

# 최소 대역폭 선로 부호 VMDB5의 성능 측정에 관한 연구

## (An Experimental Study on the Performance of a Minimum Bandwidth Line Code VMDB5)

姜 昌 求\*, 金 大 榮\*\*

(Chang Goo Kang and Dae Young Kim)

### 要 約

선로부호의 주요한 세 가지 특성은 무직류 특성, 최소대역폭 특성, 자체동기 특성인데 지금까지 알려진 선로부호중 이 세 가지 특성을 모두 갖는 선로부호는 T1Br, VMDBr, RMD3r, RMD4r 뿐이다. 본 논문에서는 이 중 VMDB5 부호에 대해 행한 실험적 성능 측정 연구결과를 보고한다.

실험을 위하여 VMDB5 선로부호의 부호기, 복호기 및 펄스 성형기등을 제작하였다. 실험을 통하여 VMDB5 선로부호의 전력밀도 스펙트럼, 눈 모양, 에러율등을 측정하였다. 이론적으로 제시된 VMDB5의 모든 성능을 재확인할 수 있었으며, 특히 NRZ 펄스 성형의 경우 선로의 대역폭이 Nyquist 대역폭의 1/2 까지 줄더라도 보정회로 없이 전송이 가능함을 관찰하였다.

### Abstract

While three most important aspects of line codes are the dc-free, the minimum-bandwidth, and the self-clocking properties, the only T1Br, VMDBr, RMD3r, RMD4r codes possess all of these properties. This paper is to report the results of an experimental performance study of VMDB5. The encoder and decoder of VMDB5 and the pulse shaper have been implemented. Power spectra, eye patterns, and error probabilities are experimentally measured, confirming the theoretical performance predictions. It has been observed that the NRZ pulse shaping reliable transmission is possible with no extra equalization even in the case when the -3dB channel bandwith is only half the Nyquist bandwidth.

### I. 序 論

오늘날 정보화 시대에 있어서 데이터 통신의 수요가 급증하고 있으며 이러한 수요로 인하여 데이터 전송

을 위해 주어진 전송매체를 효율적으로 이용할 수 있는 전송 신호방식이 중요 관심사의 하나가 되어있다. 디지털 신호의 전송에서 주어진 선로의 주파수 전달 특성에 맞추거나 수신측의 원활한 동기 재생을 위하여는 "0"와 "1"로 나타나는 디지털 데이터를 그대로 전송하는 것이 부적당하므로 이를 실제 전송될 선로 심볼로 적절히 부호화 하여야 하는데 이때 사용되는 부호를 선로부호(line code)라 한다. 이러한 선로부호에서는 다음과 같은 세 가지가 가장 중요한 특성으로 여겨지고 있다.<sup>1)~3)</sup>

#### 1. 무직류(DC-free) 특성

\*正會員, 三星半導體通信(株) 龜尾研究所 研究一室  
(Samsung Semiconductor & Telecommunications Co., LTD, R & D Dept. 1)

\*\*正會員, 忠南大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Chungnam National Univ.)

接受日字: 1986年 3月 31日

전송 선로 중에 흔히 접하는 직류 혹은 저주파 성분을 전송 할 수 없는 AC coupled 선로로 데이터를 전송하기 위해서는 선로부호가 직류 성분이 없고 저주파 성분이 적어야 하는데 이러한 특성을 무직류 특성이라고 한다.

2. 최소 대역폭(MB:Minimum Bandwidth) 특성

전송 선로의 이용효율을 높이기 위하여 가능한 한 선로부호의 소요 대역폭이 작아야 한다. 그 이론적 최소치는 Nyquist 대역폭  $W=1/2T$  (T: 주기)이며 주어진 선로부호가 이 대역폭 내에서 동작이 가능하면 최소 대역폭 특성을 갖는다고 말한다.

3. RLL(Runlength Limited) 특성

선로부호가 자체동기(self-clocking) 성질이 있으면 수신시에 별도의 동기신호 없이도 데이터 신호로부터 동기를 추출해 낼 수 있으며 이를 위해서는 무펄스 혹은 동극성 펄스의 연속은 제한 되어야 하는데 이러한 특성을 RLL특성이라고 한다.

지금까지 알려진 대표적인 선로부호들의 특성을 비교하면 표 1과 같다.<sup>1)~11)</sup>

표 1. 일부 선로부호의 특성비교  
Table 1. Comparison of the properties of some line codes

선로부호 \ 특성	DC-free		MB		RLL	
		(1)		(2)		(3)
BP	0	1	X	$\infty$	X	$\infty$
DB	X	$\infty$	0	1	X	$\infty$
MDB	0	2	0	2	X	$\infty$
VBPm	0	2	0	m	X	$\infty$
DVBPM	0	m	0	2	X	$\infty$
VDBr	X	$\infty$	0	2	0	r
VMDBr	0	2	0	4	0	r
TIBr	0	2	0	4	0	r
RMD3r	0	2	0	4	0	r
RMD4r	0	2	0	4	0	r

\* (1)=DSV, (2)=ISV, (3)=RL (Runlength)  
See II for the meanings of DSV and ISV.

본 논문에서는 최적 선로부호의 세 가지 특성인 무직류 특성, 최소대역폭 특성 및 RLL특성을 모두 만족하는 VMDB5 선로부호에 대하여 행한 실험적 성능 측정 연구의 결과를 정리하여 보고한다. 이와 관련된 이전의 연구로는 현상균<sup>10,11)</sup>의 연구가 있었으나 그것은 초소형 전산기를 이용한 에뮬레이션이었으며 실제 하드웨어를 논리회로로 제작하여 실험한 것은 본 연구가 처음이다.

II 장에서는 기저대역 데이터 전송시스템의 모형을 정리하고, III 장에서는 VMDB5의 부호화 법칙 및 이론적 성능을 소개한다. IV 장부터 V 장에서는 실험을 위하여 제작된 부호기, 복호기, 펄스성형기, 모의 선로의 설계과정을 상술한다. VI 장에서는 실험방법과 결과를 논하고 끝으로 IX 장에서 결론을 맺는다.

II. 기저대역 데이터 전송 시스템

본 논문에서는 기저대역 데이터 전송 시스템을 편의상 그림 1과 같이 부호기 F, 펄스성형 여파기 G(w), 선로 C(w), 및 복호기 F<sup>-1</sup>로 모형화한다.<sup>10)</sup>

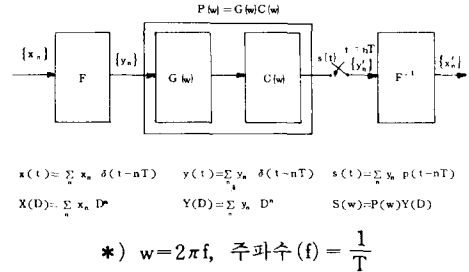


그림 1. 기저대역 데이터 전송 시스템  
Fig. 1. Baseband data transmission system.

부호기 F는 원천 심볼열  $\{x_n\}$ 을 선로 심볼열  $\{y_n\}$ 로 부호한다.

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n \delta(t-nT) \tag{1}$$

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n \delta(t-nT) \tag{2}$$

이것을 Fourier 변환하면

$$X(D) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n D^n \tag{3}$$

$$Y(D) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n D^n \tag{4}$$

여기서

$$D = e^{-j\omega T} \tag{5}$$

선로부호의 특성과 관련해서 다음과 같이 정의되는 주요한 두 개의 지수 DSV(Digital Sum Variation), ISV(Intersymbol-interference Sum Variation)가 있다.<sup>11)</sup>

$$DSV \triangleq \max_{I, J} \left| \sum_{n=1}^J y_n \right| \tag{6}$$

$$ISV \triangleq \max_{I, J} \left| \sum_{n=1}^J (-1)^n y_n \right| \tag{7}$$

위의 두 지수로 부터 다음의 정리가 발견되었다.<sup>11)</sup>  
[정리 1] DSV가 유한한 선로부호는 무직류 특성을

갖는다. 즉, DSV가 유한하면 직류 성분이 없고 DSV가 작을수록 저주파 성분이 작다.

[정리 2] ISV가 유한한 선로부호는 최소대역폭 특성을 갖는다.

펄스성형 여파기  $G(w)$ 는 선로 심볼을 무간섭(zero intersymbol interference) 펄스  $g(t)$ 로 성형한다.

$$g(nT) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

이 조건은 주파수영역에서 다음과 같이 대등하게 표시될 수 있다.

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} G(w - 2\pi k/T) = \begin{cases} T, & |w| < \pi/T \\ 0, & \text{기타} \end{cases} \quad (9)$$

(9)의 특수한 경우로서 다음식을 만족하는 펄스를 최소대역폭 펄스라 한다.

$$G(w) = \begin{cases} T, & |w| \leq \pi/T \\ 0, & \text{기타} \end{cases} \quad (10)$$

이때의  $G(w)$ 의 임펄스응답  $g(t)$ 는 sinc 함수이다.

$$g(t) = (\sin \pi t/T) / (\pi t/T) \quad (11)$$

최소대역폭 선로부호라 함은 식(10), (11)로 표현되는 최소대역폭 펄스로 성형되어도 선로신호의 눈(eye)이 닫히지 않고 안정된 전송이 가능한 부호를 말한다. 최소대역폭 선로부호는 식(10), (11)의 최소대역폭 펄스로 성형이 가능하나 반드시 이 펄스만을 사용하여야 하는 것은 아니다. 주어진 선로를 주파수분할 방식 등으로 타 사용자와 공유하지 않을 때에는 사용대역폭을 엄격하게 제한할 필요가 없으며, 이 경우 다음과 같은 비최소대역폭 펄스를 사용할 수도 있다.

$$g(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq (1-C)T/2 \\ 0, & \text{기타} \end{cases} \quad (12)$$

여기서  $C = 0$  이면 NRZ(Non-Return to Zero) 펄스이고,  $0 < C < 1$  이면 RZ(Return to Zero) 펄스이다. 단, 같은 식(12)의 비최소대역폭 펄스를 사용하더라도 선로부호 자체가 최소대역폭 특성을 갖고 있으면 그렇지 않은 경우에 비해 첫 전력 영점이 더 낮은 주파수에서 생기며 따라서  $-3\text{dB}$  대역폭이 현저하게 작다는 잇점이 있는 것이다.

다음은 선로  $C(w)$ 에 대하여 알아보자. 만약  $C(w)$ 가 이상적이면

$$C(w) = 1$$

$$P(w) = G(w)C(w) = G(w) \text{ 이고}$$

이때 선로신호  $s(t)$ 는  $g(t)$ 와 (2)식의  $y(t)$ 와의 convolution이다.

$$s(t) = y(t) * g(t) \quad (13)$$

$$= \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n g(t - nT)$$

만약  $C(w)$ 가 비이상적이면 선로신호는 왜곡된다.

$$\begin{aligned} p(t) &= g(t) * c(t) \\ s(t) &= y(t) * p(t) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} y_n p(t - nT) \end{aligned} \quad (14)$$

그러므로 선로특성은 선로신호의 질에 직접적인 영향을 미친다.

복호기  $F^{-1}$ 는 표출된 수신신호  $\{y_n\}$ 을 받아 디지털 데이터  $\{x_n\}$ 로 복호한다.

### III. VMDB5 부호

VMDB5 부호는 DSV가 2이고 ISV가 2인 MDB(Modified Duobinary) 부호를 변형한 것으로서 DSV가 2이고 ISV가 4이다(표 1 참조). 전송전의 부호열에서 "0"가 6개 연속되면 이를 대치펄스군(SP: Substitution Pattern)으로 대치 함으로서 연속되는 "0"의 갯수를 5개 이하가 되도록 "0" runlength를 제한한다. 이 부호는 DSV가 유한하므로 무직류 특성을 갖고, ISV가 유한하므로 최소 대역폭 특성을 가지며, "0"의 길이가 제한되므로 RLL 특성도 가지고 있다.

VMDB5의 부호화 상태도는 그림 2와 같으며<sup>1)</sup> 굵은 선은 MDB의 부호화 상태도이고, 가는 선은 "0" runlength를 제한하기 위하여 "0"가 6개 연속될 때의 SP이다.

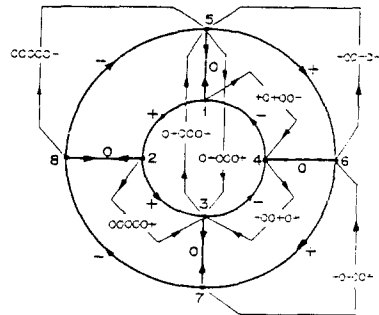
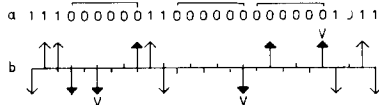


그림 2. VMDB5의 부호화 상태도  
Fig. 2. State diagram of the VMDB5.

VMDB5의 SP들은 동극성(“+” 또는 “-”) 펄스 사이에 “0”(무) 펄스가 홀수개로 된 위반펄스(violation pulse: V)를 가짐으로써 수신시 복호하기 쉽도록 하였다.

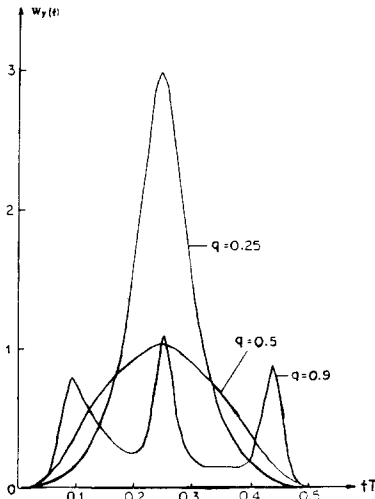
그림 2의 부호화 상태도에 의해 VMDB5 부호화 한 예는 그림 3과 같다.

VMDB5 부호의 이론적 성능을 그림 4-6에 인용하였다.<sup>12)</sup> 그림 4는 전력밀도 스펙트럼, 그림 5는 눈모양(eye pattern), 그림 6은 예러율의 해석적 성능



a : 입력 데이터, b : 부호화된 펄스, V : 위반펄스

그림 3. VMDB5의 부호화 예  
Fig. 3. Coding example of the VMDB5.



q : 입력 데이터의 "0" 발생 확률

그림 4. VMDB5의 이론적 전력밀도 스펙트럼  
Fig. 4. Theoretical power spectrum of the VMDB5.

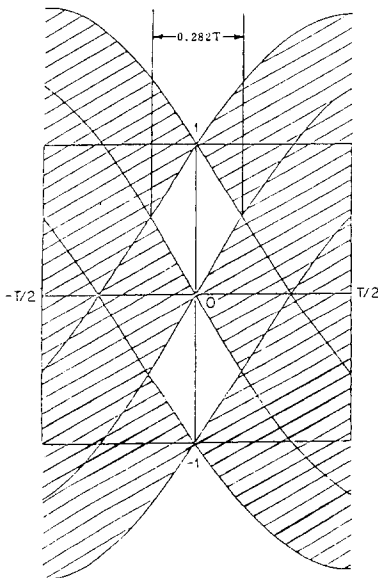
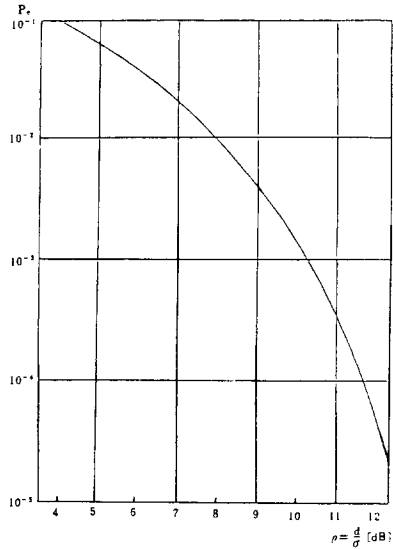


그림 5. VMDB5의 이론적 눈 모양  
Fig. 5. Theoretical eye pattern of the VMDB5.



\* ) d : decision level  
σ : rms amplitude of the noise signal

그림 6. 이론적 에러율  
Fig. 6. Calculated error probabilities.

분석 결과이다.

IV. 부호기의 설계

VMDB5 부호의 RLL 특성으로 인하여 "0" runlength를 5개 이하로 제한해야 하므로 입력 데이터로부터 "0"가 6개 연속해서 나오는 것을 검출하는 "0" x6 검출부, 현 상태와 입력에 따라 출력을 발생하는 출력 발생부, 차기상태로 천이도록 하는 상태 천이부, 입력에 따라 출력을 게이트하는 출력 제어부등으로 구성 설계하였다.

VMDB5 부호기의 계통도는 그림 7과 같다.

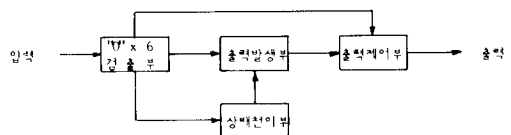


그림 7. VMDB5 부호기의 계통도  
Fig. 7. Block diagram of the VMDB5 encoder.

1. 정상 상태의 상태천이

VMDB5의 부호기를 설계 하기위해서 그림 2의 부호화 상태도에 따라 상태천이와 출력논리를 다음과 같이 구하였다. 입력 데이터중 "0"가 6개 연속하지 않는 정상 상태의 상태천이와 출력 논리표는 표 2와 같다.

표 2. 정상 상태의 상태전이 논리표  
Table 2. Normal-state transition table.

현상 상태	입력	차기 상태	출력
상태	X3 X2 X1	1	상태 Y3 Y2 Y1 펄스 P1P2
1	0 0 0	0	8 1 1 1 0 0 0
1	0 0 0	1	2 0 0 1 + 1 0
2	0 0 1	0	7 1 1 0 0 0 0
2	0 0 1	1	3 0 1 0 + 1 0
3	0 1 0	0	6 1 0 1 0 0 0
3	0 1 0	1	4 0 1 1 - 0 1
4	0 1 1	0	5 1 0 0 0 0 0
4	0 1 1	1	1 0 0 0 - 0 1
5	1 0 0	0	4 0 1 1 0 0 0
5	1 0 0	1	6 1 0 1 + 1 0
6	1 0 1	0	3 0 1 0 0 0 0
6	1 0 1	1	7 1 1 0 - 0 1
7	1 1 0	0	2 0 0 1 0 0 0
7	1 1 0	1	8 1 1 1 - 0 1
8	1 1 1	0	1 0 0 0 0 0 0
8	1 1 1	1	5 1 0 0 + 1 0

위의 논리표를 Karnaugh map을 이용하여 논리식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Y1 &= \overline{X1} \\
 Y2 &= X1 \overline{X2} + \overline{X1} X2 + \overline{X1} X2 \\
 Y3 &= X3 + \overline{X1} X3 \\
 P1 &= 1(X1X2X3 + \overline{X2} \overline{X1} X3) \\
 P2 &= 1(X1 \overline{X2} X3 + X2 \overline{X1} X3)
 \end{aligned}$$

2. "0"가 6개 연속될 때의 상태전이

입력 데이터중 "0"가 6개 연속할 경우의 상태 전이와 출력 논리표는 표3과 같다.

위의 논리표를 Karnaugh map을 이용하여 논리식을 구하면 다음과 같다.

표 3. "0"x6의 상태전이 논리표  
Table 3. Abnormal-state transition table.

X3	X2	X1	Y3' Y2' Y1'	출력 Pulse					
				P1 N1	P2 N2	P3 N3	P4 N4	P5 N5	P6 N6
0	0	0	1 0 1	0 0	1 0	0 0	0 0	0 0	1 0
0	0	1	0 0 0	1 0	0 0	0 0	0 1	0 0	0 1
0	1	0	0 0 1	0 1	0 0	0 1	0 0	0 0	1 0
0	1	1	0 0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 1
1	0	0	1 0 1	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	1 0
1	0	1	0 0 0	0 0	0 1	0 0	0 0	0 0	0 1
1	1	0	1 0 1	0 1	0 0	0 0	1 0	0 0	1 0
1	1	1	1 1 0	1 0	0 0	1 0	0 0	0 0	0 1

$$\begin{aligned}
 Y1' &= \overline{X1} \\
 Y2' &= X1X2X3 \\
 Y3' &= \overline{X1} \overline{X2} + X2X3 \\
 P1 &= X1X2X3 + X1 \overline{X2} \overline{X3} \quad N1 = \overline{X1} X2 \\
 P2 &= \overline{X1} X2 X3 \quad N2 = X1 \overline{X2} X3 \\
 P3 &= X1 X2 X3 \quad N3 = \overline{X1} X2 \overline{X3} \\
 P4 &= \overline{X1} X2 X3 \quad N4 = X1 \overline{X2} \overline{X3} \\
 P5 &= 0 \quad N5 = 0 \\
 P6 &= \overline{X1} \quad N6 = X1
 \end{aligned}$$

VMDB5 부호기에서 가장 중요한 부분은 "0"의 길이를 5개로 제한하는 부분으로서 "0"x6 검출부의 논리회로와 타이밍 다이어그램은 그림8, 그림9와 같다.

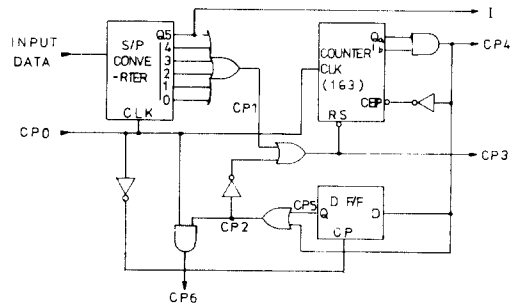


그림 8. "0"x6 검출부의 논리회로

Fig. 8. Logic circuit of the "0" x6 detector.

### V. 복호기의 설계

VMDB5 복호기는 III장에서 설명한 위반펄스(V)의 검출부와 "0" 데이터 대처부로 구성 설계 하였다.

#### 1. 위반펄스 검출부

VMDB5 부호의 위반펄스 형태에는 수신된 펄스의 배열에 따라 4가지가 있다. 동극성 펄스("+" 또는

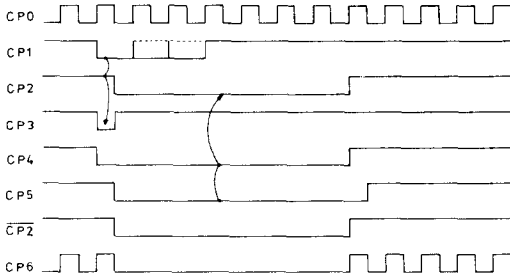


그림 9. "0"x6 검출부의 타이밍 다이어그램  
Fig. 9. Timing diagram of the "0"x6 detector.

“-” 사이에 “0” 펄스 (무 펄스)가 홀수개 있으면 위반으로 판정하는데 “0”가 5개 이면 형태1, 3개이면 형태2, 그리고 1개일 때 뒤에 있으면 형태3, 앞에 있으면 형태 4로 구분한다.

VMDB5 부호에서 위반펄스 삽입 위치에 따른 SP의 형태는 표 4와 같다.

표 4. 위반펄스 형태  
Table 4. Violation pulse types.

데이터		1	0	0	0	0	0	0	
S P 형 태	1	+	0	0	0	0	0	0	⊕ 2
		-	0	0	0	0	0	0	⊖ 8
	2	+	0	-	0	0	0	0	⊖ 3
		-	0	+	0	0	0	0	⊕ 5
3	+	+	0	0	-	0	0	⊖ 6	
	-	-	0	0	+	0	0	⊕ 4	
4	+	-	0	⊖	0	0	+	7	
	-	+	0	⊕	0	0	-	1	

○ : 위반펄스

위반펄스를 검출하는 방법은 그림10과 같다.

2. “0”데이터 대처부

VMDB5 복호기는 수신된 펄스로 부터 SP 형태에 따른 위반펄스를 감지하여 이것을 “000000”로 복호하고 위반이 없으면 펄스(“+” 또는 “-”)는 “1”로, 무펄스(“0”)는 “0”로 복호한다. 그림10의 방법에 의해 위반펄스가 감지되면 표 4의 위반형태 대로 구분되어 그림11의 “0”대치 방법에 의해 디지털 데이터로 복호된다.

Ⅶ. 펄스 성형기 설계

본 논문의 실험용 시스템에서는 구형 펄스와 sinc 펄스를 성형펄스로 사용하였다. 구형 펄스는 NRZ

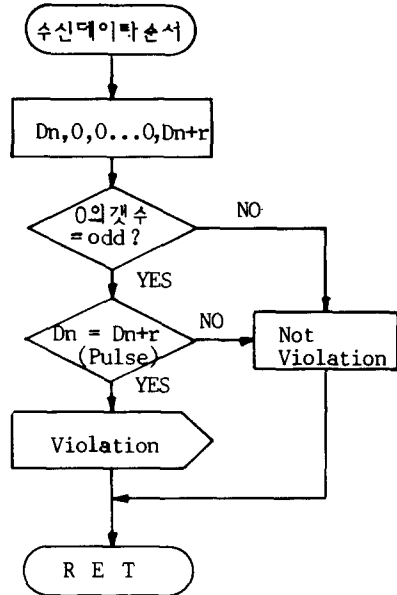


그림10. 위반펄스 검출방법  
Fig. 10. Violation pulse detection algorithm.

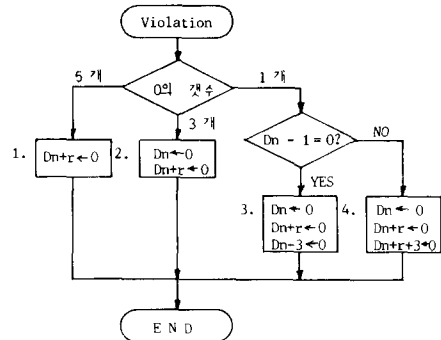


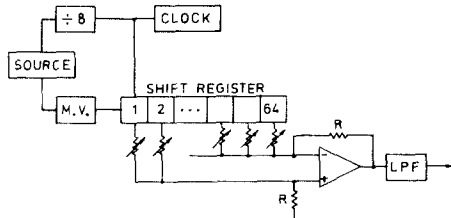
그림11. “0”대치 방법  
Fig. 11. “0”replacement algorithm.

(Non-Return to Zero) 펄스와 RZ(Return to Zero) 펄스로 실현 하였고 이상적인 동작을 관찰하기 위하여 최소대역폭 펄스인 sinc(x)펄스도 구현 하였다. 곧, 이상적 sinc펄스를 ±4T의 직각창(rectangular window)으로 절단(truncate)하여 표출 간격이 T/8인 2진 횡단(binary transversal)여과기로 실현하고 저역통과 Bessel 여과기를 통과시켜서 성형하였다.<sup>13)</sup>

Ⅷ. 모의 선로

일반적인 전송선로는 저항성과 용량성을 가진 저역 통과 여과기(LPF:Low Pass Filter)와 같으므로 본

논문의 실험용 시스템에서 모의 선로의 하나로서 그림 14의 RC 저역여파기를 사용하였다. 또한 모의 전화선로로서 그림 15와 같은 특성을 갖는 TLN-1 선로 시뮬레이터를 이용하였다.



M. V. : multi-vibrator

그림 12. 2진 횡단 여파기  
Fig. 12. Binary transversal filter.

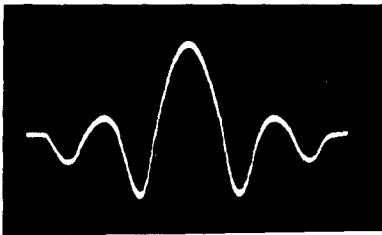


그림 13. 구현된 sinc 펄스  
Fig. 13. Implemented sinc pulse.

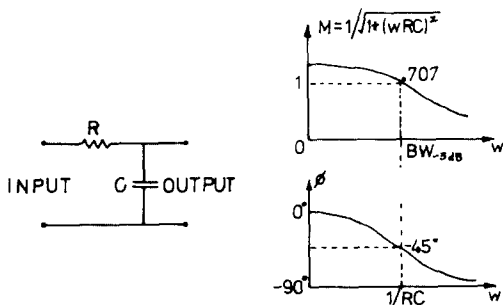
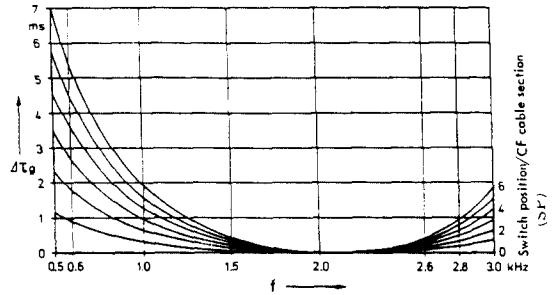


그림 14. RC 저역여파기와 특성  
Fig. 14. RC LPF and its characteristics.

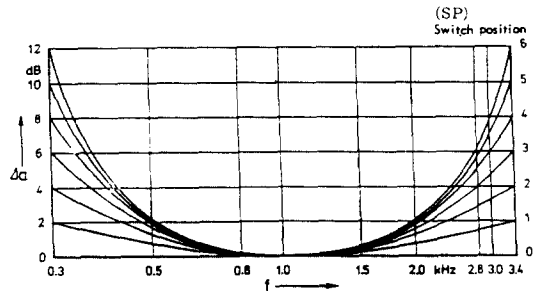
Ⅶ. 실험 및 결과

1. 실험방법

VMDB5의 성능을 측정하기 위하여 II 장의 전송 시스템과 일치하는 실험용 기저대역 데이터 전송 시스템을 그림 16과 같이 구성하였다.



(a) 지연특성



(b) 감쇄특성

그림 15. TLN-1 선로 시뮬레이터의 특성  
Fig. 15. Characteristics of the TLN-1 channel simulator.

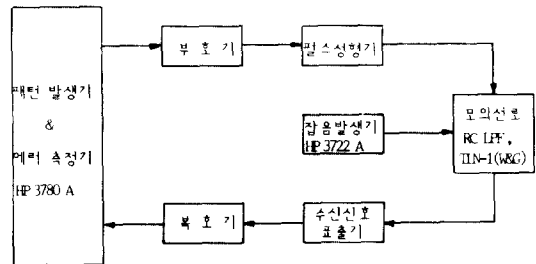


그림 16. 실험용 기저 대역 데이터 전송 시스템  
Fig. 16. Experimental baseband data transmission system.

패턴 발생기는 외부 동기에 의해 유사랜덤(pseudo-random) 데이터(cyclic sequence length=2<sup>20</sup>-1)를 부호기로 보낸다. 부호기는 입력 데이터를 VMDB5 부호로 변환하여 필스성형기로 보내어 송신 펄스를 출력하게 한다. 송신된 펄스는 모의 선로를 통해 수신부에 전달되며, 수신신호 표출기에서 추출된 후 신호 크기를 감지하여 수신신호를 인식한 다음 복호기로 보낸다. 복호기는 VMDB5 복호 방법에 따라 신호를 복호하고 에러 검출기로 보내어 에러율(BER: Bit Error Rate)을 측정한다.

2. 실험결과

VMDB5 부호의 측정된 전력밀도 스펙트럼은 그림 17과 같다. 그림에서와 같이 전력은 Nyquist 대역의 중앙에 밀집되어 있으며 입력 데이터가 모두 "0" 일 때는  $1/12T$ ,  $1/4T$ ,  $5/12T$ 에서, 모두 "1"일 때는  $1/4T$ 에서만 선스펙트럼이 생기는 것을 알 수 있다. VMDB5 부호는  $f=0$ ,  $f=1/2T$ 에서 전력 성분이 없으므로 DC-free이고 MB부호임을 알 수 있다.

눈모양은 선로의 대역폭에 따른 변화를 관찰하기 위하여 NRZ 펄스로 성형하고 모의 선로 RC LPF 로 통과시켰으며 선로의 대역폭(BW)과 송신 데이터의 Nyquist 주파수( $f_N$ )와의 비, 곧  $BW/f_N$ 을 가변하면서 측정하였다. 이때 측정된 눈모양은 그림 18(a)-(c)와 같으며  $BW/f_N$ 비가 작아짐에 따라 눈은 점점 작아졌다. 그러나  $BW/f_N=1/2$ 일 때도 눈은 충분히 크게 열렸

으며 따라서 VMDB5는 선로 대역폭이  $f_N/2$ 일 때도 보정기 없이도 정상동작이 가능함을 알 수 있다. 또한 선로의 지연특성과 감쇄특성에 대한 민감도를 관찰하기 위하여 sinc펄스로 성형하고 선로 시뮬레이터를 통과시켜서 눈모양을 측정하였다. 그림18(d)-(f)에서 보는 바와 같이 sinc 성형의 VMDB5 부호는 감쇄왜곡보다 지연왜곡에 더 민감함을 알 수 있다(감쇄특성의 SP3 대 지연특성의 SP1). 그림18의 (d)에서 눈 폭은 0.257T로서 이론치보다 작은 것은 sinc펄스를  $\pm 4T$ 에서 절단(truncate) 시켰기 때문이다.

잡음에 대한 VMDB5 부호의 에러율을 구하기 위하여 S/N비를 가변하면서 BER을 측정하였다. 측정된 BER은 그림19와 같으며 S/N비가 클 때는 측정 오차가 적었으나 S/N비가 작을수록 측정오차가 많을수록 측정오차가 컸다. 이것은 오차가 상당히 작을 경우 측정시간이 신뢰성 있는 에러율 평균치를 얻기에 부족했던 까닭으로 해석된다.

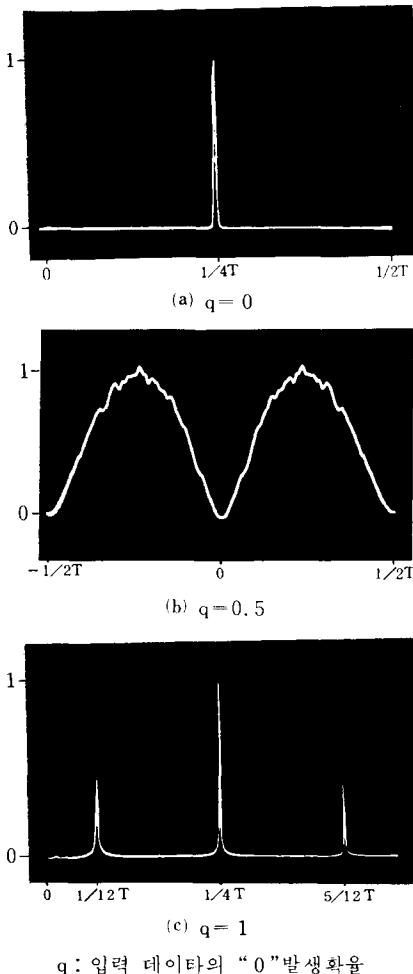


그림17. 측정된 전력밀도 스펙트럼  
Fig. 17. Measured power spectrum.

IX. 結 論

VMDB5 부호의 성능을 측정하기 위하여 VMDB 5 부호기, 복호기, 펄스 성형기를 설계 제작하였으며 실험용 기저대역 데이터 전송 시스템을 구성하였다. 이 시스템은 다른 선로부호의 성능을 측정하는데도 효율적으로 사용될 수 있으며 여기에서 사용한 복호화 방법은 RLL 특성을 갖는 다른 선로부호에도 적용될 수 있다.

실험을 통하여 VMDB5 부호의 전력밀도 스펙트럼, 눈모양, 에러율을 측정하였다. VMDB5 부호의 전력 밀도 스펙트럼은 입력 데이터의 "0"확율이 감소할 수록 전력이 Nyquist 대역의 중앙에 밀집되었으며 이론에서와 같이 주파수  $f = 0$ ,  $f = 1/2T$ 에서 전력성분이 없었으므로 이 부호는 무적류 특성과 최소대역폭 특성을 가진 부호임을 재확인하였다.

눈모양은 VMDB5 부호를 NRZ 펄스로 성형하였을 경우 전송선로의 대역폭이 송신데이터의 Nyquist 주파수의 절반일 때에도 눈이 충분히 열렸고 별도의 보정기 없이도 동작이 가능함을 확인하였다. 최소대역폭 펄스인 sinc펄스로 성형하였을 경우 VMDB5 부호의 눈모양은 감쇄왜곡에 대해서는 영향을 적게 받았으나 지연왜곡에 대해서는 영향을 크게 받았다.

VMDB5 부호의 에러율을 S/N비에 따라 측정하였으며 잡음에 대한 에러성능이 실제 응용을 위해 충분히 우수함을 확인 하였다.

본 연구의 결과로 VMDB5 부호는 데이터 전송시 선로부호에 요구되는 가장 주요한 3 가지 특성인



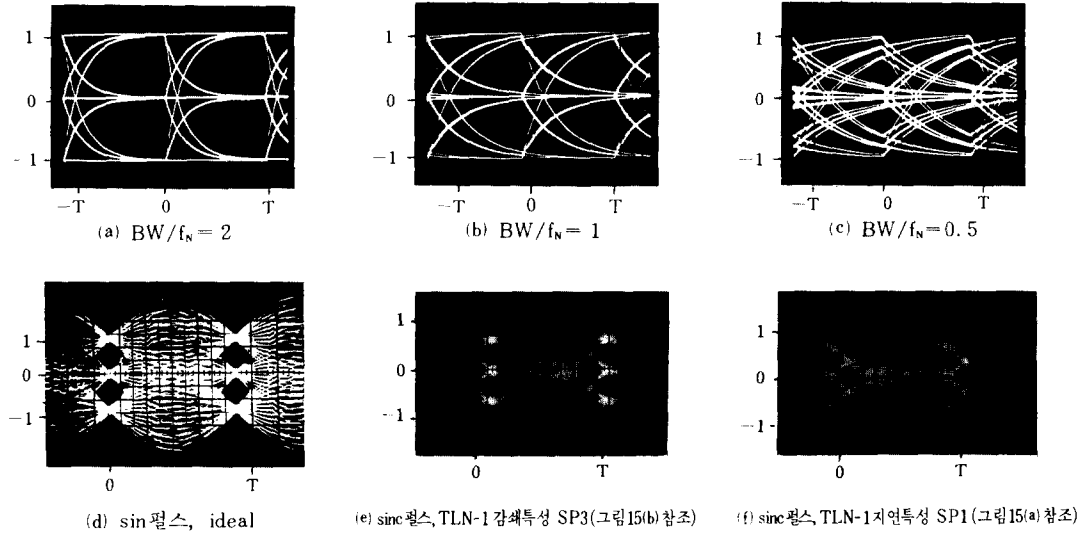
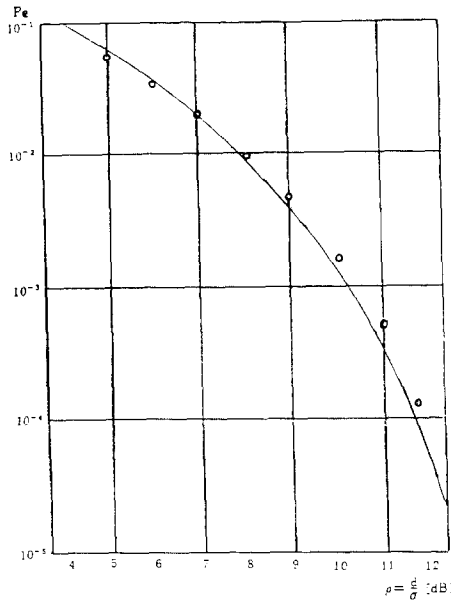


그림 18. 측정된 눈모양  
Fig. 18. Measured eye patterns.



d: decision level  
σ: rms amplitude of the noise signal

그림 19. 측정된 에러율  
Fig. 19. Measured error probabilities.

최소대역폭(MB) 특성, 무직류(DC-free) 특성 및 RLL 특성을 모두 만족하는 최적 선로부호임을 실험적으로 확인하였다. VMDB5 부호는 그 우수한 특성상 ac-coupled 기저대역 선로나 SSB passband 시스템 등

의 고속 데이터 전송시스템에 대역 이용 효율을 극대화하는 선로부호로서 적합하게 사용될 것으로 기대된다.

参 考 文 献

- [1] A. Croisier, "Introduction to Pseudo-ternary Transmission Codes," *IBM J.* vol. 14, pp. 354-367, July 1970.
- [2] N.Q. Duc. "Line Coding Techniques for Baseband Digital Transmission," *Australian Telecom. Res.*, vol. 9, no. 1, 1975.
- [3] 김대영, "데이터 전송 선로 부호," 전자공학회 잡지, 12권 4 호, pp. 24-31, Aug. 1985.
- [4] A. Lender, "The duobinary technique for high-speed data transmission," *IEEE Trans. Comm. Electron.*, vol. 82, no. 5, pp. 214-218, May 1963.
- [5] E.R. Kretzmer, "Generalization of a technique for binary data transmission," *IEEE Trans. Comm. Technol.*, vol. COM-14, no. 2, pp. 67-68, Feb. 1966.
- [6] P. Kabal, S. Pasupathy, "Partial-Response Signaling," *IEEE Trans. Comm.*, vol. COM-23, pp. 921-934, Sept. 1975.
- [7] 김대영, 김재균, "A Condition for Stable Minimum Bandwidth Line Codes" *IEEE Trans. Comm.*, vol. COM-33, no. 2, pp. 152-157, Feb. 1985.

- [8] 김대영, 김재균, "New Runlength Limited and DC-free Line Code of Minimum Bandwidth," *IEE Electronics Letters*, vol. 18, no. 24, pp. 1040-1041., Nov. 25, 1982.
- [9] 백제인, 안정된 최소대역폭 전송을 위한 고리모양의 선로부호에 관한 연구, 박사학위 논문, 한국과학기술원, Feb. 1986.
- [10] 현상균, 최소대역폭 펄스코드의 성능 측정 연구, 석사학위 논문, 한국과학기술원, Feb. 1983.
- [11] 현상균, 김대영, 김재균, "NRS 시스템의 실험적 특성 연구," 한국통신학회 추계학술발표회 논문집, pp. 47 - 51, Oct. 1982.
- [12] 김대영, 최소대역폭 펄스코드에 관한 연구, 박사학위 논문, 한국과학기술원, Feb. 1983.
- [13] F.S. Hill, "PAM Pulse Generation Using Binary Transversal Filters," *IEEE Trans. Comm.* vol. COM-22, no. 7, pp. 904-912, July 1974.

감사의 글

본 논문을 위하여 많은 배려와 도움을 주신 한국전자통신연구소 광전송장치연구실 이영규실장님, 김대호 선임연구원을 비롯한 전 실원 여러분께 감사드립니다.