적용 연령대가 좁은 편이었다. 교정치료의 연령과 결부되어 성장 발육에 대한 평가가 예민한 초기 청소년기 연령에 중점을 두었기 때문이다.

본 연구에서 키 성장의 기준 자료로 이용된 자료는 종단 성장 자료가 아니라 SIZE KOREA 2004 프로젝트의 결과물인 연령별 횡단 자료로부터 추출한 것이었다. 기준 자료가 출생 시부터 기록된 장기간의 종단 성장 자료로 구성되었다면 더 이상적이었을 것이지만 이는 외국과 달리 장기간에 걸친 인류학적 성장 연구 자료가 없는 현실에 기인한 것이며 종단

성장 연구를 표본이 전국적인 대표성까지 지니도록 확보하는데 드는 막대한 비용을 고려해 보건데 이러한 자료를 이용하는 것은 현실적으로 유일한 대안이 될 수밖에 없으며 종단 누년 자료를 이용한다손 치더라도 개개인의 성장 양상 역시 큰 차이가 있을 것이므로 종단 연구 자료를 이용하는 것이 반드시 뛰어난 예측 정확성으로 귀결되리라 쉽게 예상할 수는 없다. 이때 종단 성장 함수를 구성하고 이들 곡선 중에서 대표적인 몇 개의 군집을 설정하여<sup>40</sup> 본 연구와 같은 방식의 방법론을 사용하거나, 비선형 회귀 곡선을 응용할 수 있다면 더 예측 정확성이 높은 알고리즘을 개발할 수도 있을 것이다. 이처럼 횡단 성장 자료를 이용하는 것은 성장 평가 - 즉, 개인의 성장이 전체 인구 집단과 대비하여 어느 정도의 수준에 있는가에 대한 평가 - 에는 도움이 되지만 개인의 특정한 성장 양상을 묘사하는데 여러 가지 문제점을 지닌다. 이는 이후 성장 오차의 정규성과 독립성의 결여로 원인으로 고찰되기도 했다. 우선 단점으로서 어린이들은 각자 다양한 양상으로 성장하지만 횡단 기준 성장 곡선에서는 개인의 특성이 흡수되어 곡선이 부드러워지는 경향이 있다. 더욱이 이를 성장 곡선으로 나타내고, 특히 성장 속도 곡선을 smoothing 하면 자료 내부의 단기 변동을 흐트러뜨릴 수 있으며 이에 의해 부정확한 예측이 될 수 있다. 또한 일정한 시간에 측정된 어린이의 횡단 성장 자료로부터 얻은 성장 곡선은 성장이 일정하게 일어난다는 잘못된 느낌을 주기 쉽다. 결국 관심의 주 대상이 성장 속도인 경우 우리가 친숙한 횡단 자료는 부적절하다.

그러나 본 연구에 사용된 성장 평가 및 예측 프로그램(Fig 1)에서 횡단 기준 성장 곡선에 개인별 성장을 중첩하여 나타내는 방식은 시각적으로 유용한 정보를 준다. 또한 9개의 백분위수에 대한 각각의 횡단 자료 내부에는 평균적이거나 작거나 혹은 늦은 성장을 보이는 어린이가 많이 포함되어 있다. 이러한 점은 동일 연령 집단 내에서 작거나 큰 키를 보이는 어린이의 성장도 적절하게 평가할 수 있다는 점에서 장점이다. 또한, 성장 평가 시 다양한 성장 저해 요소들이 작용하는 경우 곡선은 아래로 처져 나타날 것이며 상황이 좋아져 catch-up 성장이 일어나는 것도 쉽게 관찰할 수 있다. 이는 개인마다 특성이 뚜렷한 누년 종단 자료상에서 확인하기 어려운 점이다.

성장 시 개인마다 대단한 생물학적인 변동이 존재하며 키 성장 역시 이러한 다양한 생물학적 변동을

반영한다. 성장 예측을 다룬 수많은 문헌들은 이러한 성장 연구의 중요성을 방증하고 있음은 물론 가급적 간편한 방법으로 높은 정확성을 구현하는데 주안점을 두고 있었다. 이렇듯 성장을 표현하기 위한 함수는 개인의 성장이나 인구 집단의 특성을 파악하는데 필수적으로 사용되지만 사람의 성장을 함수로 표현하려는 노력은 그 자체로도 흥미 있는 일이다. 성장에 대한 일관성 있는 이론을 정립하기 위한 이론은 많았지만 통일된 단 하나의 모형을 거론할 수는 없는 실정이다. 키 성장을 일, 월, 혹은 연단위로 측정하였을 때 그 해석 방법은 다를 수밖에 없다. 따라서 측정의 간격에 따라 다른 결과를 나타내어 그 해석 역시 다르게 표현할 수밖에 없다. 심지어 한 소년의 성장을 1년 넘게 일 단위로 성장을 연구한 결과 성장이 연속적으로 발생하는 것이 아니라 비주기성으로 도약하는 성질이 있음(saltatory model)이 밝혀지기도 했다.<sup>41</sup>

그러므로, 성장을 함수로 나타내고자 한 본 연구 방법의 또 다른 장점은 성장 측정에 대한 특별한 시간 간격을 필요로 하지 않는다는 것이다. 기존 한국인 성장 속도 곡선은 단순히 연간 성장 차이의 기하 평균을 사용하여 표현함으로써<sup>25</sup> 성장 속도를 파악하고 비교하기 위해서는 측정 간격이 반드시 1년의 간격을 두어야만 사용할 수 있는 제한점이 있는 것과 가장 크게 대비되는 장점이다. 반면 본 연구는 성장 곡선이 함수로 구성되었기 때문에 측정기간이 불규칙하거나 어떠한 연령 시점에서 측정한 것이거나 혹은 몇몇의 연령별 측정값이 빠져 있어도 크게 영향을 받지 않는다.

본 연구에서 사용된 표준 성장 곡선을 이용한 성장 예측 모형은 비선형 회귀 모형과 마찬가지로, 골령을 사용하는 방법과 달리, 성장에 영향을 주는 발육성 질환이 있는 청소년에 대해서도 사용할 수 있다. 그런데 특이하게 키가 크거나 작은 경우 회귀 곡선을 이용한 방법보다 우수하다. 회귀 모형의 경우 평균 성장 추세를 보이는 표본의 경우 정확성이 높지만 평균과 거리가 멀수록 예측 정확성이 떨어지는 회귀 모형 고유의 단점이 작용하기 때문이다. 그러나 본 연구에서 사용된 모델은 여러 개의 표준 성장 곡선을 이용하여 이러한 문제를 극복하였다. 그러므로 본 연구의 모형은 신체 성숙에 문제가 있으며 키가 크거나 작은 경우에도 성장 평가 및 예측이 가능할 것으로 생각된다.

본 연구 방법론을 요약하면 한국인 기준 성장 곡

선을 함수로 표현하고 이를 실측된 개인별 종단 자료를 적용하여 적합성을 보는 방식이 근간이며 이는 곧 9개 중에 하나의 함수를 고르는 일과 같다. 비록 수 개의 곡선 중에서 성장 양상을 가장 잘 반영하는 곡선을 선택하는 방식은 매우 우수한 정확성을 보였다. 결과적으로 적합성 그 자체, 즉 고르는 것에는 무리가 없다. 실측값과 예측치의 차이를 오차(error, residual)라고 했을 때, 최적의 곡선을 찾는 과정은 이 오차의 제곱의 합이 가장 적도록 하는 것이었고, 곡선 적합성의 기준은 최소제곱합(least sum of square)에 의거했다. 이에 따라 도출된  $R^2$  값은 개개인의 성장 양상이 기준 성장 곡선에 얼마나 잘 맞는지를 보여주며 결과적으로 매우 높은 평균치를 보였으며 빈도 분석에서도 우수한 단면을 보여주었다 (Table 1).

NCSF 성장 곡선은 미분 함수 즉, 개별 성장 속도 모두가 유사하게 표현되는 문제가 있다. 성장 양상의 다양성을 표현하지 못하는 것이다. 개별 성장의 다양성을 잃지 않으면서도 좀 더 정확성이 높은 수학적 표현 방식이 필요한 이유도 여기에 있다. 그러나 이것이 본 연구의 장점이 되기도 한다. 9개 곡선 중에서 어느 곡선에 가장 근접한가를 고르는 문제는 개개인의 성장이 한국인 전체의 성장 자료 중 어느 수준에 위치하고 있는지를 파악하는 문제와 같기 때문이다. 이러한 방법론은 결국 개인이 기준 집단 내에서 보이는 성장의 수준을 파악하는 방법론으로 적합하지 않을 까 생각된다. 본 연구결과 Fig 1의 기준 성장 곡선에 개인의 성장 곡선을 적합시켜 보면 성장이 저해되고 있는지 등을 쉽게 살필 수 있으므로 성장이 정상적으로 진행되는지의 여부 또한 살필 수 있다. 우리나라 사람의 성장 양상은 각 연령 군에 따라 시대상이나 환경의 영향을 받는 경우가 많아 곡선이 부드럽지 않고 변동이 두드러지는 특성도 발견된다. 각별히 저 연령군일수록 성장 시 기대되는 키가 크고 고 연령군일수록 키가 작은 특성이 있다. 나라마다 각기 다른 양상을 보일 수 있겠으나 이와 같은 현상은 최근 2 ~ 30년간 급속하게 벌어진 우리 사회의 경제적 성장에 따른 고유한 특성 중의 하나인 것으로 해석되어 왔다.<sup>25</sup>

검증 표본의 모든 연령 별 키 실측값 중에서 가장 최근의 오차가 최종 키 예측에 가장 강력한 변수로 작용하였으며 이는 연령이 높을수록, 최대 성장기를 지났을수록 예측 정확성이 높아지며<sup>6</sup> 남자 14세, 여자 12세 이후에 예측 정확성이 높다는 선행의 보고와 일치한다.<sup>22</sup> 키 예측 오차의 원인이 주로 개인별

사춘기 시기와 최대 성장기의 시기에 영향을 받는다는 것을 고려할 때 이러한 결과는 오히려 자연스러워 보인다.

본 연구의 예측 정확성은 기존 예측 모형과 비교했을 때 비슷하거나 혹은 우수한 것으로 나타났다 (Table 2). 남녀별로 보았을 경우 예측 정확성은 남자보다 여자에게 더 좋았는데 이는 기존의 연구<sup>37</sup>와 부합되는 결과였다. 100년이 훨씬 넘는 인류학적 연구를 보면 시대적, 환경적 차이와 상관없이 여자들은 항상 남자들에 비하여 키 성장의 변이가 적다고 한다.<sup>33</sup> 여자 키 분포의 균질성이 여자의 예측 정확성이 높은 것과 관계 있는지는 알 수 없었다.

비록 본 연구의 최종 키 예측 정확성이 우수하고 높은 곡선의 설명력,  $R^2$ 를 보이긴 했지만 예측된 모든 연령별 키 예측 정확성과 오차를 분석한 결과 연령별 키 예측 오차는 비교적 우수한 성질을 보였지만 오차의 정규성이나 독립성은 보장되지 않았다 (Table 1). 만약 선택된 성장 곡선이 성장 자료를 완벽하게 반영할 수 있는 것이라면 오차들은 정규분포를 따르게 된다. 자기상관관계(autocorrelation)는 예측 오차간의 연속적인 상관관계를 검증하는데 쓰이며, 만약 NCSF 곡선이 성장을 표현하는데 완벽한 것이 되려면 자기상관관계를 나타내는 Durbin Watson 통계량은 2가 되어야 한다. 그러므로 NCSF 곡선은 개인의 성장을 표현하는데 완벽하게 적합하다고는 볼 수 없다.

방사선 사진을 이용한 성장 평가는 한 시점의 성장 가능성 혹은 성장 속도를 다룬 것일 뿐 성장의 정량적 측면, 즉, 앞으로 얼마나 많은 성장량이 남아 있는지에 대한 정보를 제공하지는 못하며 앞서 논의된 바와 같은 많은 문제점을 지니고 있다. 우리나라에서는 초등학교 입학 때부터 매년 5 ~ 6월 사이 각급 학교에서 주기적인 신체 지표 측정이 이루어지므로 이러한 자료만으로 성장을 평가하고 최종 키를 예측할 수 있다면 교정 치료 시 비용이 적고 간편하고 유용한 진단 보조 자료로 이용될 수 있을 것이다. 본 연구를 토대로 하여 향후 3가지 방향의 연구를 지속할 수 있을 것으로 보인다. 첫 째, 장기간의 누년자료를 기준으로 하여 좀 더 개인의 성장을 잘 표현할 수 있는 방법을 고안할 수 있을 것으로 기대된다. 둘째, 본 연구에서 측정된 예측 정확성은 15세까지 자료가 필요한 것이었던 바 실제 임상에서는 그 이전, 즉, 7 ~ 10세, 혹은 11세 정도의 자료를 이용하는 경우가 더 많다. 이와 같이 좀 더 이른 시점

에 예측 정확성을 측정할 수 있는 성장 예측 모형이 필요하다. 셋 째, 본 연구의 NCSF 성장곡선은 한국인의 기준 성장 정보를 담긴 했지만 보간에 중점을 둔 것일 뿐 생물학적인 모수 자체를 도출하지 못하는 단점이 있다. 만약 PB model과 같은 비선형 회귀곡선을 성장 모형으로 삼는다면 이를 이용한 미분함수로부터 최대성장기, 최소성장기와 같은 생물학적으로 중요한 의미가 있는 지표들을 생성해 줄 수 있다. 나아가 최근 보고된 함수의 군집화 연구를 응용,<sup>40</sup> 다양한 개인의 성장 양상을 분류할 수 있다면 더 우수한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 넷 째, 우리나라에서 빈번한 청소년기 III급 부정교합 환자의 치료 예후 감별의 유용성을 검토하는 것이다. 그 동안 III급 부정교합 불량 예후 군에 대한 감별은 여러 가지 판별식<sup>42,43</sup> 을 통해 그 정보를 얻곤 했는데 이는 두부방사선 계속사진을 통해 얻은 정보를 이용한 것이었으며 전신 성장의 양상을 검토하지 못했다. 교정 치료의 예후가 주로 성장과 결부된 것임을 비추어 볼 때, 청소년기 키 성장 자료를 수학적 함수에 적합시켜 도출되는 곡선의 모수 추정치를 이용하여 하악골 과성장 군과 정상 성장 군 사이에 차이가 있는가를 판단하는 것 역시 교정 치료 시 유용한 정보를 도출할 수 있을 것으로 기대해 보았다.

## 결론

본 연구에서는 성장 평가와 예측에 가장 신뢰성 있는 지표로 알려진 키 성장 자료를 이용하여 교정 치료 시 간편하게 사용될 수 있는 전산 프로그램을 위한 알고리즘을 개발한 결과 한국인의 키의 기준 성장 곡선은 3차 스플라인 함수를 이용하여 적절히 표현할 수 있다는 결과를 얻었다. 이를 실제 검증 표본의 종단 자료에 적용하여 검증한 결과 최종 키 예측 정확성은 높았다. 그러나 모든 연령에 대한 키 예측 오차 분석 시 오차의 정규성과 독립성이 결여된 것은 횡단 자료로 작성한 함수로 종단 자료에 적용한 연구 방법론에 의해 발생한 피할 수 없는 특성에 기인한 것으로 보였다. 결론적으로 본 연구는 임상 환경에서 손쉽게 구사할 수 있는 성장 평가 및 예측 소프트웨어에 적합한 알고리즘을 생성할 수 있었으나 향후 개인의 성장을 좀 더 정확히 묘사할 수 있는 성장 모형의 개발 또한 필요할 것으로 생각되었다.

## 참고문헌

1. Ali MA, Ohtsuki F. Prediction of adult stature for Japanese population: a stepwise regression approach. *Am J Hum Biol* 2001;13:316-22.
2. Bayley N, Pinneau SR. Tables for predicting adult height from skeletal age: revised for use with Greulich-Pyle hand standards. *J Pediatr* 1952;40:423-41.
3. Roche AF, Wainer H, Thissen D. The RWT method for the prediction of adult stature. *Pediatrics* 1975;56:1027-33.
4. Tanner JM, Whitehouse RH, Cameron N, Marshall WA, Healy MJR, Goldstein H. Assessment of skeletal maturity and prediction of adult height (TW2 method). London: Academic Press; 1983. p. 22-37.
5. Sheldon W. The New York study of physical constitution and psychotic pattern. *J Hist Behav Sci* 1971;7:115-26.
6. Walker RN. Standards for somatotyping children: I. The prediction of young adult height from children's growth data. *Ann Hum Biol* 1974;1:149-58.
7. Khamis HJ, Roche AF. Predicting adult stature without using skeletal age: the Khamis-Roche method. *Pediatrics* 1994;94:504-7.
8. Cole TJ, Freeman JV, Preece MA. British 1990 growth reference centiles for weight, height, body mass index and head circumference fitted by maximum penalized likelihood. *Stat Med* 1998;17:407-29.
9. Chumlea WC, Guo SS, Wholihan K, Cockram D, Kuczmariski RJ, Johnson CL. Stature prediction equations for elderly non-Hispanic white, non-Hispanic black, and Mexican-American persons developed from NHANES III data. *J Am Diet Assoc* 1998;98:137-42.
10. Lera L, Luis Santos J, Garcia C, Arroyo P, Albala C. Predictive equations for stature in the elderly: a study in three Latin American cities. *Ann Hum Biol* 2005;32:773-81.
11. Beunen GP, Malina RM, Lefevre J, Claessens AL, Renson R, Simons J. Prediction of adult stature and noninvasive assessment of biological maturation. *Med Sci Sports Exerc* 1997;29:225-30.
12. Lyon AJ, Preece MA, Grant DB. Growth curve for girls with Turner syndrome. *Arch Dis Child* 1985;60:932-5.
13. Khamis HJ, Guo S. Improvement in the RWT stature prediction model: a comparative study. *Am J Hum Biol* 1993;5:669-79.
14. Wainer H, Roche AF, Bell S. Predicting adult stature without skeletal age and without paternal data. *Pediatrics* 1978;61:569-72.
15. Hintz RL. Final height prediction in constitutional growth delay. *J Pediatr Endocrinol Metab* 2001;14:1535-40.
16. Bock RD, Wainer H, Petersen A, Thissen D, Murray J, Roche A. A parameterization for individual human growth curves. *Hum Biol* 1973;45:63-80.
17. Preece MA, Baines MJ. A new family of mathematical models describing the human growth curve. *Ann Hum Biol* 1978;5:1-24.
18. Hauspie RC, Das SR, Preece MA, Tanner JM. A longitudinal study of the growth in height of boys and girls of West Bengal (India) aged six months to 20 years. *Ann Hum Biol* 1980;7:429-40.
19. Ledford AW, Cole TJ. Mathematical models of growth in stature throughout childhood. *Ann Hum Biol* 1998;25:101-15.
20. Shohoji T, Sasaki H. Individual growth of stature of Japanese. *Growth* 1987;51:432-50.
21. Jolicoeur P, Pontier J, Permin MO, Sempe M. A lifetime asymptotic growth curve for human height. *Biometrics* 1988;44:995-1003.
22. Fujii K, Matsuura Y. Analysis of the velocity curve for height by the wavelet interpolation method in children classified by maturity rate. *Am J Hum Biol* 1999;11:13-30.
23. Walker JT, Walker OA. A multiphasic approach for describing serial height data of Fels children: a hexaphasic-logistic-additive growth model. *Growth Dev Aging* 2000;64:33-49.
24. Rosen O, Cohen A. Analysis of growth curves via mixtures. *Stat Med* 2003;22:3641-54.
25. Lee SJ, Kim YJ, Ahn SJ, Kim TW. New evaluation chart of stature and weight for Koreans. *Korean J Orthod* 2006;36:153-60.
26. Burden RL, Faires JD. Interpolation and polynomial approximation. In: Numerical analysis. 7th edition. Burden RL, Faires JD editors. Pacific Grove: Brooks/Cole; 2001. p. 141-56.
27. BeGole EA. Application of the cubic spline function in the description of dental arch form. *J Dent Res* 1980;59:1549-56.
28. BeGole EA, Lyew RC. A new method for analyzing change in dental arch form. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1998;113:394-401.
29. Davis LM, BeGole EA. Evaluation of orthodontic relapse using the cubic spline function. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1998;113:300-6.
30. Cole TJ, Green PJ. Smoothing reference centile curves: the LMS method and penalized likelihood. *Stat Med* 1992;11:1305-19.
31. Durbin J, Watson GS. Testing for serial correlation in least squares regression. I. *Biometrika* 1950;37:409-28.
32. Durbin J, Watson GS. Testing for serial correlation in least squares regression. II. *Biometrika* 1951;38:159-78.
33. Zellner K, Kromeyer K, Jaeger U. Growth studies in Jena, Germany: historical background and secular changes in stature and weight in children 7-14 years. *Am J Hum Biol* 1996;8:371-82.
34. Kristrom B, Wikland KA. Growth prediction models, concept and use. *Horm Res* 2002;57:66-70.
35. Falkner F. Normal growth and development: current concepts. *Postgrad Med* 1977;62:58-63.
36. Lyon AJ, Preece MA, Grant DB. Growth curve for girls with Turner syndrome. *Arch Dis Child* 1985;60:932-35.
37. de Waal WJ, Stijnen T, Lucas IS, van Gurp E, de Muinck Keizer-Schrama S, Drop SL. A new model to predict final height in constitutionally tall children. *Acta paediatr* 1996;85:889-93.
38. Roche AF, Davila GH. Late adolescent growth in stature. *Pediatrics* 1972;50:874-80.
39. Roche AF. The final phase of growth in stature. *Growth Genet Horm* 1989;5:4-6.
40. Abraham C, Cornillon PA, Matzner-Lober E, Molinari N. Unsupervised curve clustering using B-splines. *Scand J Stat* 2003;30:581-95.
41. Johnson ML. Analysis of serial growth data. *Am J Hum Biol* 1993;5:633-40.
42. Son MH, Chang YI. Evaluation of various cephalometric measurements to predict the prognosis of early Class III malocclusion treatment. *Korean J Orthod* 2004;34:205-18.
43. Moon YM, Ahn SJ, Chang YI. Cephalometric predictors of long-term stability in the early treatment of Class III malocclusion. *Angle Orthod* 2005;75:747-53.

## Construction of a reference stature growth curve using spline function and prediction of final stature in Korean

Hongsug An, BS, BS,<sup>a</sup> Shin-Jae Lee, DDS, MSD, PhD<sup>b</sup>

**Objective:** Evaluation of individual growth is important in orthodontics. The aim of this study was to develop a convenient software that can evaluate current growth status and predict further growth. **Methods:** Stature data of 2 to 20 year-old Koreans (4893 boys and 4987 girls) were extracted from a nationwide data. Age-sex-specific continuous functions describing percentile growth curves were constructed using natural cubic spline function (NCSF). Then, final stature prediction algorithm was developed and its validity was tested using longitudinal series of stature measurements on randomly selected 200 samples. Various accuracy measurements and analyses of errors between observed and predicted stature using NCSF growth curves were performed. **Results:** NCSF growth curves were shown to be excellent models in describing reference percentile stature growth curve over age. The prediction accuracy compared favorably with previous prediction models, even more accurate. The current prediction models gave more accurate results in girls than boys. Although the prediction accuracy was high, the error pattern of the validation data showed that in most cases, there were a lot of residuals with the same sign, suggestive of autocorrelation among them. **Conclusion:** More sophisticated growth prediction algorithm is warranted to enhance a more appropriate goodness of model fit for individual growth. (*Korean J Orthod* 2007;37(1):16-28)

**Key words:** Reference growth curve, Spline function, Stature prediction

<sup>a</sup>College Student, School of Dentistry, Seoul National University, Seoul, Korea.

<sup>b</sup>Assistant Professor, Department of Orthodontics, School of Dentistry and Dental Research Institute, School of Dentistry, Seoul National University, Seoul, Korea.

Corresponding author: *Shin-Jae Lee*.

Department of Orthodontics, School of Dentistry, Seoul National University, 28-2 Yeongeon-Dong, Jongro-Gu, Seoul 110-749, Korea.

+82 2 2072 3019; e-mail, *nonext@snu.ac.kr*.

Received July 5, 2006; Last Revision August 31, 2006; Accepted September 2, 2006.