

技術解説

Sonar

정 세 련*

1. 서 론

원래 Sonar(Sound Navigation and Ranging)라는 말은 수중음향학(hydroacoustics)에서 관측 혹은 정보 전달을 위해 수중음향 에너지를 사용하는 계통의 실제 응용면, 동작이론 설계를 취급하는데 쓰여왔다. 실용상, Sonar는 다만 이러한 계통 또는 기구를 가르키는데 쓰여 왔으며, 더욱이 물속의 잠수함을 탐지하는데 사용되는 군장비만을 나타내는데 쓰여졌다. 어군탐지기와의 같은 장비들은 항상 Sonar라고 부르지는 않는다. 그러므로 여기서는 협의적인 면에서 Sonar라는 말을 사용하겠다.

Sonar는 능동 Sonar와 수동 Sonar의 두형으로 분류할 수 있다. 능동 Sonar란 Sonar장비들로부터 방사된 信號들에 對해서 2次音源(secondary sound source)과 같은 역할을하는 목표물로부터 반향되는 信號를 탐지함으로써 목표물을 탐지하는 것을 말하고, 수동 Sonar란 목표물 즉 일차음원에 依해서 방사된 音波들을 수신함으로써 목표물들을 탐지하는 것을 말한다.

Sonar의 탐지 능력을 고려할때 가장 중요한 변수는 탐지 범위이다. 물론 Sonar System을 설계하는데 가장 중요한 것은 목표물 위치가 정확하게 주어졌을때의 시간이다. 그러나 다른 능력들을 희생시키지 않는한 Sonar는 가능한 멀리 떨어진 목표물도 탐지할 수 있는 능력이 요구된다. 이런 관점에서 여기서는 Sonar 계통의 여러가지 變數와 탐지 범위의 관계를 기술한후, 현대 Sonar의 큰 문제인 탐지 능력 향상을 위한

신호처리 과정에 관심의 초점을 두고져 한다.

2. Sonar 계통 變數와 탐지범위

Sonar 계통 變數들이 탐지범위와 어떤 관계가 있는지 또 이 變數의 變化가 어떤 영향을 어느정도 미치는가를 우선 먼저 알아야겠다. 합리적으로 설계 노력을 분할함으로 요구되는 탐지 범위를 확정하기 위해서나 Sonar배경과 이의 문제점들을 이해하기 위해서는 완전한 system이라고 생각하는點이 중요하다. 여러가지 系統變數들과 탐지범위는 Sonar 방정식이라 부르는 式에 연관된다. 비록 일반적으로 사용하는 Sonar 방정식은 조건들을 이상화하므로 때때로 비현실적인 경우도 있지만 이 방정식은 이해하기가 쉽다. 그러므로 우리는 Sonar의 여러가지 원인과 결과 관계를 명백히 해주는 해석적인 Sonar 방정식을 사용한다.

(a) 능동 Sonar 방정식

음의 진로의 굵음을 생각하지않는 Sonar 방정식을 사용하면 아래와 같다(그림 1). 여기서 다음과 같은 기호를 사용한다.

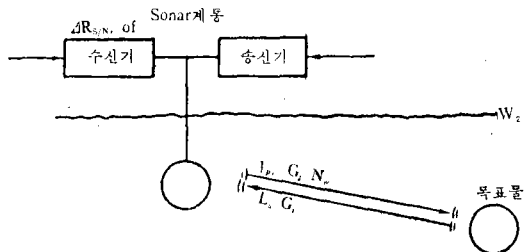


그림 1. 능동 탐지 다이어그램

* 준회원 경희대학교 전자공학과

- N_w ; 허용 전달 손실(dB)
- L_p ; 송신 전력 수준(dB)($0dB=1\mu b-yd$)
- G_s ; 송신 지향성이득(dB)
- T_s ; 목표물 강도(dB)
- L_n' ; 잡음 스펙트럼수준(dB)
- Δf ; 등가 수신대역폭(c/s)
- G_r ; 수신 지향성이득(dB)

$\Delta R_{S/N}$; 인정 차동장차(dB)

반향정도 L_e (dB)를 수신잡음정도를 L_n (dB)로 표시하면 탐지 범위를 표시하는 조건은

$$L_e - L_n \geq \Delta R_{S/N} \quad (1)$$

이다.

그리고 등식기호는 탐지 한계를 표시하는 조건이 된다. 上記기호를 사용해서 반향정도 L_e 와 수신잡음정도 L_n 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L_e = (L_p + G_s) - N_w + T_s - N_n \quad (2)$$

$$L_n = L_n' + 10 \log \Delta f - G_r \quad (3)$$

式(1), (2), (3)을 조작하여 아래와 같은형의 Sonar 방정식을 얻을 수 있다.

$$2N_w = (L_p + G_s) + T_s - (L_n' + 10 \log \Delta f - G_r) - (\Delta R_{S/N}) \quad (4)$$

전달 손실 N_w 은 다음과 같이 얻어진다.

$$N_w = 20 \log R + \alpha(f)R + 60 \quad (5)$$

여기서 P 는 거리(kyd)이고, f 는 주파수(KHz)이다. 式(4)은 Sonar 매개 變數들이 주어질때 반향을 인정하는데 對한 허용 전달로 주어졌고, 반면 방정식 (5)는 거리에 對한 전달 손실로 주어졌고, 그래서 式(4)와 (5)에서 Sonar 變數와 탐지범위 사이의 관계식을 求할 수 있다. 式(5)에서 右邊 제1항은 음파의 구형 산란에 의한 손실이며, 제2항은 매개체내의 흡수와 확산과 같은 요소에 의한 손실이다.

그러나 계수 $\alpha(f)$ 은 이론상으로 구하기 곤란하므로 실제적으로는 해양에서 얻어지는 실험치로 주어진다. 일반적으로 현재 널리 이용되는 실험치는 다음과 같다.

$$\alpha(f)_1 = 0.2f + 0.00015f^2 \approx 0.2f \quad (6)$$

Region of Several tens of KC

$$\alpha(f)_2 = 0.033f^{3/2} \quad (7)$$

Region of Several KC

$$\alpha(f)_3 = 0.01f^2$$

Region below the above (8)

(b) 수동 Sonar 방정식

능동 Sonar 경우와 같이 그림 2로부터 수동 Sonar 방정식은 式(9)에서 보는바와 같다. 여기서 사용하는 다음과 같은 기호를 사용한다.

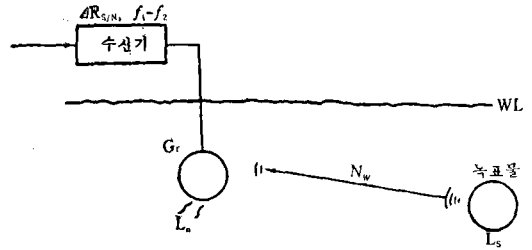


그림 2. 수동 탐지도

- N_w ; 허용 전달손실(dB)
- L_s ; 목표물 음수준($0dB=1\mu b-yd$)
- G_r ; 수신 지향성이득(dB)

$\Delta R_{S/N}$; 인식 差(dB)

$$N_w = L_s - L_n + G_r - \Delta R_{S/N} \quad (9)$$

이 경우에 엄밀히 말하면 式(9)는 오직 단일 주파수에 대해서만 성립할 것이다.

그러나 상대적으로 좁은 주파수대에서는 평균 단일 주파수에 對해서 풀 수 있으며, 방정식은 실제적인 관점에서 효과적이다.

(c) Sonar의 Figure of Merit

式(4)와 (9)에서 탐지 범위와 관계되는 變數들이 확실할때 아래와같은 表를 얻는다. 이 表에

분	류	능 동 Sonar	수 동 Sonar
(1) Sonar 설계에 關係되는 변수		$L_p, G_s, G_r, f, \Delta f, \Delta R_{S/N}$	$G_r, f, \Delta f, \Delta R_{S/N}$
(2) Sonar가 장치될 때의 설계에 關係된 변수		L_n'	L_n
(3) 목표물에 의해서 결정되는 변수		$T_s, (\Delta f)$	L_s
(4) 물리적 현상에 의해서 결정되는 변수		$20 \log R$	$\alpha(f)R$

서 (3), (4)의 분류는 목표물 또는 자연적인 현상에 의존되며 인위적으로 變化하기 어려운 Sonar 설계에 필수조건이다. (1)과 (2)분류에 있어

서는 變數는 Sonar 특질, 배 구조나 설치 방법에 속하며, 직접적으로 설계에 관련되어진다. 式(4)에서, $(L_s + G_r)$ 은 방사정도(sending level) L_s 이고, $(L_n' + 10 \log df)$ 는 入力 잡음정도(input noise level) L_n 이다. 그래서 이 기호에 依해서 우리는 아래식을 얻을 수 있다.

$$F.M = L_s - L_n G_r - \Delta R_{S/N} (= 2N_w - T_s) \quad (10)$$

(式-10)의 右邊에 대한 값은 L_s, L_n, G_r 과 $R_{S/N}$ (직접적으로 Sonar 설계에 依해서 결정됨)을 조절함과 L_n (Sonar가 설치되어지는 배의 특성에 의해서 결정됨)은 F. M (The Sonars Figure of Merit)라고 불리워져 왔다. 이것은 Sonar의 탐지 능력 측정 수단이다.

수동 Sonar의 경우, 정확하게 똑같은 방법과 형을 사용하여 다음과 같이 Figure of Merit을 정의할 수 있다.

$$F.M = L_s - L_n + G_r - \Delta R_{S/N} (= N_w) \quad (11)$$

式(11)을 보면 수동 Sonar에 대한 F. M은 허용 전달 손실 N_w 와 같다. Sonar를 설계하는데 필요한 F. M을 각항에 합리적으로 어떻게 분배할 것인가는 式(10), 式(11)을 기초로해서 조사 검토해야 한다. 또한 탐지 능력의 개량을 주의해서 sending level L_s 와 지향성이득 G_r 의 증가와 인식차(recognition differential) $\Delta R_{S/N}$ 의 감소에 관심을 두어야하고, 그래야만 모든 경우의 F. M이 증가된다.

이 Sonar의 F. M의 개량에 관련된 사항을 생각해 보자.

(1) 비록 sending level L_s 는 매개체의 진공부에 의해 부가된 음향전력 한계치로 인해 거의 한계치에 가깝고 지향성이득 G_r , 또한 Sonar가 설치되는 배의 구조에 依한 크기의 제한성때문에 한계점에 가까울지라도, recognition differential $\Delta R_{S/N}$ 에 관한 새로운 信號처리 기술의 적용가능성때문에 더욱 연구하여 개량될 여지가 있다.

(2) 목표와 탐지의 동시분류; 즉 목표의 분류는 중요하게 요구되어져왔다.

많은 연구가 S/N을 개선을 기본으로한 信號의 양을 다루는 (1)항에 집중되어져 왔고, (2)항에 관련된 信號처리계통이 양질의 信號를 얻기위해 개발되고 있다. 그러므로 이것의 개요를 다음

절에서 취급할 것이다.

3. Sonar에서의 信號처리

(a) 信號 처리법의 최근 경향

근래의 信號 처리 이론과 응용은 통신 계통을 위한 전파회로 이론형태로 통신기술의 발달과 더불어 진전되어졌다. 초기 단계에는 필터가 L_c 소자 혹은 2단자 회로 단위를 사용한 4단자 회로로 구성된 함수 이론에 따라 설계되었다. 그후 대역폭에 감소하는데 중점을 두었다. 그후에 이런 방법으로 단순히 필터의 대역폭을 매우 좁게한다는 개념을 떠나 아주 정밀한 복합 信號에 적당한 필터가 개발되었다. 현재 소위 말하는 matched filer 또는 그외에 상관함수를 근거로한 계산방법이 이용되고 있다. 따라서 정보 이론의 개발과 더불어 확률적인 처리 개념이 채택되었고 가치결정(Value Dicison)과 추측(Estimation)을 이용한 통계학적인 처리방법이 현재 진행되고 있다. 더군다나 특히 능동 Sonar에 있어선 단일 펄스를 사용한 제레식의 信號 전송 방법에서 부호화된 信號를 이용하는 Data 전송이론 쪽으로 발전되고 있다.(表 1)은 원리별로 분리한 信號처리계통이다.(表 1)의 계통난은 원리에 依한 4個의 主부류로써 信號 처리계통이 분류된다.

다음난은 이 항의 구체적인 방법에 의해서 이 계통들이 구별된다. 범위난은 시간영역처리와 주파수영역 처리사이의 분류이고 상대적으로 T와 F에 依해서 表示된다.

응용난은 능동 Sonar 또는 수동 Sonar로써 주 응용을 보여주고 A와 P로써 表示한다.

(表 1)에 있는 계통의 현 상태를 고려하는한 단일 전통적으로 사용하던 적분 계통을 제외한다면 PCC (Polarity Coincidence Correlator)와 DIMUS 계통이 응용단계에 도달되었다. 이것들은 뒤에 설명하겠지만 각각 장점을 가졌는데 Sonar에서 信號 처리상 난점을 극복하고 있다. 다른 계통들은 아직 연구내지는 개발 단계에 있다. 그러므로 다음 절에서는 능동 Sonar와 수동 Sonar에 對한 信號 처리의 例를들어 PCC와 DIMUS의 개요를 설명하겠다.

表 1. 신호 처리 계통 분류표

계통	형	영역	응용
1	탐지	線形구적법지수	T A
	양적분		T A
2	상관관계	자기상관	T A.P
		상호상관	T A
		정합여파기	F A
	PCC	chirp 계통	F A
		자기상관	T A.P
	상호상관	T A.P	
3	영역치 결정		A.P
	평가 기준		A.P
4	개신 여파기		A.P
	DIMUS		P

(b) 능동 Sonar 信號 처리의 例

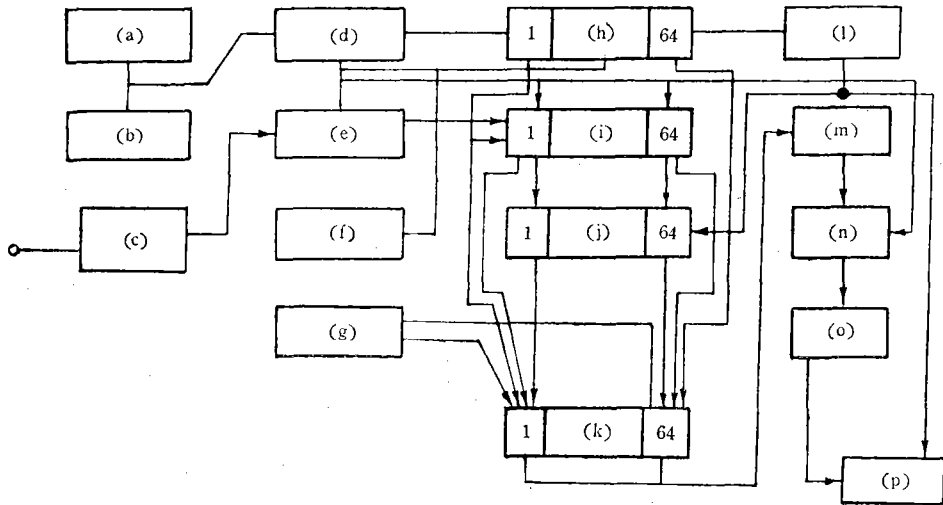
PCC 제목이 表示하는 바와같이 PCC는 入力 sampling time train의 정보 진폭을 생략하고 다만 극성에 對해서 상관적인 해석을 행하는 계통이다. 보편적 상관관계와 비교할때 入力극성만을 고려하고 진폭 정보를 생략한 결과는 효율에서 약 2dB(2/π)의 손실이 있다. 한편 이 계통은 극성만을 고려하고 있다는 근성 때문에 불규칙한 入力 信號에 대해서 효율이 저하되지 않는 장점

을 가졌다.

더욱이 실제 기구에 PCC를 적용하면 入力정보가 on-off binary digetal 값으로 취급되므로 회로가 간단해지고 신뢰도가 양호한 잇점이 또한 있다. 그림 3은 shift register를 가진 PCC의 블록도표이다. 그림 3에서 Sonar의 수신 출력은 선형 검파이거나, 헤트로다인 검파이거나, 해석하기 적당한 주파수 범위로 入力처리장치에 의해서 변환된다.

이 출력은 각 sample 點에서 극성에 따라 1 또는 0의 time train으로 변환되어 shift register로 공급된다.

shift register에서 信號는 入力 time train과 동일순서로 shift pulse의 매 싸이클마다 오른쪽으로 shift된다. 여기서 자기상관인 경우 shift register의 내용은 register의 대응 level로 전환되어 한 상관 cycle의 주기 동안 머물러 있다 상호상관인 경우 필요한 상관파형은 n program key의 train에 의해서 결정된다. 이들의 함은 shift register와 AND 회로에 대응하는 각단의 내용으로부터 shift 펄스의 각 cycle마다 얻어지고 scanner에 의해서 섀인된다. sweep 출력은 계산기에 의해서 해석되며 그리고 디지털-아날로그 변환을 한후에 회로의 Y軸에 나타난다. 이 동작은 각 shift 펄스마다 반복된다. 다음 식은



- (a) 1/21 주파수 분류기
- (b) clock 펄스발진기
- (c) 入力信號처리기
- (d) 1/2 주파수분류기
- (e) 극성 Sampler
- (f) 시호 펄스발진기
- (g) 프로그램 key
- (h) 링 계산기
- (i) Shift Register
- (j) Register
- (k) Coincidence회로와 집중기
- (l) 1/32주파수분류기
- (m) 계산기
- (n) DC-변환에對한 Register
- (o) D-A 변환기
- (p) display

그림 3. PCC의 블록선도

PCC의 SN의 이론적인 개선 효과를 증명한다.

式(12)는 헤트로드라인 출력의 자기상관의 경우에 적용된다. 반면에 같은 경우에 式(13)은 상호상관에 대해서 적용된다.

(1) 자기 상관인 경우(Autocorrelation)

$$\left. \begin{aligned} (S/N)_e &\doteq \frac{2}{\pi\sqrt{3}} \sqrt{N} \left(\frac{U}{\sigma}\right)' (U/\sigma \ll 1) \\ &\doteq \sqrt{\frac{N}{3}} \quad (U/\sigma \gg 1) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(2) 상호 상관인 경우(Mutual correlation)

$$\left. \begin{aligned} (S/N)_e &\doteq \frac{4}{\sqrt{3}} \pi^{-3/4} \sqrt{N} \frac{U}{\sigma} (U/\sigma \ll 1) \\ &\doteq \sqrt{\frac{2}{3}} N \quad (U/\sigma \gg 1) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

여기서 $(S/N)_e$; PCC 출력의 SN율
 V/σ ; 入力 PCC의 SN 비율

즉 검파기 出力의 SN 비율

N ; 하나의 상관 주파수에 포함된 Nyquist interval의 sample數

이 방법에서는 SN비의 개선 효과는 상관 관계 cycle 동안 sample의 數를 알 수 있다. 말하자면 단순히 신호 자유 N정도로써 볼 수 있다. 이점에서 decibel로써 表示되는 PCC 入力과 出力 SN비의 비율값이 SN율의 개선도로 정의된다.

그림 4와 그림 5는 shift register의 여러단에 관한 계산 결과와 실험 결과 사이의 일치성을 보인다.

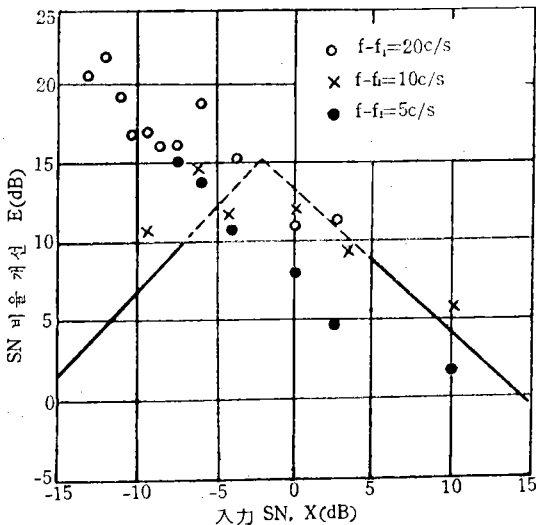


그림 4. SN 비 개선특성(I)

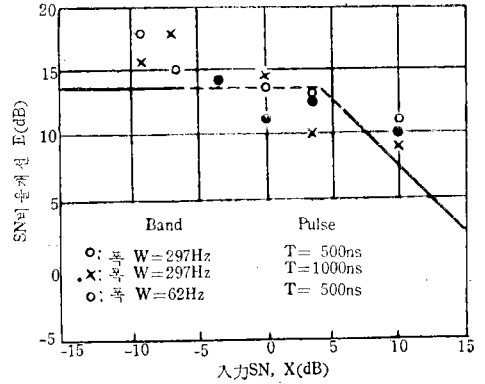


그림 5. SN 비 개선의 특성(II)

(c) 수중 Sonar 신호처리 예(DIMUS Sonar System)

앞서 언급한 PCC는 능동 Sonar 내에 신호 처리 과정이 효율적이고 실제 사용되고 있다. 여기서 PCC의 변형이라고 불리는 DIMUS (Digital Multibeam Steering) Sonar 계통에 대해서 간단하게 설명하겠다.

DIMUS에 있어서 지향성 성분을 포함하는 수중 청음기 出力에 따른 모든 처리 과정은 PCC에서와 같은 방법으로 2진법 sampling time train 처리 과정으로 변환되어진다. 그림 6은 이 원리를 근거로한 DIMUS의 계통도이다. 그림 6에서 수중 청음기 出力 e_i 은 clipping 증폭기에 의해서 + 또는 -극성 sample로 변환된 후 shift register의 첫단에 가해진다. 극성 sample은

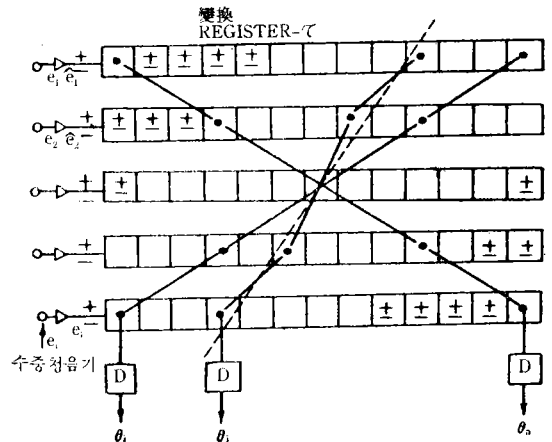


그림 6. DIMUS 동작원리의 불력선도

clocking 펄스 속력으로 shift register 을 통해서 진행하므로는 shift register 는 일종의 지연선이 된다.

지향성. 방위각 θ_1 을 가지는 그것을 임의적으로 증명하기 위해서 shift register 내의 적당한 stage 는 수중 청음기 배치가 대등한 전달 시간차에 정합한다. 이 신호의 θ_1 빔을 형성하기 위해 간단한 아날로그 계산회로가 사용된다. 이방법에서 얻어진 출력들은 관련된 소자들에 대한 binary voltage level 의 조합이므로 $n+1$ 의 값이 이 level 에서 얻어진다. 출력은 구적법으로 검파되며 빔 (beam) 출력이 된다. 동일 방법으로 다른 방위에 대한 빔 출력이 적당하게 선택된 shift register 단의 sum 으로 형성된다.

극성변환(즉 clipping)이 없는 신호 처리 과정과 DIMUS 를 비교할때 처리 이득에는 다음과 같은 선행조건이 필요하다.

(1) 검파는 오직 빔 출력 전력만을 고려하고 빔이 목표 방위에 있을때 그리고 타 방위에 있을 때 방위 빔의 변화를 관찰하므로써 행해진다.

(2) 검파는 목표 방위에 대한 상한 검파 출력 (D.C전압)과 다른 방위에서 출력전압에 대한 변화의 실효치($r. m. s.$)값을 비교함으로써 행해진다. 이 두 전압이 동등하고 이 특정 點에서 수중 청음기 배열에 入力 SN 전력비의 보충으로써 처리 과정 이득이 정의된다. 바로 이 점이 인식 한계이다.

이 선행조건들에 따라서 극성을 고려하지 않을 때 처리이득 G_1 은 다음과 같다.

$$G_1+1 = \left\{ \frac{[(N-1)(\bar{\sigma}' - \sigma'')] }{[1+(N-1)r]} \right\} (T/2\tau_1)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

여기서 N 은 빔을 형성하는데 사용하는 배열내의 수중 청음기의 數이다. 반면 $\bar{\sigma}'$ 와 σ'' 는 빔들이 목표 방위와 또 다른 방위에서 형성되어질 때 배열내의 수중 청음기들의 조합으로부터 신호의 평균 상호 상관인 경우를 각각 나타낸다. 배열내의 수중 청음기의 조합으로부터 잡음에 대한 평균 상호 상관관계는 r 에 의해 表示되며 T 는 검파기에 對한 결과적인 적분시간이며, τ_1 은 잡음의 검파된 출력에 對한 상관관계 시간이다.

식(14)의 右邊 { } 내의 분수는 array 이득이

며(지향성이득이라고 불리도 동일함) 그리고 팔호내의 분수는 검파후의 적분이득이다. σ' 와 r 에 對한 값은 적고 거의 같으며 반면에 $\bar{\sigma}'$ 는 거의 unit 값이다. 물론 식(14)에서 중요한 항은 $(N-1)r$ 이다. r 가 잡음의 공간적 상관관계와 수중 청음기 array 에 관련할때 수중 청음기들은 정돈하는 방법은 극단적으로 증대하는것을 의미한다.

다른 방법에 의하면 극성 Sampling 이 있을때 처리이득 G_2 는 다음과 같으며 G_1 을 사용한다.

$$G_2+1 = (G_1+1) \left[(\tau_1/\tau_2) / (1+\beta) \right] \quad (15)$$

여기서 τ_2 는 극성이 Sample 될때 잡음 검파 출력에 대한 상관관계 시간이다. 반면에 β 은 극성 Sample 에서 진폭정보를 무시한것에 의한 손실 성분이다. 비록 (τ_1/τ_2) 이 적분 이득의 개선에 있어서 차라고 해도 일반적으로 $\tau_2 < \tau_1$ 이고 그래서 개선될 수 있는 양은 극성 Sample 이다. 최종적인 해석에서 팔호내의 몫은 약 $-1dB$ 의 값을 가질것이며 이런가답에 극성 Sample 에 의한 손실은 어려운 문제이다. 그림 7은 목표 방위각이 30° 일때 入力 SN 비율이 $+3dB, -3dB, -10dB$ 일때 그것의 지향성 빔 패턴 (beam-pattern) 의 한 예를 보여준다.

상한 검파된 DIMUS 출력을 더욱 처리하는 방법이 연구대상이 되었다. 그림 8은 이 방법에 의

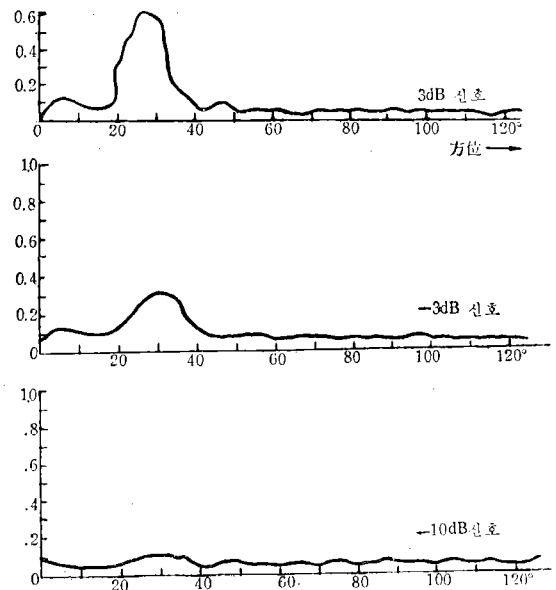


그림 7. DIMUS에 대한 방위빔패턴

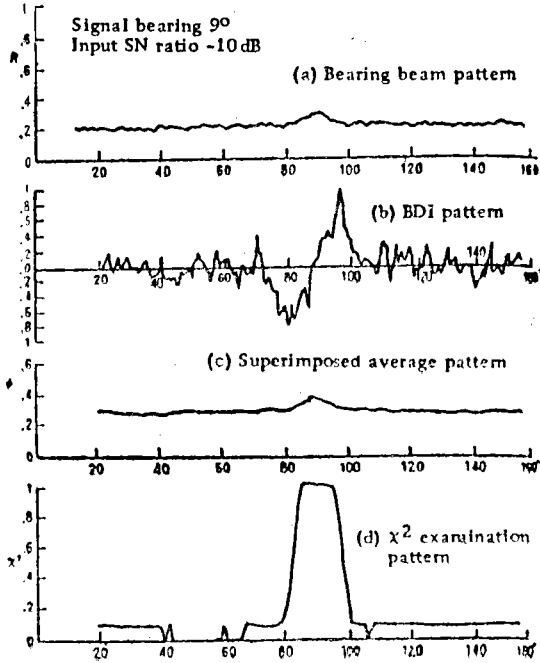


그림 8. DIMUS와 타 신호 처리패턴의 비교
해서 얻어진 결과들의 예를 보여준다. DIMUS출
력 자신은 그림 8(a)로 나타나있고 그림 8(b)은
두 인접 방위에 對한 처리를 보여주며 그림 8(c)
는 DIMUS 지향성 pattern 단면과 DIMUS 방위
패턴에 대한 상호 상관관계를 얻기위해 평균해서
중첩시킨것을 나타낸다. 그림 8(d)는 DIMUS 출
력에 대한 χ^2 실험 과정의 결과들을 보여준다.

신호 처리의 부류가 극단적으로 효율적임을 알수
있다.

4. 결 론

Sonar에서 신호 처리 문제를 다루는데 곤란한
주인자는 잡음혼신과 불규칙적인 신호이다. PCC
나 DIMUS와같은 극성 Sample 처리제통이 자주
사용되는 한가지 이유는 불규칙한 入力에 대해서
강한 이 점이 있기 때문이다.

두번째 이유는 전파하는 동안에 신호의 의곡이
다. 바로 이 점이 자기 상관관계가 상관처리제통
에서 거의 포괄적으로 이용되는 이유이다.

3번째로 능동 Sonar에서는 반향이 있고 이것은
이론적으로 취급하기는 곤란하다. 그러나 대부분
의 최근 연구에 의하면 "random noise + filter"
의 조합에 依해서 해결할 수가 있는 것이 명백하
고 큰 진보가 실제 해석에서 이루어지고 있다.
Sonar는 탐지범위 한계상에서 신호가 나타났을
때 진짜목표물과 가짜를 구별하는 질적 향상의
문제점이 있다.

완전히 공백인 장소에서 목표물로 보이는 신호
의 검출 그리고 이것을 목표를 결정하는데는 상
상이상의 어려운 점이있다. 이런 까닭에 신호처
리 과정이 특별히 탐지 범위 확장에서 중요시 되
고 있는 점이다.