

## TiO<sub>2</sub> 농도 및 여기광에 따른 광촉매 반응이 *Streptococcus mutans*의 생장에 미치는 영향

강시묵<sup>1,2,3</sup> · 이해나<sup>1</sup> · 김희은<sup>4</sup> · 김백일<sup>1,2,3</sup>†

<sup>1</sup>연세대학교 치과대학 예방치과학교실, <sup>2</sup>BK21 플러스 통합구강생명과학 사업단, <sup>3</sup>구강과학연구소, <sup>4</sup>가천대학교 보건과학대학 치위생학과

### Influence of TiO<sub>2</sub> Concentrations and Irradiation Lights on the Photocatalytic Reaction for Inhibiting Growth of *Streptococcus mutans*

Si-Mook Kang<sup>1,2,3</sup>, Hae-Na Lee<sup>1</sup>, Hee-Eun Kim<sup>4</sup> and Baek-Il Kim<sup>1,2,3</sup>†

<sup>1</sup>Department of Preventive Dentistry and Public Oral Health, Yonsei University College of Dentistry, Seoul 120-752,

<sup>2</sup>BK21 PLUS Project, Yonsei University College of Dentistry, Seoul 120-752,

<sup>3</sup>Oral Science Research Center, Yonsei University College of Dentistry, Seoul 120-752,

<sup>4</sup>Department of Dental Hygiene, College of Health Science, Gachon University, Incheon 406-799, Korea

The aim of this study was to evaluate influences of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) concentrations and irradiation times on growth of *Streptococcus mutans* when irradiated by visible light (405 nm wavelength) and by ultraviolet light (254 nm wavelength). To find the optimal antibacterial concentration of TiO<sub>2</sub>, 0.01, 0.1, 1.0, and 10.0 mg/ml TiO<sub>2</sub> suspension was prepared with sterilized distilled water. *S. mutans* cultured media was added to TiO<sub>2</sub> solution to set the final cell count to 10<sup>4</sup> CFU/ml. The photocatalytic reaction was induced by irradiating 254 nm and 405 nm lights for 10 minutes. To compare the bactericidal activities according to irradiation times, all photocatalytic reaction was carried out with 0.1 mg/ml TiO<sub>2</sub> for 0, 10, 20, 30, and 40 minutes with both lights. After the photocatalytic reaction, 100 μm of the reaction mixture was immediately plated on brain heart infusion agar. These plates were placed at 5% CO<sub>2</sub>, 37°C, for 24 hours and the bacterial colonies were counted. All experiments were performed in quintuplicate. One-way ANOVA was used to determine whether there were any significant differences between the TiO<sub>2</sub> concentrations or the irradiation times. The most effective concentration of TiO<sub>2</sub> for its photocatalytic bactericidal effect on *S. mutans* was 0.1 mg/ml when irradiated with 254 nm and 405 nm lights. The longer the irradiation time, the bigger the bactericidal effect for both wavelengths. Over 99% of bacteria in the inoculum were killed after irradiation with 254 nm for 20 minutes and with 405 nm for 40 minutes. In conclusion, a photocatalytic reaction of TiO<sub>2</sub> induced by visible light of 405 nm constitutes the bactericidal effect on *S. mutans*.

**Key Words:** Light, Photocatalyst, *Streptococcus mutans*, Titanium dioxide, Ultraviolet rays

## 서론

통성 혐기성이며 그람 양성균인 *Streptococcus mutans*는 치면세균막과 타액에서 발견되고, 치아우식증의 주요 원인균으로 잘 알려져 있다<sup>1)</sup>. 많은 연구자들은 치아우식증의 효과적인 관리를 위해 구강 내 *S. mutans*를 제거하거나 저해

또는 사멸시키기 위한 다양한 방법을 시도하였다. 치아 표면의 치면세균막을 효과적으로 제거하기 위해서 칫솔 등을 이용하는 물리적인 관리를 시행할 수 있으나 구강의 형태 및 치아의 구조에 따라 치면세균막을 완벽하게 제거하기 어려운 경우가 있다<sup>2)</sup>. 그러므로 화학적인 치면세균막 조절방법을 병용하여 구강 관리가 취약한 부위를 보완하는 과정이

Received: June 21, 2014, Revised: August 1, 2014, Accepted: August 3, 2014

ISSN 1598-4478 (Print) / ISSN 2233-7679 (Online)

†Correspondence to: Baek-Il Kim

Department of Preventive Dentistry and Public Oral Health, Yonsei University College of Dentistry, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 120-752, Korea  
Tel: +82-2-2228-3070, Fax: +82-82-2-392-2926, E-mail: drkbi@yuhs.ac

Copyright © 2014 by the Korean Society of Dental Hygiene Science

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

필요하다. 화학적 치면세균막 조절은 구강 내 유해 세균을 조절하기 위해서 다양한 항균물질을 적용하는 방법을 주로 일컫는다. 그러나 지속적으로 항생제를 사용할 경우 구강 미세생태계 교란 및 내성을 갖는 세균이 발생할 수 있다<sup>2)</sup>. 한편 항균력이 우수한 클로르헥시딘과 같은 항균물질은 장기간 사용 시 치아에 착색을 유발하거나 미각을 교란시키는 등 몇 가지 부작용이 보고되고 있어 사용에 주의가 필요하다<sup>3,4)</sup>. 따라서 사용이 간편하면서 부작용이 적고 복잡한 형태학적 구조를 갖는 치아에 쉽게 적용할 수 있는 새로운 화학적 치면세균막 조절법의 개발이 필요하다.

빛은 다양한 파장으로 구별되고 이에 따라 에너지를 갖는다. 이러한 빛 에너지를 이용한 광촉매(photocatalyst)는 빛(photo)과 촉매(catalyst)의 합성어로 빛을 에너지원으로 이용하여 산화, 환원반응을 촉진시키는 반도체 물질을 의미한다<sup>5)</sup>. 광촉매 반응으로 일어난 산화, 환원 반응은 유기물을 이산화탄소와 물로 분해시키며 미생물의 성장을 억제하거나 사멸하는 능력을 가지고 있다<sup>6)</sup>.

광촉매로서 이용될 수 있는 물질 중 이산화 티타늄(TiO<sub>2</sub>)은 인체에 적용하기 좋은 광촉매 소재로 알려져 있다<sup>7)</sup>. 지구상에 많이 존재하는 원소인 티타늄이 산화된 형태로 존재하는 이산화 티타늄은 자원적으로 풍부하고 가격이 저렴하다. 또한 이산화 티타늄은 내마모성, 내구성이 좋고, 물질 자체가 안전하고 쉽게 변하지 않으며, 인체에 독성을 나타내지 않는다. 이와 같이 이산화 티타늄은 촉매제로 사용하기에 많은 장점을 가지고 있어 광촉매로 가장 많이 사용된다<sup>8)</sup>. 이산화 티타늄 광촉매는 380 nm 이하의 빛에 의해 수산화 라디칼(hydroxyl radical: ·HO)과 초과산화 이온(superoxide ion: O<sub>2</sub><sup>-</sup>)을 생성하여 강력한 산화반응을 일으킨다. 이러한 활성 산소들은 유기물을 효과적으로 분해하기 때문에 항균, 탈취, 유해물 제거 등에 활용이 가능하다<sup>9)</sup>. 이산화 티타늄의 광활성화(photoactivity) 연구는 20세기부터 시작되었고 1956년 Mashio 등이 이산화 티타늄의 자기산화(auto oxidation) 반응을 보고한 이후<sup>10)</sup> 전세계적으로 빛을 이용한 광촉매에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대부분의 연구에서 물이나 공기 중의 유독 물질을 정화하는 데 사용되었으며 조명 기구 및 주방용기, 건축자재 등의 자정작용에 사용되며, 거울이나 창 내벽 등의 유리의 김서림 방지도 유용하게 사용되고 있다. 또한 수질, 토지 오염물과 같은 환경 유해물질, DNA, 내독소, 바이러스, 미생물을 분해하는 등 현재까지 광범위하게 연구되고 있다<sup>9,11)</sup>.

치의학 분야에서는 교정용 와이어에 이산화 티타늄을 합성하거나 코팅하여 항균작용을 할 수 있게 하는 연구가 진행되고 있으며 각종 구강병을 야기하는 세균을 대상으로 항

균효과를 평가하는 연구가 진행되었다<sup>5)</sup>. 하지만 지금까지 이산화 티타늄을 이용하여 세균에 대한 항균효과를 조사한 연구는 대부분 ultraviolet (UV) 영역의 빛(100~400 nm)을 사용하였으며, *S. mutans*에 대한 항균효과 또한 380 nm 이하의 빛을 이용한 연구들이 대부분이었다<sup>12)</sup>. 비록 이산화 티타늄은 내구성과 내마모성이 우수하고 독성이 없어 인체에 무해하지만 380 nm 이하의 빛은 자외선 영역이기 때문에 빛 자체만으로도 유전자 변이를 유발할 수 있으며<sup>13)</sup>, 특히 인체에 장시간 조사될 경우 피부암 등의 부작용이 일어날 가능성이 존재한다<sup>14)</sup>. 이러한 단점을 극복하기 위해 가시광선 영역대(400~800 nm)에서 반응하는 광촉매를 만들기 위한 연구가 진행되고 있으나, 대부분의 연구는 산업분야에 국한하여 활용하기 위해 금속 이산화 티타늄의 표면을 개선하거나 다양한 전이 금속을 결합하는 방법이 연구되고 있다<sup>15)</sup>. 따라서 구강에 적용하기 위해서는 이러한 변형 티타늄 물질들이 인체에 무해한지에 대한 평가가 선행되어야 할 것이다. Lee 등<sup>16)</sup>은 광민감제(photosensitizer)의 하나인 에리트로신(erythrosine)과 치과용 할로젠(halogen) 램프 광원이 *S. mutans* 바이오 필름의 세포 사멸을 유도한다는 사실을 보고하여 빛을 이용한 치면세균막 관리의 가능성을 제시하였다. 하지만 현재까지는 이산화 티타늄 광촉매에 치과용 광원을 적용하여 구강 미생물의 성장 억제에 대한 영향을 평가한 연구는 보고된 바 없는 실정이다.

최근 구강 내 미세변화를 탐지하기 위해 가시광선 영역의 빛을 사용하는 QLF-D Biluminator (QLF-D; Inspektor Research System BV, Amsterdam, Netherlands)라는 장비가 소개되었다. QLF-D는 405 nm의 가시광선을 이용하여 치아 또는 치면세균막을 구성하는 세균의 대사산물 중 하나인 포피린(porphyrin) 계열 물질의 형광(fluorescence) 현상을 유도하여 육안으로 쉽게 탐지할 수 있도록 도와주는 탐지기구이다<sup>17,18)</sup>. 하지만 아직 QLF-D 시스템의 광원을 활용하여 구강의 미세변화 탐지 이외의 작용을 탐색한 연구는 전혀 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 인체에 유해성 없이 광촉매를 이용한 치면세균막 관리를 하기 위해 현재 임상현장에서 사용하고 있는 QLF-D의 405 nm light emitting diode (LED)를 활용해 보고자 하였다. 이를 위해 다양한 농도의 이산화 티타늄을 적용하고 파장별 광조사 시간을 달리하여 *S. mutans*에 대한 항균력이 최적화되는 조건을 탐색하고자 하였다.

## 연구대상 및 방법

### 1. 실험 균주

본 연구에서는 *S. mutans* ATCC 25175 균주를 한국생명공학연구원 생물자원센터로부터 분양받았다. 순수배양을 하기 위해 분양 받은 균주를 Brain Heart Infusion (BHI; Difco Co., Sparks, MD, USA) 고체배지에서 48시간 동안 5% CO<sub>2</sub> 배양기(37°C)에서 배양한 후 잘 분리된 단일 집락을 백금으로 선별하였다. 선별한 단일 집락은 BHI 액체배지에 접종하고 24시간 배양하였다. 이후 세균 배양액을 항균 처리된 80% 글리세롤(Glycerol; Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 용액과 1 : 1로 혼합하여 밀봉한 후 -80°C에 보관하여 실험에 이용하였다.

### 2. 이산화 티타늄의 농도에 따른 효과

이산화 티타늄의 농도에 따른 항균력을 비교하기 위해 분말형태인 이산화 티타늄(titanium dioxide anatase type; Sigma-Aldrich)을 멸균된 증류수에 혼합하여 0.01, 0.1, 1.0, 10.0 mg/ml의 농도가 되도록 제조하였다. 각 농도별로 제조한 이산화 티타늄 용액 4.95 ml에 세균의 최종농도가 10<sup>4</sup> colony-forming unit (CFU)/ml로 조절된 배양액 50 µl를 첨가하여 petri dish에서 교반 자석으로 교반하였다. 여기에 광촉매 반응을 유도하기 위해 254 nm의 빛이 방출되는 UV 램프(G40T10; Snakyo Denki, Kanagawa, Japan)와 405 nm의 빛이 방출되는 LED 램프(QLF-D Biluminator;

Inspektor Research System BV)를 이용하였다(Table 1). 각 농도별 이산화 티타늄 용액과 *S. mutans* 배양액을 혼합한 용액에 각각의 빛을 10분씩 조사한 후 반응이 완료된 용액 100 ml를 BHI 고체배지에 접종하여 CO<sub>2</sub> 배양기에서 24시간 배양 후 생균수를 측정하였고, 모든 실험은 총 5번 반복하였다.

### 3. 광조사 시간에 따른 효과

각 광원별 조사시간에 따른 항균력을 확인하기 위해 분말형태인 이산화 티타늄을 멸균된 증류수에 혼합하여 0.1 mg/ml의 농도로 이산화 티타늄 용액을 제조하였다. 해당 용액 4.95 ml에 세균의 최종농도가 10<sup>4</sup> CFU/ml가 되도록 *S. mutans* 배양액 0.05 ml를 첨가하여 petri dish에서 교반 자석으로 교반하였다. 254 nm와 405 nm의 빛을 10, 20, 30, 40분간 각각 조사하여 광촉매 반응을 유도하였고, 반응이 완료된 용액 100 ml를 BHI 고체배지에 접종하여 CO<sub>2</sub> 배양기에서 24시간 배양 후 생균수를 측정하였고, 모든 실험은 총 5번 반복하였다.

### 4. 통계 방법

이산화 티타늄 농도 및 광조사 시간에 따른 항균력의 유의성을 검증하기 위해 일원분산분석(one-way ANOVA)을 수행하였다. 모든 자료의 분석은 PASW Statistics 18.0 (IBM Co., Armonk, NY, USA)을 사용하여 유의수준 0.05에서 수행하였다.

## 결 과

### 1. 이산화 티타늄 농도에 따른 *S. mutans* 항균 효과

광조사를 하지 않은 경우 이산화 티타늄의 농도에 따른 항균력의 차이는 보이지 않았다(p>0.05). 하지만 이산화 티타늄 없이 254 nm 또는 405 nm의 빛을 10분간 조사한 경우 각각 44%, 7%의 생균수 감소를 나타냈고 이는 광조사하지 않은 대조군과 통계적으로 유의한 차이를 나타냈다(p<

Table 1. Discriptions of Light Sources Used in This Study

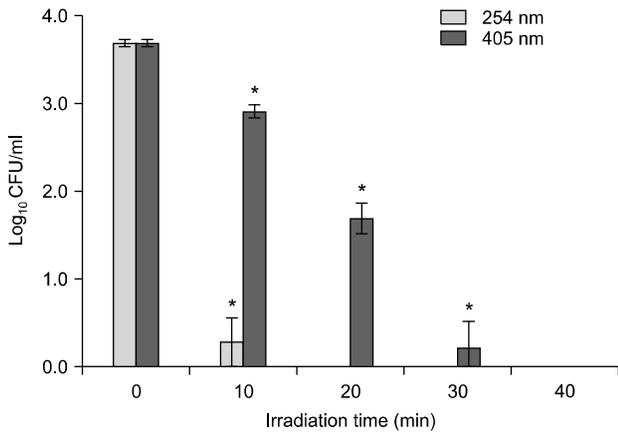
	Ultraviolet light	Visible light
Company	Sankyo Denki	Inspektor Research System BV
Model	G40T10	QLF-D Biluminator
Wavelength	254 nm	405 nm
Power	40 W	36 W (3 W×12 ea)

Table 2. Bactericidal Effects of Photocatalysts on *Streptococcus mutans* according to TiO<sub>2</sub> Concentrations (unit: log<sub>10</sub> CFU/ml)

Group	n	TiO <sub>2</sub> concentrations (mg/ml)				
		0	0.01	0.1	1	10
None	5	3.66±0.05 <sup>a</sup>	3.66±0.09 <sup>a</sup>	3.68±0.05 <sup>a</sup>	3.70±0.04 <sup>a</sup>	3.71±0.03 <sup>a</sup>
Ultraviolet (254 nm)	5	2.05±0.15 <sup>b</sup>	1.13±0.19 <sup>b</sup>	0.25±0.24 <sup>b</sup>	1.94±0.09 <sup>b</sup>	2.77±0.12 <sup>b</sup>
Visible (405 nm)	5	3.41±0.09 <sup>c</sup>	3.08±0.08 <sup>c</sup>	2.81±0.15 <sup>c</sup>	2.97±0.09 <sup>c</sup>	3.59±0.05 <sup>c</sup>

Values are presented as mean±standard deviation.

<sup>a~c</sup>Different letters within the same column indicate significant differences between groups by ANOVA and Turkey's post hoc test at α=0.05.



**Fig. 1.** Bactericidal effects of different wavelengths and irradiation times on *Streptococcus mutans*. TiO<sub>2</sub> concentrations 0.1 mg/ml, error bars present standard deviations. \*Compared with other groups, statistically significant with p<0.05. CFU: colony-forming unit.

0.001).

모든 이산화 티타늄의 농도에서 두 가지 광원 모두 *S. mutans*의 항균 효과에 영향을 주었다. 먼저 254 nm의 경우 이산화 티타늄의 농도가 증가할수록 광조사를 하지 않은 대조군에 비해 각각 44%, 69%, 93%, 48%, 25%로 0.1 mg/ml에서 가장 효과적이었다. 그리고 405 nm 빛의 항균 효과는 7%, 16%, 24%, 20%, 3%로 254 nm와 마찬가지로 0.1 mg/ml에서 가장 효과적이었다(Table 2).

## 2. 광조사 시간에 따른 *S. mutans* 항균 효과

광촉매에 의한 *S. mutans* 항균력은 빛의 파장이 405 nm보다 단파장인 254 nm에서 높게 나타났으며 광조사 시간에 비례하여 항균력이 유의미하게 증가하는 것을 확인하였다(p<0.001). 254 nm의 광원을 이용한 경우는 20분간의 광조사 시간에서 실험에 사용한 생균이 모두 사멸한 것으로 나타난 반면, 405 nm의 광원을 이용한 경우에는 생균수가 54% 감소한 것으로 나타났다. 하지만 조사시간을 40분으로 늘린 경우 405 nm의 빛에서도 실험에 사용한 생균이 모두 사멸하였다(Fig. 1).

## 고 찰

최근 다양한 항균처리 방법 중 특정 빛을 이용하여 항균력을 조절할 수 있는 광역학 치료법(photodynamic treatment)이 새롭게 대두되고 있으며 광촉매 또는 광민감제와 빛을 함께 이용하여 병원성 세균을 억제하는 방법이 연구되고 있다<sup>19,20</sup>. Salinas 등<sup>21</sup>은 *Pseudomonas aeruginosa* ATCC

27853 균주를 이용하여 이산화티타늄에 의한 항균작용을 평가한 결과 365 nm의 자외선을 90분간 조사할 경우 이산화 티타늄 0.5 mg/ml과 1.0 mg/ml 농도에서 10<sup>6</sup> CFU/ml 세포가 각각 99.92%, 99.99% 사멸되는 것을 확인하였다. 치의학 분야에서는 Saito 등<sup>12</sup>이 Mutans streptococci 속의 하나인 *Streptococcus sobrinus* AHT 균주를 이용하여 이산화 티타늄에 의한 항균작용을 평가한 결과 이산화 티타늄 1.0 mg/ml의 농도에서 자외선(300~400 nm; peak 325 nm)을 1분간 조사할 경우 항균력이 가장 높게 나타났으며 10<sup>5</sup> CFU/ml 세포가 사멸함을 보고하였다. 이와 유사하게 본 연구에서는 치아우식증의 원인균으로 산생산성 및 내산성이 있다고 알려진 *S. mutans*를 선정하여 이산화 티타늄과 빛이 해당균에 대한 항균효과가 있는지를 확인하고자 하였다.

이산화 티타늄은 결정구조에 따라 rutile, anatase 및 brookite 3종류로 구분된다. 이들 중 광촉매 기능을 이용한 항균 작용에는 anatase 이산화 티타늄이 가장 효과적이라고 알려져 있다<sup>6</sup>. Rutile은 이산화 티타늄 원자가 2개 포함되어 있는 반면 anatase는 직선상의 이산화 티타늄을 4개 가지고 있는 구조이기 때문에 anatase가 rutile에 비해 강한 환원력을 가지게 된다. 또한 이산화 티타늄이 빛에너지를 흡수하여 전자가 생성되는 전도대의 위치가 rutile보다 anatase에서 더 안정된 위치에 있고 더욱 큰 에너지를 발산할 수 있어 본 연구에서는 anatase type의 이산화 티타늄을 이용하였다.

본 연구에서는 자외선과 가시광선 영역의 빛을 사용한 경우 모두에서 이산화 티타늄의 농도가 0.1 mg/ml일 때 가장 높은 항균력을 나타낸 반면 세균에 대한 선행연구들은 이산화 티타늄의 농도가 0.5~1.0 mg/ml에서 가장 높은 항균력을 보인 것으로 보고하였다<sup>6,21</sup>. 본 연구에서 이용한 이산화 티타늄은 금속성 물질로 물에 잘 용해되지 않으며 실온에서 흰색의 분말형태로 존재하기 때문에 용액 안에서 부유되어 불투명한 환경을 재현한다. 따라서 외부의 빛이 내부까지 잘 투과하지 못하게 되고 이로 인해 광촉매 반응이 유도되지 않을 수 있다. 이를 극복하고자 본 연구에서는 반응용액을 지속적으로 교반해 주었기 때문에 보다 낮은 농도에서 항균력이 최적화된 것으로 생각된다. 한편 각기 다른 파장의 광원에 따라 TiO<sub>2</sub>의 농도별 항균력은 254 nm를 이용한 경우 이산화 티타늄의 농도가 0.1, 0.01, 1.0, 10.0 mg/ml의 순서로 높게 나타났고, 405 nm를 이용한 경우 이산화 티타늄의 농도가 0.1, 1.0, 0.01, 10.0 mg/ml의 순서로 높게 나타났다. 이러한 결과는 두 가지 광원 모두 광촉매의 농도가 0.1보다 낮거나 높으면 항균력이 떨어지고 세균을 효과적으로 사멸시키기 위해서는 파장에 따라 적절한 농도 조건이 존재한다는 사실을 의미한다.

본 연구에서는 또한 현재 임상현장에서 초기 우식 병소 및 성숙된 치면세균막을 탐지하는 데 활용하는 405 nm의 광원을 이용하여 기존의 UV (254 nm)를 통해 항균력을 나타내는 이산화 티타늄의 광촉매 반응을 유도하여 그 가능성을 확인하고 최적의 조건을 탐색함으로써 임상현장에 적용 가능한 새로운 항균 처치법을 제안해 보고자 하였다. 본 연구 결과에서 이산화 티타늄 농도가 0.1 mg/ml일 때, 20분간 광조사시 405 nm의 빛은 약 54.34%의 항균력을 나타낸 반면 254 nm의 빛의 경우는 완전히 사멸하였다. 이와 유사하게 최근 Gao 등<sup>22)</sup>은 파장이 다른 ultraviolet-A (UVA, peak wavelength=360 nm)와 ultraviolet-C (UVC, peak wavelength=250 nm)를 이용하여 이산화 티타늄 표면의 UV-photofunctionalization에 대한 차이를 연구한 결과, UVA를 이용한 것보다 UVC를 이용한 것이 더 높은 생체활성을 나타냄을 보고하였다. 이는 파장이 짧을수록 빛에너지가 높아지는 이유에 기인하는 것으로 본 연구 결과와 유사한 효과로 볼 수 있다. 본 연구를 통해 도출한 결과에서 405 nm 빛의 경우는 조사시간을 40분까지 증가시켰을 때 10<sup>4</sup> CFU/ml의 균이 완전히 사멸되었으므로 이를 임상에 적용하기에는 많은 개선이 필요하다. 따라서 향후 저농도의 과산화수소를 통해 신속한 광촉매 반응을 유도함으로써 항균력을 개선하고 작용시간을 단축하기 위한 노력이 필요할 것이다.

본 연구에서 자외선 노출 없이 순수 이산화 티타늄만을 반응시켰을 경우 농도에 따른 차이가 나타나지 않았으므로 광조사 없이 이산화 티타늄만으로는 *S. mutans*의 생장에 영향을 미치지 못한다는 사실을 확인하였다(p>0.001). 이는 이산화 티타늄 자체만으로는 *S. mutans* 세포의 증식을 억제할 수 없음을 의미한다. 비록 405 nm의 빛에서 광촉매 반응을 통한 항균력은 비교적 낮게 나타났지만 인체에 무해한 가시광선의 빛을 사용하는 것이 더욱 안전하기 때문에 임상현장에서 빛을 이용하여 광촉매 반응을 이용한 항균효과를 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

한편 본 연구에서는 부유성 세포를 대상으로 항균력을 평가했다는 한계점이 존재한다. 즉, 실제 구강 내 존재하는 세포는 치면세균막을 형성하고 있으며, 이로 인해 이산화 티타늄이 치면세균막의 내부로 침투할 가능성이 떨어질 수 있다. 하지만 이산화 티타늄은 강력한 산화력을 나타내기 때문에 치면세균막을 형성하는 불용성 유기물을 분해할 수 있을 것으로 예상된다. 만약 이산화 티타늄에 의해 치면세균막의 불용성 유기물이 쉽게 분해된다면 지속적인 빛 조사를 통해 치면세균막의 구조를 파괴시킬 수 있고 이를 통해 내부에 존재하는 세포에 영향을 주어 균을 사멸시킬 수 있을

것으로 예상된다. 따라서 향후 연구를 통해 치면세균막을 실험실 상에서 재현한 바이오필름 모델을 이용하여 불용성 유기물의 분해와 내부 세포의 사멸 가능성을 확인해야 할 것이다.

## 요약

본 연구는 광촉매 반응을 이용하여 치아우식증의 주요 원인균인 *S. mutans*를 조절하기 위한 새로운 방법을 제안하고자 기존 이산화 티타늄 광촉매에 주로 사용되었던 자외선 영역의 광원과 현재 임상현장에서 활용되고 있는 405 nm의 가시광선 빛에 의한 광촉매 반응을 유도하여 항균효과를 비교하였다. 우선 최적의 이산화 티타늄 농도를 탐색한 결과 254 nm 또는 405 nm 빛 조사시 0.1 mg/ml의 농도에서 *S. mutans*에 대한 항균력이 각각 93%와 24%로 가장 높게 나타났다. 또한 광조사 시간과 *S. mutans*에 대한 항균력은 정비례 관계를 보였으며, 254 nm의 빛은 20분 이상, 그리고 405 nm의 빛은 40분 이상 조사할 경우 10<sup>4</sup> CFU/ml 정도의 생균이 완전히 사멸되는 결과를 확인하였다. 따라서 이산화 티타늄의 광촉매 반응은 인체에 무해한 405 nm의 가시광선으로 유도될 수 있으며, 향후 항균력을 보다 증가시킬 수 있는 방법을 고안한다면 임상현장에서 효과적으로 구강 내 *S. mutans*를 억제하는 데 활용이 가능할 것으로 예상된다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2013R1-A1A2062505).

## References

1. Loesche WJ: Microbiology of dental decay and periodontal disease. In: Baron S. Medical microbiology. 4th ed. University of Texas Medical Branch at Galveston, Galveston, 1996.
2. Jain Y: A comparison of the efficacy of powered and manual toothbrushes in controlling plaque and gingivitis: a clinical study. Clin Cosmet Invest Dent 5: 3-9, 2013.
3. Jarvinen H, Tenovuo J, Huovinen P: In vitro susceptibility of *Streptococcus mutans* to chlorhexidine and six other antimicrobial agents. Antimicrob Agents Chemother 37: 1158-1159, 1993.
4. Flotra L, Gjermo P, Rolla G, Waerhaug J: Side effects of

- chlorhexidine mouth washes. *Scand J Dent Res* 79: 119-125, 1971.
5. Koh EH, Cho JH: A comparative study of physical properties of TiO<sub>2</sub> thin films according to a coating method on orthodontic wire sand brackets. *Korean J Orthod* 36: 451-464, 2006.
  6. Mills A, Hunte SL: An overview of semiconductor photocatalysis. *J Photochem Photobiol A Chem* 108: 1-35, 1997.
  7. Fujishima A, Rao TN, Tryk DA: Titanium dioxide photocatalysis. *J Photochem Photobiol C Photochem Rev* 1: 1-21, 2000.
  8. Tark C: Photocatalytic antibacterial effect of TiO<sub>2</sub> film of titanium alloys on *Streptococcus mutans*. Unpublished master's thesis, Yonsei University, Seoul, 2007.
  9. Choi J: Photocatalytic antibacterial effect of TiO<sub>2</sub> film of TiAg on cariogenic bacterias. Unpublished doctoral dissertation, Yonsei University, Seoul, 2005.
  10. Hashimoto K, Irie H, Fujishima A: TiO<sub>2</sub> photocatalysis: a historical overview and future prospects. *J Appl Phys* 44: 8269-8285, 2005.
  11. Park JH, Kwon SY: Solar photochemical degradation and toxicity reduction of Trichloroethylene (TCE). *Clean Technol* 12: 244-249, 2006.
  12. Saito T, Iwase T, Horie J, Morioka T: Mode of photocatalytic bactericidal action of powdered semiconductor TiO<sub>2</sub> on mutans streptococci. *J Photochem Photobiol B Biol* 14: 369-379, 1992.
  13. Mackenzie K, Muller HJ: Mutation effects of ultraviolet light in *Drosophila*. *Proc R Soc Lond B Biol Sci* 129: 491-517, 1940.
  14. Narayanan DL, Saladi RN, Fox JL: Ultraviolet radiation and skin cancer. *Int J Dermatol* 49: 978-986, 2010.
  15. Jeong W: Preparation of visible-working photo-catalyst and evaluation of anti-bacterial effect. Unpublished doctoral dissertation. Chosun University, Gwangju, 2007.
  16. Lee YH, Park HW, Lee JH, Seo HW, Lee SY: The photodynamic therapy on *Streptococcus mutans* biofilms using erythrosine and dental halogen curing unit. *Int J Oral Sci* 4: 196-201, 2012.
  17. Kim BI: QLF Concept and Clinical Implementation. *J Korean Dent Assoc* 49: 443-450, 2011.
  18. Lee ES, Kang SM, Ko HY, Kwon HK, Kim BI: Association between the cariogenicity of a dental microcosm biofilm and its red fluorescence detected by Quantitative Light-induced Fluorescence-Digital (QLF-D). *J Dent* 41: 1264-1270, 2013.
  19. Lee SY, Chang BS, Um HS, Ma DS: Comparison of photodynamic bactericidal effects of erythrosine against *Streptococcus mutans* and *Streptococcus sobrinus* by different wavelength of LED lights. *J Korean Acad Oral Health* 36: 20-25, 2012.
  20. Chen J, Keltner L, Christophersen J, et al.: New technology for deep light distribution in tissue for phototherapy. *Cancer J* 8: 154-163, 2002.
  21. Salinas JLA, Aguilar JRP, Hernández SAM, Cruz JS: Bactericidal activity of TiO<sub>2</sub> on cells of *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853. *Int J Photoenergy* 954914: 1-7, 2013.
  22. Gao Y, Liu Y, Zhou L, et al.: The effects of different wavelength UV photofunctionalization on micro-arc oxidized titanium. *PLoS One* 8: e68086, 2013.