

# 미세역학을 이용한 치아 내 에나멜의 물성치 예측에 관한 연구

## Estimation of the elastic constants of an enamel of tooth by using a micro-mechanical analysis

\*1.# 윤영준

<sup>1,#</sup> Y. J. Yoon (yoon.youngjune@gmail.com)

<sup>1</sup>한양대학교 기계공학부

Key words : Mechanical properties, enamel, micromechanics, elastic constants.

### 1. 서론

치아 내에서 가장 강하고 단단한 물질이 에나멜이다. 이 생체조직은 치아의 겉면을 둘러싸고 있으며 그 성분은 애퍼타이트에 해당하는 미네랄이 96%, 단백질 등의 유기물질이 약 1%, 그리고 물이 4%정도를 차지한다<sup>1</sup>. 이 생체조직은 치아의 다른 생체조직 (예를 들면 상아질이나 펄프)에 비하여 그 두께가 얇으며, 치아의 최고점에서부터의 최대 길이가 2.5mm이다<sup>2</sup>.

에나멜의 물성치를 측정하기 위해서는 그 두께가 얇다는 조건 때문에 실험적으로 나노인덴테이션을 이용한 물성치 측정이 그 주를 이루고 있다<sup>3,4,5,6</sup>. 그러나 이론적으로 에나멜의 물성치 예측을 위하여 간단한 보이트 로이스 바운드를 사용하였다<sup>7</sup>. 이는 물성치의 값이 콜라겐등의 단백질과 애퍼타이트와 같은 미네랄로 단순히 결합되어있다고 간주하여 예측한 값이다. 다른 방법으로는 콜라겐과 미네랄의 배열형태에 따라서 다단계에 걸쳐서 뼈의 물성치를 예측하였다<sup>8,9</sup>.

에나멜은 뼈의 조직과 달리 그 성분이 주로 애퍼타이트로 구성되어 있으며, 애퍼타이트들은 프리즘이라고 하는 막대형태로 결합되어 약간의 물과 단백질로 둘러싸여 있는 형태를 지니고 있다. 이 프리즘은 쉬드(sheath)라고 하는 단백질로 둘러싸여져 있다.

실험적으로 측정된 에나멜의 물성치는 나이가 많은 사람의 에나멜과 나이가 상대적으로 적은 사람의 에나멜에 대한 물성치를 나노인덴테이션을 이용하여 측정하였다. 젊은 층에서 측정된 에나멜의 탄성치는 84.4+4.4GPa, 그리고 노년층에서 측정된 에나멜의 탄성치는 91.1+6.5 GPa이다.

이 연구에서는 미세역학의 방법을 이용하여 에나멜의 물성치를 예측하여 위의 실험치와 비교

하려고 한다.

### 2. 미세역학을 이용한 해석방법

단백질 (약 1%), 물 (4%), 그리고 미네랄 (96%)의 성분들로 이루어진 에나멜은 먼저 성분의 양에 따라서 널리 사용되는 혼합법칙을 이용하여, 단백질에 물이 싸여져 있을 경우와 미네랄에 물이 싸여져 있을 경우와 같이 두 가지 경우로 나눌수 있다. 먼저 콜라겐에 물이 싸여져 있을 경우,

$$C_{cw} = (1 - \phi)C_c + \phi C_w,$$

여기서  $C_c$ 는 단백질의 탄성텐서 (elasticity tensor)에 해당하고,  $C_w$ 는 물의 탄성텐서가 된다. 여기서  $\phi$ 는 단백질과 물의 혼합법칙에서 필요한 물의 분량은 나타낸다. 비슷하게 미네랄이 물에 싸여 있는 경우,

$$C_{hw} = (1 - \phi)C_h + \phi C_w,$$

로 나타내며, 여기서  $C_h$ 는 미네랄의 탄성텐서가 된다. 이로부터 각각의 탄성계수를 예측하고, 이로부터 원통형 구조의 프리즘을 가지고 있는 에나멜의 물성치는 다음의 식에서 구해진다.

$$C_{enamel} = C_{sheath} \left( 1 - \frac{P_{prism}}{\phi_{prism} (C_{sheath} - C_{prism})^{-1} C_{sheath} - P_{prism}} \right)$$

여기서

$$P_{prism} = \sum_{\xi} \phi_{prism} g(-\xi) g(\xi) FP_{prism}(\xi).$$

또한

$$g(\xi) = \frac{\sin w}{w} \frac{2}{B} J_1(B), \quad w = \pi n_3 (b_3/a_3),$$

$$B = \pi (b_1/a_1) \sqrt{n_1^2 + n_2^2} \text{ 이다.}$$

### 3. 결과

나이가 적은 군과 많은 군의 두 가지 군으로 나누어서 계산하였다. 두 개의 군이 일정한 성분 (물 3%, 미네랄 96%, 그리고 단백질 1%)으로 이루어져 있다고 가정하고, 나이가 많은 군은 3%의 물 중 약 90%가 단백질과 연관되어있다고 유추하여, 그리고 나이가 적은 군은 3%의 물 중 약 80%가 단백질에 결합되어 있다고 유추하였다. 이는 최종적으로 도달할 결론인 나이가 들어감에 따라서 단백질에서 결합된 물이 이동하여 미네랄과 결합한다는 것을 유추해 낼 수 있다.

Table 1 Estimated elastic constants of an enamel between two different age groups

	나이가 젊은 집단	나이가 많은 집단
E1 (GPa)	74.7	86.4
E2 (GPa)	74.7	86.4
E3 (GPa)	83.3	96.4
$\nu_{12}$	0.298	0.297
$\nu_{13}$	0.253	0.253
$\nu_{21}$	0.298	0.297
$\nu_{23}$	0.253	0.253
$\nu_{31}$	0.283	0.282
$\nu_{32}$	0.283	0.282
G12 (GPa)	31.7	36.7
G13 (GPa)	31.8	36.8
G23 (GPa)	31.8	36.8

### 4. 결론

나이가 적은 군과 많은 군의 두 가지 군으로 나누어서 계산한 결과, 그 결과치는 실험적으로 계산된 결과치 (젊은 층에서 측정된 에나멜의 탄성치는 84.4+4.4GPa, 그리고 노년층에서 측정된 에나멜의 탄성치는 91.1+6.5 GPa)와 근접하게 예측하였다. 이로부터 유추된 값은 나이가 많은 집단의 물이 미네랄과 결합한 양이 젊은 집단의 물이 미네랄과 결합한 양보다 약 10%정도 많음을 알 수 있다.

### 후기

본 연구는 한국연구재단 연구비 (2010-0023070)의 지원을 받아서 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Robinson, C., Weatherell, J.A. and Hallsforth, A.S. "Variation in composition of dental enamel within thin ground tooth sections" *Cares Res*, **5**, 44-57, 1971
2. Ten Cate, A.R. "Oral Histology: Development, Structure, and Function", 5th edition, Mosby, Saint Louis, 1998
3. Ge, J., Cui, F.Z., Wang, X.M., and Feng, H.L. "Property variations in the prism and the organic sheath within enamel by nanoindentation" *Biomaterials*, **26**, 3333-3339, 2005
4. Park, S.J., Wang, D.H., Zhang, D., Romberg, E., and Arola, D., "Mechanical properties of human enamel as a function of age and location in the tooth", *J. Mater Sci: Mater Med*, **19**, 2317-2324, 2008
5. Cuy, J. L., Mann, A.B., Livi, K.J., Teaford, M.F., and Weihs, T.P., "Nanoindentation mapping of the mechanical properties of human molar tooth enamel" *Archives of Oral Biology*, **47**, 281-291, 2002
6. Braly, A., Darnell, L.A., Mann, A.B., Teaford, M.F., and Weihs, T.P., "The effect of prism orientation on the indentation testing of human molar enamel" *Archives of Oral Biology*, **52**, 856-860, 2007
7. Zhou, J. and Hsiung, L.L., "Depth dependent mechanical properties of enamel by nanoindentation", *J. Biomed. Mater. Res.*, **81A**, 66-74, 2007
7. Yoon, Y.J. and Cowin, S.C., "The estimated elastic constants for a single bone osteonal lamella", *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, **7**, 1-11, 2008
8. Yoon, Y.J. and Cowin, S.C., "An estimate of anisotropic poroelastic constants of an osteon", *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, **7**, 13-26, 2008