

표준 단일모드 광섬유와 하이델타 광섬유사이의 저 손실 접속 기법

김광택[†] · 양병철

호남대학교 광전자공학과
 ☎ 506-714 광주 광산구 서봉동 59-1

(2008년 4월 22일 받음, 2008년 5월 23일 수정본 받음, 2008년 6월 2일 게재 확정)

열처리에 의한 광섬유 코어의 모드 확산과 모드 진화 현상을 이용하여 일반 통신용 단일모드 광섬유와 하이델타(high Δ) 광섬유 사이의 접속 손실을 줄일 수 있는 기법들을 제시하였다. 실험결과는 하이델타 광섬유의 적절한 열처리를 통해 기계적 접속 손실이 2.3 dB에서 0.1 dB까지 감소함을 나타내었다. 반면 용착접속 후 접속 부위에 전기 방전이나 산소 불꽃으로 열을 인가하는 방법으로 0.2~0.4 dB 정도의 접속 손실을 달성하였다.

주제어: High delta fiber, Low loss splicing, Thermally expanded core fiber, Mode evolution

I. 서 론

코어와 클래딩 사이의 굴절률 차이가 큰 광섬유를 하이델타(high delta) 혹은 하이 NA(high numerical aperture) 광섬유라고 일컫는다. 단일모드 하이델타 광섬유는 하이델타 평판 도파로와 접속시 모드 불일치에 의한 결합 손실(coupling loss)을 줄이는 용도로 이용 될 수 있을 뿐만 아니라,^[1] 반도체 레이저 광원과 광섬유 광결합 분야,^[2] 초광대역 광원생성 분야,^[3] 비선형 광섬유 분야^[4]와 같은 다양한 응용이 보고되고 있다. 계단형 단일모드 광섬유의 고유 모드의 생김새(profile)는 코어의 크기 및 코어와 클래딩사이의 굴절률 차이에 의해 결정된다. 도파로 구조가 서로 다른 광섬유를 단면 결합할 때 모드 부정합에 의한 손실이 발생한다. 단일모드 하이델타 광섬유는 코어-클래딩 굴절률 차이가 일반 통신용 단일모드 광섬유의 코어-클래딩 굴절률 차이에 비해 현저히 크다. 반면 모드의 크기는 상대적으로 작은 특징을 가지고 있다. 대부분의 광섬유 광학계는 통신용 표준 단일모드 광섬유를 이용하기 때문에 하이델타 광섬유와 일반 통신용 광섬유 사이에 저 손실 접속 기술이 요구 된다. 지금까지 이중 광섬유간에 저손실로 접속하기 위한 여러 연구^[5-8]가 보고 되었다. 하지만 본 논문의 저자들이 알고 있는 한 하이델타 광섬유와 일반 광섬유 사이의 접속 손실을 최소화하기 위한 다양한 시도와 최적화된 조건을 제공한 연구 결과는 아직 보고되지 않았다.

본 논문에서는 단일모드 하이델타 광섬유와 일반 통신용 광섬유 간의 접속 손실을 줄이기 위한 세 가지 방법을 시도 하였고 각 방법의 실험결과를 비교 분석하였다. 모드 정합을 통한 저 손실 접속을 달성하기 위해 산소 불꽃 혹은 전기 방전에 의한 코어내 불순물을 확장하는 방법을 도입하였다. 최소 접속 손실을 얻을 수 있는 조건과 이때 달성한 접속 손실

에 대한 실험 결과가 기술되어 있다. 본 논문에서 획득한 기법은 코어 크기가 다른 단일모드 이중 광섬유들 사이의 저 손실 접속을 위해 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

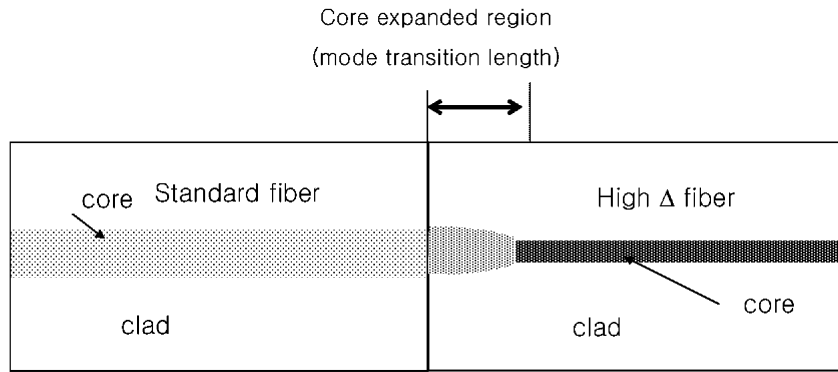
II. 원리 및 구조

앞서 언급 했듯이 모드크기가 서로 다른 광섬유 사이의 접속손실을 줄이기 위해서 모드 정합이 필요하다. 여기서 모드 정합이란 접속되는 두 광섬유의 모드 크기와 형태를 일치 시키는 것을 의미한다. 광섬유의 고유 모드 크기를 제어 하는 방법으로 고열을 이용해 광섬유를 양쪽으로 잡아 당겨 테이퍼링 하는 방법과 코어내 도핑된 불순물을 확산하는 방법이 알려져 있다. 실리카 광섬유 코어에는 일반적으로 GeO₂ 분자들이 첨가되어 있고 고열을 가하면 이들은 클래딩으로 확산된다. 이 확산은 코어의 확장을 의미하며 불순물의 농도가 낮아짐에 따라 코어의 굴절률이 감소한다. 코어가 커지고 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 감소하여 모드가 확장된다.^[9-11] 열확산 후 단면상에 분포된 불순물 총량은 변하지 않기 때문에 정규화 주파수는 변하지 않으며 단일모드를 유지한다.

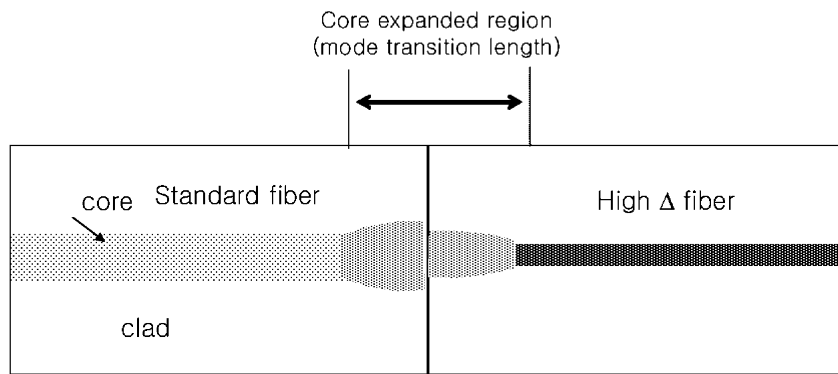
본 논문에서는 이러한 광섬유에 1300°C 이상 고열을 인가하여 모드를 확장하는 방법을 도입하였다. 우선 본 논문에서는 모드 정합을 위해 기본적으로 두 가지 방법을 고려하였다. 첫째 상대적으로 모드 크기가 작은 하이델타 광섬유만 고열을 인가하여 두 광섬유 사이의 모드 정합을 이루는 방법으로 그림 1(a)로 이해 할 수 있다. 이 방법은 두 광섬유를 기계적 접속할 때 적용 가능하다. 두 번째 방법은 그림 1(b)와 같이 두 광섬유를 용착접속 후 접속부위에 열을 인가하여 양쪽 광섬유 코어를 모두 확장하는 방법이다. 열확산 전 단일 모드 광섬유의 정규화 주파수는 다음과 같이 표현된다.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a_0 n_0 \sqrt{2\Delta_0} \tag{1}$$

[†]E-mail: ktkim@honam.ac.kr



(a) 접속전 하이텔타 광섬유만의 코어 열확산 방법



(b) 접속 후 접속 부위 코어 열확산 하는 방법

그림 1. 일반 광섬유와 하이텔타 광섬유 사이의 저 손실 접속 기술.

여기서 λ 는 파장, n_0 는 광섬유 코어의 굴절률이다. a_0 와 Δ_0 는 열확산 전 광섬유 코어의 반지름과 코어와 클래딩의 비굴절률 차(fractional refractive index difference)를 각각 나타낸다. 정규화 주파수가 열확산 후에도 일정하기 때문에 다음과 같이 표현 할 수 있다.

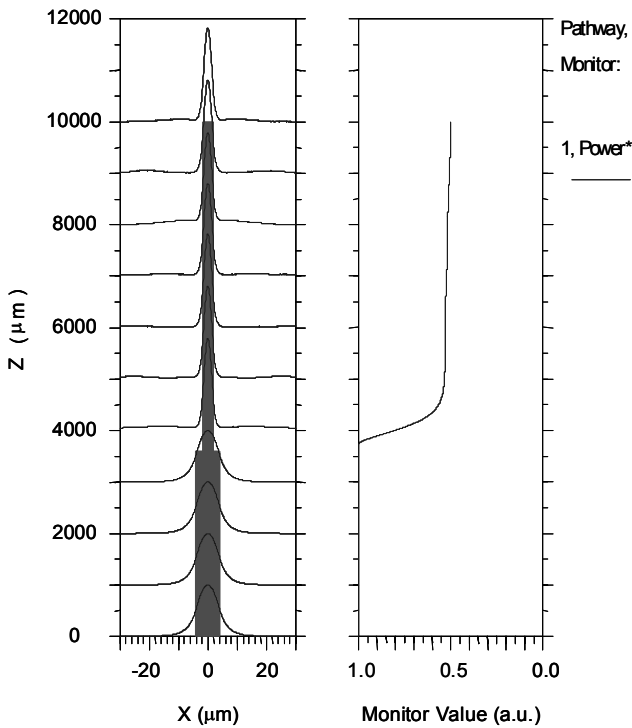
$$a^2 \Delta = a_0^2 \Delta_0 \tag{2}$$

여기서 a 와 Δ 는 열확산 후 광섬유 코어의 반지름과 코어와 클래딩 비굴절률 차이를 나타낸다.

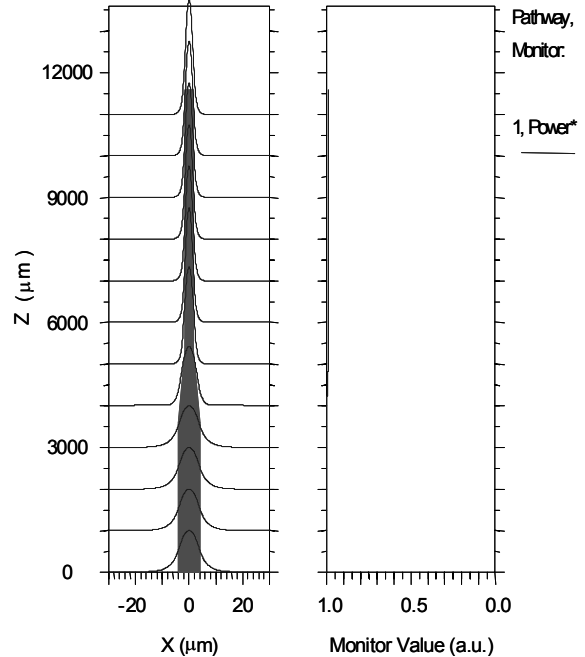
그림 2(a)는 일반 광섬유와 하이텔타 광섬유가 단면 결합 되었을 때 전송과정에서 모드 생김새의 변화와 모드의 광파위의 변화를 빔전파방법을 이용하여 계산한 결과를 나타내고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 두 광섬유의 접속 부분에서 모드 부정합에 의한 결합 손실이 발생함을 알 수 있다. 광의 진행 경로가 반대인 경우도 동일한 손실을 가진다. 전산모의에서 일반 광섬유는 $a_0 = 4.1 \mu\text{m}$, $n_0 = 1.444$, $\Delta_0 = 0.00346$ 가정하였고, 하이텔타 광섬유의 코어의 반경은 일반 광섬유보다 훨씬 작은 $1.7 \mu\text{m}$ 이며 코어와 클래딩간의 비굴절률 차 (Δ_0)이를 약 0.029로 가정하였다. 두 광섬유 모두 1550 nm 파장에서 단일모드 광섬유로 동작한다. 이러한 모드 부정합에 의한 손실을 줄이기 위해 두 광섬유의 모드 생김새를 유

사하게 만들어 모드 정합을 이끌어 내는 것이 필요하다. 하이텔타 광섬유의 끝단에 열을 인가하여 적절하게 모드 크기를 조절 후 일반 광섬유와 접속한 경우에 모드의 진행 과정과 광파위의 변화가 그림 2(b)에 나타나 있다. 이때 광섬유 길이방향으로 코어 모양의 변화가 천천히 일어나면 모드 진화현상^[2]에 의해 손실 없이 모드 크기가 변환된다. 그림 2(b)에서 광섬유의 코어가 연속적으로 변하지만 진행 방향으로 정규화 주파수가 일정하도록 코어의 굴절률을 변화 시켰다. 그림 2(b)를 통해서 알 수 있듯이 적절한 열확산을 이용하면 접합 손실은 무시할 수 있을 정도로 작게 할 수 있음을 예측할 수 있다.

모드 진화가 손실 없이 이루어지기 위해서는 길이 방향의 광섬유 굴절률 분포의 변화가 천천히 진행되어야 한다. 모드 진화 과정에서 손실은 광섬유의 구조 변화가 진행되는 길이에 매우 의존한다. 그림 3은 광섬유에서 모드가 변환되는 길이(mode transition length)와 모드의 광파위 변환효율(transmission)사이의 관계를 계산한 결과이다. 모드 변환이 시작되는 점에서는 일반 통신용 단일모드 광섬유 굴절률 분포를 가지며 끝점에서는 하이텔타 광섬유 구조의 굴절률 분포를 가지는 것으로 가정하였다. 코어의 직경은 점점 가늘어지는 반면 코어와 클래딩의 굴절률 차이는 점점 커진다. 그러나 변환영역에서 정규화 주파수는 일정하도록 설정하였다. 변환영



(a) 열 처리 없이 접속한 경우



(b) 하이텔타 광섬유의 열처리 후 접속한 경우

그림 2. 빔전파방법을 이용한 이중 광섬유간 접속 손실 전산모의 결과.

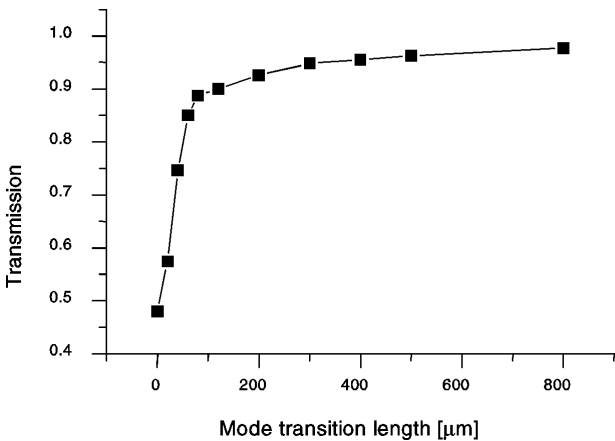


그림 3. 모드 변환 길이(mode transition length)에 따른 광파워 전달비(transmission).

역의 길이가 100 μm 이상이 되면 광파워 변환 효율은 0.9 이상 되며 변환 길이가 1000 μm 이상이면 이론적 광파워 변환 효율은 0.98에 달하는 것으로 예측되었다. 실제 열확산 코어의 굴절률 분포는 가우시안 형태이지만, 여기서는 계단형 굴절률 분포로 가정하였다.

III. 실험 및 분석

본 장은 이중 광섬유 사이의 기계적 접속 및 용착 접속 과

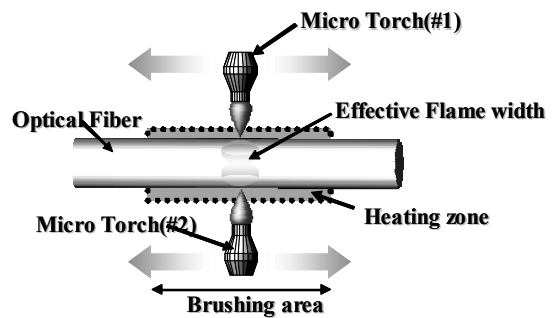


그림 4. 산소 불꽃에 의한 광섬유 코어 열확산 방법.

정에서 모드 부정합(mode mismatching) 때문에 발생하는 접속 손실을 줄이기 위한 세 가지 방법들을 소개하고 실험 결과를 제공하고자 한다. 먼저 기계적 접속 실험을 위해 열확산 코어 광섬유를 제작하였다. 실험에 하이텔타 광섬유로 Nufern사의 UHNA4 모델의 광섬유를 이용하였다. 1550 nm 파장에서 이 광섬유의 모드직경(MFD: mode field diameter)는 4.0 μm이며 개구수(NA: numerical aperture)는 0.35이다. 이로부터 추정된 광섬유의 코어 지름은 3.4 μm이다. 코어 반경과 모드 크기가 일반 통신용 광섬유의 절반에 미치지 못하지만 개구수는 수배 크다. 일반 표준 광섬유로 SMF 28을 이용하였다. 이 광섬유의 MFD는 10.4 μm이며 코어 지름은 8.2 μm 광섬유에 높은 열을 가하기 위해 그림 4와 같이 산소와 LPG 혼합가스를 이용한 불꽃을 광섬유에 주행하면서 광섬유에

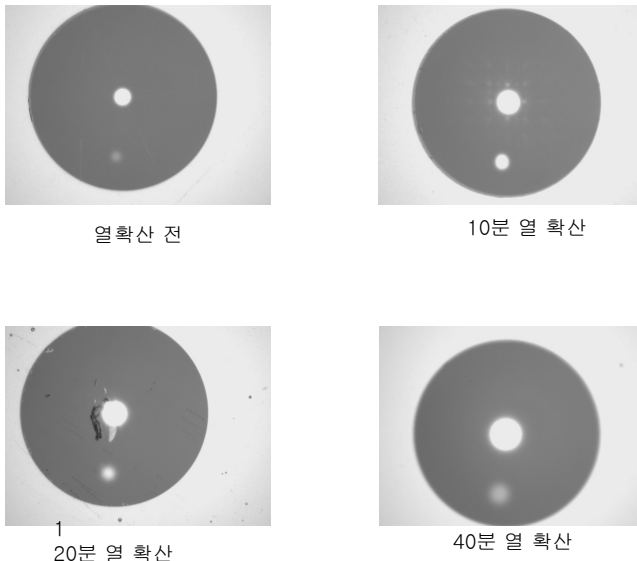


그림 5. 산소 불꽃에 의한 열확산 시간에 따른 광섬유 끝단에서 빔 크기 비교.

표 1. 산소 불꽃 노출 시간에 따른 기계적 접속 손실의 변화.

확산 시간(분)	손실[dB](파장 1550 nm)
0	2.3
5	1.0
10	0.1
20	0.7

열을 가한다. 광섬유에 인가되는 열은 1300°C 이상이다. 주행 거리는 8 mm이다. 불꽃의 노출 시간에 따른 하이텔타 광섬유의 끝단에 출력되는 빔패턴 사진이 그림 5에 나타나 있다. 광원으로 백색광을 사용했기 때문에 정확한 MFD를 측정하기 힘들었지만 약 40분 이상을 고온에 광섬유를 노출시켰을 때 빔 크기의 지름은 확산전의 두 배 정도로 나타났다. 하지만 열확산 후 광섬유의 외경은 변화가 거의 없었다. 열처리된 하이텔타 광섬유의 중간 부위를 절단하고 광커넥터를 부착하였다. 마찬가지로 통신용 단일모드 광섬유의 끝단을 연마하고 커넥터를 부착하였다. 광섬유 아답터를 통해 두 광섬유를 기계적으로 접속하여 접속 손실을 측정하였다. 실험에 광원으로 1550 nm 파장의 레이저 광을 이용하였다. 하이텔타 광섬유의 열확산 시간에 따른 기계적 접속 손실을 측정된 결과는 표 1에 제시 되어 있다. 열확산 시간이 길어짐에 따라 처음에는 손실이 감소하다가 다시 손실이 증가하는 경향을 보였다. 다시 손실이 커지는 이유는 하이텔타 광섬유 모드가 지나치게 확장 된 결과 때문으로 분석된다. 손실이 가장 작은 경우 0.1 dB까지 얻을 수 있었다. 이러한 작은 접속 손실은 모드 진화와 모드 정합이 효과적으로 달성된 결과이다. 이러한 실험 결과로 볼 때 불꽃이 주행했던 양쪽 끝단에서 광섬유의 길이 방향으로 굴절률 분포 변화가 천천히 진행된 것으로 판단된다.

표 2. 용착 접속 후 방전에 횟수에 따른 접속 손실의 변화.

방전횟수	실험 1, 접속손실[dB]	실험 2, 접속손실[dB]
1	1.3	1.3
2	1.2	1.1
3	1.1	0.9
4	1.0	0.8
5	0.9	0.7
6	0.8	0.6
7	0.7	0.5
8	0.6	0.5
9	0.6	0.5
10	0.6	0.5
11	0.6	0.5
12	0.6	0.6
12	0.5	0.5
13	0.4	0.4
14	0.5	0.5

다음으로 용착 접속시 하이텔타 광섬유와 일반 광섬유 사이의 접속손실을 줄이는 두 가지 방법과 그 실험 결과를 제공하고자 한다. 전기 방전에 의한 두 광섬유를 용착 접속할 때 광섬유에 고열이 인가되며 이때 광섬유의 코어에 첨가된 불순물이 확산된다. 두 광섬유 양쪽 모두 열확산이 발생하며, 불순물의 확산 방정식에 의하면^[13] 불순물 농도가 상대적으로 높은 하이텔타 광섬유의 코어 확산이 더 빠르게 진행되는 것으로 사려된다. 용착 접속기로 후지쿠라사의 FSM-40S를 이용하였다. 이때 효과적인 열확산을 위해 가능한 방전 시간은 길게 하고 방전의 세기는 약하게 하는 것이 옳다고 알려져 있다. 너무 강한 방전은 광섬유의 왜곡을 가져 올 수 있기 때문이다. 두 광섬유를 용착 접속 후 방전을 반복하는 방법으로 열확산을 진행 시켰다. 본 실험에서는 1회 방전 시간을 3000 ms로 설정하였고 방전량은 주어진 장비에서 주어진 상대적인 값인 20 bit로 설정하였다.

실험 과정에서 손실을 실시간으로 측정하기 위해 일반 표준 광섬유쪽에 광원을 결합하고 하이텔타 광섬유 쪽에는 광파워 메타를 부착하였다. 처음 접속 후 삽입손실은 1.3 dB로서 앞서 열처리 과정을 거치지 않았던 2.3 dB의 기계적 접속 손실 보다 작게 나타났다. 접속 후 접속부위에 방전을 계속 하면서 손실의 변화를 관측하였다. 방전횟수가 늘어남에 따라 접속 손실이 점점 감소함을 알 수 있다. 표 2에 방전횟수에 따른 삽입손실의 변화가 나타나 있다. 이러한 실험을 동일한 조건으로 2회 실시하였다. 최적의 조건에서는 0.4 dB까지 감소함을 알 수 있었다. 두 광섬유의 코어에 방전으로 인한 고열이 인가 될 때 불순물 농도가 높은 하이텔타 광섬유는 불순물의 확산이 빠르게 일어나고 반면 일반 광섬유는 상대적으로 불순물의 확산이 느리게 발생하여 접속 부위에서 두 광섬유의 코어의 크기가 비슷해지는 현상이 발생하는 것

표 3. 용착 접속 후 산소 불꽃의 노출 시간에 따른 접속 손실의 변화.

열확산 시간 [분]	실험 1, 접속손실[dB]	실험 2, 접속손실 실험[dB]
0	1.4	1.4
3	1.3	1.1
4	1.1	0.9
5	0.7	0.8
6	0.5	0.7
7	0.4	0.5
8	0.3	0.4
10	0.3	0.2
13	0.4	0.3

으로 사려 된다. 하지만 방전횟수를 계속 증가하면 약간 손실이 증가하였는데 이는 여러 번의 장시간 방전에 의한 광섬유의 외곡이 원인인 것으로 사려 된다. 용착 접속 부위에 실제로 외형 변화가 있었다. 단적인 예로 여러 번의 방전에 노출된 광섬유는 외형 변화로 지름이 126 μm인 구멍을 가진 페룰(ferrule) 속으로 삽입되지 않았다. 이러한 용착 접속 후 방전 방법으로 얻을 수 있는 최소 접속 손실은 앞서 하이텔타 광섬유만 코어를 열확산 시켜 얻을 수 있는 최소 손실보다는 약간 크게 나타났다.

마지막으로 두 광섬유를 용착 접속 후 산소 불꽃으로 접속 부위에 고열을 가해 접속 손실을 줄일 수 있는지 실험하였다. 앞서 그림 4와 같이 두 개의 마이크로 토치에서 발생하는 불꽃을 접속 부위 8 mm를 주행시키면서 실시간으로 접속 손실을 측정하였다. 동일한 조건에서 두 번 실험을 수행하였다. 용착 접속 후 손실은 1.4 dB였으며 열을 인가하는 시간이 경과함에 따라 최소 0.2~0.3 dB까지 감소함을 알 수 있었다. 큰 차이는 아니지만 이 방법은 전기 방전을 이용하는 방법보다 더 작은 손실을 얻을 수 있었다. 광섬유 증폭기나 광섬유 레이저에서는 작은 접속 손실의 차이가 성능에 크게 영향을 미치며 이러한 경우 마이크로 토치를 이용하여 접속 손실을 줄이는 방법은 매우 유효한 방법이 될 수 있다. 이 방법에서 산소 불꽃의 주행 거리를 짧게 하거나 산소 불꽃을 크게 하여 열을 인가하는 시간을 줄일 수 있는 여지는 남아 있다. 다만 광섬유에 장시간 높은 열을 인가하면 광섬유의 기계적 강도가 약해지는 문제점을 가진다는 사실은 유의할 필요가 있다.

IV. 결 론

모드 크기가 현저하게 차이가 나는 일반 광섬유와 하이텔타 광섬유 사이의 접속 손실을 줄이기 위한 다양한 방법을 연구 하였다. 상대적으로 모드 크기가 작은 하이 텔타 광섬유를 산소 불꽃으로 열확산 후 두 광섬유를 기계적으로 접속 하는 실험을 수행 하였다. 최적의 열확산 조건에서 초기 2.3

dB의 접속 손실이 0.1 dB까지 감소할 수 있음을 알 수 있었다. 용착 접속의 경우 용착접속 직후 1.3 dB 접속 손실을 보였다. 용착 접속 후 접속 부위에 여러 번의 방전을 가해 실 시간으로 접속 손실의 변화를 관측한 결과 방전횟수가 증가함에 따라 손실은 0.4 dB까지 감소하였고 일정 범위 이상의 방전은 오히려 접속 손실을 증가시키는 결과를 가져왔다. 두 광섬유를 접속 후 마이크로 토치를 이용하여 접속 부위에 불꽃을 인가하여 손실 변화를 측정하였다. 열을 인가하는 시간에 따라 손실은 점점 감소하여 최소 0.2~0.3 dB까지 감소함을 알 수 있었다. 이러한 저 손실 접속 기술은 하이텔타 도파로를 이용하는 AWG(arrayed waveguide grating)소자의 저손실 본딩, 광섬유 증폭기에서 어븀 첨가 광섬유와 일반 광섬유 사이의 접속, 그리고 고풍력 광섬유 레이저에서 대구경 광섬유(large mode area fiber)와 일반 광섬유 사이의 접속기술에 적용될 수 있을 것으로 사려된다.

참고문헌

- [1] Y. Hibino, "Recent advances in high density and large scale AWG multi/Demultiplexers with high index contrast silica-based PLCs," *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 8, no 6, pp. 1090-1101, 2002.
- [2] Yu-Cheng Lin and San-Chien Lin, "Thermally expanded core fiber with high numerical aperture for laser-diode coupling," *Microwave and optical technol. lett.*, vol. 48, no. 5, pp. 979-981, 2006.
- [3] D. L. Marks, A. L. Oldenburg, J. J. Reynolds, and S. A. Boppart, "Study of an ultrahigh-numerical-aperture fiber continuum generation source for optical coherence tomography," *Optics Lett.*, vol. 27, no. 22, pp. 2010-2012, 2002.
- [4] Y. Nishida, T. Kanamori, Y. Ohishi, M. Yamada, K. Kobayashi, and S. Sudo, "Efficient PDFA module using high-NA PbF2/InF3-based fluoride fiber," *IEEE photonics technology letters*, vol. 9, no. 3, pp. 318-320, 1997.
- [5] A. Ishikura, Y. Kato, and M. Miyauchi, "Taper splice method for single-mode fibers," *Appl. Opt.*, vol. 25, pp. 3460-3465, 1986.
- [6] Mehendra P. Singh, James O Reese, T. Michael Wel, and D. G. Storch, "Low-loss fusion splicing of erbium-doped optical fiber for high performance fiber amplifiers," *IEEE Transactions on components, hybrids and manufacturing Technol.*, vol. 13, no. 14, pp. 811-813, 1990.
- [7] Kunihara Himeno, "Fusion splicing techniques for photonic crystal fibers," *The review of laser engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 42-46, 2006.
- [8] T. Haibara, T. Nakashima, M. Matsumoto, and H. Hanafusa, "Connection loss reduction by thermally diffused expended core fiber," *IEEE. Photonics Technol. Lett.*, vol. 3, no. 4, pp. 348-350, 1990.
- [9] K. Shiraishi, Yoshizo, and S. Kawakami, "Beam expending fiber using thermal diffusion of the dopand," *J. Lightwave*

- Technol.*, vol. 8, no. 8, pp. 1151-1161, 1990.
- [10] K. Shiraishi, T. Yanagi, and S. Kawakami, "Light Propagation characteristics in thermally diffused expanded core fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 11, no. 10, pp. 1584-1591, 1993.
- [11] O. Hanaizumi, Y. Aizawa, H. Minamide, and S. Kawakami, "Fabrication of an expanded core fiber having MFD of 40 μm preserving outer diameter," *IEEE Phonic Technol. Lett.*, vol. 6, no. 7, pp. 842-844. 1994.
- [12] Fielding, A. J., Edinger, K., Davis, C. C. "Experimental observation of mode evolution in single-mode tapered optical fibers," *Journal of lightwave technology : a joint IEEE/OSA publication*, vol. 17, no. 9, pp. 1649-1656, 1999.
- [13] Y. Ohtera, O. Hanaizumi, and S. Kawakami, "Numerical analysis of eigenmodes and splice losses of thermally expanded core fiber," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 12, pp. 2675-2682, 1999.

Low Splicing Loss Technique between Standard Single Mode Fiber and High Δ Fiber

Kwang Taek Kim[†] and Byoung Cheoul Yang

Department of Optoelectronics, 59-1, Seobong-doing, Kwangsan-Gu, Gwangju 506-714, Korea

[†]*E-mail: ktkim@honam.ac.kr*

(Received April 22, 2008; Revised manuscript May 23, 2008; Accepted June 2, 2008)

In this paper, we have presented techniques to reduce the splicing loss between standard single mode fiber and high Δ single mode fiber based on the mode expanding and mode evolution induced by thermal treatment of the fibers. The experimental results show that mechanical splicing loss can be reduced from 2.3 dB to 0.1 dB through proper thermal treatment of the high Δ fiber. Meanwhile, we achieved 0.2~0.4 dB of low splicing loss between two fibers by heating the splicing region using electric arcing or an oxygen flame.

OCIS codes: (060.2310) Fiber optics; (060.2360) Fiber optics links and subsystems; (060.2400) Fiber properties; (060.2430) Fibers, single-mode.