

## 비선형 배열 MUSIC 빔형성에 의한 예인 선배열 센서 시스템의 표적 좌우 분리 기법

김윤수\*                      홍우영\*\*                      오원천\*\*\*

\* 군사과학기술원 해양공학과    \*\* 해군사관학교 전자공학과    \*\*\* 국방과학연구소

### Bearing Ambiguity Solution of Towed Array Sensor System By Nonlinear Array MUSIC Beamforming

Kim Younsoo                      Hong Wooyoung                      Oh Wontchon

#### 요 약

이 논문에서 비선형 배열 MUSIC 빔형성 기법을 이용하여 예인형 선배열 센서 시스템의 표적 좌우 방위 분리 방법을 기술하였다. 이 기법은 배열 운동모델 Water-Pully 모델과 방향센서의 정보를 이용하는 칼만필터를 설계하여 예인함 기동에 따른 배열형상을 추정하고 표적의 좌우방위를 분리하기 위하여 추정된 비선형 배열형상에서 MUSIC 빔형성 기법으로 신호처리를 수행하였다. 또한 예인주기와 예인진폭과 같은 예인함 기동형태의 관계에서 선형화된 빔형성 기법과 MUSIC 빔형성 기법으로 표적의 좌우 방위 분리 성능을 비교 분석하였다.

#### I. 서 론

예인형 선배열 센서 시스템은 수중에서 예인되는 센서배열의 선형적 특성을 갖어야 성능 유지하도록 설계되었다. 즉, 배열형상이 선형성을 유지할 때 최적의 성능을 얻을 수 있다. 그러나 선형적인 배열형상을 이용하여 빔형성 위므로써 표적 방위 추상시 표적의 좌우 방위를 분리하지 못하는 문제점을 가지고 있다. 따라서 예인함은 표적의 좌우 방위를 분리하기 위하여 시그제그 형태로 기능하고 있으나 예인함의 기동으로 배열형상이 변형되기 때문에 배열이 선형적으로 완성화 될 때까지 신호처리를 못하고 있다.

이러한 예인형 선배열 센서 시스템의 표적 좌우 방위분리를 해결하기 위하여 배열의 운동모델인 Water-Pully 모델과 방향센서 정보로 배열형상을 추정하는 칼만필터를 설계하여 추정된 비선형 배열형상에서 신호처리 하는 기법이 연구되었다[1]. 이 기법에서는 추정된 비선형 배열의 위치정보로 좌우측 방향에서 각 센서에 입사하는 신호의 시간지연을 계산하고 선형적인 빔형성기법에 적용시켜 표적의 좌우방위를 분리하였다.

본 논문에서는 칼만필터로 추정된 비선형 배열형상을 이용하여 선형적인 빔형성 기법 보다 분해능이 높고 방위 추정 성능이 우수한 MUSIC 빔형성기법을 이용하여 표적의 좌우 방위 분리 성능을 분석하였다.

#### II. 본 론

##### 1. 예인형태에 따른 선배열 형상 추정

일정한 속도와 예인주기( $T$ )가 큰 경우 수중에서 예인되는 배열의 운동모델인 Water-Pully 모델[2]과

$$\left(c_r + \frac{c_n}{\pi}\right) \frac{\partial \eta}{\partial \xi} + \frac{c_n}{\pi} \frac{\partial \eta}{\partial \tau} = 0 \quad (1)$$

배열의 기동기 정보를 획득하는 방위센서를 이용하여 예인함의 기동에 따른 배열형상을 추정하는 칼만필터를 설계할 수 있다[3][4][5]. 방위센서를 이용하기 때문에 상태를 배열구조의 기동기로 정의하고 Water-Pully 모델을 시-공간적으로 요인하여 선사화를 통하여 식 2와 같이 상태벡터를 정의할 수 있다.

$$\eta_{\xi}^T(k+1) = F \eta_{\xi}^T(k) + u_{\xi}^T(k) - w_{\xi}^T(k) \quad (2)$$

$$F = (1 - \rho)I + \rho L$$

$$u_{\xi}^T(k) = [\rho \eta_{\xi}^T(k), 0, \dots, 0], \quad \rho = \rho \frac{h_z}{h_c}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$F$ 는 상태전이행렬,  $I$ 는 단위행렬,  $\rho$ 는 강제할수인 조단 방위센서 출력으로부터 구한다. 그리고  $u(k)$ 는 모델오차를 나타낸다. 또한 추정방정식은 방위센서의 출력인 선배열 기동기를 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$z(k) = H^T \eta_{\xi}^T(k) + v(k) \quad (3)$$

여기서  $H$ 는 측정행렬이고 방위센서의 위치에 따라 정의되고  $v(k)$ 는 측정센서의 오차를 나타낸다[6].

##### 2. 비선형 배열의 표적 좌우방위 분리

예인함형의 기동에 따라 추정된 배열형상은 선배열 형상에서 변형되어 비선형 배열형상을 갖는다. 따라서 비선형 배열형상에서 각 센서에 도달하는 신호의 시간지연은 각각 다르게 나타나며 또한, 배열형상이 좌우측 방향을 변형되었기 때문에 좌우측 방향에서의 시간지연은 다르게 나타난다. 그림 1은 변형된 배열형상에 입사하는 신호를 기하학적으로 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이  $m$  번째 센서에 도달하는 좌측에서 입사하는 신호의 시간지연( $t_{zm}$ )과 우측에서 입사하는 신호의 시

간지연 값( $\tau_i$ )이 다르다는 것을 알 수 있다.

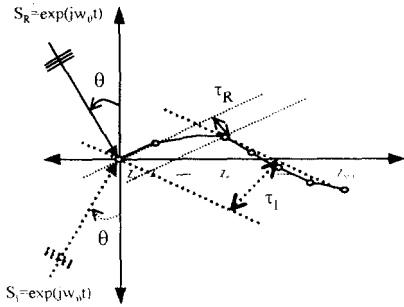


그림 1. 변형어레이의 입사신호

m 번째 센서에 도달하는 좌측방위의 시간지연은

$$\tau_{Rm} = \frac{L_{Rm}}{c} = \frac{x_m \sin \theta + y_m \cos \theta}{c} \quad (4)$$

와 같은 우측방위의 시간지연은

$$\tau_{lm} = \frac{L_{lm}}{c} = \frac{x_m \sin \theta - y_m \cos \theta}{c} \quad (5)$$

와 같다. 따라서 m 번째 센서에 입사하는 신호는 좌우측 방위 입사신호의 시간지연은 서로 다른 값을 갖게된다[7][8].

$$\tau_R \neq \tau_l \quad (6)$$

따라서 입사신호의 시간지연을 이용하는 빔형성 기법을 이용하여 비선형 배열에서 좌우측 방위의 빔을 형성할 경우 허상 표적의 빔은 변형이 되어 나타나게 된다.

그림 2은 선배열과 비선형 배열에서 전형적인 빔형성기법과 MUSIC 빔형성 기법을 이용한 표적의 좌우 방위 분리 특성을 나타낸 그림이다. 선배열 형상에서는 두 기법 모두 좌우측 방위에서 동일한 형태의 빔이 형성되기 때문에 좌우 방위를 분리할 수 없다. 그러나 비선형 배열에서는, 허상 표적의 빔이 변형되어 좌우방위 빔간의 차가 전형적인 빔형성기법에서는 약 8dB, MUSIC 빔형성기법에서는 약 30dB가 되기 때문에 표적의 좌우 방위를 분리할 수 있다.

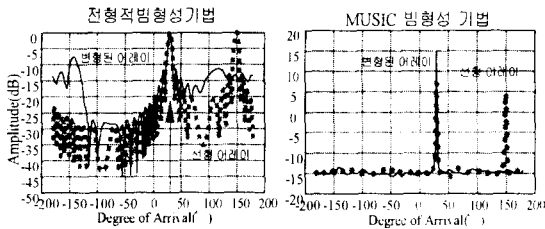


그림 2. 선배열/비선형 배열의 좌우분리 특성

### 3. 예인조건에 따른 좌우방위 분리 특성

비선형 배열형상에서 표적의 좌우방위분리 성능은 예인조건에 따라 영향을 받는다. 이 절에서는 예인조건과 측정센서 오차에 따른 표적의 좌우 방위분리 특성 변화를 컴퓨터 모의 실험을 통하여 분석하였고 특히, 전형적인 빔형성기법과 MUSIC 빔형성기법에 대하여 비교 분석하였다.

#### 3.1 예인주기에 의한 좌우 방위분리 특성

예인주기( $T$ ) 예인속도( $U$ )와 배열길이( $L$ )와 함께 식 7과 같이 무차원 주파수의 관계식으로 나타낼 수 있다

$$f := f \frac{L}{U} = \frac{T}{T_f} \leq 1 \quad (7)$$

Water Pully 모델의 조건으로 예인함 운동이 배열을 통과하는 시간( $T$ )보다 커야 하므로 무차원주파수가 1 보다 작은 예인주기를 갖어야 한다.

선배열길이 155m, 예인진폭 20m 측정센서오차 1° 그리고 표적의 방위를 0°로 가정하여 예인주기별 좌우방위분리 특성을 살펴보았다. 그림 3은 예인주기가 38초(무차원주파수=1)인 경우에 대하여 시뮬레이션한 결과이다.

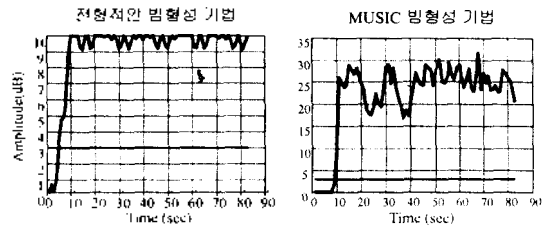


그림 3. 좌우방위분리특성( $T_f=38$  sec)

이 경우 배열형상이 많은 변형을 가지고 있기 때문에 좌우 분리 특성이 좋으며 전형적인 빔형성 기법은 약 8dB 그리고 MUSIC 빔형성기법은 약 25dB 정도 좌우 방위 빔간의 차가 발생되어 두 기법 모두 표적 좌우방위 분리가 가능하다. 그러나 그림 4와 같이 예인주기가 너무 큰 경우 배열형상은 같은 변형을 가지고 있기 때문에 좌우 분리특성이 나빠지게 된다.

그림 4는 예인주기가 376초(무차원주파수=0.01)인 경우에 대하여 시뮬레이션한 결과이다.

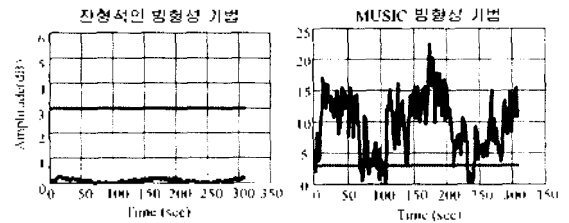


그림 4. 좌우방위분리특성( $T_f=376$  sec)

이 경우 무차원주파수가 작아 배열형상 변형이 작게 일어나 전형적인 형상을 갖기 때문에 허상 표적의 빔이 작져 전형적인 빔형성 기법에서는 빔간의차가 3dB 이하로 떨어져 표적의 좌우방위분리가 불가능하다. 그러나 MUSIC 빔형성 기법은 선형적으로 빔간의 차가 줄었으나 조그마한 변형에서도 허상 표적의 빔이 변형되기 때문에 일부구간을 제외하고는 3dB 이상 값을 갖기 때문에 표적 좌우 방위 분리가 가능하다.

그림 5은 예인주기에 따른 표적의 좌우방위 분리 특성을 종합적으로 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이 예인주기에 따라 좌우 방위 분리 특성이 변화되고 있는데 예인주기가 클수록 배열형상 변형이 작아져 좌우 방위 분리 특성이 나빠지는 것이 나타나고 있다. 전형적인 빔형성 기법은 예인주기에 따라 좌우방위 빔간의 차가 크게 줄어들기 때문에 예인주기가 188

초인 경우 좌우 방위를 분리 할 수 없다. 그러나 MUSIC 빔형성 기법에서는 조그마한 배열형상 변형에 성능이 변하기 때문에 예인주기가 376초인 경우에서도 일부구간을 제외하고는 좌우분리가 가능하다. 따라서 예인주기에 따른 표적의 좌우분리 특성은 MUSIC 빔형성 기법이 더 좋은 결과를 보이고 있다.

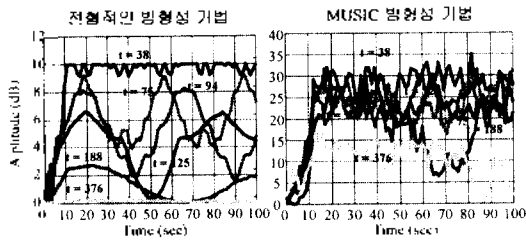


그림 5. 예인주기별 좌우 방위분리 특성

### 3.2 예인진폭에 의한 좌우방위 분리특성

예인진폭은 배열형상 변형에 가장 큰 영향을 주기 때문에 좌우 방위분리 특성을 크게 변화시킨다. 그러므로 예인진폭이 클수록 배열 형상은 많은 변형이 일어나 표적의 좌우 방위 분리 특성이 좋아지게 되나 너무 작은 예인진폭인 경우에는 배열 형상을 쉽게 변형시키기 때문에 표적의 좌우 방위 분리가 나빠지게 된다.

그림 6은 예인속도 8 knts, 예인주기가 188초(부차원주파수 0.2) 그리고 예인진폭이 40 m일 경우에 대하여 시뮬레이션한 결과이다.

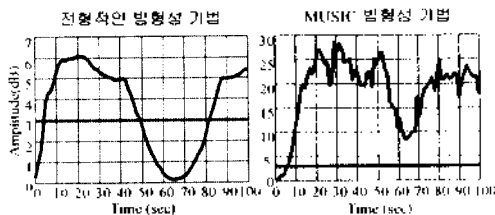


그림 6. 좌우방위분리특성(예인진폭 40 m)

이 경우 예인주기가 크기 때문에 일부구간에서 배열형상이 선형적 형상을 갖기 때문에 전통적인 빔형성 기법에서는 일부구간에서 좌우측 방위의 빔간의 차가 3dB 이하가 되어 좌우 방위를 분리할 수 없으나 MUSIC 빔형성 기법은 이 구간에서도 3dB 이상의 값을 가지므로 진구간에서 좌우 방위 분리가 가능하다.

그림 7은 동일한 예인조건에서 예인진폭이 120 m일 경우에

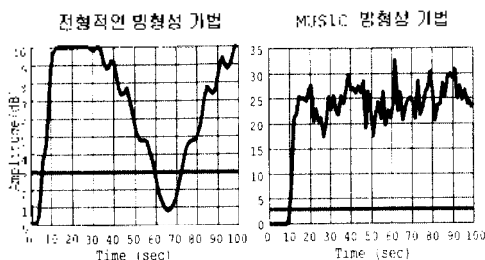


그림 7. 좌우방위분리특성(예인진폭 120 m)

대하여 모의실험한 결과이다.

마찬가지로 예인주기가 크기 때문에 일부구간에서 배열이 선형적인 형상을 갖고 있어 전통적인 빔형성 기법은 일부 구간에서 표적의 좌우 분리가 불가능하고 그 이외의 구간에서는 좌우분리가 가능하다. 그러나 MUSIC 빔형성 기법은 진구간에서 약 25dB 정도의 크기를 갖고 있기 때문에 좌우방위분리가 가능하다.

그림 8은 예인진폭에 따른 표적의 좌우 분리 특성을 종합적으로 나타낸 그림이다. 전통적인 빔형성 기법은 예인진폭이 20 m 이하인 경우에는 좌우방위의 빔간의 차가 3dB 이하로 떨어져 표적의 좌우 방위를 분리할 수 없다. 그러나 MUSIC 빔형성 기법은 진구간에서 3dB 이상의 값을 갖기 때문에 좌우분리가 가능하다.

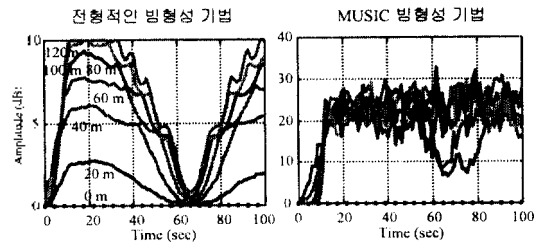


그림 8. 예인진폭에 따른 좌우방위분리특성

### 3.3 입사신호 방위에 의한 좌우방위 분리 특성

빔형성 기법은 입사신호의 방위에 따라 성능이 제한되어 각 방위에 대하여 약 ±70° 정도 범위내에서 사용할 수 있으며 그 이상의 방위각에서는 빔폭이 증폭되는 현상으로 방위추정 성능이 저하된다[6]. 또한 비선형 배열의 경우에는 예인진폭이 클 경우 선배열이 좌우측 방향으로 크게 변형되어 허상 표적의 빔이 이동하여 실제 표적의 빔과 중첩되어 빔폭을 확장시키기 때문에 빔형성기의 성능이 저하된다.

그림 9은 예인속도 8knts, 예인주기 125초, 예인진폭 50 m 그리고 방위각이 30° 일 경우에 대하여 모의실험한 결과이다

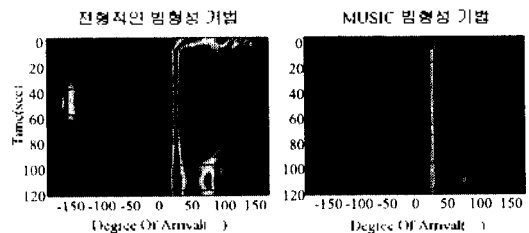


그림 9. 좌우방위분리특성(입사방위 : 30°)

그림에서 보듯이 허상 표적방위의 빔이 배열의 좌우 방위로 선형적인 움직임에 따라 방위가 변화되고 있다. 전통적인 빔형성 기법의 허상 표적의 빔은 크게 나타나지만 MUSIC 빔형성 기법에서는 아주 작게 나타나고 있다.

그림 10은 동일한 예인조건에 입사신호 방위각이 -60° 일 경우에 대하여 모의실험한 결과이다. 허상 표적의 빔이 실제 표적의 빔과 중첩되어 빔폭이 넓어지면서 허상 표적의 빔이 사라지기 때문에 표적의 좌우 방위를 분리할 수 있다. 그러나 그림 12와 같이 전통적인 빔형성기법은 빔폭이 큰 쪽으로 넓

여기서 때문에 표적의 빙형성기의 성능을 크게 저하되고 MUSIC 빙형성 기법은 빙폭의 변화가 작게 일어나 방위추정 성능을 크게 변화시키지는 않는다.

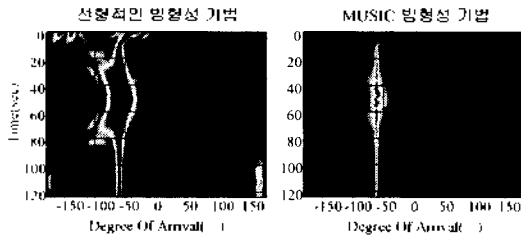


그림 10. 좌우방위분리특성(입사방위 :  $-60^\circ$ )

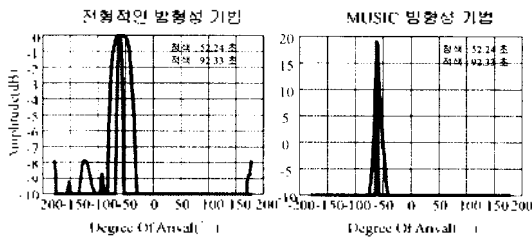


그림 11. 좌우방위분리특성(입사방위 :  $-60^\circ$ )

### 3.4 측정센서오차에 의한 좌우분리 특성

간략히되는 방위센서의 정보를 이용하여 배열형상을 추정한다. 따라서 오차가 작은 방위센서를 사용하면 정확한 배열형상을 추정하여 좌우 방위분리특성에 영향을 미치지 않으나 오차가 큰 방위센서를 사용할 경우 오차가 많은 배열형상을 추정하여 좌우방위 분리 특성을 나쁘게 만든다.

그림 12은 측정센서 오차에 따른 표적의 좌우 분리 특성을 종합적으로 나타낸 그림이다.

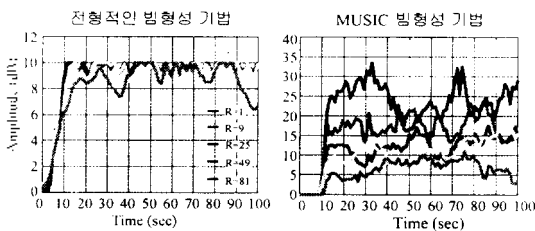


그림 12. 측정센서 오차에 따른 좌우방위 분리특성

그림에서 보듯이 전형적인 빙형성 기법은 측정센서 오차에 대하여 큰 변화 없이 좌우분리특성을 나타내고 있다. 그러나 MUSIC 방위추정법은 측정센서 오차에 따라 좌우 방위 분리 특성이 크게 나빠진다.

## III. 결 론

본 논문에서는 예인함의 기동에 의해 변형되는 배열 형상을 간략히더로 추정하여 비선형 배열형상에서 MUSIC 빙형성 기법으로 좌우 방위 빙을 형성하여 표적의 좌우 방위를 분리 방법을 제시하였다. 그리고 전형적인 빙형성 기법과 MUSIC 빙

형성기법을 이용하여 표적의 좌우 방위 분리 특성을 비교 분석하였다.

표적의 좌우 방위 분리 특성은 예인속도, 예인주기, 예인진폭 그리고 표적방위의 예인함에서 가변할 수 있는 영향요소에 따라 변화된다.

각각의 영향요소에 대한 좌우 방위 분리 특성을 살펴보면 첫번째로 예인주기에서는 예인주기가 늘수록 좌우분리 특성 나빠지는 특징이 나타나고 전형적인 빙형성기법에 비해 MUSIC 빙형성기법은 더 큰 예인주기에서도 좌우분리가 가능하다. 두 번째로 예인진폭에서는 진폭이 작을수록 좌우방위분리특성이 나빠지는 특징을 가지고 있으면서 전형적인 빙형성기법에 비해 MUSIC 기법이 더 작은 진폭에서도 좌우 방위를 분리할 수 있다. 세 번째로 표적방위에서는 방위가 클수록 허상 표적의 빙과 실제 표적의 빙이 중첩되어 전형적인 빙형성은 빙폭이 크게 넓어지기 때문에 방위추정성능이 크게 저하되나 MUSIC 방위추정기법은 빙폭이 변형되지만 빙의 최대값이 크기 때문에 방위추정성능이 크게 저하되지 않는다. 마지막으로 측정센서의 오차에서는 전형적인 빙형성 기법이 오차에 따라 좌우 분리 성능이 변화하지 않는 반면에 MUSIC 빙형성 기법은 측정센서의 오차가 클수록 성능이 크게 저하되는 특징이 나타났다. 또한, 전형적인 빙형성기법은 오차에 따라 방위추정성능이 저하되기 때문에 정확한 측정센서를 사용하여야 한다. 그러므로 작은 오차의 측정센서로 정확한 방위정보를 제공한다면 전형적인 빙형성 기법보다 MUSIC 빙형성기법이 더 안정적인 좌우 분리 특성을 얻을 수 있다.

## 참고문헌

1. 김윤수, "미선형 배열 빙형성에 의한 예인 선배열 센서의 표적 좌우분리 기법", 수중음향학회 학술대회(영남 분과) Oct. 23, 1998
2. R.M Kennedy, "Crosstrack Dynamics of a Long Cable Towed in the Ocean", Oceans, pp 966-970, 1981
3. D.A Gray, B.D Anderson and R.R Bitmead, "Towed Array Shape Estimation Using Kalman Filters-Theoretical Mode I", IEEE J. Oceanic Eng., Vol. 18, No.4, pp 543-556 Oct. 1993
4. J.L Riley and D.A Gray, "Towed Array Shape Estimation Using Kalman Filters-Experimental Investigation", IEEE J Oceanic Eng., Vol. 18, No.4, pp 571-582 Oct. 1993
5. 한강우, "예인 선배열 형상 추정에 의한 건설화 빙형성 기법연구", 국방과학연구소 연구보고서, Oct. 1995
6. M.S Grewal and A.P Adrewns, Kalman Filtering: Theory and Practice Hall, 1993
7. R.O Nielson, Sonar Signal Processing, Artech House, 1991
8. Daniel E. Wahl "Towed Array Shape Estimation Using Frequency - Wavenumber Data ", IEEE J. Oceanic Eng., Vol. 18, No.4, Oct. 1993