

## 적응제어에 의한 대수심 라이저의 리엔트리

남 동 호\*  
(95년 10월 31일 접수)

### Automatic Reentry of Deepsea Riser by Adaptive Control

Dong-Ho Nam\*

**Key Words** : Adaptive control(적응제어), Riser(라이저, 양광관), Reentry(리엔트리), Persistently exciting input(지속적 가진입력, PE특성), Unmodeled dynamics(비모델화된 동특성), Parameter identification(파라미터 추정)

#### Abstract

This paper presents automatic reentry of a deepsea riser by adaptive control. Reentry is one of the major problems regarding a deepsea riser. In the reentry operation, the lower end of riser must be accurately positioned over the target point on the seabed. But the deepsea riser shows complex elastic response due to flexibility and nonlinearity of the riser dynamics and the required positioning accuracy is high. Moreover, elastic deformation must be controlled for securing structural integrity.

In adaptive control, uncertainly known parameters like added mass and drag coefficient in the riser dynamics are identified and control forces at the floating body and the riser are calculated simultaneously. An Adaptive algorithm for MIMO linear discrete time system without requiring a persistent excitation is adopted in this study. The effectiveness of adaptive control logic is tested by numerical simulation and model experiment. The designed control system shows good overall performances, so that the present study can be applied to the control of the deepsea riser.

#### 1. 서 론

1992년 11월 프랑스에서 열린 경제협력개발기구(OECD)의 거대과학포럼 심해굴삭 전문가회의

에서 일본, 미국, 프랑스, 영국, 독일등의 세계선진 각국은 세계최대의 심해굴삭선을 건조하여 지구환경의 변화와 지각변동등의 조사연구를 국제협력으로 추진하기로 합의하였다. 2000년경의 운항을 목

\* 정회원, 시립인천전문대학 기계설계과

표로 진행되고 있는 심해굴삭을 통한 해저지질의 조사는 대륙이동을 설명하는 플레이트이론의 직접 검증으로 지진, 화산활동의 관측과 규명, 과거의 기후변동, 지구진화의 역사이해와 함께 석유, 천연가스등 해저자원의 생성메카니즘의 해명에도 매우 유용하리라고 기대된다.

심해를 대상으로한 자원개발 또는 학술조사에서는 채취한 자원과 학술자료를 수송하기 위하여 해상의 작업선과 해저를 연결하는 장대한 파이프 구조물인 라이저(riser, 양광관)가 사용된다. 이러한 라이저를 이용한 굴삭에서는 폭풍우와 같은 악천후의 해상상태에서 일단 철수한 라이저를 해저상의 목표위치로 이동하여, 라이저의 하단부를 BOP(blowout preventer, 분출방지장치)와 같은 해저기에 결합하는 리엔트리(reentry)라고 하는 작업이 필요하게 된다.

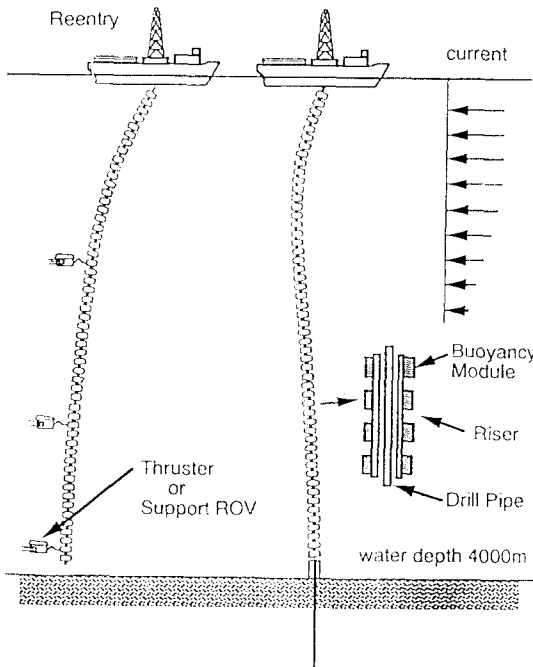


Fig. 1 Schematic diagram of riser reentry

대수심 라이저는 매우 장대 유연하고 비선형성이 현저하여 현재 얕은 수심에서 행해지는 것과 같이 해상의 부유체만을 조종하여 해저 수 천미터

밑에 있는 라이저의 하단부를 제어할 수는 없다. 따라서, Fig. 1과 같이 부유체와 라이저의 하단부 및 중간부에 설치한 추진기 또는 ROV(Remotely Operated Vehicle)를 이용하여 리엔트리작업을 자동화하는 것이 필요하다.

Suzuki등<sup>1)</sup>은 부유체와 라이저의 연성 운동방정식을 유도한 후, 최적제어에 의한 제어계를 구성하고 수치시뮬레이션과 수조실험을 수행하여 능동제어에 의한 리엔트리 시스템의 구축에 대한 연구결과를 발표한 바있다.

그러나, 라이저와 같은 장대한 파이프 구조물은 단순한 형상에도 불구하고 대변형에 의한 비선형 거동이 현저하며, 수중에 있어서 부가질량, 항력등 유체력 파라미터의 불확실성이 있다. 시스템 파라미터에 대해 정확한 선견(先見)지식이 있으면 최적제어가 무난하나 그 정보에 불확실한 점 내지 잘못이 있거나 또는 파라미터가 시간에 따라 변화한다면 최적제어에 의한 제어계의 기능과 안정성에 문제가 발생할 수가 있다.

그래서 본 연구에서는 수중에서 불확실한 부가질량, 항력등 비선형인 유체력 파라미터에 대응하기 위해 적응제어를 도입하였다. 현재 체계화된 적응제어방식으로는 MRACS(model reference adaptive control system)과 STC(self tuning control, 자기동조법)이 있다. STC는 입출력신호를 이용하여 추정기구에 의해 시스템 파라미터를 추정한 후, 이 추정된 파라미터를 참값으로 가정하여(certainty equivalence principle) 제어기를 수정하는 방식으로 일반적인 피드백제어를 온라인(on line)화한 제어기법이다. 1970년대 Astrom등<sup>2)</sup>에 의해 확률적 환경하에서 최소분산제어를 목적으로 한 적응레귤레이터(regulator)가 제안된 이래 이론과 응용 양면에서 활발히 발달되어져 왔다.

제어기의 설계에는 출력오차의 분산을 최소화하는 최소분산제어, 페루프시스템의 극을 설계치로 지정하는 극배치제어, LQ이론에 근거한 최적레귤레이터방식이 사용되고 있다. 근시한적인 시각으로 한 스텝후 제어편차의 최소분산제어를 행하는 경우, 일반적으로 조작량이 크게 변동한다고 알려져 있다. 비선형인 제어대상 시스템의 경우, 조작량의 변동이 클수록 추정의 정확도가 떨어지고 제

어가 불안정하게 되는 경우가 많다. 본 연구에서는 Riccati 차분방정식을 각 스텝별로 간단히 풀어 실시간제어에 적합한 LQ법에 의한 레귤레이터를 이용하였다.

한편 추정기구조로는 최소제곱법, 확장최소제곱법, 확장칼만필터법등의 알고리즘이 이용되고 있다. 입력신호가 플랜트의 모든 모드를 가진시킬 만큼 충분히 다양한 주파수성분을 갖는 성질을 지속적 가진입력<sup>2),3)</sup>(PE, persistently exciting input)특성이라고 한다. 적응제어에 있어서, 입력신호가 PE특성인가의 여부는 추정된 파라미터가 참값(true value)에 수렴하기 위한 불가결한 조건이다. 그러나 실제 구조물의 제어시에 이와 같은 PE특성을 갖는 입력을 가하여 파라미터를 추정하는 것은 현실적이지 못하고 더우기 라이저와 같은 유연한 구조물에 손상을 줄 위험성이 있다.

본 논문에서는 Ossman<sup>4),5)</sup>의 PE특성을 필요로 하지 않는 다변수 입출력 선형이산계의 적응알고리즘을 이용하여 시뮬레이션과 구조실험을 수행하고 실제 대수심 라이저의 리엔트리시스템에 적응제어를 적용하는 가능성에 대하여 검토를 하였다.

## 2. 적응제어 알고리즘

Ossman은 Kreisselmeier<sup>6)</sup>가 단입출력(SISO) 연속계의 적응관측기에 적용한 수정항을 기존의 순환 최소제곱(recursive least square) 추정알고리즘에 도입하여 다입출력(MIMO) 이산계에서의 파라미터 추정알고리즘을 제안하였다. 또, 단입출력 이산계에 있어서 Samson<sup>7),8)</sup>에 의하여 개발된 LQ법에 의한 레귤레이터를 다입출력 이산계에 확장하고, 앞의 파라미터 추정알고리즘을 결합하여, 최소 및 비최소 위상 이산계에 모두 적용가능하고 PE특성이 불필요한 적응제어기를 설계하였다. 이 적응제어기는 대역적으로 안정(globally stable)하다는 것이 증명되었는데,<sup>4),5)</sup> 이하 본 연구에서 채택한 Ossman의 적응알고리즘에 대해 간단히 서술한다.

### 2.1 시스템의 정의 및 가정

시스템에 대해 다음과 같이 가정한다.

1) 시스템 차수의 상한은 알려져 있다.

2) 모든 미지의 시스템 파라미터는 기지의 상한과 하한의 구간내에 있다. 이 가정은 실제의 경우, 시스템에 관한 어느 정도의 선형적인 정보를 이용할 수 있으므로 타당하다.

3) 기지의 유한구간내에 속하는 모든 미지의 시스템 파라미터에 대해 시스템은 안정되어질 수가 있다. 이 조건(pointwise stabilizability)은 시스템이 작동하기 전에 체크할 수가 있다.

제어대상 시스템이 되는 다입출력 선형이산계를 다음과 같은 입출력 차분방정식으로 기술한다.

$$y(k) = - \sum_{j=1}^p A_j y(k-j) + \sum_{j=1}^q B_j u(k-j) \quad (1)$$

여기서  $y(k)$ 는 출력벡터,  $u(k)$ 는 제어입력벡터이고,  $A$ 와  $B$ 는 시스템 파라미터행렬,  $p$ 와  $q$ 는 이산계에서 과거치의 회귀차수이다. 식(1)을 다음과 같이 파라미터 추정에 편리한 형태로 나타낸다.

$$y(k) = D^T \phi(k-1) \quad (2)$$

$$\text{여기서, } D^T = [ -A_1 \cdots -A_n \quad B_1 \cdots B_n ]$$

$$\phi^T(k-1) = [ y(k-1) \cdots y(k-n) \quad u(k-1) \cdots u(k-n) ]$$

실제 응용상에서는 어느 정도의 선형적인 정보가 얻어져, 기지의 파라미터는 추정할 필요가 없으므로 식(2)를 변수분리하여 다음과 같이 표현한다.

$$y(k) = \theta^T \phi_a(k-1) + \psi^T \phi_b(k-1) \quad (3)$$

여기서  $\theta$ 는 D에서 미지의 파라미터,  $\psi$ 는 기지의 파라미터이다.  $\phi_a(k-1)$ ,  $\phi_b(k-1)$ 는 각각 회귀 벡터(regression vector)  $\phi(k-1)$ 에서 미지와 기지의 시스템 파라미터에 대응하는 성분들이다. 본 논문에서 사용한 벡터와 행렬의 노름(norm)은 각각 다음과 같이 정의된 Euclidean 노름과 스펙트럼 노름이다.

$$\|x\| = (x^T x)^{\frac{1}{2}}, \quad \|M\| = [ \lambda_{\max}(M^T M) ]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

### 2.2 파라미터 추정알고리즘

선형이산 시스템을 식(3)과 같은 ARMA(Auto-Regressive Moving Average)모델로 기술하면, 파라미터 추정기구 알고리즘은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \theta(k) &= \theta(k-1) - P(k-1)f(\theta(k-1)) \\ &+ \frac{P(k-1)\phi_a(k-1)}{\eta_{k-1}^2 + \phi_a^T(k-1)P(k-1)\phi_a(k-1)} \\ &\times [y^T(k) - \phi_b^T(k-1)\psi - \phi_a^T(k-1)\theta(k-1)] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P(k) &= P(k-1) - \frac{P(k-1)\phi_a(k-1)\phi_a^T(k-1)P(k-1)}{\eta_{k-1}^2 + \phi_a^T(k-1)P(k-1)\phi_a(k-1)} \\ 0 < P(0) &= P^T(0) < 2I \end{aligned} \quad (6)$$

$$f_{ij}(k-1) = \begin{cases} \theta_{ij}(k-1) - \theta_{ij}^{\max}, & \text{when } \theta_{ij}(k-1) > \theta_{ij}^{\max} \\ \theta_{ij}(k-1) - \theta_{ij}^{\min}, & \text{when } \theta_{ij}(k-1) < \theta_{ij}^{\min} \\ 0, & \text{when } \theta_{ij}(k-1) \in [\theta_{ij}^{\min}, \theta_{ij}^{\max}] \end{cases} \quad (7)$$

$$\eta_{k-1} = \begin{cases} 1, & \text{when the determinant of } P(k) > \varepsilon, \\ \max(1, \|\phi_a(k-1)\|), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (8)$$

여기서  $\varepsilon$ 는 작은 양의 실수이고,  $\theta_{ij}^{\max}, \theta_{ij}^{\min}$ 는 각각 시스템 파라미터가 속하는 기지인 유한구간의 상한치과 하한치이다. 이 추정알고리즘은 일반적으로 알려져 있는 최소제곱법과 다음의 3가지 면에서 다른 점이 있다.

1) 공분산 행렬(covariance matrix) P의 초기치가 2I보다 작은 양의 행렬(positive definite) 행렬이어야 하는데 이 조건은 적응레귤레이터의 대역적 안정성의 증명에 필요하다.

2) 최소제곱법에서는 1인  $\eta_{k-1}$ 에 의한 데이터의 정규화이다.

3) 본 추정알고리즘의 가장 중요한 특징으로 수정항  $P(k-1)f(\theta(k-1))$ 의 도입이다. 처음 Kreisselmeier<sup>(6)</sup>가 단일출력 연속계의 적응관측기에 적용한 이 수정항에 의해 시스템 파라미터  $\theta_{ij}$ 가 기지의 유한구간  $[\theta_{ij}^{\min}, \theta_{ij}^{\max}]$ 에 수렴하게 되고 PE특성의 필요성이 없어진다.

이 파라미터 추정기구는 다음과 같은 성질을 가진다<sup>(1,5)</sup>.

1. P(k)는 2I보다 작은 양의 반한정(positive semidefinite) 행렬  $P_\infty$ 에 수렴한다.

2. 모든 시간 k에서,  $|\theta_{ij}(k)| < \infty$

$$3. \frac{\|e(k)\|^2}{\eta_{k-1}^2 + \phi_a^T(k-1)P(k-1)\phi_a(k-1)} \rightarrow 0 \quad \text{as } k \rightarrow \infty$$

예측오차 e(k)는 다음과 같이 정의된다.

$$e(k) = y(k) - \theta^T(k-1)\phi_a(k-1) - \psi^T\phi_b(k-1)$$

$$4. \|e(k)\| \leq a(k)\|\phi(k-1)\| + b(k)$$

여기서 a(k), b(k)는 0으로 수렴하는 양의 스칼라 수열이다.

$$5. f(\theta(k)) \rightarrow 0 \quad \text{as } k \rightarrow \infty$$

즉,  $\theta_{ij}$ 는  $[\theta_{ij}^{\min}, \theta_{ij}^{\max}]$ 에 수렴한다.

$$6. |\theta_{ij}(k) - \theta_{ij}(k-p)| \rightarrow 0 \quad \text{as } k \rightarrow \infty \quad \text{for any integer } p$$

### 2.3 적응레귤레이터

시스템(1)을 다음과 같은 상태공간모델의 관측기 실현형<sup>(7)</sup>으로 나타낸다.

$$x(k+1) = Fx(k) + Gu(k), \quad y(k) = Hx(k) \quad (9)$$

여기서,

$$F = \begin{bmatrix} -A_1 & I & & \\ -A_2 & & I & \\ \vdots & & & \ddots \\ -A_{n-1} & & & I \\ -A_n & & & 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_{n-1} \\ B_n \end{bmatrix},$$

$$H = [I \ 0 \ \dots \ 0] \quad (10)$$

제어계인을 L이라 하면 제어력은 다음과 같다.

$$u(k) = -L(k)x(k) \quad (11)$$

$$L(k) = [G^T(k)R_k G(k) + I]^{-1} G^T(k)R_k F(k) \quad (12)$$

$$R_{k+1} = Q + L^T(k)L(k) + (F(k) - G(k)L(k))^T R_k (F(k) - G(k)L(k)) \quad (13)$$

여기서 Q는 가중행렬, R은 Riccati 방정식의 해이다. 이 방법은 Riccati 차분방정식을 각 스텝마다 간단히 풀어 실시간제어에 매우 적합하다.

적응제어시스템에 관한 대부분의 설계법은, 미지 플랜트에 대하여 파라미터는 미지이지만 차수는 기지라는 전제하에 정립되어 있다. 본 적응알고리즘도 모델링되지 않은 동특성(unmodeled dynamics)의 영향과 수렴속도, 안정도등의 과도응답을 고려하지 않고 있어, 그 실용성을 검증할 필요성이 있다. 본 연구에서는 실제문제에 대해 단순히 적용하지 않고 제어대상에 관한 선견정보를 고려하여 알고리즘의 효율화를 꾀하고 시뮬레이션과 모형실험을 수행하여 적응제어의 유효성을 알아보았다.

### 3. 제어 시뮬레이션

적응제어계의 구성에 필요한 리엔트리 시스템의 정식화는 최적제어에 의한 연구결과<sup>11,9)</sup>를 참조한다.

제어의 목적은 부유체와 라이저의 하단부를 목표점으로 위치제어하는 동시에 라이저의 동적변형도 제어하는 것으로 실험모형과 실시스템을 대상으로 시뮬레이션 계산을 하였다. 실험모형에서는 추진기를 부유체와 라이저의 중앙부와 하단부에 설치하였고 실시스템에서는 추진기를 라이저에 등간격으로 4기 설치한 경우를 상정하였다. Table 1에 실험모형과 실시스템의 특성치를 나타낸다.

유체력을 산정하기 위한 Morison식에서 관성력계수  $C_m$ 와 항력계수  $C_d$ 는 Reynolds수와 Keulegan-Carpenter수에 의해 결정된다. 시뮬레이션에서는 불확실한 유체력 파라미터인 관성력계수와 항력계수의 참값을 각각  $C_m = 2.0$ ,  $C_d = 1.0$ 으로 가정하

였다. 이하 탄성체인 라이저를 탄성관이라 한다.

Table 1 Principal data of model and real system

Floating body	Model	Real system
Mass(kg)	14.083	$1.5 \times 10^7$
Riser	Model	Real system
Length(m)	1.777	4000
Outer diameter(m)	0.064	0.406
Young's modulus(N/m <sup>2</sup> )	$6.3 \times 10^9$	$2.1 \times 10^{11}$
Moment of inertia of section(m <sup>4</sup> )	$4.667 \times 10^{12}$	$5.541 \times 10^4$
Weight in air(N)	22.54	$3.0 \times 10^7$
Weight in water(N)	1.13	$1.5 \times 10^6$

#### 3.1 실험모형에 대한 시뮬레이션

중양차분법<sup>10)</sup>에 의해  $\Delta t = 0.005$ 초로 실험모형시스템을 이산화하고 다음과 같은 ARMA모델로 나타낸다.

$$y(t) = Cy(t-1) + Ky(t-2) + Pu(t-1) \quad (14)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} Y(t) \\ \theta(t) \\ Z_1(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_0(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}$$

여기서 Y는 부유체의 수평방향(sway)의 변위,  $\theta$ 는 탄성관의 회전각,  $Z_1$ 는 탄성관의 횡방향 변형의 1차 모드 성분량이고,  $u_0$ ,  $u_1$ ,  $u_2$ 는 각각 부유체(F0), 탄성관의 하단부(F1), 중앙부(F2)에서의 제어력이다<sup>1)</sup>. 식(9)와 같은 관측기 실현형으로 나타내면 F, G는 다음과 같다.

$$F = \begin{bmatrix} C & I \\ K & 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

제어력은 식(11),(12),(13)으로부터 구해진다.

시스템이 발산역에 매우 가까운 극을 갖고 있어, 추정파라미터의 초기치에 따라서는 제어시스템이 발산할 가능성이 있다. 본 연구에서는 모델링되지 않은 동특성의 영향으로 탄성관의 탄성응답을 10 차모드까지 고려하고 추정파라미터의 초기치로는 다음과 같은 3가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하여 채택한 적응알고리즘의 안정성과 유효성을 확인하였다.

- 1)  $C_m=2.0, C_d=1.0$ 인 참값으로 한 경우 (Test A),
- 2)  $C_m=1.6, C_d=0.8$ 인 경우(Test B, 20%초기 오차),
- 3) ARMA모델 식(14)에서 파라미터 P를 기저로 가정하여 추정하지 않고 C, K를 추정하되 파라미터의 초기치로  $C_m=1.0, C_d=0.5$ 로 한 경우(Test C, 50%초기오차).

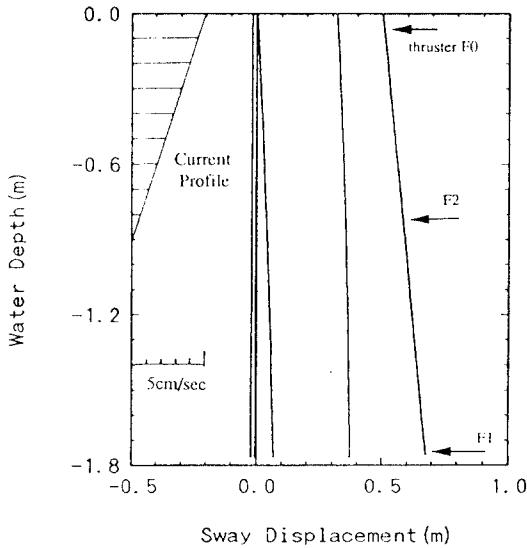


Fig. 2 Simulation result of model with true initial value(Time interval of displayed lines = 3.0 sec)

Fig. 2는 실험모형에 대한 시뮬레이션 결과 (Test A)이다. 부유체의 초기변위는 0.5m, 탄성관의 초기경사는 0.1rad이다. 그림 우단부의 화살표

는 추진기의 설치위치이고, 좌상단에 깊이방향에 따른 조류의 속도분포를 나타낸다. 외력은 실험시에 측정된 조류의 수직분포를 근사화하였다. 식(13)에서의 가중행렬 Q와 Riccati방정식의 해 R의 초기치로는 단위행렬 I를 대입하였다. 탄성관의 변형을 억제해 나가면서 부유체와 탄성관의 하단부를 목표로 하고 있는 지점으로 빠르게 위치제어하고 있음을 알 수가 있다.

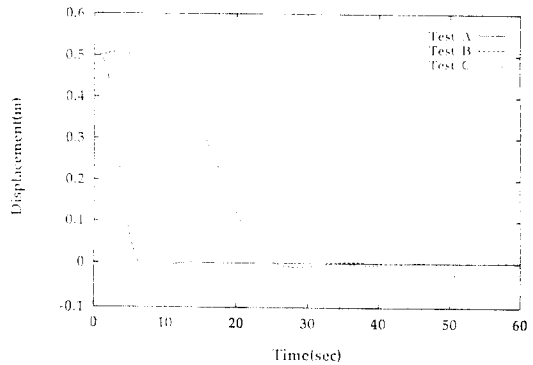


Fig. 3 Displacement of floating body

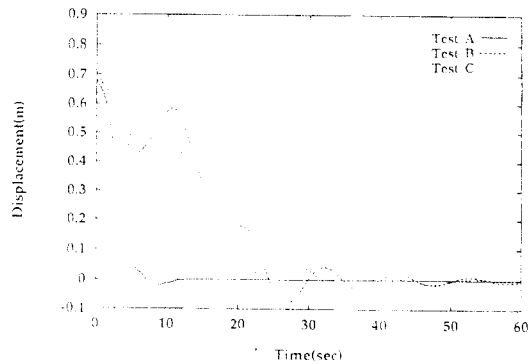


Fig. 4 Displacement of lower end of model riser

Fig. 3은 초기치로 참값 또는 초기오차를 갖는 파라미터를 설정하였을 때 부유체의 변위를, Fig. 4는 탄성관 하단부의 변위를 나타낸다. 초기오차를 갖는 파라미터를 대입하였을 경우(Test B, C), 참값을 대입한 경우(Test A)와 비교해서 수렴속도는 느리지만 부유체와 탄성관의 하단부를 목표로 하고 있는 지점으로 위치제어하고 있고, 심지어 50%

의 오차를 갖는 초기치를 설정하여도(Test C) 적용제어기가 안정하게 기능하고 있음을 알 수가 있다. 이때 부유체와 탄성관에서 필요한 정상(steady state)제어력은 각각 9.1gf, 0.93gf 정도이고 시스템 파라미터의 추정치도 빠른 속도로 일정한 값으로 수렴하였다.

3.2 실시스템에 대한 시뮬레이션

$\Delta t = 0.1$ 초로 실시스템을 중앙차분법에 의해 이산화하고 다음과 같은 ARMA모델로 나타낸다.

$$y(t) = Cy(t-1) + Ky(t-2) + Pu(t-1) \quad (18)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} Y(t) \\ \theta(t) \\ Z_1(t) \\ Z_2(t) \\ Z_3(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_0(t) \\ u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} \end{bmatrix},$$

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} \end{bmatrix}$$

여기서 Y는 부유체의 수평방향의 변위,  $\theta$ 는 라이저의 회전각,  $Z_1, Z_2, Z_3$ 는 라이저의 횡방향 변형의 1, 2, 3차 모드 성분량이고,  $u_0, u_1, u_2, u_3, u_4$ 는 각각 부유체(F0), 라이저의 하단부(F1)와 중앙부(F2), 라이저의 위에서부터 1/4의 위치(F3), 3/4의 위치(F4)에서의 제어력이다<sup>(1)</sup>.

Fig. 5는 4000m의 라이저를 장비한 실시스템에 대한 시뮬레이션 결과이다. 부유체의 초기변위는 1000m, 라이저의 초기 회전각은 0.1rad이다. 조류

의 속도는 수면에서 0.5knot(0.25m/sec)이고 깊이 방향으로 감소하여 수심 1000m에서 0이 되는 선형 분포를 가정하였고 모델링되지 않은 동특성의 영향으로는 라이저의 탄성변형을 12차 모드까지 고려하였다. 추정파라미터의 초기치로는  $C_m = 1.6, C_d = 0.8$  (20%초기오차)를 설정하고, 식(13)에서의 가중행렬 Q와 Riccati 방정식의 해 R의 초기치로는 각각  $10^4 I$ 와 I를 대입하였다. 시뮬레이션 결과로 부터 비모델링된 동특성의 영향을 고려하더라도 라이저의 탄성변형을 억제하면서 부유체와 라이저의 하단부를 목표점으로 위치제어함을 알 수가 있다. 라이저 하단부의 위치는 2-3m의 정확도로 제어가 되었고, 추정된 시스템 파라미터도 빠른 속도로 일정치에 수렴하였다. 부유체에서 요구되는 정상제어력은 1.4tonf 정도이고, 4기의 추진기를 설치한 라이저에서 필요한 정상제어력은 0.7tonf 정도였다.

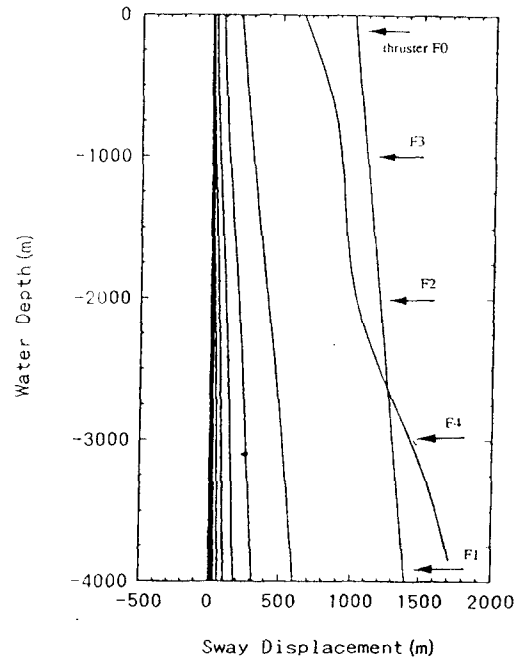


Fig. 5 Simulation result of real system with 20% initial error (Time interval of displayed lines = 10min)

### 4. 실 험

이상에서 모델링되지 않은 동특성이 존재하는 시스템에 초기오차를 갖는 파라미터를 대입하여 적응제어에 의한 시물레이션을 행한 결과, 적당한 제어력으로 부유체와 탄성관 하단부의 위치가 제어됨을 확인하였다. 그러나 시스템의 정식화에는 많은 가정을 하고 있고 시물레이션상에서는 예상할 수 없는 비모델화된 동특성의 영향이 실제로는 존재하므로 실험을 통하여 적응알고리즘의 유효성을 검증할 필요가 있다.

#### 4.1 실험장치 및 모형

액추에이터로는 최대출력이 120gf인 회전수 제어의 프로펠러형 추진기를, 센서로는 초음파 위치계측장치를 사용하였다<sup>11,9)</sup>. 이 위치계측장치는 수중에서 송신기로부터 초음파를 발신하여 수신기에서 수신할 때까지 카운터를 작동시켜 카운터의 값로부터 거리를 산정하는 장비로써 5m의 거리를 1mm의 정확도로 측정할 수가 있다. 한 개의 송신기로부터 발신된 초음파를 세 개의 수신기로 수신하여 삼각측량의 방법으로 부유체의 위치와 탄성관의 변형을 계측하였다. 또, 추진기에 이용한 DC서보모터는 태코제너레이터를 내장하고 있어 회전수를 피드백하여 회전수에 비례하는 추력을 조정하였다.

탄성관의 모형으로는 아크릴제의 보를, 부유체의 모형으로는 배수량이 14kg이고 Column간 거리가 58cm인 반잠수식 구조물을 사용하였다.

탄성관과 부유체의 질량비는 연성거동에 매우 중요한 계수이다. 실시스템에서의 라이저와 부유체의 질량비인 1/5이 되도록 실험모형을 제작하였다. 또, 탄성관의 실험모형에서 중요한 상사법칙<sup>11)</sup> 파라미터인 축력 또는 장력의 효과를 고려하여, 라이저의 수중중량과 공기중중량의 비율인 1/20이 되도록 중량분포를 조절하며 탄성관 모형을 제작하였다<sup>11,9)</sup>.

탄성관의 변형은 Modal filter<sup>12)</sup>를 이용, 계측데이터로부터 3차까지의 모드를 추출하여 강제모드와 1차모드를 제어하였는데, 고차모드일수록 빨리 감쇠하므로 변형량은 1차에서 3차모드만으로 나타

난다고 가정하였다.

제어는 센서로 사용한 초음파 위치계측장치의 성능상 가장 빠른 속도인 5Hz로 실행하였는데, 양단의 경계조건이 단순지지, 자유단인 탄성관 모형의 고유주기가 저차로부터 12초, 3.7초, 1.77초, 1.034초 등이므로 저차모드에 대해서는 충분히 여유가 있다고 여겨진다.

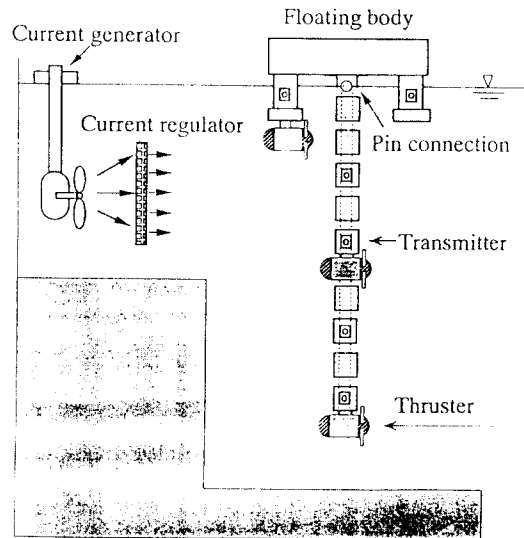


Fig. 6 Experimental setup

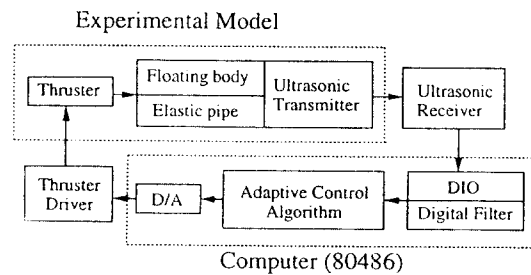


Fig. 7 Block diagram of control system

외력으로 가한 조류는 소형의 회전기를 사용, 발생시키고 정류격자(整流格子, current regulator)를 설치하여 수면에서 5cm/sec이고, 깊이방향에 따라 속도가 감소하는 조류분포를 구현하였다<sup>11,9)</sup>. Fig. 6은 실험시스템을, Fig. 7은 제어시스템을 나타낸다.



#### 4.2 실험결과 및 고찰

실험은 조류중에서 원점으로 부터 조금 떨어진 곳에서 제어를 시작하여 탄성관의 변형을 제어하면서 부유체와 탄성관의 하단부를 목표점으로 이동하여 위치제어하였다.

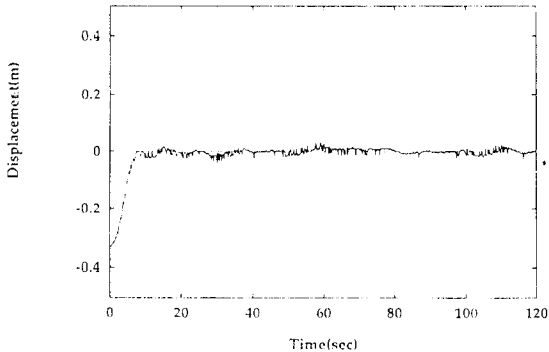


Fig. 8 Sway displacement of floating body in the experiment

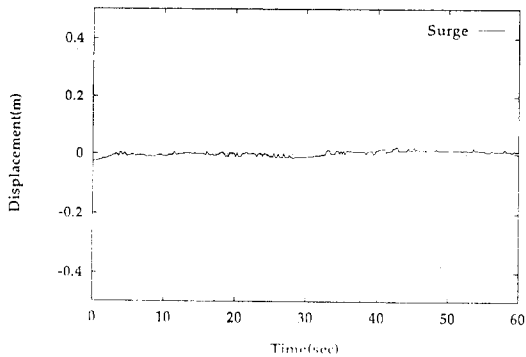


Fig. 9 Surge displacement of floating body in the experiment

Fig. 8은 부유체의 변위를 보여준다. 부유체의 위치제어에 대해서는 수심 2m의 0.5%에 해당하는 1cm의 정확도로 제어가 되었다. 부유체와 탄성관의 운동을 이차원 평면문제에 하기위해 PID제어로 행한 평면의 운동(surge, yaw)도 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 정확하게 제어가 되었다.

Fig. 10은 탄성관 하단부의 변위를 보여준다. 탄성관의 제어에 의해, 제어하지 않은 경우에 발생하

는 6cm정도의 정상편차가 3cm로 50%정도 줄어들었음을 알 수가 있다. 이때 부유체와 탄성관에서 필요한 정상제어력은 각각 20gf, 3.0gf 정도였다.

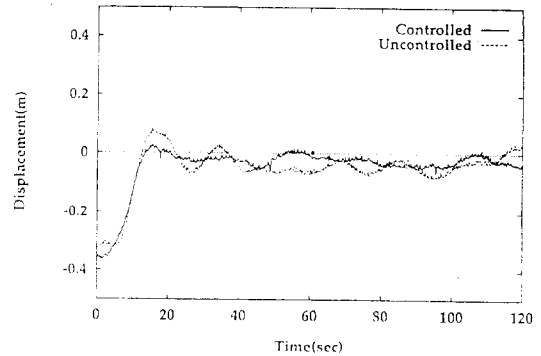


Fig. 10 Displacement of lower end of riser in the experiment

실험시에 추정된 ARMA모델에서의 파라미터 C, P중 대각요소의 추정치를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타낸다. 추정된 파라미터 C, P가 일정한 값으로 빠르게 수렴하고 있음을 알 수가 있다. 본 연구에서 채택한 파라미터 추정알고리즘은 역행렬의 계산을 필요로 하지 않아 간단하고 계산시간도 짧아 실시간제어에 적합하다.

그러나 앞에서도 서술했듯이 파라미터가 참값으로 수렴하기 위한 필수조건인 PE특성을 필요로 하지않는 추정기구를 이용하였으므로 추정된 파라미터가 반드시 참값으로 수렴하지는 않는다. 본 실험에서는 추정파라미터의 초기치로  $C_m = 2.0$  과  $C_d = 1.0$ 을 대입하였다.

이상으로 수중에서 유체력 계수의 불확실성에 대응하기 위해 도입한 적응제어에 의한 모형실험 결과, 부유체와 탄성관 하단부의 변위제어등 목적으로 한 제어기능을 얻을 수가 있었지만 탄성관 하단부의 위치제어에 있어서는 정확도의 면에서 충분히 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다.

본 연구에서는 실시간제어를 위해 실험에서 사용한 하드웨어의 성능을 고려하여 적응제어계를 설계하였는데, 식(14),(15),(16)과 같이 모델링을 너무 간략화한 것이 그 원인으로 판단되어 진다. 시뮬레이션에서는 예상할 수 없는 비모델화된 동특성의 영향이 실제로는 존재하고 모델링오차, 파라

미터의 변동등 외란에 충분한 대책이 없는 것이 현재 존재하는 적응제어알고리즘의 실상이다.

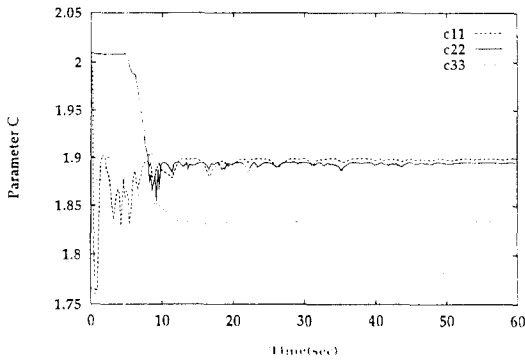


Fig. 11 Estimated value of parameter C in the experiment

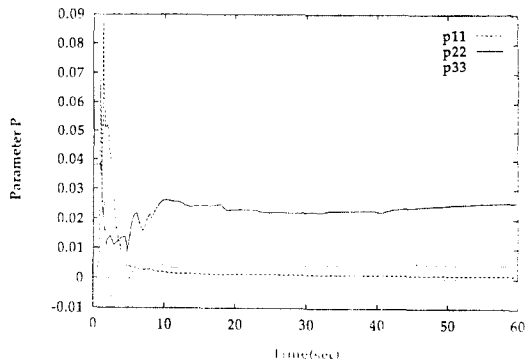


Fig. 12 Estimated value of parameter P in the experiment

또, 실험시에 발생한 추진기의 전기적 노이즈의 영향으로 제어력이 진동하여 시스템이 불안정하게 되지 않도록 가중치를 가하여 탄성관에서의 제어력이 작았던 것도 제어효과 저하의 한가지 원인으로 생각된다. 본 실험에서는 제어계인을 산정하는 식(13)에서 가중행렬 Q에 단위행렬 I를 대입하였다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 수중 특유의 부가질량, 항력등 유

체력 파라미터의 불확실성에 대응하기 위해 지속적 가진입력(PE특성)을 필요로 하지 않는 다변수 입출력 선형 이산계의 적응알고리즘을 도입하여 장대 유연한 탄성구조물인 라이저의 리엔트리시스템에 적응제어를 적용하는 가능성에 대하여 알아보았다.

비모델화된 동특성의 영향이 존재하는 시스템에 20%, 50%의 초기오차를 갖는 파라미터를 대입하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 추정한 파라미터가 일정치에 빠르게 수렴하며 적당한 제어력으로 부유체와 라이저 하단부의 위치가 제어되어 본 연구에서 구성한 적응제어기의 강인성이 확인되었다.

또, 온라인으로 미지의 파라미터를 추정하므로 계산기에 대한 부담이 커서 실현에 어려움이 많다고 알려져 있는 적응제어에 의한 모형실험결과, 부유체의 위치에 대해서는 수심의 0.5%에相当하는 정확도인 1cm정도로 제어가 되었다. 또, 정확도의 면에서는 문제점이 있으나 탄성관 하단부의 변위 제어에 대해서도 정상오차가 50% 줄어드는 등 제어의 효과가 입증되어, 채택한 파라미터 추정알고리즘과 적응레귤레이터의 유효성과 안정성을 확인할 수가 있었다.

본 연구의 목적은 실시스템에 적응제어 도입의 가능성을 검토하는 것으로, 장대 유연한 해양구조물의 위치와 탄성응답에 대한 적응제어시스템의 구축이라는 점에서 유익한 결과를 얻었다. 본 연구 결과는 최적제어에 의한 연구결과와 함께, 최근 국책연구과제로 선정되어 주목을 받고 있는 태평양 심해저 망간단괴 채광개발시스템 연구의 기초자료로도 이용될 것이 기대된다.

### 후 기

본 연구에 많은 조언과 격려를 해 준 일본 동경 대학의 Suzuki, H. 교수와 Yoshida, K. 교수께 깊은 감사를 드린다.

### 참 고 문 헌

- 1) Suzuki, H., Yoshida, K., Ishida, S., Nam, D.H., "Active Control of Riser Deformation

- and Vessel Motion for Entry/Reentry System", Proc. of the 4th Int. Conf. on Offshore and Polar Engineering, Vol.2, pp. 216-223, 1994
- 2) Astrom, K.J., Wittenmark, B., "Adaptive control", Addison Wesley, 1989
  - 3) Harris, C.J., Billings, S.A.(ed.), "Self-Tuning and Adaptive Control -Theory and Applications", Peter Peregrinus LTD, 1981
  - 4) Ossman, K.A., "New Results in Indirect Adaptive Control", Ph.D. Thesis, Univ. of Florida, 1986
  - 5) Ossman, K.A., Kamen, E.W., "Adaptive Regulation of MIMO Linear Discrete Time Systems Without Requiring a Persistent Excitation", IEEE Trans. AC Vol.AC-32, No. 5, pp. 881-889, 1987
  - 6) Kreisselmeier, G., "An Approach to Stable Indirect Adaptive Control", Automatica, Vol. 21, pp. 425-431, 1985
  - 7) Samson, C., Fuchs, J.J., "Discrete Adaptive Regulation of Not-Necessarily Minimum-Phase Systems", Proc. IEEE Vol.128, Pt.D, No.3 pp. 102-108, 1981
  - 8) Samson, C., "An Adaptive LQ Controller for Non-minimum-phase Systems", Int. J. Control, Vol.35 pp. 1-28, 1982
  - 9) 南東浩, "浮體・線狀構造物連成系の能動制御", 日本 東京大學 工學部 博士論文, 1994
  - 10) Bathe, K.J., Wilson, E.L., "Numerical Methods in Finite Element Analysis", Prentice-Hall, 1976
  - 11) Hartnup, G., Airey, R. et al, "Hydrodynamic Tests on Marine Risers", OTC4319, pp. 223-233, 1982
  - 12) Meirovitch, L., Baruh, H., "The Implementation of Modal Filters for Control of Structures", J.Guidance & Control, Vol.8 No.6 pp. 707-716, 1985