

## 고 분해능 안구내시경 개발을 위한 광학적 특성 평가

이봉수<sup>†</sup> · 조동현

건국대학교 의과대학 의학공학부  
Ⓣ 380-701 충청북도 충주시 단월동 322

김 신

제주대학교 공과대학 에너지공학과  
Ⓣ 690-756 제주도 제주시 제주대학로 66

조효성

연세대학교 보건대학 방사선학과  
Ⓣ 220-710 강원도 원주시 234

(2004년 3월 17일 받음, 2004년 8월 19일 수정본 받음)

현재 임상적으로 사용되고 있는 안구내시경은 전체 직경이 1 mm 이하로 제한되어 있고, 그 영상 분해능 역시 30~40 lp/mm로 제약되기 때문에 안구내시경 영상의 질을 판단하는데 있어서 가장 중요한 요소는 영상 분해능이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 0.23 pitch GRIN 렌즈와 5  $\mu\text{m}$  이하의 마이크로 광섬유를 포함하는 미세 영상가이드를 이용한 새로운 광학적 설계로 고 분해능 안구내시경의 확대 영상을 획득하였고, USAF 분해능 target을 이용하여 기존 안구내시경 영상의 분해능과 비교, 분석하였다.

주제어 : Ophthalmic endoscope, Image resolution, GRIN lens, Fiber-optic image guide.

### I. 서 론

1990년대 중반부터 미국에서 임상적으로 사용되기 시작한 안구내시경은 그 직경이 1 mm 이하로 제한되고, 고 분해능의 영상 획득이 가능해야 되기 때문에 복강경, 흉강경, 관절경과 같은 다른 내시경에 비해 연구 및 임상에서의 이용이 늦어졌다. 그러나 안구 내시경은 홍채 뒷부분이나 모양체, 망막 주변 등 육안으로 관찰 할 수 없는 곳의 질환, 또는 녹내장, 백내장 레이저 수술시 효과적으로 사용 가능하기 때문에 앞으로 그 사용 범위 및 빈도는 증가 할 것으로 판단된다<sup>1,2,3</sup>.

임상적으로 사용되고 있는 안구내시경은 6,000~30,000개의 마이크로 광섬유들을 포함하는 0.8 mm 이하 직경의 영상 가이드와 광원 전달용 광가이드, 레이저 전달용 광섬유 등으로 구성되는데, 영상가이드의 직경과 마이크로 광섬유의 개수에 의해 결정되는 영상 분해능이 안구 내시경의 영상 분석에 있어 가장 중요한 요소가 된다. 일반적으로 내시경의 영상 분해능은 마이크로 광섬유의 직경이 5  $\mu\text{m}$  이하가 되면 마이크로 광섬유들 사이에서 발생 할 수 있는 cross-talk 현상과 leaky-ray 현상 때문에 오히려 영상 분해능이 낮아진다는 연구 결과가 발표되었다<sup>4,5,6</sup>. 그러므로 안구내시경의 경우 최고 분해능을 얻기 위해서 마이크로 광섬유의 직경을 5  $\mu\text{m}$  로 제한한다면 내시경 전체의 직경이 커져야 되기 때문에 실

제 사용되고 있는 안구내시경의 마이크로 광섬유 직경은 5  $\mu\text{m}$  이하 인 것으로 알려져 있다<sup>1</sup>. 현재 사용되고 있는 안구 내시경용 영상가이드의 마이크로 광섬유 직경은 보통 3.7~4.6  $\mu\text{m}$ 로 그 영상 분해능은 최대 값이라 할 수 없다.

본 연구의 목표는 현재 사용되고 있는 안구내시경의 영상 분해능을 향상시키기 위해서 기존 내시경의 영상가이드 끝단(distal face)에 영상 획득용으로 사용하고 있는 GRIN(Gradient Index) 렌즈(0.29P~0.31P) 보다 pitch 길이가 짧은 렌즈들(0.23P, 0.25P)을 사용하고, 관찰하고자 하는 물체와 GRIN 렌즈 사이의 거리(working distance), GRIN 렌즈와 영상가이드 사이의 거리를 조절하면서 고 분해능의 확대 영상을 획득하는 것이다. 획득 영상의 분해능은 USAF 분해능 target을 이용하여 측정하였고 기존 안구내시경의 분해능과 비교, 분석하였다.

기존 안구내시경의 경우 영상가이드가 포함하고 있는 마이크로 광섬유의 직경이 4.6  $\mu\text{m}$ 라고 하더라도 GRIN 렌즈의 working distance, GRIN 렌즈 자체의 수차(aberration), 영상가이드를 구성하고 있는 마이크로 광섬유들 간의 cross-talk, leaky-ray 현상들 때문에 CCD(charge coupled device) 또는 접안렌즈로 획득 영상을 확대시킨다 하더라도 30~40  $\mu\text{m}$  이하의 영상 획득은 불가능하게 된다. 그러나 본 연구에서 제안하고 있는 고 분해능 안구내시경의 경우는 상대적으로 짧은 pitch의 GRIN 렌즈에 의해 확대된 영상이 영상가이드에 의해 획득되기 때문에 마이크로 광섬유의 직경인 4.6  $\mu\text{m}$  보

<sup>†</sup>E-mail: bslee@kku.ac.kr

다 작은 영상을 획득 할 수 있게 된다. 일반적으로 광섬유 내시경의 끝단에 영상획득용으로 사용되고 있는 GRIN 렌즈는 그 중심으로부터 외곽까지 굴절률의 변화와 함께 그 분해능도 바뀌게 되는데 예를 들어 NSG America 사의 SELFOC (1LH-1.0) GRIN 렌즈의 경우 중심에서의 분해능은 250 lp/mm 이고, 중심으로부터 반지름의 80% 떨어진 지점에서의 분해능은 30 lp/mm 이다. 그래서 본 연구에서는 기존 내시경으로는 관찰할 수 없이 작은 마이크론 단위 크기의 물체를 기존 내시경 working distance 보다 1/10 이상 짧은 거리에서 관찰함으로써 GRIN 렌즈의 중심 일부분만을 사용하여 렌즈 자체의 수차를 줄이고 전체적인 영상 분해능을 향상시키고자 하였다. 이러한 아이디어는 지금까지 기존 내시경시스템에서 시도된바 없고, 여러 가지 렌즈들의 조합이 아닌 상대적으로 pitch 길이가 짧은 GRIN 렌즈 하나만을 사용하여 고 분해능 영상을 획득하였다는 데에 큰 의의가 있다.

## II. 실험방법

본 연구에서는 Sumitomo Ltd. 제품의 직경 4.6  $\mu\text{m}$  마이크로 광섬유 30,000개를 포함하는 전체 직경이 0.8 mm 인 영상 가이드와 3.7  $\mu\text{m}$  마이크로 광섬유 10,000개를 포함하는 전체 직경 0.37 mm 의 실제 안구내시경용 영상가이드를 사용하였고, GRIN 렌즈는 NSG America Inc. 제품으로 기존 안구내시경에 사용되고 있는 0.29 P 길이 이외에 0.23P, 0.25P 길이의 렌즈들을 사용하였다. 또한 target, GRIN 렌즈, 영상가이드 간의 정확한 거리 측정을 위해서 Newport Inc.의 esp300 nano-scale stage를 사용하여 실험하였다. 표 1은 본 실험에

사용한 영상가이드와 GRIN 렌즈에 대한 특성을 각각 보여 주고 있다.

그림 1은 기존 안구내시경의 광학적 설계를 보여주고 있는데, 영상 획득용 GRIN 렌즈는 그 pitch 길이가 0.29P~0.31P로서 영상가이드와 접촉하고 있기 때문에 관찰하고자 하는 물체와의 거리(working distance)가 항상 필요하고, 획득된 영상의 크기는 관찰 물체의 크기보다 작게 된다. 실제 안구내시경의 경우 이 거리는 최소 4~5 mm 이상 인 것으로 알려져 있고, 획득된 영상의 크기는 관찰물체 크기의 20-30%에 불과하다<sup>[1]</sup>.

그림 2와 3은 본 연구에서 제안하는 고 분해능 안구내시경의 광학적 설계와 실험 장치 구성을 보여주고 있는데, 그림 1과의 차이점은 pitch 길이가 짧은 GRIN 렌즈(0.25P, 0.23P)를 사용하였고, 물체와 렌즈와의 거리(working distance,  $d_2$ )를 줄이면서 렌즈와 영상가이드 사이의 거리( $d_1$ )를 증가시켜 확대된 고 분해능의 영상을 획득하는 것이다.

본 연구에서는 0.29P 길이의 GRIN 렌즈를 사용하여 실제 안구내시경 영상과 동일한, 즉 GRIN 렌즈와 영상가이드를 접촉시킨 상태에서 USAF 분해능 target의 최소 영상을 획득하였고, 새로운 광학적 설계를 통한, 즉 GRIN 렌즈와 영상가이드 사이의 거리( $d_1$ ), 분해능 target과 GRIN 렌즈와의 거리( $d_2$ )를 정확하게 조절하면서 역시 같은 방법으로 분해능 target의 최소 영상을 획득, 비교하였다. 또한 거리  $d_2$ 에 따른 두 가지 안구내시경의 영상 분해능 변화와 고 분해능 안구내시경의 확대율도 측정하였다.

표 1. 실험에 사용한 영상가이드 및 GRIN 렌즈의 특성

영상가이드	마이크로 광섬유 직경 ( $\mu\text{m}$ )	3.7	4.6	
	영상가이드 직경 (mm)	0.37	0.8	
	영상가이드 길이 (cm)	50.5	50.5	
	Core 물질	GeO <sub>2</sub> 포함 실리카		
	Cladding 물질	F 포함 실리카		
	개구수 (NA)	>0.35		
GRIN 렌즈	Pitch 길이	0.23	0.25	0.29
	렌즈 길이 (mm)	4.26	4.63	5.37
	개구수 (NA)	0.46	0.46	0.46

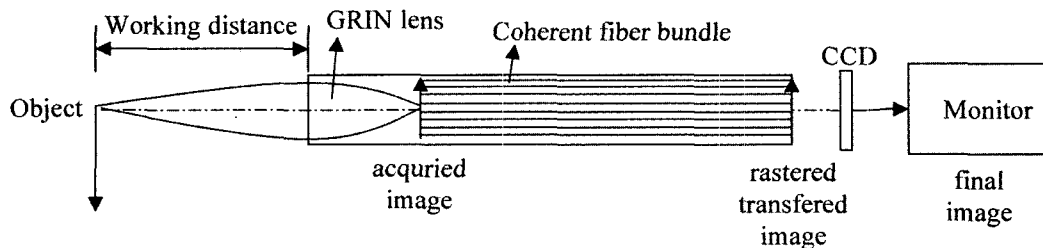


그림 1. 기존 안구내시경의 광학적 설계.

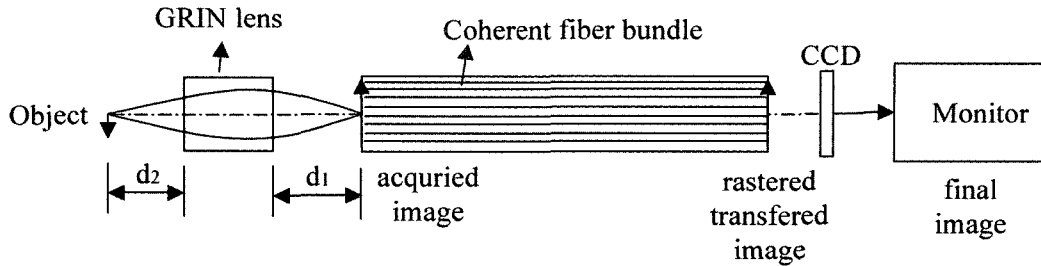


그림 2. 고 분해능 안구내시경의 광학적 설계.

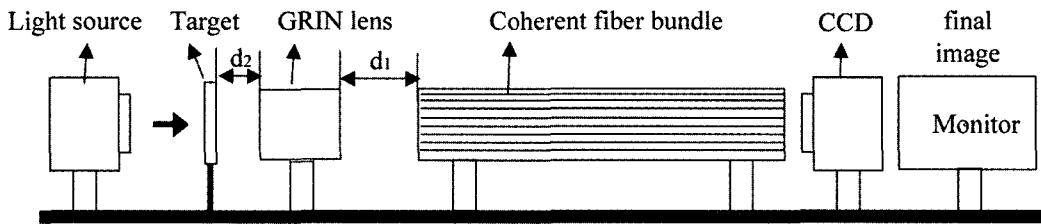


그림 3. 고 분해능 안구내시경 영상 획득을 위한 실험 장치.

### III. 실험 결과

표 2는 고 분해능 안구내시경의 영상 획득을 위한 그림 3 과 같은 실험 장치를 이용하여 GRIN 렌즈+ 영상가이드+ microscope(기존 안구내시경, 고 분해능 안구내시경)에 대한 영상 분해능을 USAF target을 이용하여 측정 한 결과이다.

표 2. USAF 분해능 target을 이용한 분해능 측정

	마이크로 광섬유 직경 ( $\mu\text{m}$ )	영상분해능 (lp/mm)
기존 안구내시경	4.6	32
	3.7	28.51
고 분해능 안구내시경	4.6	228
	3.7	161

기존 안구내시경 영상과 고 분해능 안구내시경의 영상 분해능을 비교해 보면  $4.6\mu\text{m}$  영상가이드와 0.23P GRIN 렌즈 사용 시, 최대 7배 이상 고 분해능 안구내시경의 분해능이 높음을 알 수 있다. 고 분해능 안구내시경의 경우  $d_1 = 0.4\text{ mm}$ ,  $d_2 = 12.4\text{ mm}$  일 때 0.23P GRIN 렌즈를 사용하면 USAF 분해능 target의 최소 크기인 group 7-6의 영상, 즉 최대 분해능  $228\text{ lp/mm}$ ,  $2.19\mu\text{m}$  크기의 영상을 획득 할 수 있었다. 위 표 2에서  $4.6\mu\text{m}$  영상가이드보다  $3.7\mu\text{m}$  영상가이드의 경우 영상 분해능이 낮은 것을 볼 수 있는데, 이것은 서론 부분에서 언급한 것과 같이  $5\mu\text{m}$  이하 마이크로 광섬유들 사이에서 발생하는 Cross-talk, Leaky-ray 현상들 때문인 것으로 해석 된다<sup>4)</sup>. 광섬유 영상가이드 내부에서 발생 가능한 Cross-talk, Leaky-ray 현상은 영상가이드를 구성하고 있는 마이크로 광섬유의 cladding 두께가 감소하면서 마이크로 광섬유의 core 로 들어간 가시광선의 일부분이 전반사 작용을 일으키지 않

고 주위의 광섬유로 누설되어 마이크로 광섬유들 사이에서 서로 영향을 미치는 현상을 말한다. 특히  $5\mu\text{m}$  이하 마이크로 광섬유들을 포함하는 영상가이드의 경우, cladding의 두께가  $1\mu\text{m}$  이하가 되면 이 두 현상들 때문에 영상분해능이 오히려 감소하게 되는데, 만약 영상분해능의 감소를 막기 위해서 마이크로 광섬유 core 부분의 직경만 감소시키고, cladding의 두께를 일정하게 유지한다면 영상광도가 급격히 감소하여 전체적인 영상의 질을 저하시키게 된다.

그림 4, 5는 고 분해능 안구내시경의 광학 설계를 이용하여 GRIN 렌즈와 분해능 target 사이의 거리( $d_2$ )에 따른 획득 영상의 확대 배율을  $4.6\mu\text{m}$ ,  $3.7\mu\text{m}$  영상가이드에 대해서 각각 나타낸 그림들이다. 여기서 3가지의 pitch 길이가 다른 GRIN 렌즈들에 대한 결과를 보여주고 있는데, 거리  $d_2$ 가 짧아질수록 3가지 경우 모두 배율이 증가하였고, 특히 0.23P의 GRIN 렌즈를 사용하였을 때,  $4.6\mu\text{m}$  영상가이드는 기존 안구내시경의 영상보다 최대 약 35배,  $3.7\mu\text{m}$  영상가이드는 약

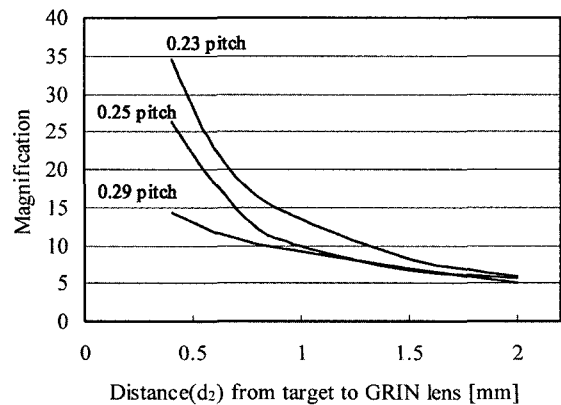


그림 4.  $4.6\mu\text{m}$  영상가이드 사용 시 거리  $d_2$ 에 따른 확대 배율의 변화

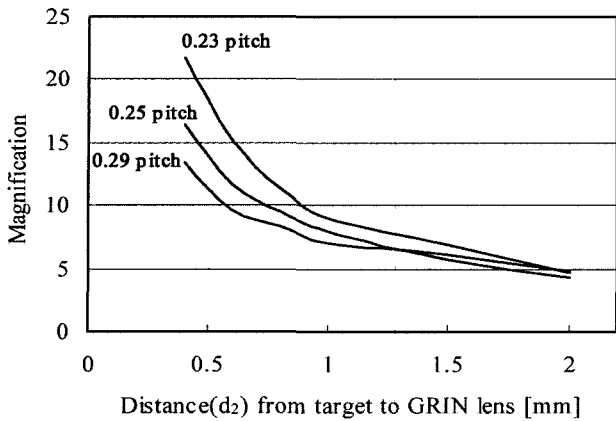


그림 5. 3.7  $\mu\text{m}$  영상가이드 사용 시 거리  $d_2$ 에 따른 확대 배율의 변화.

22배 확대된 영상을 획득 할 수 있었다.

그림 6, 7은 기존 안구내시경과 고 분해능 안구내시경에서 거리  $d_2$ 에 따른 영상 분해능의 변화를 보여주고 있다. 기존 안구내시경은 사용된 GRIN 렌즈의 pitch 길이와 광학적 구조 때문에 영상 획득을 위해서는 최소 4-5 mm의 working distance를 가져야 하고, 이 때의 분해능은 4.6  $\mu\text{m}$  영상가이드의 경우 32 lp/mm, 3.7  $\mu\text{m}$  영상가이드의 경우는 28.51 lp/mm

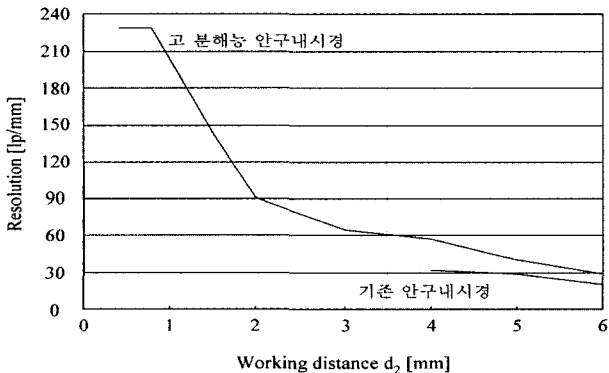


그림 6. 4.6  $\mu\text{m}$  영상가이드, 0.23 pitch GRIN 렌즈 사용 시 거리  $d_2$ 에 따른 영상 분해능의 변화.

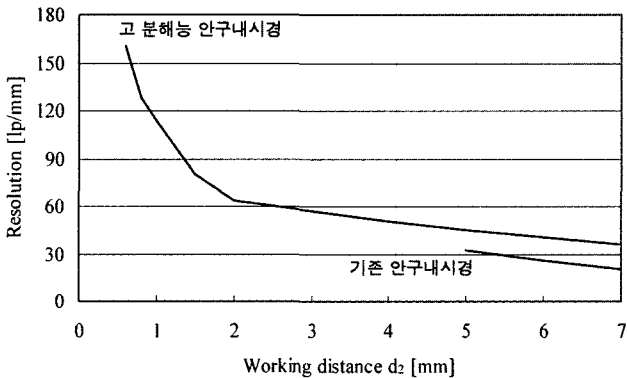


그림 7. 3.7  $\mu\text{m}$  영상가이드, 0.23 pitch GRIN 렌즈 사용 시 거리  $d_2$ 에 따른 영상 분해능의 변화.

로 제한됨을 알 수 있다. 이에 비해 본 연구에서 제안된 고 분해능 확대 안구내시경은 4~5 mm 보다 짧은 working distance에서 영상 획득이 가능하였고, 최대 영상 분해능은 4.6, 3.7  $\mu\text{m}$  영상가이드에 대해서 각각 228 lp/mm, 161 lp/mm 이었다. 이는 기존 안구내시경 보다 약 7배 이상 높은 영상 분해능으로 인체 내부에서 세포단위 이하의 영상 획득도 가능하다는 결과를 보여 주는 것이다. 특히 그림 6에서  $d_1 = 0.8 \sim 0.4$  mm 까지 영상 분해능의 변화가 없는데, 그 이유는 USAF 분해능 target의 최대 분해능이 228 lp/mm로 그 이상 분해능 측정이 불가능하였기 때문이다. 그러므로  $d_1 = 0.4$  mm인 경우의 실제 영상 분해능은 228 lp/mm 이상이 될 것으로 기대된다.

그림 8, 9는 고 분해능 안구 내시경에서 영상가이드와 GRIN 렌즈 사이의 거리  $d_1$ 에 따른 확대 배율의 변화를 보여 주고 있는데 두 경우 모두 거리  $d_1$ 이 증가함에 따라 확대배율이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이 때 거리  $d_1$ 은 거리  $d_2$ 에 따라 변하게 되는데 4.6  $\mu\text{m}$  영상가이드를 사용하였을 경우  $d_1 = 0.4$  mm,  $d_2 = 12.4$  mm 일 때 최대 35배의 확대된 영상이 획득되었고, 3.7  $\mu\text{m}$  영상가이드를 사용하였을 경우  $d_1 = 0.4$  mm,  $d_2 = 7.3$  mm 일 때 최대 22배의 확대영상이 획득되었다.

그림 10은 0.29P GRIN 렌즈와 4.6  $\mu\text{m}$  영상가이드를 사용하여 획득한 기존 안구내시경의 USAF 분해능 target 영상과

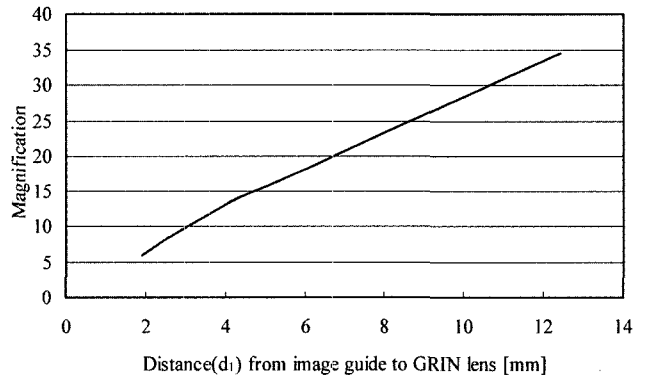


그림 8. 4.6  $\mu\text{m}$  영상가이드, 0.23 pitch GRIN 렌즈 사용 시 거리  $d_1$ 에 따른 확대 배율의 변화.

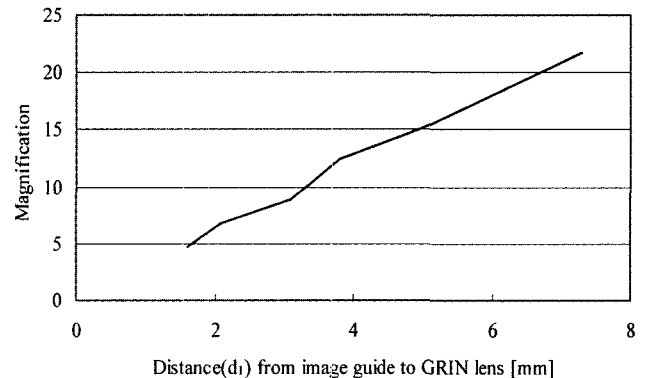


그림 9. 3.7  $\mu\text{m}$  영상가이드, 0.23 pitch GRIN 렌즈 사용 시 거리  $d_1$ 에 따른 확대 배율의 변화.

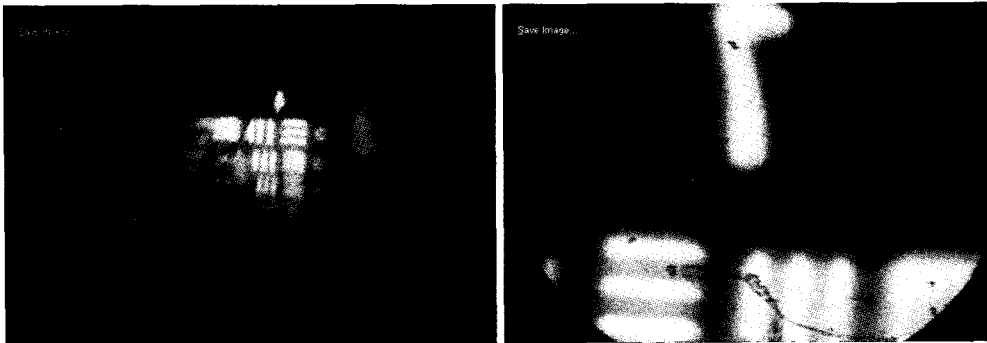


그림 10. 기존 안구내시경(4.6  $\mu\text{m}$  영상가이드, 0.29P GRIN 렌즈)과 고 분해능 안구내시경(4.6  $\mu\text{m}$  영상가이드, 0.23P GRIN 렌즈)의 USAF 분해능 target 영상.

0.23P GRIN 렌즈, 4.6  $\mu\text{m}$  영상가이드를 사용한 고 분해능 안구내시경의 획득영상을 보여주고 있다. 기존 내시경 영상은 USAF 분해능 target의 group 4-1(16 lp/mm)을 보여주고 있고, 고 분해능 내시경 영상은 group 7-1(128 lp/mm)을 각각 보여주고 있는데, 두 영상 모두 group 수를 표시하기 위해서 각각 group 4-1과 7-1의 영상을 획득하였다.

본 연구 결과 영상가이드를 포함하고 있는 마이크로 광섬유의 직경에 의해 획득 영상의 분해능이 결정되었는데, 마이크로 광섬유의 직경이 4.6  $\mu\text{m}$  일 경우가 3.7  $\mu\text{m}$  직경의 마이크로 광섬유를 포함하는 영상가이드를 사용하는 경우보다 영상 분해능이 높다는 결론을 얻었고 이는 기존 안구내시경의 경우와 같은 결과임을 알 수 있었다<sup>17)</sup>.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 확대 고 분해능 안구내시경 영상을 획득하기 위해서 신 개념의 광학적 설계를 통해 마이크론 단위의 영상을 획득하였고, 기존 안구내시경 영상의 분해능과 USAF 분해능 target을 이용하여 비교, 분석하였다. 그 결과 신 개념 고 분해능 안구내시경에서 획득한 영상은 기존 안구내시경 영상보다 분해능이 최대 약 7배 이상, 확대 배율이 약 35배 이상 높았다. 본 연구결과 개발 가능한 고 분해능 안구내시경은 임상적으로 그 사용범위 및 빈도를 증가시킬 것이고, 안구내시경 뿐 아니라 혈관내시경, 바늘내시경 등 미세 영상가이드를 사용하는 비침습적 내시경 수술 부분에서의 응용이 가능 할 것으로 기대 된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국 과학재단 목적기초연구 지원으로 수행되었음(R05-2002-000-00563-0).

#### 참고문헌

- [1] P. Rol, Jenny, D. Beck, F. Frankhauser, P. F. Niederer, "Optical properties of miniaturized endoscope for ophthalmic use," *Opt. Eng.*, vol. 34, no 7, pp. 2070-2077, 1995.
- [2] M. Uram, "Laser endoscope in the management of proliferative vitreoretinopathy," *Ophthalmology* 101, pp. 1404-1408, 1994.
- [3] K. M. Joos, J. H. Shen, and Q. Ren, "An endoscopic goniotomy probe for holmium : YAG laser delivery," *Proc. SPIE* 2126, pp. 259-261, 1994.
- [4] T. Tsumanuma, K. Tanaka, S. Chigira, K., Sanada, and K. Inada, "The ultrathin silica based imagefiber for the medical usage," *Opt. Fib. Medicine III*, SPIE vol. 906, pp. 92-96, 1988.
- [5] L. Huang and U. Osterberg, "Measurement of cross-talk in order packed image fiber bundle," *Proc. SPIE* 2536, pp. 480-484, 1995.
- [6] A. W. Snyder and D. J. Mitchell, "Leaky rays on circular optical fibers," *J. of Soc. Am. A*, vol. 64, no. 5, pp. 599-607, 1974.
- [7] B. Lee, "Measurement of spatial resolution in fiber-optic image guides," *J. of Soc. Korea*, vol. 5, no. 2, pp. 33-37, 2001.

## Evaluation of optical properties for the development of high resolution ophthalmic endoscope

Bongsoo Lee<sup>†</sup> and Dong Hyun Cho

*School of Biomedical Engineering, College of Medicine, Konkuk University, Chungju 380-701, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: bslee@kku.ac.kr*

Sin Kim

*Department of Nuclear and Energy Engineering, College of Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, KOREA*

Hyosung Cho

*Department of Radiation Science, Institute of Health Science, Yonsei University, Gangwon 220-710, KOREA*

(Received March 17, 2004, Revised manuscript August 19, 2004)

An ophthalmic endoscope which is used in medical applications should have the total diameter less than 1 mm. Its image resolution is limited to 30~40 lp/mm. Therefore, the image resolution is one of the most important factors to decide image quality of the ophthalmic endoscopic images. This study obtained high resolution and magnifying ophthalmic endoscopic images by a new optical design using a 0.23 pitch GRIN lens and high resolution fiber-optic image guide which has less than 5  $\mu$ m diameter microfibers. The resolutions of images from existing and from a new type of ophthalmic endoscope are measured and compared using a USAF resolution target.

OCIS Codes : 110.2350. 110.2760. 100.6640. 170.2150.