

# 정지 궤도 위성 중계 시스템의 LPI 성능 분석

정희원 정병기\*, 김기근\*, 유흥균\*\*

## LPI Performance Analysis of Geostationary Satellite Transponder System

Byung-Ki Chung\*, Kie-Keun Kim\*, Heung-Gyoon Ryu\*\* *Regular Members*

### 요약

재밍이 없는 환경과 광대역 재밍이 있는 환경을 고려한 uplink LPI(low probability of intercept) 분석과 3가지 위성 중계 방식에 따른 특성을 연구하였다. 재밍이 없는 경우, 처리 이득이 40dB일때 quality factor는 약 65.2dB가 되어 스펙트럼 확산 통신 방식은 LPI 기법으로 효과적인 방식이다. 그러나, 광대역 재밍 환경에서의 quality factor값은 5.4dB로 감소한다. 따라서, 재밍 환경에서는 스펙트럼 확산 방식에 의한 LPI 성능이 크게 저하된다. 3가지 위성 중계 시스템에 따른 LPI 성능 분석 결과, bent-pipe형 중계기는 AJ 기능은 없으나, despreaders만 있는 OBP형 중계기에 비해 LPI 성능은 우수하다. despreaders만 있는 OBP형 중계기는 확산 대역폭대 신호 대역폭 비 ( $W_s/W_c$ )만큼 재머 전력이 감소되는 AJ 성능을 보이나, bent-pipe형 중계 시스템과 respreader를 포함하는 중계 시스템에 비해, 신호 대역폭대 확산 대역폭비 ( $W_s/W_c$ )만큼 LPI 성능은 떨어진다. despreaders 및 respreader를 포함하는 OBP 중계기는 AJ 성능과 LPI 성능을 동시에 만족하는 가장 우수한 중계 방식임을 확인하였다.

### ABSTRACT

LPI characteristics in the non-jamming and broadband jamming environment on the uplink are studied for three types of satellite transponder. In the non-jamming environment, quality factor is about 65.2dB in case of 40dB processing gain. Thus, spread spectrum method is effective for LPI communication techniques. In broadband jamming, however, the quality factor is 5.4dB, so the performance of LPI significantly degrades. In comparisons of satellite transponders, the LPI performance of bent-pipe transponder is better than that of the despreaders OBP system. Despreaders OBP system is inferior to bent-pipe and respreader transponder system. However, the AJ performance of despreaders OBP system is better than that of bent-pipe type, as jamming power is decreased to the extent of spreading bandwidth to signal bandwidth ( $W_s/W_c$ ). In result, the respreader transponder OBP system which includes despreaders shows the excellence of AJ and LPI performance.

### 1. 서론

재머는 강한 전력을 방사하여 단말의 신호를 방해하는 반면, 인터셉터는 단말의 신호를 수신하여 여러 신호 특성들, 즉 hop rate, chip rate, 반송파 주파수, 신호 에너지등을 알아내려고 노력한다. 따라서 신호의 이런 노출 위험성을 피하기 위한 LPI

(Low Probability of Intercept)기법은 신호의 보안, 비밀 유지에 꼭 필요한 기법이며, 확산 스펙트럼 통신 방식은 AJ 와 LPI에 효과적으로 사용되고 있다<sup>[1-3]</sup>. LPI 통신 기법의 분석으로, 송신 단말과 위성 수신기사이의 통신 링크에서의 통신 거리(Communication Range,  $R_c$ )와, 송신 단말과 인터셉터 수신기사이의 인터셉터 링크에서의 인터셉트 거리(Intercept

\* 국방과학연구소 위성계연구팀

\*\* 충북대학교 전자공학과(ecomm@cbucc.chungbuk.ac.kr)

논문번호: 99508-1230, 접수일자: 1999년 12월 30일

Range,  $R_f$ )가 중요하다<sup>[4]</sup>. LPI system quality factor는  $R_s$ 와  $R_f$ 의 거리 제곱의 비로서 LPI 통신을 위한 시스템 설계시 중요 분석 요소이다. Prescott, Gutman, Connolly, Holtzman은 인터셉터 수신기들에 대한 modulation quality factor를 분석했다<sup>[5]</sup>. 본 논문에서는, DS 확산된 단말의 송신 신호를 수신하려 하는 에너지 검출기를 가정하여, 재밍이 없는 환경과 광대역 재밍 환경에서 uplink quality factor를 유도하고, 설계 변수에 따라 LPI 성능을 분석하였다. 그리고 재밍의 영향을 고려하여, 기존 연구에는 없는 위성 중계 방식에 따른 downlink quality factor를 분석하였다.

## II. Uplink Quality Factor 분석

### 2.1 재밍이 없는 환경

위성 수신기에서의 신호 전력(S)대 잡음 전력 밀도비( $N_0$ )는 다음과 같다.

$$\frac{S}{N_0} = \frac{P_t G_t \lambda^2}{(4\pi R_s)^2} \frac{G_r}{T_r} \frac{1}{kML_{as}} \quad (1)$$

여기서,  $P_t, G_t$ 는 송신 EIRP,  $G_r$ 는 위성의 수신 안테나 이득,  $T_r$ 는 위성 수신기 잡음 온도,  $k$ 는 볼츠만 상수( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K),  $M$ 는 링크 마진,  $L_{as}$ 는 송신 단말과 위성 사이의 대기 손실,  $R_s$ 는 송신 단말과 위성 사이의 통신 거리이다.

$$\frac{S}{N_0} = \frac{E_b/T}{N_0} = \frac{E_b}{N_0 T} = \frac{E_b}{N_0} R_D \quad (2)$$

여기서,  $R_D$ 는 데이터율을 나타낸다.

위성 수신기에서 요구되는 SNR은 (3)식이다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{E_b}{N_0}\right)_{req} &= (SNR)_{required} \\ &= \frac{P_t G_t \lambda^2}{(4\pi R_s)^2} \cdot \frac{G_r}{T_r} \cdot \frac{1}{kML_{as}} \cdot \frac{1}{R_D} \end{aligned} \quad (3)$$

본 논문에서 분석한 인터셉터 수신기는 에너지 검출기로서 구조는 아래의 그림 1과 같다.

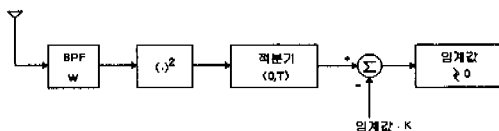


그림 1. Energy Detector의 구조

에너지 검출기의 성능은  $P_f$ (false alarm 확률)와  $P_D$ (detection 확률)로서 결정되며, deflection ( $d$ )은 신호의 검출을 위해 필요한,  $P_f$ 와  $P_D$ 를 달성하기 위해 요구되는 정규화된 최소 SNR로서 다음 (4)식과 같다<sup>[6]</sup>.

$$d = (SNR)_{IN, req} \cdot \sqrt{TW} \quad (4)$$

$T$ 는 적분 시간이며,  $W$ 는 BPF의 대역폭이다.

$(SNR)_{IN, req}$ 은 신호의 검출을 위해 필요한 최소한의 입력 SNR이다. 반면,  $(SNR)_{OUT}$ 은 적분기를 거친후의 출력 SNR이며, 입력 SNR과 관련된 식으로 (5)식과 같다<sup>[6]</sup>.

$$(SNR)_{OUT} = (SNR_{IN, req})^2 TW \quad (5)$$

또한 에너지 검출기에서, 송신 단말의 대역 확산된 신호를 수신하기 위해 요구되는 입력 SNR은 (6)식과 같다<sup>[6]</sup>.

$$(SNR)_{IN, req} = \frac{\lambda^2 P_t G_{it} G_{ir}}{(4\pi R_f)^2 L_{af} k T_{ir} W_{ss}} \quad (6)$$

여기서,  $P_t$ 는 단말의 송신 전력,  $W_{ss}$ 는 확산 대역폭,  $G_{it}$ 는 에너지 검출기 방향으로의 단말의 안테나 이득,  $G_{ir}$ 는 단말기 방향으로의 에너지 검출기의 안테나 이득,  $R_f$ 는 단말과 에너지 검출기 사이의 인터셉트 거리,  $L_{af}$ 는 단말과 에너지 검출기 사이의 대기 손실,  $T_{ir}$ 는 에너지 검출기의 잡음 온도이다. 최종적인 시스템 quality factor를 (8)식과 같이 유도할 수 있다.

$$Quality\ Factor = \left(\frac{R_s}{R_f}\right)^2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{R_s}{R_f}\right)_u^2 &= \frac{(SNR)_{IN, req}}{(SNR)_{required}} \\ &\cdot \frac{G_t G_r}{G_{it} G_{ir}} \cdot \frac{L_{af}}{L_{as}} \cdot \frac{T_{ir}}{T_r} \cdot \frac{W_{ss}}{MR_D} \end{aligned} \quad (8)$$

### 2.2 광대역 재밍 환경

위성 수신기에서 수신된 재머전력은 다음이다.

$$J = \frac{P_f G_f G_{sf} \lambda^2}{(4\pi R_f)^2 L_{af}} \quad (9)$$

여기서,  $P_f G_f$ 는 재머의 EIRP,  $G_{sf}$ 는 위성 수신기

의 재머 방향으로의 안테나 이득,  $L_{as}$ 는 재머와 위성 사이의 대기 손실,  $R_r$ 는 재머와 위성 사이의 거리를 각각 나타낸다.

신호대 재밍 전력비(S/R)는 (10)식과 같다.

$$\frac{S}{J} = \frac{P_t G_t}{P_f G_f} \cdot \left(\frac{R_f}{R_s}\right)^2 \cdot \frac{L_{af}}{L_{as}} \cdot \frac{G_r}{G_{sf}} \cdot \frac{1}{M} \quad (10)$$

재머 전력은 매우 크기 때문에, 잡음의 영향은 무시할수 있고 광대역 재머를 가정한다.

$$\frac{E_b}{J_o} = \frac{S/R_D}{J/W_{ss}} = \frac{S}{J} \cdot G_P \quad (11)$$

여기서,  $G_P$ 는 처리이득을 나타낸다.

(10)식과 (11)식을 이용하면 (12)식과 같다.

$$\frac{E_b}{J_o} = G_P \cdot \left(\frac{P_t G_t}{P_f G_f}\right) \cdot \left(\frac{R_f}{R_s}\right)^2 \cdot \frac{L_{af}}{L_{as}} \cdot \frac{G_r}{G_{sf}} \cdot \frac{1}{M} \quad (12)$$

(6)식과 (12)식을 이용하면 재밍 상황에서의 시스템 quality factor를 다음과 같이 유도된다.

$$\left(\frac{R_s}{R_f}\right)_u^2 = \frac{(4\pi)^2}{\lambda^2} \cdot \frac{G_t G_r}{G_{IT} G_{IR} G_{sf}} \cdot \frac{W_{ss} R_f^2}{P_f G_f} \cdot \frac{L_{af} L_{af}}{L_{as}} \cdot \frac{kT_{ir}}{M} \cdot \frac{(SNR)_{IN, req}}{E_b/J_o} \cdot G_P$$

### III. 중계기별 LPI 성능 분석

중계기 유형에 따른 LPI 성능 분석은 다음과 같다. 분석 중계기로는 수동형 중계기인 bent-pipe형, despreader 만 있는 OBP형, 그리고 respreader까지 포함한 OBP형 중계기를 고려하였다. 송신, 수신 단말기와, 에너지 검출기, 재머가 있는 전체 시스템 구성도가 그림 2이다.

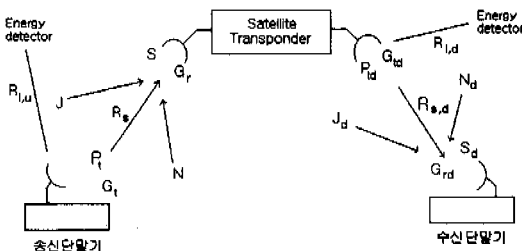


그림 2. 전체 시스템 구성도

### 3.1 Bent-pipe형 중계기 시스템

Bent-pipe형 중계기 시스템은 수신된 up-link 신호를 주파수 변환후 증폭하여 downlink로 송신하게 된다.

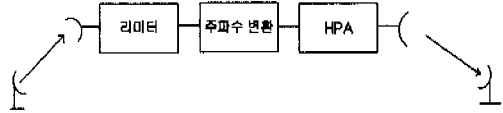


그림 3. Bent-pipe형 위성 중계기 모델

잡음과, 재머의 재밍 간섭을 고려한 위성 수신기 입력단에서의 총 수신 전력은 (14)식이다.

$$P_{tot} = S + J + N = S + J \quad (J \gg N \text{ 일 때}) \quad (14)$$

S는 위성 수신기 입력단에서 수신된 신호만의 전력으로써 다음 (15)식과 같다.

$$S = \frac{\lambda^2 P_t G_t G_r}{(4\pi R_s)^2 L_{as} M} \quad (15)$$

또한, J는 위성 수신기 입력단에서 수신된 up-link 재머 전력으로써 (9)식과 같다.

리미터와 HPA를 거쳐, downlink로 송신될 전력은 다음 (16)식과 같다.

$$P_{td} = G_{HPA} \cdot b_{Backoff} \cdot L_s (S + J) \quad (16)$$

$L_s$ 는 리미팅 손실,  $G_{HPA}$ 는 HPA의 증폭 이득,  $b_{BACKOFF}$ 는 HPA의 back-off 값이다. 수신 단말기에서 수신된 총전력은 다음과 같다.

$$S_{tot} = S_d + J_d + N_d = S_d + J_d \quad (J_d \gg N_d \text{ 일 때}) \quad (17)$$

$S_d$ 는 수신 단말기 입력단에서 수신된 uplink 신호전력과 재밍 전력의 합해진 전력이다.

$$S_d = \frac{\lambda^2 P_{td} G_{td} G_{rd}}{(4\pi R_{s,d})^2 L_{as,d} M_d} \quad (18)$$

$P_{td}$ 는 위성의 송신 전력,  $G_{rd}$ 는 위성의 수신 단말기 방향으로의 안테나 이득,  $G_{rd}$ 는 수신 단말기의 위성 방향으로의 안테나 이득을 각각 나타낸다.

또한,  $J_d$ 는 수신 단말기 입력단에서 수신된 downlink 재머 전력으로써 (19)식과 같다.

$$J_d = \frac{\lambda^2 P_{I,d} G_{L,d} G_{S,d}}{(4\pi R_{I,d})^2 L_{a,d}} \quad (19)$$

uplink에서처럼 지상 수신단말에서의  $E_b/J_o$ 를 다음 (20)식과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{E_b}{J_o} = \frac{R_{J,d}^2 P_{td} G_{td} G_{rd} L_{a,d}}{R_{s,d}^2 P_{J,d} G_{J,d} G_{S,d} M_d L_{as,d}} \cdot G_P \quad (20)$$

위성 중계기의 출력 신호를 수신하는 에너지 검출기에서, 신호의 검출을 위해 요구되는 입력 SNR은 다음식과 같다.

$$(SNR)_{IN, req} = \frac{\lambda^2 P_{td} G_{ir} G_{ir}}{(4\pi R_{I,d})^2 L_{a,d} kT_{ir} W_s} \quad (21)$$

(20),(21)식을 이용하면, 최종적인 downlink 시스템 quality factor를 다음 (22)식과 같다.

$$\left(\frac{R_s}{R_I}\right)_d^2 = \frac{(4\pi)^2}{\lambda^2} \cdot \frac{G_{td} G_{rd}}{G_{ir} G_{ir} G_{S,d}} \cdot \frac{W_s R_{J,d}^2}{P_{J,d} G_{J,d}} \cdot \frac{L_{a,d} L_{a,d}}{L_{as,d}} \cdot \frac{kT_{ir}}{M_d} \cdot \frac{(SNR)_{IN, req}}{(E_b/J_o)} \cdot G_P \quad (22)$$

3.2 OBP 중계기 시스템 (despreader만 있는) 이 위성 중계기는 despreader만 포함한 형태로, 수신된 uplink spreading 신호가 despreader를 거친 후에는  $W_s$ 의 대역폭을 가진 신호가 되며, 이 신호가 downlink로 송신된다.

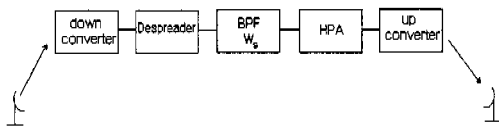


그림 4. Despreader-OBP형 위성 중계기 모델

수신된 uplink 재머 전력은 despreader를 거친후 BPF 출력단에서 확산 대역폭대 신호 대역폭 비 ( $W_s/W_s$ )만큼 감소되어 출력된다.

$$P_{td} = (S + J / (W_s / W_s)) \cdot b_{BACKOFF} \cdot G_{HPA} \quad (23)$$

출력 신호를 수신하려 하는 에너지 검출기에서 검출을 위해 요구되는 입력 SNR은 (24)식이다.

$$(SNR)_{IN, req} = \frac{\lambda^2 P_{td} G_{ir} G_{ir}}{(4\pi R_{I,d})^2 L_{a,d} kT_{ir} W_s} \quad (24)$$

광대역 재밍의 경우 수신 단말기에서의  $E_b/J_o$ 는 다음 (25)식과 같다.

$$\frac{E_b}{J_o} = \frac{R_{J,d}^2 P_{td} G_{td} G_{rd} L_{a,d}}{R_{s,d}^2 P_{J,d} G_{J,d} G_{S,d} M_d L_{as,d}} \cdot \frac{W_s}{R_D} \quad (25)$$

따라서, 최종 downlink quality factor를 구한다.

$$\left(\frac{R_s}{R_I}\right)_d^2 = \frac{(4\pi)^2}{\lambda^2} \cdot \frac{G_{td} G_{rd}}{G_{ir} G_{ir} G_{S,d}} \cdot \frac{W_s R_{J,d}^2}{P_{J,d} G_{J,d}} \cdot \frac{L_{a,d} L_{a,d}}{L_{as,d}} \cdot \frac{kT_{ir}}{M_d} \cdot \frac{(SNR)_{IN, req}}{(E_b/J_o)} \cdot \frac{W_s}{R_D} \quad (26)$$

3.3 OBP 중계기 시스템 (Respreader 포함) 중계기에서 despreading된 후 다시 respreading 되어 대역확산된 신호가 downlink로 송신 된다.

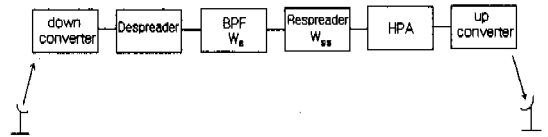


그림 5. Respreader 포함하는 OBP 위성중계기 모델

마찬가지로, 에너지 검출기에서 신호의 검출을 위해 요구되는 입력 SNR은 (27)식과 같다.

$$(SNR)_{IN, req} = \frac{\lambda^2 P_{td} G_{ir} G_{ir}}{(4\pi R_{I,d})^2 L_{a,d} kT_{ir} W_s} \quad (27)$$

Respreader를 거친후의 신호가 수신 단말에서 수신되므로, 수신 단말에서의  $E_b/J_o$ 는 다음이다.

$$\frac{E_b}{J_o} = \frac{R_{J,d}^2 P_{td} G_{td} G_{rd} L_{a,d}}{R_{s,d}^2 P_{J,d} G_{J,d} G_{S,d} M_d L_{as,d}} \cdot G_P \quad (28)$$

따라서 downlink 시스템 quality factor를 (29)식과 같이 유도할 수 있다.

$$\left(\frac{R_s}{R_I}\right)_d^2 = \frac{(4\pi)^2}{\lambda^2} \cdot \frac{G_{td} G_{rd}}{G_{ir} G_{ir} G_{S,d}} \cdot \frac{W_s R_{J,d}^2}{P_{J,d} G_{J,d}} \cdot \frac{L_{a,d} L_{a,d}}{L_{as,d}} \cdot \frac{kT_{ir}}{M_d}$$

$$\frac{(SNR)_{IV, req}}{(E_b/J_0)} \cdot G_p \quad (29)$$

#### IV. 시스템 파라미터와 LPI 성능 분석

구성도는 그림 2에 나타내었으며, 분석 링크는 uplink이다. 송신 단말은 무주(36°N, 127.8°E)에 위치하며, 위성과의 거리는 37317Km이다. 링크 마진은 3dB이며, 데이터 속도는 4.8Kbps이다. 송신 전력은 20dBW, 송신 안테나 이득은 60dB이다. 따라서 단말의 총 송신 EIRP는 80dBW가 된다. 또한 에너지 검출기 방향으로의 안테나 이득은 20dB이다. 위성은 정지 궤도에서 운용되는 무궁화 위성(116°E)에 대해 분석하였으며, 요구되는 수신 SNR은 10dB이다. 수신 안테나 이득은 HPBW가 3°인 경우로, 34dB이며, 재머 방향으로의 이득은 20dB이다. 확산 대역폭은 60MHz, 수신기 잡음 온도는 900K, 반송파 주파수는 8GHz이다. 재머는 광대역 재머로 평양(39°N, 125.75°E)에 위치하며, 위성과의 거리는 37504Km이다. EIRP는 100 dBW이다. 에너지검출기는  $P_F=10^{-5}$ ,  $P_D=0.95$ 의 성능을 가진다고 가정하였다. 또한, 공중에 위치하였으며, 단말 방향으로의 안테나 이득은 20dB, 수신기 잡음 온도는 500K이다.

##### 4.1 재밍이 없는 환경

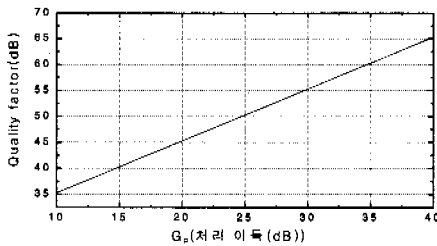


그림 6. 처리이득에 따른 quality factor

처리이득에 따라 quality factor는 선형적으로 증가하게 되는데, 40dB까지 증가하게 되면, 약 65.2 dB의 큰 값을 갖는다. 재밍이 없는 환경일 때, 스펙트럼 확산 통신 방식은 LPI 기법에 효과적이며, 적절한 처리 이득의 선택이 중요하다. 그림 7은 에너지 검출기의 성능에 따른 quality factor를 나타내고 있다. 요구되는 deflection이 증가할수록 quality factor가 증가하게 되고, 신호의 검출을 위한 동작 성능에 도달하기 위해 요구되는 출력 SNR을 생성하기 위해 큰 TW 값을 가져야 한다. 동일 deflection일때, TW

값이 증가함에 따라, 신호의 검출을 위해 요구되는 입력 SNR이 감소되므로 quality factor는 감소하게 된다. TW값이 12500 일 때, 20dB의 deflection에서, quality factor는 약 78.5dB이다.

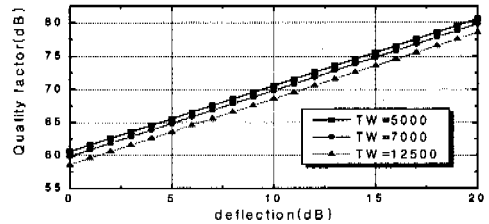


그림 7. Deflection에 따른 quality factor

##### 4.2 광대역 재밍 환경

광대역 재밍 환경에서의 quality factor는 재머와 관련된 분석 요소, 즉, 재머 EIRP, 위성 수신기의 재머 방향으로의 이득( $G_j$ ), 재머의 위치에 따른 위성과 재머 사이의 거리( $R_j$ ), 위성 수신기에서의  $E_b/J_0$ 에 의한 영향이 크다. 그림 8의 결과로부터, 재머 전력이 증가할수록 quality factor가 크게 감소되고, 100dBW의 큰 재머 전력일 경우, quality factor는 약 6.4dB이다.

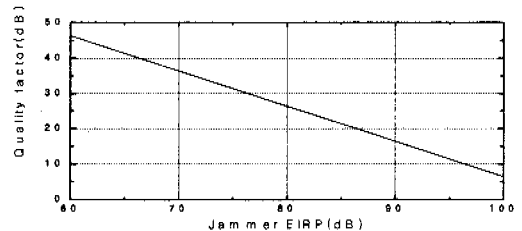


그림 8. 재머 EIRP에 따른 quality factor

그림 9는 처리 이득의 증가에 따른 quality factor를 나타내고 있다. 재밍의 영향이 없는 환경에서는 처리 이득에 따른 quality factor가 큰 값으로 나타났으나, 재밍 환경에서는 크게 감소하여, 40dB의 처리 이득에서 약 5.4dB이다.

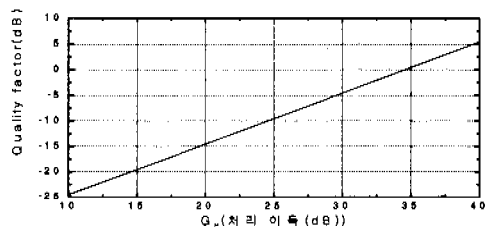


그림 9. 처리 이득에 따른 quality factor

