

# $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 기체의 $1.54949\mu\text{m}$ 흡수선을 이용한

## OFDM 통신의 광 동기신호 발생장치

조규만, 이용구, 강민희, 김종희

서강대학교 물리학과, 서울시 마포구 신수동 1번지

$^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  분자의  $1.54949\mu\text{m}$  회전-진동 전이 흡수선을 이용하여 DFB LD의 발진주파수를 안정화 시킴으로써 이를 주파수대역 광 다중통신(OFDM)의 표준주파수를 주는 광동기 신호로 활용하는 방안에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 DFB LD의 발진주파수의 변화에 따른 기체 Cell의 투과한 빛의 세기의 변화를 연산 처리하여 이를 안정화 Loop에 대한 error 신호로 사용하여 줌으로써 수 MHz 이내의 주파수 안정도를 갖는 광 동기신호를 구성하였다. 이러한 안정화 방법을 이용하여 이제까지 개안된 다른 방법에 비하여 광학계통과 광신호처리 과정을 크게 단순화 된, 또한 동작중 자체 진단 및 자동복구 기능을 갖춘 이상적인 광동기 신호를 구성하였다.

### I. 서론

단일 회선당 즉 단일 광섬유당 데이터 통신량을 증가시키기 위해서 OFDM에 대한 많은 연구가 진행되어왔다. 또한, OFDM이 효과적으로 이루어지기 위해서는 multiplexing 또는 demultiplexing 과정에서 채널 주파수를 설정해 주는 주파수 표준이 필요하기 때문에 절대적으로 주파수가 안정화된 레이저 즉 절대광원에 대한 연구가 진행되어 왔다.

레이저의 주파수를 안정화 시키기 위해서는 레이저의 발진주파수를 잠금(locking)시킬 수 있는 절대주파수 표준이 있어야 한다. 이러한 주파수 표준으로 표준공진기의 공진주파수<sup>[1]</sup> 원자<sup>[2]</sup> 또는 분자<sup>[3-6]</sup>의 흡수선의 중간주파수등을 사용한다. 표준공진기나 원자 또는 분자로 구성된 빛의 흡수 cell은 모두 빛의 진동수의 변화를 세기의 변화로 바꾸어 주는 주파수 검출기 역할을 한다. 따라서 빛의 세기의 변화를 측정함으로써 레이저의 발진주파수가 표준주파수로 부터 벗어난 정도를 알 수 있고 되먹임고리(feedback loop)에 의해 레이저의 유입전류를 조절하여 줌으로써 레이저의 발진 주파수를 안정화 시킬 수 있다.

외부 기준 공진기를 사용하여 절대광원의 주파수로 사용하는 경우 단시간의 높은 주파수 안정도를 구현할 수 있지만 절대적인 주파수를 설정하는 데

어려움이 있으며 주변 온도가 변함에 따라 공진기의 길이도 변하기 때문에 지속적인 주파수 안정도를 유지하는 데 필요한 안정화에 대한 열개가 복잡하여 통신용 소자로서는 실용화 되기 어렵다. 그러므로, 광통신의 최적 상용파장인  $1.55\mu\text{m}$  부근에서의 주파수 안정화를 위하여 원자 또는 분자의 흡수선의 중간주파수에 레이저의 발진주파수를 locking 시키는 방법에 대한 연구가 많이 진행되어 왔으며, 주로  $Kr$ <sup>[2]</sup>,  $Hf$ <sup>[3]</sup>,  $NH_3$ <sup>[4]</sup>,  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ <sup>[5]</sup>,  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ <sup>[6]</sup> 등의 기체를 이용하여 여러가지 안정화 방법이 제안되었다.

흡수선의 중간 주파수에 대하여 레이저의 발진주파수를 안정화를 시키기 위해서는 흡수선의 중간주파수 부근에서 레이저의 발진주파수 변화에 대하여 선형적으로 변하는 error 신호를 얻어야 한다. 이를 위하여 이제까지는 레이저의 발진주파수를 변조시켜 첫번째 Bessel side-band의 크기변화를 되먹임신호로 사용하는 방법이 연구되어 왔다. 레이저의 발진주파수의 변조방법으로는 주입전류를 주기적으로 변조시켜주는 직접변조방식과 전기광학변조기 또는 광음향변조기등 외부변조기를 사용하는 간접변조방식이 있다. 또한, 레이저의 주파수를 변조시키는 방법 대신에 Zeeman 효과를 이용하여 흡수선의 중간주파수를 변조시키는 방법들이 제안된 바 있다.

직접변조를 이용한 방법의 경우에는 레이저의 발진주파수 자체가 변조되어 있으므로 절대광원으로는

부적합하고 간접변조를 이용한 방법의 경우에는 상대적으로 광학계통 및 광신호처리 계통이 복잡하기 때문에 광통신 소자로 집적시키는 데 어려움이 있다. 본 논문에서는 흡수 cell을 투과한 빛의 규격화된 세기 변화를 컴퓨터로 연산처리하여 주파수 안정화에 이용함으로써 이제까지 제안되어온 방식들의 단점들을 크게 보완한 새로운 주파수 안정화 방법을 제안하였다.

## II. 반도체 레이저의 주파수 안정화

반도체 레이저의 발진주파수는 레이저의 온도와 주입전류에 따라 변하기 때문에 높은 주파수 안정도를 유지하기 위해서는 온도와 주입전류를 되먹임 고리에 의해 동시에 조절해 주어야 한다. 일반적으로 1.55  $\mu\text{m}$  근방에서 발진하는 DFB LD는 온도에 따라 약 수십 GHz/K, 주입전류에 따라 약 수 GHz/mA의 주파수 변화율을 갖는다. 따라서 레이저의 발진 주파수를 안정화 시키기 위해서는 thermister와 TEC를 이용하여 레이저의 온도를 0.1K 이내로 안정화 시키고 주파수 표준으로 선정된 흡수 cell에 의해 측정된 주파수 변위값을 전기적으로 되먹임하여 주입전류를 조절하여 줄으로써 레이저의 발진주파수를 미세하게 조절해 주는 방법을 사용한다. 온도조절에 대한 개념은 잘 알려져 있기 때문에 여기에서는 주로 주입전류의 미세조절에 대한 개념에 대하여 논의하겠다.

레이저의 발진주파수를 흡수선의 중간 주파수에 잠금시키기 위해서는 중간주파수 근처에서 발진주파수 변화에 따라 선형적으로 변하는 error 신호의 검출이 필요하다. 이를 위하여 레이저의 발진 주파수를 주기적으로 변조시키거나 흡수선의 중간주파수를 주기적으로 변조시키는 방법들이 중점적으로 연구되어 왔다.

흡수 cell을 투과한, 발진 주파수가

$$\omega'(t) = \omega + \delta \sin(\omega_m t), \quad (1)$$

로 변조된 레이저 빛의 세기를 광다이오드로 검출하여 이를 변조 주파수  $f_m = \omega_m / 2\pi$ 에 동기된 lock-in 증폭기로 검출하면 그 출력신호는

$$e_s = \frac{\eta I_0 J_0(\delta) J_1(\delta) e^{-\alpha(\omega)l/2} (e^{-\alpha(\omega+\omega_m)l/2} - e^{-\alpha(\omega-\omega_m)l/2})}{-e^{-\alpha(\omega-\omega_m)l/2}} \quad (2)$$

가 된다. 여기서  $\delta$ , 는 주파수 변조의 크기(modulation depth)를 나타내며,  $\alpha$ ,  $l$ 은 각각 기체의 흡수계수와 흡수 cell의 길이를 나타내고,  $\eta$ 는 빛을 전기신호로 바꾸어주는 유효양자효율 상수이다. 따라서, 이로부터 주파수 변화에 따른 흡수신호의 미분값을 측정할 수 있으며 이 값은 흡수선의 중간주

파수 근처에서 선형적으로 변하기 때문에 이를 DFB LD의 주파수안정화를 위한 전류조절 되먹임 loop의 error 신호로 사용할 수 있다.

레이저의 발진주파수를 주기적으로 변조시켜주는 방법으로는 주입전류를 작은폭으로 변조시켜주는 직접변조 방식과 전기광학 변조기 또는 광음향 변조기를 사용하거나 또한 Zeeman 효과등을 이용하여 흡수선의 중간주파수를 변조시켜주는 간접변조 방법이 있다.

Ikegami<sup>(6)</sup> 등은 직접변조 방법을 사용하여 DFB LD의 발진주파수를  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ 의 1.54949 $\mu\text{m}$  회전-진동 전이선에 대하여 2 MHz이내의 주파수 안정도를 갖는 절대광원을 구성하였으나, 구성된 절대광원의 주파수가 주입 전류에 따라 흔들리고 있으므로 이를 OFDM의 절대적인 주파수 표준으로 활용하기에는 부적합하다.

이러한 직접변조에서 야기되는 여러가지 문제점들을 피하기 위하여 외부변조기에 의한 간접 주파수 변조 방법을 이용하여 레이저의 발진주파수를 안정화 시키는 방법이 연구되어왔다. 그러나 외부변조기를 사용할 경우 직접 변조의 단점을 보완할 수 있으나 이를 광학계통에 첨가 시킴으로써 광학계통의 구조가 복잡하고 상대적으로 광신호처리 계통이 복잡하다는 단점이 있다.

이를 보완하기 위하여 Chung<sup>(2)</sup> 등은 레이저 빛의 주파수를 변조시키는 대신에 흡수선의 중간주파수를 주기적으로 변조시켜 주는 방식을 적용하였다. 주기적으로 변화하는 자기장을 Kr lamp에 인가하여 줄으로써 Zeeman 효과에 의해 1.5422 $\mu\text{m}$ 에 해당하는 Kr 원자의 원형 편광된 빛에 대한 중간 흡수 주파수를 주기적으로 변화시킬 수 있다. 이는 효과적으로 레이저 빛의 주파수를 변조시켜주는 것과 동일하다. 그러므로 흡수 cell을 투과한 레이저 빛을 자기장의 주기에 동기된 lock-in amp로 측정하여 흡수선의 중간주파수 부근에서 주파수 변화에 대하여 선형적으로 변하는 error 신호를 얻을 수 있다. 이들은 이 방법을 이용하여 3MHz의 주파수 안정도를 얻을 수 있었다. 이 방법이 높은 신뢰도를 갖기 위해서는 흡수 cell을 투과하는 레이저 빛이 높은 원형편광도를 유지해야 한다. 그러나 광섬유를 도파하는 빛의 편광 상태는 주변 환경변화에 의한 섭동에 영향을 많이 받기 때문에 광섬유로 집적된 광통신소자로 구성하는 데 세심한 주의가 필요하다. 또한 cell 주변의 잔류 자기장에 의한 간섭을 제거하기 위해 차폐에 세심한 주의가 필요하며 표준 파장이 1.5244 $\mu\text{m}$ 로 광증폭기의 증폭대역에서 다소 벗어나 있기 때문에 광전송 system을 구성하는 데 어려움이 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 컴퓨터 연산을 통한 새로운 안정화 방법으로 절대광원을 구성하였다.

## III. 컴퓨터 연산을 이용한 안정화 방법

흡수 Cell을 통과한 빛의 세기는 주파수에 따라

변화한다. 따라서 가장 간단한 안정화 방법은 레이저의 주파수를 변조시키지 않고 흡수 cell을 투과한 레이저 빛의 세기 변화를 error신호로 검출하여 직접 전기적으로 되먹임을 하는 방법이다. 그러나 선풍화대요인에 의해 결정된 흡수선의 모양은 중간 주파수에 대하여 대칭이므로 흡수 cell을 투과한 빛의 세기만으로는 레이저의 발진주파수가 변화하는 방향을 알 수 없다. 따라서, 일상적인 아날로그 방법으로는 흡수선의 중간 주파수에 대한 주파수 안정화가 불가능하며, 중간 주파수에 대한 변별 곡선을 결정하기 위한 새로운 알고리즘의 도입이 필요하다.

본 논문에서 구성된 절대광원에 대한 광학계통 및 광신호 처리계통에 대한 개략도가 그림 1에 나와 있다. 레이저에 접속된 광섬유를 도파해 가는 레이저 빛은 3dB coupler에 의하여 두개의 광섬유로 나뉘어진다. 한쪽 광섬유를 따라 도파해가는 빛은 통신 시스템으로 연결되어 절대광원으로 활용하며 다른 광섬유를 따라 도파해 가는 빛은 GRIN 렌즈에 의하여 시준시킨 후 이를 다시 빛살 가르개 (NPBS, non-polarizing beam splitter)를 이용하여 두개의 경로로 나눈다. 이중 하나의 빛살은 기체 cell을 통과한 후 Ge 광다이오드 PD1으로 검출하고, 다른 빛살은 투과된 빛의 세기변화를 규격화 시키기 위하여 광다이오드 PD2로 검출한다. 각각의 광다이오드에서 검출된 신호를 나누어 주면

$$e_s = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\eta_1 T e^{-\alpha(\nu)}}{\eta_2 R} \quad (3)$$

이 된다. 여기에서  $\eta_1, \eta_2$  는 PD1과 PD2의 유효 양자효율을 나타내며,  $T, R$ 은 각각 NPBS의 투과와 반사계수를 나타낸다. 따라서, 두개의 광다이오드로부터 검출된 빛의 세기를 나누어 줌으로써 규격화된 흡수신호  $e_s$ 는 주입전류 변화에 따른 레이저 빛의 세기 변화에 무관하게되며 흡수선의 고유특성, 즉 발진주파수의 함수로 주어지는 흡수계수에 의해서만 결정됨을 알 수 있다. 더우기 규격화과정을 통하여 레이저의 세기 잡음 또는 광섬유에 가해진 섭동 등에 의한 빛의 세기 변화등 흡수 cell이전에서 일어난 모든 잡음요인을 제거할 수 있다. 식 (3)으로 주어진 규격화된 신호는 A/D 변환기에 의해 digital신호로 바뀌어 주파수 안정화에 필요한 error 신호를 얻기 위하여 컴퓨터에 입력 된다.

주입전류의 조절을 위하여 D/A 변환기로 출력된  $i$ -번째 loop의 조절신호  $e_i'$ 의 결과로 A/D 변환기에  $e_i'$ 가 입력되었다고 한다면 이로부터 되먹임조절에 필요한 error 신호  $\epsilon$ 는 다음과 같은 연산으로 부터 구할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{e_s^i - e_s^{i-1}}{e_c^i - e_c^{i-1}} \propto e^{-\alpha(\nu)} \frac{\eta_1 T}{\eta_2 R} \frac{d\alpha}{d\nu} \frac{d\nu}{dt} \quad (4)$$

여기서,  $d\nu/dt$ 는 주입전류의 변화에 따른 레이저의 발진주파수 변화를 나타내는 상수이기 때문에 식 (4)로 주어지는 연산을 통하여 흡수곡선의 미분값을 구할 수 있으며, 따라서 흡수선의 중간주파수 부근에서 선형적으로 변하는 error 신호를 얻을 수 있다.

이러한 방법으로 얻어진 error 신호에 대한 PID 연산을 취하여 이로부터 주입전류를 조절하여 줌으로써 레이저의 발진주파수를 안정화 시킬 수 있다.

#### IV 실험

제안된 실험 방법에 따라 그림 1과 같은 절대광원을 구성하였다. 본 실험에서는 1.52-1.55 $\mu$ m의 파장에서 많은 수의 흡수선을 갖는  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  기체를 사용하였다. 이 기체는 광섬유 증폭기의 이득대역 안에 포함되며, dispersion shifted fiber의 0 분산파장에 가까우며, 광섬유에서 손실이 적은 파장인 1.54949 $\mu$ m 에서 흡수선을 가지므로 OFDM의 주파수표준으로 이상적이다.

본 실험에서는 99% 순도의  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  기체를 사용하였으며, 38torr의 압력으로 진공용 전착제를 사용하여 직경이 1.25 cm이고 길이가 10 cm인 봉인된 cell을 제작하였다. 실험에 사용된 DFB LD(ETRI 제작, ES-S1620)는 주입전류와 온도에 따라 각각 840 MHz/mA, 11.6 GHz/ $^{\circ}\text{C}$ 의 주파수 변화율을 가지며, 발진 파장 대역에서 흡수계수가 크고 좁은 선풍을 갖는 5 개의 흡수선이 존재하였다. 상용의 온도조절기(ILX Lightwave LDX-3702)를 이용하여 레이저의 온도를 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 의 오차범위로 안정화 하였다.

본 실험에서는  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  기체의 1.548 $\mu$ m 흡수선에 대하여 DFB LD의 발진주파수를 안정화 시켰으며 주입전류의 변화에 따른 규격화된 세기변화가 그림 2에 나와 있다. 이로부터 이 흡수선의 반치폭(FWHM)이 약 1.6 GHz임을 알 수 있으며 이제까지 발표된 결과와 일치함을 알 수 있다.

이와같은 방법으로 얻어진 규격화된 세기변화 신호로부터 식 (4)에 주어진 연산을 통하여 되먹임 조절에 필요한 error 신호를 얻을 수 있었으며 주입전류를 일정한율로 증기시켜가며 얻어진 error 신호에 대한 결과가 그림 3에 나와있다. 이 결과로부터 선류의 변화에 대한 빛의 세기 변화를 미분할 경우 중간 흡수선에서 전류의 변화, 즉 주파수 변화에 따라 선형적으로 변하는 error 신호를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 컴퓨터에서 PID 연산처리된 error 신호를 D/A 변환기로 출력시켜 이를 전류조절기의 조절전압으로 사용하여 DFB LD의 발진 주파수를 안정화 시킬 수 있었다.

## V 실험결과 및 논의

본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 절대광원을 구성하였다.  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  기체의  $1.548\mu\text{m}$  흡수선에 대한 DFB LD의 안정도 결과가 그림 4에 나와있다. 그림에서 주파수 안정도를 측정하기 위해서 처음 5분동안은 안정화를 실행하지 않았으며 5분이후부터 안정화 loop를 구동시켰다. 주파수 안정도는 error신호의 변화폭으로 계산하였으며, 이로부터 수 MHz이 내로 레이저의 발진주파수가 안정화 되어 있음을 알았다. 또한 장시간 주파수 안정도를 측정하기 위하여 실험실에서 40시간 동안 안정화 loop를 가동시켰을 때의 결과가 그림 5에 나와있다.

높은 분해능을 갖는 A/D변환기가 제 기능을 발휘하기 위해서는 세심한 주의가 필요하기 때문에 본 실험에서는 8Bit 분해능의 A/D변환기를 사용하였다. 그러나 규격화 과정을 통하여 레이저의 세기 잡음을 제거해 줌으로써 광신호는 광자의 shot noise에 의해서 주어지는 높은 신호 대 잡음비를 갖기 때문에 12-bit이상의 A/D변환기를 사용할 경우 주파수 안정도를 높일 수 있다. 따라서 제안된 컴퓨터를 이용한 안정화 방법은 광통신에 대한 표준 뿐만 아니라 좀더 높은 주파수 안정도를 요구하는 절대광원에도 적용시킬 수 있다고 사려된다.

## VI 결론

$^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  기체의 회전-진동 전이선 중  $1.55\mu\text{m}$ 에 근접한 흡수선을 선택하여 이 흡수선의 중간 주파수에 대하여 DFB LD의 발진 주파수를 안정화시킬 수 있었다. 본 연구에서는 컴퓨터에 의해 레이저의 발진주파수를 흡수선의 중간주파수에 안정화시키는 새로운 방법을 시도하였으며 그 결과 약 수 MHz 정도의 주파수안정도를 갖는 절대광원을 구성하였다. 이 방법은 레이저의 발진주파수를 주기적으로 변조시킬 필요가 없기 때문에 이제까지 시도되어온 방법들에 비하여 광학계통과 신호처리 과정이 훨씬 단순하기 때문에 module화가 용이하고 높은 신뢰도를 유지할 수 있다는 장점이 있다. 또한 안정화를 위한 되먹임 조절에 컴퓨터를 이용하여 모든 안정화 과정이 자동화 될 수 있으며 컴퓨터를 이용하여 절대광원을 구성함으로써 주변기기의 구성이 일원화될 수 있으며 안정화가 이루어지는 과정중에 실시간 진단이 가능한 장점을 갖는다. 그리고 실시간 진단을 통하여 이상여부를 중앙제어 시스템에 통보할 수 있는 조기경보체계가 용이하다. 이러한 장점을 고려하여 볼 때 본 연구에서 제안된 안정화 방법이 광통신의 절대주파수를 설정해 주는 절대광원을 구성하는 데 이상적인 방법임을 알 수 있다.

\* 본 연구는 1994년도 한국 전자통신연구소의 연구비지원(계약번호: 94178)에 의해 이루어 졌음.

## 참고문헌

1. B. Dahmani, L. Hollberg, and R. Drullinger, "Frequency stabilization of semiconductor lasers by resonant optical feedback", *Opt. Lett.*, **12**, 876 (1987).
2. Y. Chung and R. Derosier, "Frequency-locking of a  $1.5\mu\text{m}$  InGaAsP Lasers to an atomic Kr line using optogalvanic effect", *IEEE Phot. Tech. Lett.*, **2**, 435 (1990).
3. F. Bertinotto, P. Gambini, R. Lano and M. Puleo, "Stabilization of the emission frequency of  $1.54\mu\text{m}$  DFB laser diodes to Hydroge iodide", *IEEE Phot. Tech. Lett.*, **4**, 472 (1993).
4. T. Yanagawa, S. Sudo, and T. Yamamoto, "Frequency stabilization of  $1.5\mu\text{m}$  InGaAs distributed feedback laser to  $\text{NH}_3$  absorption lines", *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 826 (1984).
5. Y. Sakai, I. Yokohama and S. Sudo, "Frequency Stabilized laser diode locked to Acetylene gas absorption lines using fiber-pigtail-type acoustic optical modulator", *IEEE Phot. Tech. Lett.*, **4**, 96 (1992).
6. Y. Sakai, S. Sudo, T. Ikegami, "Frequency stabilization of laser diodes using  $1.51\text{--}1.55\mu\text{m}$  absorption lines of  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$  and  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ ", *IEEE. J. Quant. Elect.*, **28**, 75 (1992).

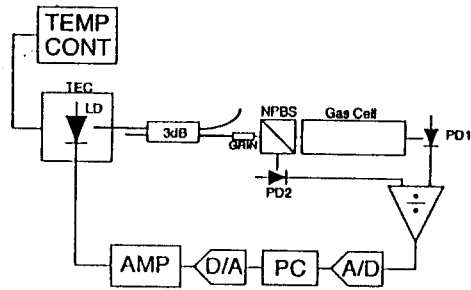


그림 1] 절대광원의 구성도

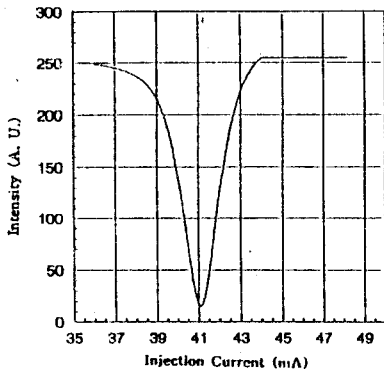


그림 2] 유입 전류의 변화에 대한 흡수선의 모양

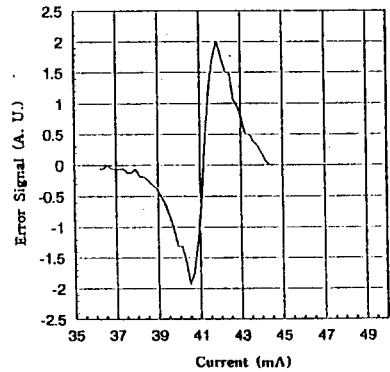


그림 3] 흡수선의 전류에 대한 미분값

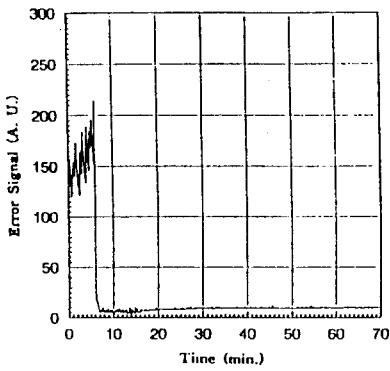


그림 4] 안정화되기 전후의 error신호

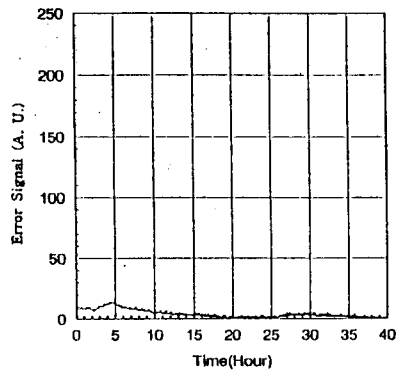


그림 5] 안정화된 레이저의 장시간 안정도 측정결과