論 文

(255, 223) RS부호의 직렬부호기

正會員 曺 容 碩*, 正會員 李 晩 榮**

A Bit-serial Encoder of (255,223) Reed-Solomon code

Yong Suk CHO*, Man Young RHEE** *Regular Members*

要 約 본 논문에서는 유한체GF(2^m)상의 원소들을 표현하는 데 있어서 기존의 표준기지(standard basis) 표현 대신 쌍대기지(Dual basis)표현을 이용하여 GF(2^m)상의 승산을 직렬화시킨 Berlekamp의 직렬승산 알고리즘(Bit-Serial Multiplier Algorithm)을 연구 분석하고 이를 이용하여 직렬로 동작되는 Reed-Solomon부호의 직렬부호기를 설계하였다. 또한 오류정정능력이 16인(255, 223) Reed-Solomon부호를 택하여 이 직렬부호기를 TTL IC로 직접 장치화함으로써 이 부호기가 기존의 부호기보다 훨씬 간단한 Hardware로 장치화 될 수 있음을 보였다.

ABSTRACT This paper presents a method of designing a Bit-Serial Reed-Solomon encoder using Berlekamp's Bit-Serial Multiplier Algorithm and the implementation of the (255, 223) Bit-Serial Reed-Solomon encoder using TTL logics. It is shown from these results that this encoder require substantially less hardware than the conventional Reed-Solomon encoders.

I. 서 론

Reed-Solomon(이하 RS)부호는 GF(2^m)상의 2^m개의 심볼로 이루어지는 블럭 계열이며 각 심벌은 m개의 비트로 구성되어 있다. RS부호는 오류정정능력이 매우 우수할 뿐만 아니라 통신로상에서 발생하는 산발오류(random error)와 연집오류(burst error)를 동시에 정정할 수 있기 때문에 많은 디지탈 통신시스템과 컴퓨터, CD(Compact Disk), DAT(Digital Audio Tape) 등과 같은 데이타 저장시스템에 널리 사용되고 있다.

RS부호의 부호기는 일반적인 순회부호(cyclic codes)의 부호기와 마찬가지로 정보다항식(Information polynomial)을 생성다항식(generator polynomial)으로 나누는 나눗셈회로로 구성할 수 있다[1]. 그러나 RS부호기는 m 비트씩 병렬로 동작되기 때문에 m과 오류정정능력 t가 커지면 상당히 복잡하게 된다.

*, **漢陽大學校 大學院 電子通信工學科
Dept. of Electronic communication Engineering
Han-Yang University
論文番號 : 88-43 (接受 1988. 8. 24)

GF(2^m) 상의 각 원소들은 m개의 비트(binary digit)로 표현할 수 있다. 이와같이 각 원소들을 m개의 비트로 나타내는 방법에는 기존의 표준기지를 이용하는 방법, 정규기지(normal basis)를 이용하는 방법, 쌍대기지를 이용하는 방법등 여러가지가 있다[5]. (chap. 4)

최근 Berlekamp[2]는 쌍대기지를 이용하여 GF(2^m) 상의 승산을 직렬화 시킨 직렬 승산알고리즘을 제안하였다. 이 직렬승산알고리즘을 RS부호의 부호화에 적용시키면 직렬로 동작되는 RS부호기를 구성할 수 있는데 이 직렬부호기는 기존의 부호기에 비해 매우 간단하게 된다.

본 논문에서는 이 직렬승산알고리즘을 연구분석하고 이를 이용하여 직렬로 동작되는 RS부호기를 설계하였다. 또한 (255, 223)RS 부호를 택하여 이 부호기를 TTL IC로 직접 제작함으로써 이 부호기가 기존의 부호기보다 훨씬 간단한 Hardware로 장치화됨을 보였다.

Ⅱ. RS부호의 부호기

부호장이 n이고 정보장이 k인 (n, k) 순회부호에서 정보다항식을 d(x), 생성다항식을 g(x)라 할 때 부호다항식 c(x)는

$$c(x) = d(x)\ g(x) \tag{1}$$

가 된다. 여기에서 조직형 부호어는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c(x) = I(x) + P(x) = x^{n-k} d(x) + P(x) \tag{2}$$

순회부호의 일반적인 부호화는 d(x)와 g(x)로부터 검사다항식 P(x)를 찾는 것이다.

식(2)의 I(x)를 g(x)로 나누면

$$I(x) = q(x)\ g(x) + R(x) \tag{3}$$

가 되는데 여기에서 R(x)=−P(x)라 놓고 식(2)에 대입하면

$$c(x) = q(x)\ g(x) - P(x) + P(x) = q(x)\ g(x) \tag{4}$$

가 되어 c(x)가 g(x)의 곱으로 나타나므로 식(1)을 만족하게 된다. 그러므로 검사다항식 P(x)는 I(x)를 g(x)로 나눈 나머지 R(x)로 부터 구할 수 있다.

RS부호의 생성다항식 g(x)는 다음과 같이 정의된다[3].

$$g(x) = \prod_{i=0}^{2t-1} (x + \gamma^{\ell_0 + i}) = \sum_{i=0}^{2t} g_i x^i \tag{5}$$

여기에서 ℓ_0는 음이 아닌 임의의 정수이고 γ

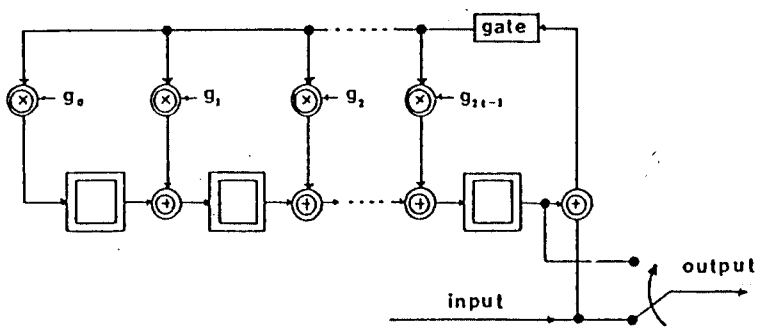


그림 1 일반적인 RS 부호기.

는 GF(2 m) 상의 원시원이다. 이 g(x)로 식(3)을 이용하여 일반적인 RS부호의 부호기를 구성하면 그림 1과 같다. 그림 1에서 모든 선은 m개의 선이고 ⊕와 ⊗는 각각 GF(2 m) 상에서의 덧셈기와 곱셈기를, ▣는 m개의 flip-flop을 나타낸다.

Ⅲ. 쌍대지기 (Dual Basis)

GF(p m) 상의 임의의 한 원소 β에 대한 Trace는 다음과 같이 정의된다[4].

$$Tr(\beta)=\sum_{k=0}^{m-1}\beta^{p^k} \tag{6}$$

여기에서 p는 솟수(Prime humber) 이며 m 은 임의의 양의 정수이다.
이 Trace는 다음과 같은 성질을 가지고 있다.

(1) $[Tr(\beta)]^p=Tr(\beta)$, 즉 $Tr(\beta)$ 는 GF(p) 상의 원소이다.
(2) $Tr(\beta+\gamma)=Tr(\beta)+Tr(\gamma)$
(3) $Tr(C\beta)=C\ Tr(\beta)$, $C\in GF(p)$
(4) $Tr(1)=m(\mathrm{mod}\ p)$

〔증명〕

(1) $[Tr(\beta)]^p=\left[\sum_{k=0}^{m-1}\beta^{p^k}\right]^p=[\beta+\beta^p\beta^{p^2}+\cdots+\beta^{p^{m-1}}]^p$

$=[\beta^p+\beta^{p^2}+\beta^{p^3}+\cdots\cdots\beta^{p^{m-1}}+\beta^{p^m}]$

$=[\beta+\beta^p+\beta^{p^2}+\cdots\cdots+\beta^{p^{m-1}}]\ (\beta^{p^m}=\beta)$

$=Tr(\beta)$

(2) $Tr(\beta+\gamma)=\sum_{k=0}^{m-1}(\beta+\gamma)^{p^k}=\sum_{k=0}^{m-1}(\beta^{p^k}+\gamma^{c^k})=\sum_{k=0}^{m-1}\beta^{p^k}+\sum_{k=0}^{m-1}\gamma^{p^k}=Tr(\beta)+Tr(\gamma)$

(3) $Tr(C\beta)=\sum_{k=0}^{m-1}(C\beta)^{p^k}=\sum_{k=0}^{m-1}C^{p^k}\beta^{p^k}$

$=\sum_{k=0}^{m-1}C\beta^{p^k}=C\sum_{k=0}^{m-1}\beta^{p^k}=Tr(\beta)$

$(C^{p^k}=C)$

(4) $Tr(1)=\sum_{k=0}^{m-1}(1)^{p^k}=\sum_{k=0}^{m-1}(1)=m(\mathrm{mod}\ p)$

GF(p m)상의 m개의 선형독립(linerly independent) 인 원소들의 집합을 GF(p m) 의 기지(basis) 라 하는 데 두개의 기지 $\{\mu_j\}$와 $\{\lambda_k\}$가 다음과 같은 조건을 만족할 때 이 두 기지들을 각각의 쌍대기지라 한다.

$$Tr(\mu_j\lambda_k)=\begin{cases}1, & j=k\\ 0, & j\neq k\end{cases} \tag{7}$$

α를 GF(p)상의 차수가 m인 기약다항식(irreducible polynomial)의 근이라 할 때 $\{\alpha^k\}$, $0\leq k\leq m-1$는 GF (p m)의 기지이다. 이 기지를 GF(p m)의 표준기지(standard basis)라 한다.

GF(p m)상의 임의의 한 원소 Z를 쌍대기지로 표현하면 다음과 같다.

$$Z=z_0\lambda_0+z_1\lambda_1+\cdots\cdots+z_{m-1}\lambda_{m-1}$$

$$=\sum_{k=0}^{m-1}z_k\lambda_k,\quad z_k\in GF(p),\quad 0\leq k\leq m-1 \tag{8}$$

식(8)의 양변에 α^k를 곱하여 Trace를 취하면

$$Tr(Z\alpha^k)=Tr\left(\alpha^k\sum_{i=0}^{m-1}z_i\lambda_i\right)=\sum_{i=0}^{m-1}Tr(z_i\lambda_i\alpha^k)$$

$$=\sum_{i=0}^{m-1}z_iTr(\lambda_i\alpha^k)=z_k,\quad 0\leq k\leq m-1 \tag{9}$$

가 된다. 즉 GF(p m) 상의 임의의 원소 Z를 쌍대기지로 표현할 때 Z의 k번째 요소 z_k는 $Tr(Z\alpha^k)$가 된다.

Ⅳ. Berlekamp의 직렬승산 알고리즘

$GF(2^m)$ 상의 임의의 한 원소 Z를 쌍대기지로 표현하면

$$Z = z_0\lambda_0 + z_1\lambda_1 + \cdots\cdots + z_{m-1}\lambda_{m-1} \quad (10)$$

이고 여기에서 z_k, $0 \leqq k \leqq m-1$ 는 식(9)에 의하여

$$z_k = Tr(Z\alpha^k) \quad (11)$$

가 된다. 이 Z에 α를 곱한 $Z\alpha$의 쌍대기지 표현을

$$Z\alpha = z_0'\lambda_0 + z_1'\lambda_1 + \cdots\cdots + z_{m-1}'\lambda_{m-1} \quad (12)$$

이라 할 때 z_k', $0 \leqq k \leqq m-1$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$z_k' = Tr(Z\alpha\cdot\alpha^k) = Tr(Z\alpha^{k+1}) = z_{k+1}$$

$$\begin{cases} z_k' = z_{k+1}, & 0 \leqq k \leqq m-2 \\ z_{m-1}' = Tr(Z\alpha^m) \end{cases} \quad (13)$$

$GF(2^m)$ 상에서 이미 알고 있는 상수 G와 임의의 한 원소 Z를 곱하는 경우를 생각해 보자. G를 표준기지로 나타내면

$$G = G_0 + G_1\alpha + G_2\alpha^2 + \cdots\cdots + G_{m-1}\alpha^{m-1} \quad (14)$$

가 되고 $Y = G\cdot Z$라 할 때 이 Y를 쌍대기지로 표현하면 다음과 같다.

$$Y = G\cdot Z = \sum_{k=0}^{m-1} y_k\lambda_k = \sum_{k=0}^{m-1} Tr(G\cdot Z\alpha^k)\lambda_k \quad (15)$$

식(10)~(14)를 이용하여 식(15)를 풀어 쓰면

$$y_0 = Tr(G\cdot Z) = G_0z_0 + G_1z_1 + \cdots\cdots + G_{m-1}z_{m-1} \quad (16)$$

$$y_1 = Tr(G\cdot Z\alpha) = G_0z_0' + G_1z_1' + \cdots\cdots G_{m-1}z_{m-1}'$$
$$= G_0z_1 + G_1z_2 + \cdots\cdots G_{m-1}Tr(Z\alpha^m) \quad (17)$$

$$\vdots$$

$$y_{m-1} = Tr(G\ Z\alpha^{m-1}) \quad (18)$$

가 된다.

즉 G와 Z의 곱 Y의 요소들은 식(16)의 $Tr(G\ Z)$를 구한 다음

$$\begin{cases} z_k \leftarrow z_{k+1}, & 0 \leqq k \leqq m-2 \\ z_{m-1} \leftarrow Tr(Z\alpha^m) \end{cases} \quad (19)$$

을 대입해 나가면 차례로 얻을 수 있다. 그러므로 두 원소의 곱 $Y = GZ$는 직렬화 된다.

식(19)에서 α^m을

$$\alpha^m = a_0 + a_1\alpha + a_2\alpha^2 + \cdots\cdots + a_{m-1}\alpha^{m-1} \quad (20)$$

이라 할 때 $Tr(Z\alpha^m)$은

$$Tr(Z\alpha^m) = z_0a_0 + z_1a_1 + \cdots\cdots + z_{m-1}a_{m-1} \quad (21)$$

가 된다. 위 식들을 이용하여 직렬승산기를 구성하면 그림 2와 같다.

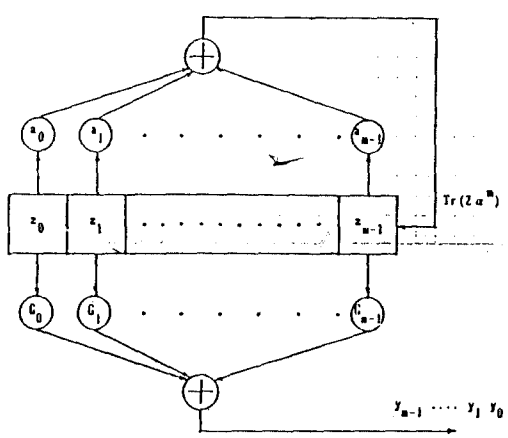


그림 2 직렬승산기.

그림 2 의 직렬승산기는 처음 상태에서 $Y=GZ$ 의 첫번째 계수 $y_0=Tr(GZ)$가 출력되며 Z 레지스터를 왼쪽으로 한번 치환(shift)시키면 Y의 두번째 계수 $y_1=Tr(GZ\alpha)$가, …, m−1 번 치환시키면 Y의 m번째 계수 $y_{m-1}=Tr(GZ\alpha^{m-1})$가 출력되므로 Y의 계수들을 차례로 얻을 수 있어 유한체 내에서의 곱셈 $Y=GZ$는 직렬화 된다. 다음 단계에서는 Z 레지스터에 새로운 유한체 원소가 병렬 입력되어야 한다.

V. RS 부호의 직렬부호기

그림 1 과 같은 RS 부호기에서 입력을 쌍대기저로 나타내고 $g(x)$ 의 계수 g_i 와 입력을 곱하는 승산기들을 그림 2 와 같은 직렬 승산기로 바꾸면 그림 3 과 같은 직렬부호기를 구성할 수 있다. 그림 3 에서 Trace 계산회로는

$$\begin{aligned} T_0 &= Tr(g_0 Z) \\ T_1 &= Tr(g_1 Z) \\ &\vdots \\ T_{2t} &= Tr(g_{2t} Z) \\ T_{\gamma} &= Tr(\alpha^m Z) \end{aligned} \tag{22}$$

를 계산하는 회로이며 이것들은 Z 레지스터 내용들의 EX−OR 연산으로 구성된다. 초기상태에서 $T_0, T_1, \cdots\cdots, T_{2t}$에는 입력 Z 와 생성다항식의 계수 $g_0, g_1, \cdots\cdots, g_{2t}$ 등을 곱한 $Zg_0, Zg_1, \cdots\cdots, Zg_{2t}$의 첫번째 비트가 나오고 Z 레지스터를 한번 치환(shift) 시키면 두번째 비트가, m−1 번 치환시키면 마지막 비트가 나오게 된다. 그 다음 단계에서는 Z 레지스터에 새로운 유한체 원소(field element)가 입력 레지스터로부터 병렬 입력되어야 한다. 이 직렬부호기는 그림 1 의 부호기와 비교해 볼 때 모든 선은 단선이며 ⊕은 2 입력 EX−OR이므로 훨씬 간단하게 된다.

VI. (255, 223) RS 부호의 직렬부호기

t 개 이하의 모든 오류를 정정할 수 있는 RS 부호는 다음과 같은 매개변수(parameter) 들을 갖는다[1].

심볼단위의 부호장 : $n=2^m-1$

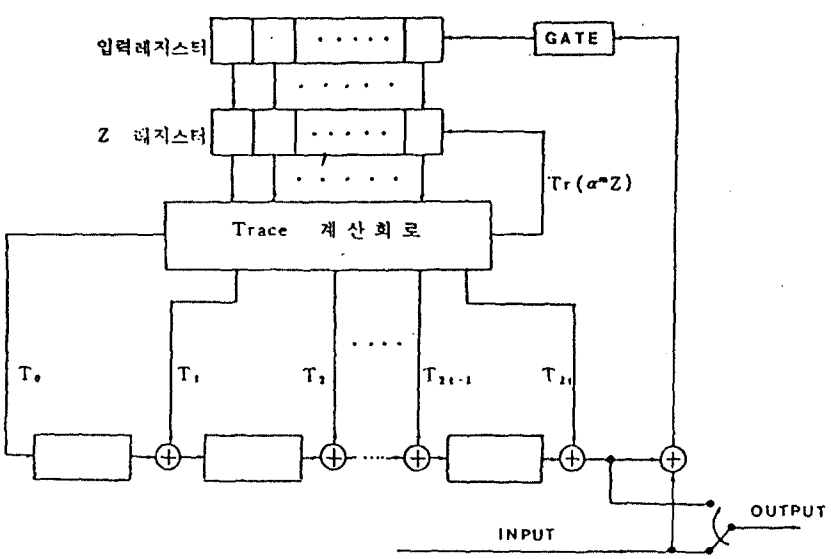


그림 3 RS부호의 직렬부호기.

정보심볼의 길이 : $k=n-2t$
검사심볼의 길이 : $n-k=2t$
최소거리 : $d_{min}=2_{t+1}$

그러므로 (255, 223) RS부호는 $m=8$ 이며 $t=16$인 RS부호이다.

α를 원시다항식 $p(x)=1+x+x^7+x^8$의 근이라 할 때 $GF(2^m)$ 상의 0원(zero element)이아닌 임의의 한 원소 Z는 α의 멱(power)으로 나타낼 수 있다.

$$Z=\alpha^j, \quad 0 \leq j \leq 254 \tag{23}$$

또한 Z를 표준기지 $\{\alpha^k\}$, $0 \leq k \leq 7$로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$Z=u_0+u_1\alpha+u_2\alpha^2+u_3\alpha^3+u_4\alpha^4+u_5\alpha^5+u_6\alpha^6+u_7\alpha^7 \tag{24}$$

여기에서 u_k, $0 \leq k \leq 7$는 GF(2) 상의 원소이다.

위식의 양변에 Trace를 취하면

$$\begin{aligned}Tr(Z)&=Tr(u_0+u_1\alpha+u_2\alpha^2+u_3\alpha^3+u_4\alpha^4+u_5\alpha^5+u_6\alpha^6+u_7\alpha^7)\\&=u_0Tr(1)+u_1Tr(\alpha)+u_2Tr(\alpha^2)+u_3Tr(\alpha^3)+u_4Tr(\alpha^4)+u_5Tr(\alpha^5)+u_6Tr(\alpha^6)+u_7Tr(\alpha^7)\end{aligned} \tag{25}$$

가 된다. 여기에서

$$Tr(1)=8 \pmod 2 = 0$$

$$Tr(\alpha)=Tr(\alpha^2)=Tr(\alpha^4)$$

$$=\alpha+\alpha^2+\alpha^4+\alpha^8+\alpha^{16}+\alpha^{32}+\alpha^{64}+\alpha^{128}$$

$$=1$$

$$Tr(\alpha^3)=Tr(\alpha^6)$$

$$=\alpha^3+\alpha^6+\alpha^{12}+\alpha^{24}+\alpha^{48}+\alpha^{96}+\alpha^{192}+\alpha^{129}=1$$

$$Tr(\alpha^5)=\alpha^5+\alpha^{10}+\alpha^{20}+\alpha^{40}+\alpha^{80}+\alpha^{160}+\alpha^{65}+\alpha^{130}=1$$

$$Tr(\alpha^7)=\alpha^7+\alpha^{14}+\alpha^{28}+\alpha^{56}+\alpha^{112}+\alpha^{224}+\alpha^{193}+\alpha^{131}=1$$

이므로 식(25)의 $Tr(Z)$는 다음과 같이 된다.

$$Tr(Z)=u_1+u_2+u_3+u_4+u_5+u_6+u_7 \tag{26}$$

즉 표준기지로 $GF(2^8)$을 구성한 다음 각 원소들의 두번째 비트부터 마지막 비트까지 모두를 2원합 한 값이 그 원소의 Trace값이 된다.

식(23)과 같이 $Z=\alpha^j$, $0 \leq j \leq 254$로 나타내면

$$z_k=Tr(Z\alpha^k)=Tr(\alpha^j\alpha^k)=Tr(\alpha^{j+k}), \quad 0 \leq k \leq 7 \tag{27}$$

가 되므로 $GF(2^8)$ 상의 임의의 한 원소 Z의 쌍대기지 표현은 그 원소의 Trace값에서부터 올림차순으로 8개의 Trace값을 취하면 구할 수 있다.

예를 들어 α^0의 쌍대기지 표현은 α^0의 Trace 값에서부터 α^7의 Trace 값까지를 차례로 취한 것이 된다.

$$[Tr(\alpha^0), Tr(\alpha^1), Tr(\alpha^2), Tr(\alpha^3), Tr(\alpha^4), Tr(\alpha^5), Tr(\alpha^6), Tr(\alpha^7)]$$

$$=[0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1]$$

이상과 같은 방법으로 $GF(2^8)$의 각 원소들에

대한 표준기지 표현과 쌍대기지 표현을 구해보면 쌍대기지 $\{\lambda_0, \lambda_1, \cdots\cdots, \lambda_7\}$ 는 $\{\alpha^{99}, \alpha^{197}, \alpha^{203}, \alpha^{202}, \alpha^{201}, \alpha^{200}, \alpha^{199}, \alpha^{100}\}$ 가 됨을 알 수 있다.

식(5)에서 $r=\alpha^{11}$, $\ell_0=112$, $t=16$이라 하면 (255, 223) RS부호의 생성다항식 $g(x)$의 계수들은 다음과 같이 된다.

$$g_0=g_{32}=1,\quad g_1=g_{31}=\alpha^{249},\quad g_2=g_{30}=\alpha^{59}$$
$$g_3=g_{29}=\alpha^{66},\quad g_4=g_{28}=\alpha^{4},\quad g_5=g_{27}=\alpha^{43}$$
$$g_6=g_{26}=\alpha^{126},\quad g_7=g_{25}=\alpha^{251},\quad g_8=g_{24}=\alpha^{97}$$
$$g_9=g_{23}=\alpha^{30},\quad g_{10}=g_{22}=\alpha^{3},\quad g_{11}=g_{21}=\alpha^{213}$$
$$g_{12}=g_{20}=\alpha^{50},\quad g_{13}=g_{19}=\alpha^{66},\quad g_{14}=g_{18}=\alpha^{170}$$
$$g_{15}=g_{17}=\alpha^{5},\quad g_{16}=\alpha^{24} \tag{28}$$

이 g_i들을 이용하여 식(22)의 Trace들을 구해보면 다음과 같다.

$$T_0=Tr(g_0Z)=Tr(\alpha^0Z)=z_0$$

$$T_1=Tr(g_1Z)=Tr(\alpha^{249}Z)$$
$$=Tr((1+\alpha+\alpha^3+\alpha^4+\alpha^6)Z)=z_0+z_1+z_3+z_4+z_6 \tag{29}$$
$$\vdots$$
$$T_{16}=Tr(g_{16}Z)=Tr(\alpha^{24}Z)$$
$$=Tr((1+\alpha^4+\alpha^5+\alpha^6)Z)=z_0+z_4+z_5+z_6$$
$$T_f=Tr(\alpha^mZ)=Tr(\alpha^8Z)$$
$$=Tr((1+\alpha+\alpha^2+\alpha^7)Z)=z_0+z_1+z_2+z_7$$

위식을 행렬로 표현하면 다음과 같다 된다.

$$\begin{bmatrix}T_0\\T_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0&0&0\\1&1&0&1&1&0&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}z_0\\z_1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}T_2\\T_3\\T_4\\T_5\\T_6\\T_7\\T_8\\T_9\\T_{10}\\T_{11}\\T_{12}\\T_{13}\\T_{14}\\T_{15}\\T_{16}\\T_f\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&1&1&1&1&1&1&0\\0&1&1&0&1&0&1&0\\0&0&0&0&1&0&0&0\\0&1&1&1&1&0&0&0\\1&0&1&1&0&0&0&0\\1&1&0&1&0&1&1&1\\1&0&0&0&0&1&1&0\\1&0&1&0&0&1&0&1\\0&0&0&1&0&0&0&0\\0&1&0&1&0&1&0&0\\0&1&1&0&1&1&0&0\\0&1&1&0&1&0&1&0\\1&1&0&1&0&1&0&1\\0&0&0&0&0&1&0&0\\1&0&0&0&1&1&1&0\\1&1&1&0&0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}z_2\\z_3\\z_4\\z_5\\z_6\\z_7\end{bmatrix} \tag{30}$$

그림 4에 이상의 결과를 이용하여 장치 화한 (255, 223) RS부호의 직렬부호기를 사진으로 나타내었다. 본 논문의 장치화에서는 약 62개의 TTL IC가 소요되었으며 2M bps까지 안정하게 동작하였다.

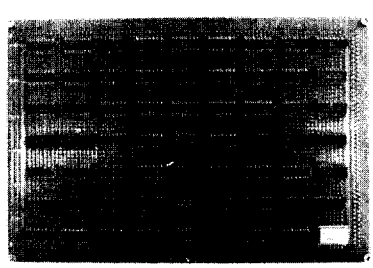


그림 4 (255, 223) RS부호의 직렬부호기.

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 Berlekamp의 직렬승산 알고리즘을 연구 분석하고 이를 이용하여 RS 부호의 직렬부호기를 설계하였다. 또한 (255, 223) RS부호의 직렬부호기를 TTL IC로 직접 장치화 하였다.

이 직렬부호기는 기존의 부호기와 비교할 때 Hardware적으로 매우 간단하며 그 정도는 부호장과 오류정정능력이 커질수록 현저하게 된다. 또한 이 직렬부호기는 규칙적이고 간단하기 때문에 VLSI화 할 경우에도 매우 큰 잇점이 될 것이다.

參 考 文 獻

1. 이만영, 부호이론, 희중당. 1984.
2. E.R. Berlekamp, "Bit-Serial Reed-Solomon Encoders", IEEE Trans. Inform. Theory, vol.IT-28, No.6, pp.869-874, Nov. 1982.
3. W.W. Peterson and E.J. Weldon Jr., Error-correcting Codes, 2nd ed., MIT Press, Cambridge, Mass., 1972.
4. P.J. MacWilliams and N.J.A. Sloan, The Theory of Error Correcting Codes, Amsterdam, North-Holland, 1978.
5. E.R. Berlekamp, Algebraic Coding Theory, McGraw-Hill, 1968.

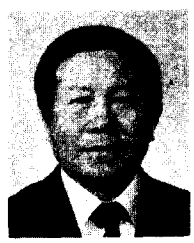
曺 容 碩(Cho Yong Suk) 正會員

1960年12月 2 日生

1986年：漢陽大學校 電子通信工學科 卒業

1988年：漢陽大學校 大學院 電子通信科 卒業

1988年～現在：漢陽大學校 大學院 電子通信科 博士課程



李 曉 榮(Man Young RHEE) 正會員

1924年11月30日生

- 서울大 電氣工學科 卒業
- 美國콜로라도대학 工學博士
- 美國버지니아工大 教授
- 國防科學研究所 副所長
- 韓國電子通信 社長
- 三星半導体通信 社長
- 漢陽大學術院長, 副總長
- 現在, 漢陽大 電子通信工學科 教授