

論文 2001-38SD-9-4

## 회절격자 주기의 랜덤 변이가 QWS-DFB 레이저의 정규화된 결합계수에 미치는 영향

(Influence of the random fluctuation in grating period on  
the Coupling Coefficient of QWS-DFB Lasers)

河先容\*, 金相培\*

(Sun Yong Ha and Sang Bae Kim)

### 요 약

회절격자 반주기 길이의 랜덤 변이가 QWS-DFB 레이저의 특성을 나타내는 척도인  $xL$  값에 미치는 영향을 알아보았다. QWS-DFB 레이저의 양 거울면은 무반사면으로 하였고, 회절격자 랜덤 변이는 평균이 0이고 분산이 1인 상관되어 있는 두 Gaussian 랜덤 변수로 나타내었다. 회절격자 반주기의 랜덤 변이가 있으면 동일 위상성분의 되먹임이 적어져 유효  $xL$  값이 감소하고 모드 간격이 줄어든다. 그런데, 회절격자 주기의 랜덤 변이가 있을 때 결모드 간격에서 구한 결합계수  $xL_{SM}$  값과 주모드 거울면 손실에서 구한  $xL_{SM}$  는 일치하지 않으며, 랜덤 변이가 없을 때의  $xL$  값보다 작다. 이 결과는 결모드 간격 또는 spontaneous emission spectrum을 사용하여 측정된  $xL_{SM}$  값을 실제로 되먹임되는 정도를 나타내는  $xL_{eff}$ 로 해석하여서는 안된다는 사실을 보여준다.

### Abstract

Influence of the grating half-period fluctuation on the normalized coupling coefficient has been studied by an effective index transfer matrix method in quarter wavelength shifted(QWS) DFB lasers. The laser facets are assumed to be perfectly antireflection coated, and the period fluctuation is modeled by two correlated Gaussian random variables. In the presence of the random fluctuation in the grating period, effective normalized coupling coefficient is reduced because the in-phase feedback strength is weakened. We have shown that the normalized coupling coefficient determined from the side mode spacing is less than the effective coupling coefficient, and the normalized coupling coefficient determined from the mode spacing or spontaneous emission spectrum does not properly represent the feedback strength of the grating.

### I. 서 론

DFB 레이저에서 회절격자의 결합계수  $x$ 와 공진기

길이  $L$ 의 곱으로 주어지는  $xL$ 은 주모드의 거울면 손실, 문턱이득 차이와 SMSR(Side Mode Suppression Ratio), 공진기 안에서의 광자분포와 광출력비 등 DFB 레이저의 특성을 결정짓는 주요 요소의 하나이다. DFB 레이저에서 Bragg 파장 양쪽의  $\pm 1$  모드의 간격(mode spacing)으로부터  $xL$  값을 찾는 방법은 널리 사용되어 왔다.<sup>[1,2]</sup> QWS(quarter wavelength shifted)-DFB 레이저에서는 결모드 간격(side mode spacing)으로부터  $xL$

\* 正會員, 亞洲大學校 電子工學部  
(School of Electronics Engineering, Ajou University)  
接受日: 2000年7月11日, 수정완료일: 2001年7月25日

값을 구할 수 있다.<sup>[3]</sup> 또 ASE(amplified spontaneous emission) 스펙트럼으로부터  $xL$  값을 구하는 방법에서도<sup>[4,5]</sup>  $xL$ 에 따른 모드 간격의 변화가 중요한 역할을 한다. 이처럼 모드 간격은  $xL$ 을 측정하는 주요 도구로 사용되어 왔다.

QWS-DFB 레이저에서 회절격자 주기의 랜덤 변이는 주모드 거울면 손실을 증가시키고 결모드 간격을 감소시키며 단일 주파수 동작 안정성도 나쁘게 한다.<sup>[6,7]</sup> 이는 회절격자 주기의 랜덤 변이에 의해 주기가 일정치 않아서 동일 위상 성분의 되먹임이 약하여지기 때문에 나타나는 현상이다. 그런데, 모드 간격에서 구한  $xL$ 값인  $xL_{SM}$ 과 문턱이득 또는 거울면 손실로부터 구한  $xL$ 값인  $xL_{off}$ 가 서로 다를 때  $xL_{SM}$ 을 어떻게 해석하여야 하는지 분명하지 않다. 이 부분은 그 실용적 중요성에도 불구하고 전혀 연구되지 않았다. 실제로 ASE 스펙트럼으로부터 구한  $xL$ 값은 한 웨이퍼 안에 서도 많이 다르며, 그 평균값이 이론적인 계산 값의 75% 정도라는 결과가 보고된 바 있다.<sup>[5]</sup> 그리고 이론 값과 실험 값 사이의 이 차이는 아직도 설명되지 않은 채로 남아있다.

이 연구에서는 회절격자 반주기 사이에 상관관계가 있는 랜덤 변이가 있을 때, 정규화된 결합계수  $xL_{SM}$ 과  $xL_{off}$ 가 얼마나 다르며 상관관계는 얼마나 되는지에 대하여 알아본다. 먼저 II장에서는 유효 굴절률 전달 매트릭스 방법을 사용함에 있어 각각의 회절격자 반주기의 상관관계가 있는 랜덤 변이를 어떻게 다루었는지에 대하여 설명하였다. III장에서는 모드 간격으로부터 구한  $xL_{SM}$ 과 주모드 손실로부터 구한  $xL_{off}$ 를 비교하여 두 값이 일치하지 않음을 보이고,  $xL_{SM}$ 과 거울면 손실 차이 사이의 관계,  $xL_{SM}$ 과  $xL_{off}$ 의 평균값 사이의 관계를 보인 다음,  $xL$ 이 감소하는 양을 반주기 길이 변이 사이의 상관관계를 나타내는 상관 계수  $\gamma$ , 회절격자 반주기 변이의 정규화된 표준편차  $\sigma_A$ 의 함수로 나타낸다. 마지막으로 IV장에서는 결론을 맺는다. 이 연구 결과는 회절격자 주기의 랜덤 변이가 있을 때에는 종래의 방법으로 구한  $xL_{SM}$ 이 문턱이득, 문턱이득 차이, 레이저 공진기 안에서의 광자분포 및 출력 비율 등 DFB 레이저의 특성을 정확히 나타내지 못할 수도 있음을 보여준다.

## II. 해석 방법

이상적인 회절격자 주기  $\Lambda_0$  는

$$\Lambda_0 = \frac{\lambda_B}{4} \left( \frac{1}{n_L} + \frac{1}{n_H} \right) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있으며,  $\lambda_B$ 는 Bragg 파장,  $n_L$ 은 사각파 회절격자에서 낮은 유효 굴절률,  $n_H$ 는 높은 유효 굴절률을 각각 나타낸다. 회절격자 길이의 랜덤 변이 사이에 상관관계를 주기 위해서는 먼저 길이 변이를 나타내는 랜덤 변수 사이에 상관관계를 주어야 한다. 낮은 굴절률 반주기 길이 변이를 나타내는 랜덤 변수  $v_{LK}$ 와 높은 굴절률 쪽의 랜덤 변수  $v_{HK}$  사이의 관계는 아래와 같다.

$$v_{LK} = \sqrt{1-\gamma^2} v_{K'} + \gamma v_{HK} \quad (2)$$

여기에서  $v_{HK}$ 와  $v_{K'}$ 은 평균이 0이고 표준편차가 1인 독립적으로 생성된 Gaussian 분포의 랜덤 변수이다. 이와 같이  $v_{HK}$ 와  $v_{LK}$ 는  $\gamma$ 라는 상관계수를 통하여 서로 연관성을 가지게 된다. 독립적으로 생성된  $v_{HK}$ 와  $v_{K'}$ , 그리고 이 두 랜덤 변수의 선형조합인 (2)식으로 주어지는  $v_{LK}$ 를 이용하여 랜덤 변이가 있는 실제 반주기의 길이를 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Lambda_{H,K} &= (1 + \sigma_A v_{HK}) \Lambda_0 / 2 \\ \Lambda_{L,K} &= (1 + \sigma_A v_{LK}) \Lambda_0 / 2 \end{aligned} \quad (3)$$

그러므로 그림 1에 보인 것처럼 K번째 주기의 실제 길이는  $\Lambda_K = \Lambda_{H,K} + \Lambda_{L,K}$ 가 된다. 여기에서  $\Lambda_H$ 는 높은 굴절률 부분의 반주기이고,  $\Lambda_L$ 은 낮은 굴절률 부분의 반주기,  $\Lambda_0$ 는 회절격자 평균 주기,  $\sigma_A$ 는 scaling factor를 나타낸다. (3)식으로부터 scaling factor  $\sigma_A$ 는  $\Lambda_0/2$ 에 의해 정규화된 회절격자 반주기 변이의 표준편차가 됨을 알 수 있다.

회절격자 주기 랜덤 변이의 영향만을 보기 위하여 QWS-DFB 레이저의 양 거울면은 완전 무반사면으로 가정하였고, 위상천이는 공진기 중앙에 있다고 생각하였으며, 분산과 파장의존 흡수손실의 효과는 무시하였다. 거울면 손실은 흡수 손실이 0인 레이저 공진기의

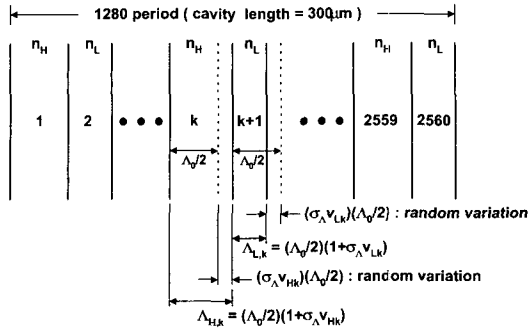
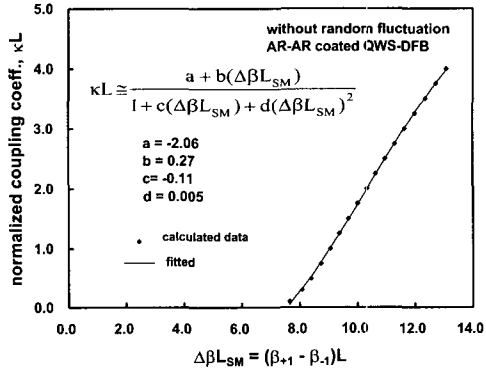
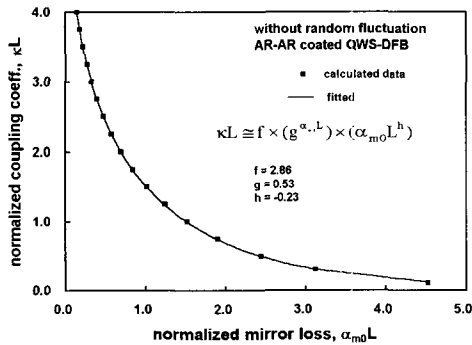


그림 1. 랜덤변이가 있는 회절격자의 구조  
Fig. 1. Grating structure with random fluctuations in the grating period.



(a)



(b)

그림 2. QWS-DFB 레이저에서 회절격자 주기의 랜덤 변이가 없을 때 정규화된 결합계수에 따른 (a) 결모드 간격과 (b) 거울면 손실의 변화

Fig. 2. Normalized coupling coefficient versus (a) side mode spacing, and (b) normalized mirror loss in QWS-DFB lasers without random fluctuation in the grating period.

문턱이득으로 정의하였고 도파로 구조와 물질에서의 랜덤 변이는 없는 것으로 가정하였다. 또, 랜덤 변이의 영향은 변이가 일어나는 위치에 광자가 많이 분포할 수록 그 영향이 커지므로  $v_K'$ ,  $v_{HK}$ 를 각각 독립적으로 200 세트를 생성하여 통계처리하였다. 즉,  $xL=1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5$ 일 때  $\sigma_A$ 와  $\gamma$ 를 바꾸어 가면서 결모드 간격(side mode spacing), 모드별 거울면 손실, 거울면 손실 차이의 평균값과 표준편차를 계산하여  $\sigma_A$ ,  $\gamma$ 의 영향을 보았다.

결모드 간격에서  $xL_{SM}$ 을 구하기 위하여 회절격자 주기의 랜덤 변이가 없는 QWS-DFB 레이저의 결모드 간격과  $xL$  사이의 관계식을 구하였으며, 이 관계식에 랜덤 변이가 있는 QWS-DFB 레이저의 결모드 간격을 대입하여  $xL_{SM}$ 을 구하였다.  $xL_{eff}$  역시 회절격자 주기의 랜덤 변이가 없는 DFB 레이저의 거울면 손실과  $xL$  사이의 관계식에 랜덤 변이가 있을 때의 거울면 손실 값을 대입하여 구하였다.

그림 2(a)는 정규화된 결합계수  $xL$ 을 결모드 간격  $\Delta\beta L_{SM}$ 의 함수로 표현한 것으로서 계산 결과를 curve-fitting하여 구한 수식인데, 다음과 같이 주어진다.

$$xL = \frac{a + b(\Delta\beta L_{SM})}{1 + c(\Delta\beta L_{SM}) + d(\Delta\beta L_{SM})^2} \quad (4)$$

여기에서  $a=-2.06$ ,  $b=0.27$ ,  $c=-0.11$ ,  $d=0.005$ 이다. 결모드 간격은, Bragg 파장에 가장 가까이 있는 모드를 주모드로 하고 그 양 옆의 모드 즉 결모드를  $\pm 1$  모드로 할 때,  $\pm 1$  모드의 전파상수  $\beta$ 값의 차이에 공진기 길이  $L$ 을 곱한 값  $\Delta\beta L_{SM} = (\beta_{+1} - \beta_{-1})L$ 로 정의한다. 정규화된 결합 계수  $xL$ 이 커지면서 결모드 간격(side mode spacing)이 커짐을 알 수 있다. (4)식에 랜덤 변이가 있을 때의 결모드 간격을 대입하여  $xL_{SM}$ 을 구한다.

한편, 거울면 손실로부터  $xL_{eff}$ 를 구하려면, 랜덤 변이가 없는 QWS-DFB 레이저에서  $xL - \alpha_{m0}L$  관계를 알아내야 한다. 그림 2(b)는 랜덤 변이가 없는 QWS-DFB 레이저에서 정규화된 결합계수를 주모드 거울면 손실  $\alpha_{m0}L$ 의 함수로 표현한 것으로서 다음과 같다.

$$xL = f g^{\alpha_{m0}L} \times (\alpha_{m0}L)^h \quad (5)$$

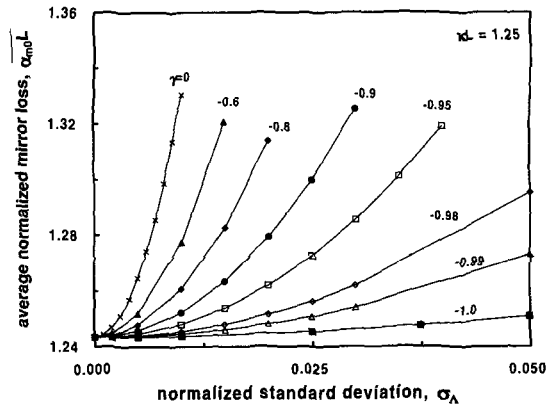
여기에서 상수  $f=2.86$ ,  $g=0.53$ ,  $h=-0.23$ 이다. 정규화된

결합 계수  $xL$ 이 커지면서 주모드 거울면 손실이 작아짐을 알 수 있다. 주모드 거울면 손실은 회절격자 주기의 랜덤 변이에 의해 되먹임의 강도가 약해지는 정도를 나타내는 가장 좋은 척도이다. 그러므로, 되먹임의 정도를 나타내는  $xL_{eff}$ 를 주모드 거울면 손실로부터 구할 수 있으며, 이 유효 결합계수  $xL_{eff}$ 를 주모드 거울면 손실로부터 구할 때에 (5)식을 사용한다.

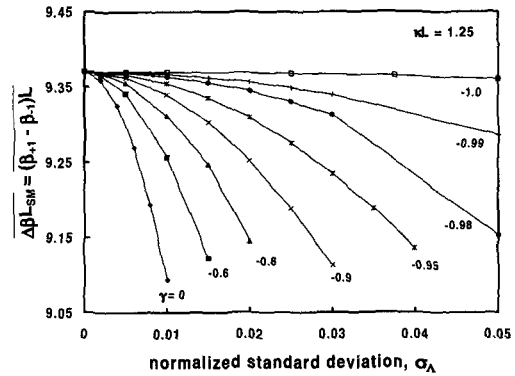
### III. 회절격자 주기의 랜덤 변이가 QWS-DFB 레이저의 정규화된 결합계수에 미치는 영향

회절격자 주기의 랜덤 변이는 유효 결합 계수  $xL_{eff}$  값을 감소시킨다.<sup>[6,7]</sup> 그림 3(a)는 명목상의  $xL$ , 즉 랜덤 변이가 없을 때 유효 굴절률 차이로부터 구한  $xL$ 이 1.25일 때 200개의 랜덤변수 세트에 대하여 계산한 정규화된 주모드 거울면 손실  $a_{m0}L$ 의 평균값을  $\sigma_A$ 와  $\gamma$ 에 대하여 그린 것이다. 그림 3(a)에서 보면  $\sigma_A$ 가 커지거나  $\gamma$ 가 0으로 갈수록 주모드 거울면 손실이 커지므로 유효  $xL$  값, 즉  $xL_{eff}$ 가 작아짐을 알 수 있다.<sup>[7]</sup> 그림 3(b)는 명목상의  $xL$ 이 1.25일 때 결모드 간격을 회절격자 반주기 변이의 정규화된 표준편차인  $\sigma_A$ 의 함수로 몇 개의  $\gamma$ 값에 대하여 그린 것이다. 그림 3(b)에서도  $\sigma_A$ 가 커지거나  $\gamma$ 가 0으로 갈수록 결모드 간격이 작아지므로  $xL_{SM}$  값이 작아짐을 알 수 있다. 이와 같이  $\sigma_A$ 가 커지거나  $\gamma$ 가 0으로 가서 회절격자 주기의 랜덤 변이가 심하여질수록  $xL_{eff}$ 와  $xL_{SM}$ 의 평균값이 동시에 작아진다. 그림 3(c)는 주모드와 결모드의 거울면 손실 차이를  $\sigma_A$ 와  $\gamma$ 에 대하여 그린 것이다.  $\sigma_A$ 가 커지거나  $\gamma$ 가 0으로 갈수록 거울면 손실 차이의 평균값이 작아져 단일 모드 동작 안정성이 낮아짐을 알 수 있다.

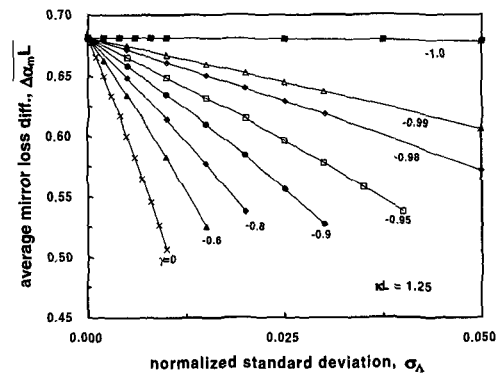
그림 3에서보면  $\sigma_A$ 가 커지거나  $\gamma$ 가 0으로 갈수록  $xL_{eff}$ 와  $xL_{SM}$ 의 평균값이 작아짐을 알 수 있고 두 값 사이에 상관관계가 있어 보인다. 또, 거울면 손실 차이도  $xL_{eff}$ 의 감소로 설명할 수 있을 것으로 보인다. 결모드 간격으로부터 비교적 쉽게  $xL_{SM}$ 을 구할 수 있으므로, 결모드 간격과  $xL_{SM}$ 이 줄어드는 것으로  $xL_{eff}$ 의 감소와 주모드 거울면 손실의 증가를 잘 설명할 수 있



(a)



(b)



(c)

그림 3. QWS-DFB 레이저에서  $\sigma_A$ 와  $\gamma$ 에 따른 (a) 주모드 거울면 손실, (b) 결모드 간격, (c) 거울면 손실 차이 평균값의 변화

Fig. 3. Dependence of average values of (a) main mode mirror loss, (b) side mode spacing, and (c) mirror loss difference on  $\sigma_A$  for several  $\gamma$  values in QWS-DFB lasers.

는지를 알아보는 것은 매우 의미 있는 일이다.

1.  $xL_{SM}$ 과  $xL_{eff}$ 의 비교

랜덤 변이가 없을 때에는 결모드 간격에서 구한  $xL_{SM}$ 과 주모드 거울면 손실로부터 구한  $xL_{eff}$ 가 이론적인  $xL$ 과 같아  $xL = xL_{eff} = xL_{SM}$ 이 된다. 그러나, 랜덤 변이가 있을 때에는 이 등식 관계가 깨어진다. 그림 4는  $\gamma=0$ ,  $\sigma_A=0.005$ 일 때에 QWS-DFB 레이저의 결모드 간격과 거울면 손실의 관계를 보인 것이다. 그림에서 실선은 랜덤 변이가 없을 때 결모드 간격과 거울면 손실의 관계로 그림 2(b)의 결과를 그대로 옮긴 것이다.

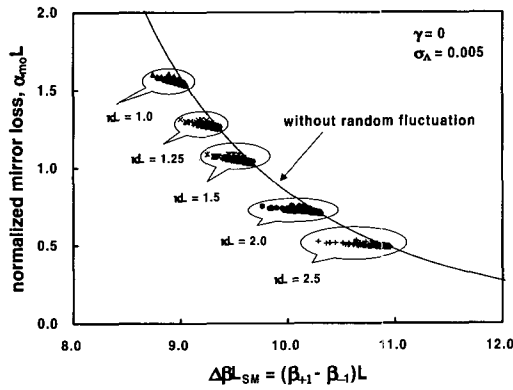
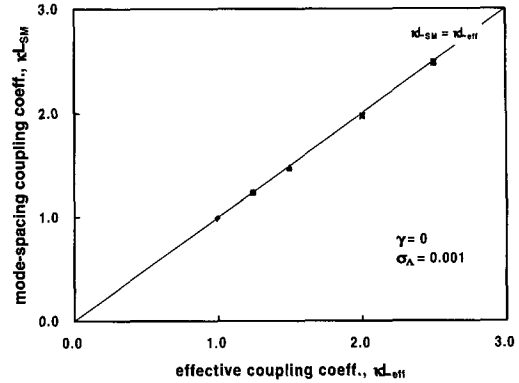


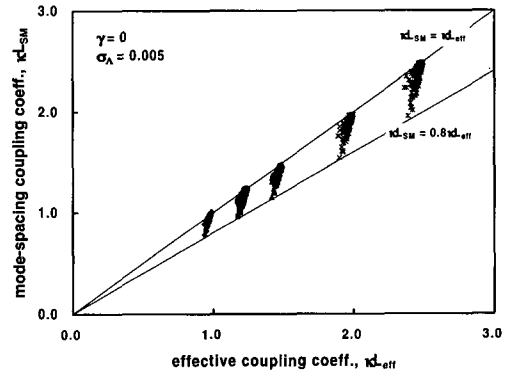
그림 4.  $\gamma=0$ ,  $\sigma_A=0.005$ 이고  $xL = 1.0, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5$  일 때 결모드 간격에 따른 주모드 거울면 손실

Fig. 4. Main mode mirror loss versus side mode spacing for several  $xL$  values with  $\gamma$  and  $\sigma_A$  values of 0 and 0.005, respectively.

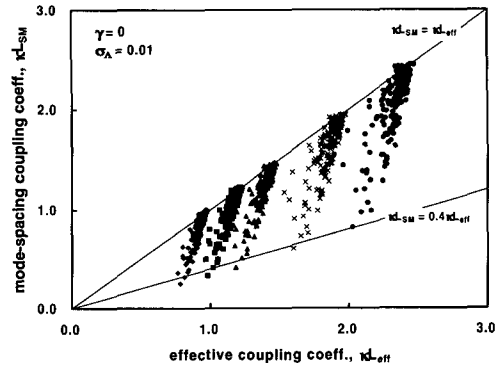
그림 4에서 보면 회절격자 랜덤 변이의 영향이 단순한 유효 결합계수  $xL_{eff}$ 의 감소가 아님을 알 수 있다. 결모드 간격이 줄어들면서  $xL_{eff}$ 가 줄어들어 주모드 거울면 손실이 커지는 경향을 뚜렷이 보이기 는 하지만, 계산 값을 나타내는 좌표점들이 회절격자 랜덤 변이가 없을 때의  $\Delta BL_{SM} - \alpha_{m0}L$  곡선을 따라가지 않는다. 즉 II장의 (4)식에 결모드 간격을 대입하여 구한  $xL_{SM}$ 과 II장의 (5)식에 거울면 손실을 대입하여 구한  $xL_{eff}$ 가 서로 달라진다는 것이다. 그리고 랜덤 변이에 따른 감소가  $xL_{SM}$ 에서 더 크게 나타난다. 특히, 그림의 특정  $xL$  값에 대한 데이터들처럼 명목상의  $xL$  값이 같을 때에는 결모드 간격  $\Delta BL_{SM}$ 과 거울면 손실  $\alpha_{m0}L$ 이 상



(a)



(b)



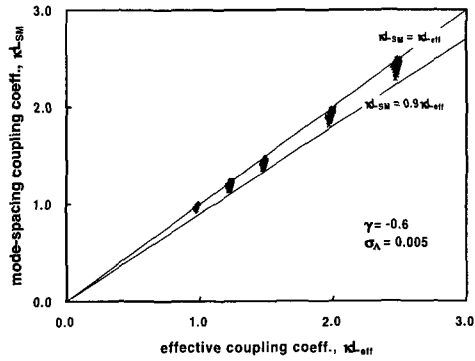
(c)

그림 5.  $\gamma$ 가 0이고  $\sigma_A$ 가 (a) 0.001, (b) 0.005, (c) 0.01 일 때  $xL_{SM}$ 과  $xL_{eff}$ 의 비교

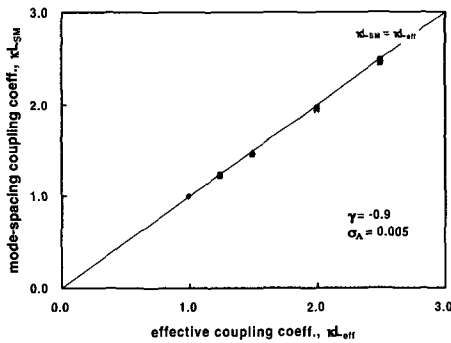
Fig. 5. Comparison of  $xL_{SM}$  and  $xL_{eff}$  when  $\sigma_A$  is (a) 0.001, (b) 0.005, and (c) 0.01.  $\gamma$  is assumed to be zero.

관성을 보이지만, 명목상의  $xL$  값을 제한하지 않을 때

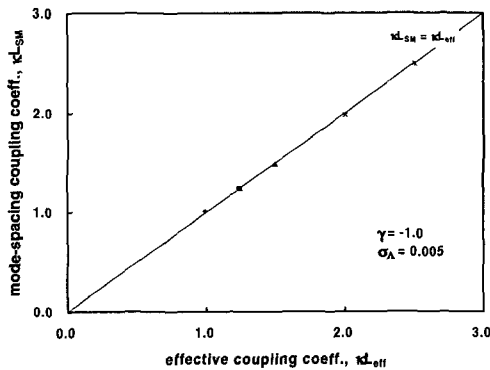
에는  $\Delta BL_{SM}$ 과  $\alpha_{m0}L$  사이에는 상관성이 낮다. 이는 결 모드 간격 또는  $xL_{SM}$ 이  $xL_{eff}$ , 즉 주모드의 거울면 손실을 잘 나타내지 못한다는 것을 의미한다.



(a)



(b)



(c)

그림 6.  $\sigma_A$ 가 0.005이고  $\gamma$ 가 (a) -0.6, (b) -0.9, (c) -1.0일 때  $xL_{SM}$ 과  $xL_{eff}$ 의 비교

Fig. 6. Comparison of  $xL_{SM}$  and  $xL_{eff}$  when  $\gamma$  is (a) -0.6, (b) -0.9, and (c) -1.0 for  $\sigma_A$  of 0.005.

그림 5는 랜덤 변이가 있는 레이저의  $xL_{SM}$ 과  $xL_{eff}$ 를 (4), (5) 식에서 각각 구하여 비교한 것으로,  $\gamma=0$ 일 때에  $\sigma_A$ 를 (a) 0.001, (b) 0.005, (c) 0.01로 바꾸어 가면서  $\sigma_A$ 의 영향을 본 것이다.  $\sigma_A=0.001$ 일 때에는  $xL_{SM}$ 과  $xL_{eff}$ 가 거의 일치함을 알 수 있고  $\sigma_A=0.005$ 일 때에는  $xL_{SM}$ 이  $xL_{eff}$ 의 0.8배,  $\sigma_A=0.01$ 일 때는 0.4배까지 낮아질 수 있음을 보여준다. 그리고, 대개의 경우  $xL_{SM}$ 이  $xL_{eff}$ 보다 작음을 알 수 있다. 이는  $\sigma_A$ 가 커질수록 결모드 간격, 또는  $xL_{SM}$ 이 유효 결합계수  $xL_{eff}$ 를 제대로 나타내지 못함을 보여준다. 또, ASE 스펙트럼으로부터 구한  $xL$ , 즉  $xL_{SM}$ 이  $xL$ 보다 훨씬 작게 나타나는 실험결과를<sup>[5]</sup> 설명할 수 있는 길이 열린 것이다.

그림 6은  $\sigma_A=0.005$ 일 때에  $\gamma$ 를 (a) -0.6, (b) -0.9, (c) -1.0으로 바꾸어 가면서  $\gamma$ 의 영향을 본 것이다.  $\gamma=-0.6$ 일 때에  $xL_{SM}$ 이  $xL_{eff}$ 의 0.9배 범위 내에 있는 반면  $\gamma=-1.0$ 일 때에는  $xL_{SM}$ 과  $xL_{eff}$ 가 거의 일치함을 알 수 있다. 이와 같이,  $\gamma$ 값이 -1로 갈수록 회절격자 주기의 랜덤 변이가 줄어들어  $xL_{SM}$ 과  $xL_{eff}$  사이의 괴리가 없어진다.

### 2. $xL_{SM}$ 과 거울면 손실 차이 사이의 관계

$xL$  값은 문턱 이득 뿐 아니라 문턱 이득 차이를 나타내는 척도로도 사용된다. 그러므로 결모드 간격이나 spontaneous emission spectrum 등에서 측정된  $xL$  값에 해당하는  $xL_{SM}$ 이 문턱 이득 차이를 잘 나타내는지 알아볼 필요가 있다. 그림 7은  $\gamma=0$ 일 때  $\sigma_A$ 를 (a) 0.001, (b) 0.005, (c) 0.01로 바꾸어 가면서 결모드 간격으로부터 구한  $xL_{SM}$ 과 거울면 손실 차이 사이의 관계를 보인 것이다. 그림에서 실선은 랜덤 변이가 없을 때  $xL$ 과  $\Delta\alpha_m L$ 의 관계를 보여준다. 그림 7(a)에서 보면  $\sigma_A$ 가 0.001로 아주 작은 값임에도 불구하고 거울면 손실 차이의 변이가 매우 큼을 알 수 있고 그림 7(b), (c)로부터  $\sigma_A$ 가 커지면서 그 변이가 더욱 커짐을 알 수 있다. 또한 거울면 손실 차이가 결모드 간격이 줄어드는 것 즉  $xL_{SM}$ 이 줄어드는 것과 깊은 상관성이 없음을 알 수 있다.

여기에서 보이지는 않았지만,  $\gamma$ 가 -1로 감에 따라 거울면 손실 차이의 변이와 결모드 간격의 변이가 함께 작아지면서  $xL_{SM}$ 이 거울면 손실 차이를 잘 나타내

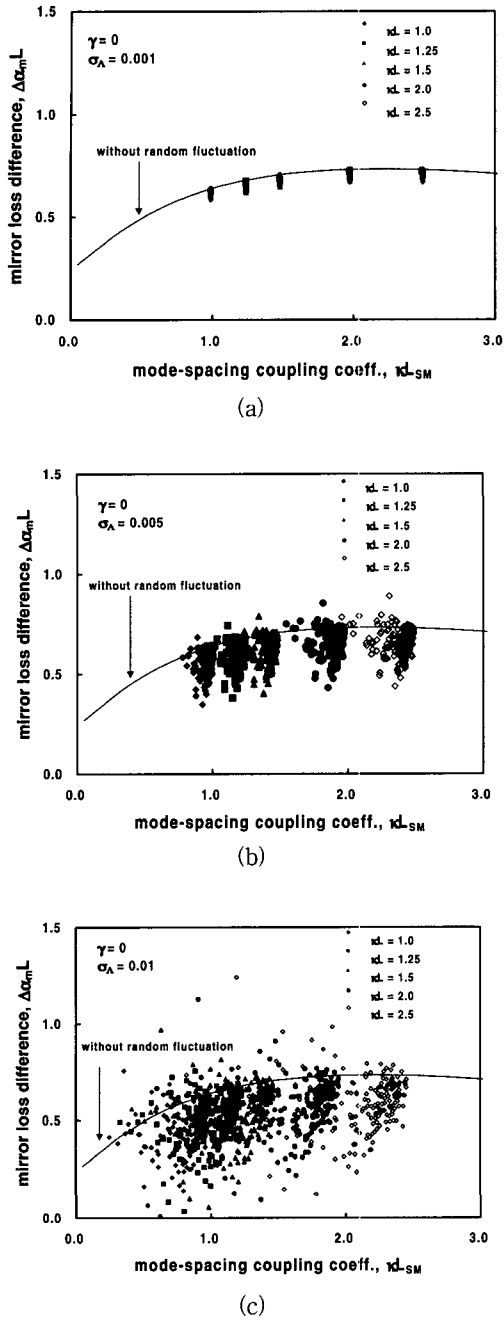


그림 7.  $\gamma$ 가 0이고  $\sigma_A$ 가 (a) 0.001, (b) 0.005, (c) 0.01 일 때  $xL_{SM}$ 에 따른 거울면 손실 차이의 변화  
 Fig. 7. Mirror loss difference versus  $xL_{SM}$  when  $\sigma_A$  is (a) 0.001, (b) 0.005, and (c) 0.01.  $\gamma$  is assumed to be zero.

는데, 이는 그림 6의  $\gamma$ 의 영향에서 유추할 수 있다. 이와 같이 음의 상관관계가 약하거나 랜덤변이가 클 때

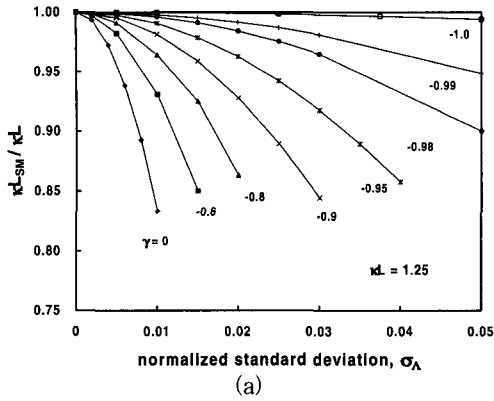
에는 거울면 손실 차이와 결모드 간격 즉  $xL_{SM}$  사이에는 상관관계가 없으나, 인접 반주기간의 음의 상관관계가 커서  $\gamma$ 가 -1로 갈수록  $xL_{SM}$ 이 거울면 손실 차이를 잘 나타낸다.

3.  $xL$ 과  $xL_{SM}$ ,  $xL_{eff}$  평균값 사이의 관계

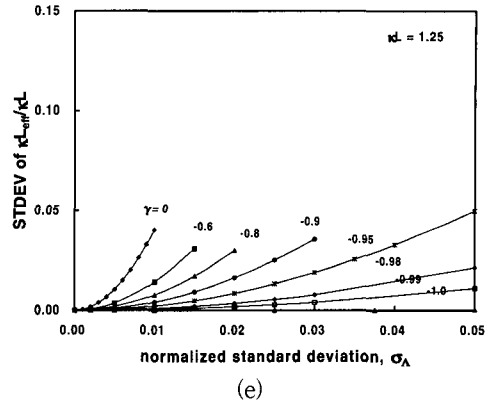
$xL_{SM}$ 과  $xL_{eff}$ 는 앞 절에서 보듯이 회절격자 주기 랜덤 변이에 의해서 감소하지만, 그 감소율은 다르다. 그러므로, 회절격자에 의한 되먹임의 세기를 나타내는  $xL_{eff}$ 와 실제 측정에서 얻어지는 값인  $xL_{SM}$  사이의 관계를 명확히 알 필요가 있다. 그림 8은  $xL_{SM}$ 과  $xL_{eff}$ 의 평균값을 비교한 것이다. 그림 8(a)는  $\overline{xL_{SM}}/xL$ 을  $\sigma_A$ 와  $\gamma$ 에 대하여 그린 것이다.  $\sigma_A$ 가 커지거나  $\gamma$ 가 0으로 갈수록  $\overline{xL_{SM}}$ 이 더 많이 감소함을 알 수 있다. 그림 8(b)는  $\overline{xL_{eff}}/xL$ 을  $\sigma_A$ 와  $\gamma$ 에 대하여 그린 것이다. 이 때에도  $\sigma_A$ 가 커지거나  $\gamma$ 가 0으로 갈수록  $\sigma_A$ 가 커짐에 따라  $\overline{xL_{eff}}$ 가 더 많이 감소함을 알 수 있다. 그림 8(a)와 (b)를 비교하면  $\overline{xL_{eff}}$ 보다  $\overline{xL_{SM}}$ 이 더 급격히 감소한다. 그림 8(c)는 이를 잘 보여준다. 또 그림 8(d)와 (e)는  $xL_{SM}/xL$ 과  $xL_{eff}/xL$ 의 표준편차를 보인 것으로서 이 둘의 변화 형태는 비슷하지만  $xL_{SM}/xL$ 의 표준편차가  $\sigma_A$ 가 커지거나  $\gamma$ 가 0으로 가면서 훨씬 더 빠르게 커짐을 알 수 있다. 이와 같이  $xL_{SM}$ 보다는  $xL_{eff}$ 가 더 좋은 척도이기는 하지만, 직접 측정하기 어려운 문제점이 있다. 또,  $xL_{SM}$  또는  $xL_{eff}$  값 그 자체보다 한 웨이퍼 안에 있는 소자들에 대한 이 값들의 평균값이 보다 더 큰 의미를 가짐도 알 수 있다.

4. 정규화된 결합계수에 미치는 영향

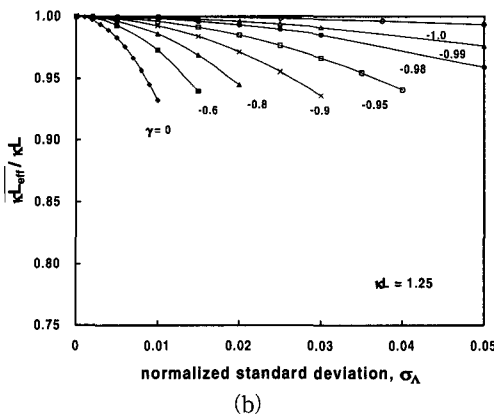
그림 4로부터 회절격자 주기의 랜덤 변이에 의해 결모드 간격이 감소하는 만큼  $xL_{eff}$ 가 줄어들지 않으므로 결모드 간격으로부터 구한  $xL$ , 즉  $xL_{SM}$ 은 실제의  $xL_{eff}$  값을 작게 예측하게 된다. 따라서 양산 단계에서 수율이 가장 높은 최적의  $xL$ 값을 잘못 찾을 수도 있다. 또, 명목상의  $xL$  값은 도파로에 대한 이론적인 계산으로부터 구할 수 있으므로,  $xL_{SM}$ 과  $xL$ 을 비교하면 회절격자 랜덤 변이의 정도를 알아낼 수도 있다. 이는 회절격자 제작공정의 정밀도를 평가할 수 있는 좋은 방법의 하나가 될 수 있다. 이 절에서는 이러한 목표 아래  $xL_{SM}$ 의 평균값  $\overline{xL_{SM}}$ 을 명목상의  $xL$ 과 회절격자 제



(a)



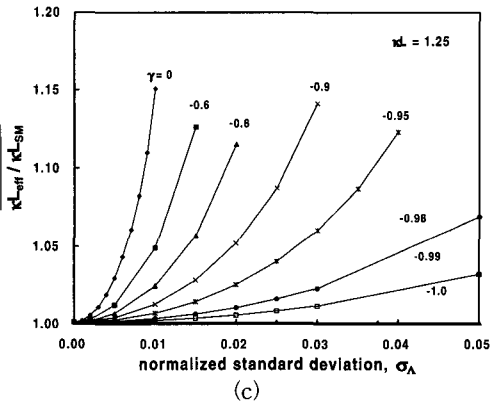
(e)



(b)

그림 8.  $\sigma_A$ 와  $\gamma$ 에 따른 (a)  $xL_{SM}/xL$ , (b)  $xL_{eff}/xL$ , (c)  $xL_{SM}/xL_{eff}$ 의 평균값과 (d)  $xL_{SM}/xL$  (e)  $xL_{eff}/xL$ 의 표준편차의 변화

Fig. 8. Average values of (a)  $xL_{SM}/xL_{eff}$ , (b)  $xL_{SM}/xL$ , (c)  $xL_{eff}/xL$ , and standard deviation of (d)  $xL_{SM}/xL$  and (e)  $xL_{eff}/xL$  versus  $\sigma_A$  for several  $\gamma$  values.



(c)

작 공정 변수인  $\sigma_A$ 와  $\gamma$ 의 함수로 나타내고자 한다. 이렇게  $\sigma_A$ 와  $\gamma$ 의 예상 값이 구해지면, 그림 8(b)로부터  $\overline{xL_{eff}}$ 의 예상 값을 구할 수 있다.

여기에서 보이지는 않았지만,  $\gamma$ 가 0이고  $xL$ 이 1, 1.25, 1.5, 2.0, 2.5일 때에  $1 - \overline{xL_{SM}}/xL$ 을  $\sigma_A$ 에 따라 그려 보면,  $xL$ 에 무관하게 거의 같은 값을 가짐을 알 수 있다. 또  $xL=1.25$ 일 때와  $xL=1.5$ 일 때 여러  $\sigma_A$ ,  $\gamma$ 에 대하여  $1 - \overline{xL_{SM}}/xL$ 을 비교하여도  $1 - \overline{xL_{SM}}/xL$ 은 각각의  $\sigma_A$ ,  $\gamma$  값에서 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 9는  $xL=1.25$ 일 때 결모드 간격의 감소를 나타낸 그림 3(b)의 결과를 정규화된 결합계수로 환산하여 나타낸 것이다. 앞에서 기술한 바와 같이  $xL$ 에 거의 무관하게 그림 9의 관계가 성립하므로,  $xL_{SM}$ 의 평균값  $\overline{xL_{SM}}$ 은 명목상의  $xL$ 과  $\sigma_A$ ,  $\gamma$ 의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{xL_{SM}} = xL [1 - f(\sigma_A, \gamma)] \tag{6}$$

$$f(\sigma_A, \gamma) = \sigma_A^2 \frac{k + l\gamma}{1 + m\gamma + n\gamma^2} \tag{7}$$

여기서  $f(\sigma_A, \gamma)$ 는  $\overline{xL_{SM}}$ 값의 상대적인 감소분으로  $k=1670.20$ ,  $l=1668.05$ ,  $m=-0.04$ ,  $n=-0.15$ 이며,



1.0 <  $xL$  < 2.5 범위에서 적용될 수 있어 QWS-DFB 레이저에서 중요한  $xL$  값의 범위를 다 포함한다. 한 웨이퍼 안에서는  $xL$  값을 일정하게 두므로, 한 웨이퍼 안에 있는 여러 소자의  $xL_{SM}$  값을 측정하고 평균하여  $\overline{xL_{SM}}$ 을 구하면 (6), (7) 식을 써서  $\sigma_A$ 와  $\gamma$ 와  $\overline{xL_{eff}}$  값을 구할 수 있다.

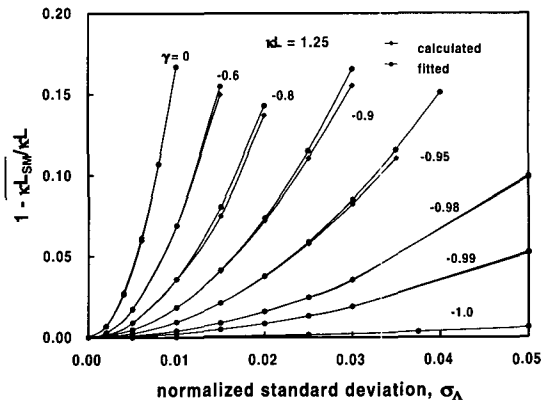


그림 9.  $xL$ 이 1.25일 때  $\sigma_A$ 와  $\gamma$ 에 따른  $1 - \overline{xL_{SM}}/xL$ 의 계산 값과 fitting 결과의 비교

Fig. 9.  $1 - \overline{xL_{SM}}/xL$  versus  $\sigma_A$  for several  $\gamma$  values when  $xL$  is 1.25. The calculated and fitted results are compared.

#### IV. 결론

회절격자 주기의 랜덤 변이는 QWS-DFB 레이저의 특성을 나타내는 가장 중요한 변수의 하나인  $xL$  값에 영향을 미쳐, 회절격자에 의한 되먹임의 크기를 나타내는  $xL_{eff}$ 와 실제로 결모드 간격이나 ASE 스펙트럼으로부터 측정되는  $xL_{SM}$  값 사이에 괴리가 나타나게 하며, 이 두 값 모두 명목상의  $xL$  값보다 작다. 이러한 괴리는  $\sigma_A$ 가 클수록, 음의 상관관계가 약할수록 심하게 나타난다. 그러므로 랜덤 변이가 없어 이 세 값이 모두 같을 때  $xL$ 이 가지고 있던 QWS-DFB 레이저의 특성을 나타내는 척도로서의 의미가 퇴색되어, 랜덤 변이가 있을 때의  $xL_{SM}$ 은 주모드 문턱 이득, 문턱이득 차이와 SMSR(Side Mode Suppression Ratio), 공진기 안에서의 광자분포와 광출력비 등의 특성을 제대로 나타내지 못한다. 그러므로 실험적으로 구한  $xL_{SM}$  값은 조심스럽게 해석하여야 한다. 또, 명목상의  $xL$  값과

$xL_{SM}$ 의 평균값으로부터 회절격자 주기 랜덤 변이의 정도를 나타내는 공정변수인  $\sigma_A$ 와  $\gamma$  값을 평가하고 이로부터  $\overline{xL_{eff}}$  값을 구하는 방법을 제안하였다. 이 방법은  $xL_{SM}$ 의 해석 및 회절격자 제작공정의 정밀도를 평가하는 데에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] H. Kogelnik and C. V. Shank, "Coupled-wave theory of distributed feedback lasers," J. Appl. Phys., vol. 43, no. 5, pp. 2327~2335, May 1972.
- [2] L. J. P. Ketelson, I. Hoshino, and D. A. Ackerman, "Experimental and theoretical evaluation of the CW suppression of TE side modes in conventional InP-InGaAsP distributed feedback lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 27, no. 4, pp. 965~975, April 1991.
- [3] J. Kinoshita, "Validity of  $xL$  evaluation by stopband method for  $\lambda/4$  DFB lasers with low reflecting facets," IEE Electron. Lett., vol. 23, no. 10, pp. 499~500, May 1987
- [4] R. Schatz, E. Berglind, and L. Gillner, "Parameter Extraction from DFB Lasers by Means of a Simple Expression for the Spontaneous Emission Spectrum," IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 6, no. 10, pp. 1182~1184, October 1994.
- [5] J. Skagerlund, F. Pusa, O. Sahlen, L. Gillner, R. Schatz, P. Granstrand, L. Lundqvist, B. Stoltz, J. Terlecki, F. Wahlin, A.-C. Morner, J. Wallin, and O. Oberg, "Evaluation of an automatic method to extract the grating coupling coefficient in different types of Fabricated DFB lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 34, no. 1, pp. 141~146, Jan. 1998.
- [5] J.-W. Han, J.-H. Cha, and S.-B. Kim, "Effects of the Random Fluctuation in Grating Period on the Characteristics of Quarter-Wavelength-Shifted DFB Lasers," IEEE Photon. Tech. Lett., vol. 11, no. 12, pp. 1569~1571, December 1999.
- [7] 한 제용, 김 상배, "회절격자 반주기의 상관관계가 있는 랜덤 변이가  $\lambda/4$  위상천이 DFB 레이저

특성에 미치는 영향,” 전자공학회 논문지, 제 37권 SD편, 제 8호, pp. 618~626, 2000년 8월

---

저 자 소 개



河 先 容(正會員)

1998년 2월 : 아주대학교 전자공학과 졸업(공학사). 2000년 8월 : 아주대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 현재 : 삼성전자 연구원

金 相 培(正會員) 第37卷 SD編 第8號 參照.

현재 : 아주대학교 전자공학부 교수