

◎ 論 文

## 海底面 토양마찰력에 의한 圓筒形 물체의 운동<sup>+</sup>

최 경 식\* · 강 신 영\* · 강 효 진\* · 곽 한 우\*\*

(1992년 1월 30일 접수)

### Motion of a Cylindrical Object due to Seabed Soil Friction

Kyungsik Choi, Sin Young Kang, Hyo Jin Kang, Han Woo Kwak

**Key Words :** Cylindrical Object(원통형 물체), Seabed Soil Friction(해저면 토양마찰력), Rotational and Translational Motion(회전 및 직선운동), Parametric Study, Minimum Penetration Depth(최소침식깊이).

#### Abstract

The motion of a cylindrical object resting on shallow seabed due to wave forces and soil friction is studied. Given environmental conditions such as wave characteristics and seabed soil properties, the equations of motion are derived and the corresponding responses of the cylinder in two dimensional plane, i.e., translational and rotational displacements, accelerations, are calculated. The motion is substantially restrained by the penetration of a cylinder into seabed and the parametric study focuses on finding out a minimum penetration depth which makes the cylinder motionless.

#### 1. 서 론

해저에 놓인 원통형 물체의 운동에 대한 연구는 석유시추와 생산을 위한 라이저(riser), 해저 케이블, 시추파일 등 해양산업에 관련된 구조물과 관련하여 관심이 되어 왔으며 그 외에 산업용이나 군사용의 각종 원통형 구조물이나 계측장비를 해저에 부설하는 목적에서도 연구가 진행되고 있다.

70년대에 들어서 석유파동에 따른 연안 해저유전의 개발과 해저 송유관 부설사업이 활발하였는데, 본 해저 원통형 물체의 운동에 관한 연구는 해저 송유관 설치상의 제 문제점을 해결하기 위한 노력(on-bottom stability design of submarine pipelines)과 일치한다고 볼 수 있다. 해저 송유관의 운동형식과 원통형 물체의 운동형식에 근본적인 차이가 있지만 2차원 원형단면 주위의 유체 흐름과 유체력 산정방법 등에 있어서 두 경우 충분히 유

+ 1991년도 한국해양공학회 추계학술대회 발표(1991년 11월)

\* 정회원, 한국해양대학교 해양공학과

\*\* 국방과학연구소

사한 해석방법을 사용할 수 있기에 우선적인 관심을 갖게 된다.

원통형 물체가 해저에 놓여 있는 경우 물체 주변의 유체 흐름이 비정상적이며 또한 비대칭적이기 때문에 유체역학적인 측면이나 구조동역학적 측면에서의 어려움 뿐만 아니라 물체와 해저면과의 상호작용, 해저면의 침식과 지형변화, 물체의 운동에 기인한 유체력의 보정효과 등 복합적인 현상들에 대한 연구가 수행되어야 하는 어려움이 있다. 그러나 이러한 종합적인 연구는 대규모의 실험장비와 현장실험, 실험실 단위의 시뮬레이션 등 많은 인력과 연구비의 투입이 필수적으로서 최근까지도 선진국 주도(석유회사의 연구비 지원)의 몇 가지 대형 연구 프로젝트를 제외하면 대부분의 연구들은 유체력 계산이나 물체의 운동, 해저면 침식 등의 개별적인 현상에 대해 국부적인 해석방법을 택하고 있다.

해저 송유관 설계에 있어서 전통적으로 사용한 안정성 해석방법은 유체의외력과 해저면 마찰력과 사이에 정역학적인 평형조건을 써 온 것이다. 파도나 조류에 의한 유체력은 항력계수와 양력계수를 사용한 Morison 공식으로 부터 계산되고 해저면 마찰력은 간단한 토질실험에 근거한 Coulomb 마찰계수를 사용하여 계산된다. 유체력 계산과 마찰력 계산식의 단순함에도 불구하고 이러한 해석방법은 세계적으로 해저 송유관 설계에 오랫동안 아주 유용하게 사용되어 왔고 또한 그 결과도 상당부분 성공적이었다고 할 수 있다.

그러나 1970년대 후반부터 실험에 기초한 많은 연구들<sup>1)~4)</sup>이 유체력 계산과 해저면 마찰력 계산을 위한 보다 정교한 모델을 다루기 시작하였는데, 실험실 혹은 실제 바다속에서의 실험결과에 의하면 주기적인 왕복흐름 속의 물체가 받는 유체력은 전통적인 해석방법에 따라 추정된 정상흐름 속에서의 유체력보다 상당히 크고 또한 송유관의 안정상태를 유지하기 위한 해저면 마찰력도 예상보다 훨씬 큰 값을 갖게됨을 알게 되었다. 실험으로부터 얻어진 이러한 새로운 인식은 해저 송유관의 설계와 부설, 유지에 따르는 제반의 문제들, 즉 유체력 계산, 해저면 마찰력 계산, 통합 전산 프로그램 개발, 송유관 설계기준 결정 등의 문제들에 관하여

종합적인 연구 프로젝트가 필요함을 주지시키게 되었다. 그 결과 1983년부터 1988년 까지 American Gas Association(A.G.A.) 해저 송유관 연구위원회가 주도한 연구 프로젝트가 수행되었으며, 이 A.G.A 연구 프로젝트<sup>5)</sup>는 역시 1983년부터 3년간 수행된 PIPESTAB 연구 프로젝트<sup>6)</sup>와 함께 해저 송유관의 안정성 평가에 관한 대표적인 산-연 합동연구로서 기록되는 것이었다.

송유관-토양 상호작용에 대한 모형실험의 결과<sup>7)~9)</sup>에 의하면 송유관이 횡동요를 유발함과 함께 점차 해저면을 파고 들어가게 되어 해저면이 유체력에 저항하려는 마찰도 그에 상응하여 증대되는 것을 확인하였다. 이 마찰력은 전통적으로 사용되어 온 Coulomb 마찰력 표현식과는 다른 것으로서 송유관이 해저면을 파고 들며 토양을 끊어냄에 따라 파도나 조류와 같은 유체의외력에 저항하려는 힘이 더욱 커지는 현상을 확인하였다.

대규모의 연구비 투자와 복잡한 실험을 통하여 얻어진 지식은 상당히 유용한 것이었으나 그 결과가 모든 환경조건에 충분히 만족스러운 것은 아니라는 것을 지적할 수 있다. 특히 해저면 마찰력 관계 실험은 연구자가 주장하는 효용성에 비해 실제로 국지 상황에 응용할 수 있을 만큼 충분한 자료를 제공하지 못하고 있다. 무엇보다도 긴 케이블이나 2차원보로 취급할 수 있는 송유관의 수평 횡동요만을 취급한 이들 연구결과를, 본 연구의 대상인 해저부설용 자기감응기뢰와 같이 길이가 짧은 원통형 물체의 운동에도 그대로 적용하는 것이 적합할지는 의문시된다. 회전운동의 존재는 본 연구에서 매우 중요한 의미를 갖게 되는데, 중량이 큰 원통형 물체의 회전운동은 해저 송유관의 수평 운동과는 달리 해저 바닥면을 끊어내는 효과보다는 경우에 따라서는 오히려 해저면을 다져주는 역할을 하기 때문에, 기존의 송유관 해석에 사용되었던 경험식과 계수값들을 그대로 사용하기에는 문제점이 있다는 사실을 지적할 수 있다.

해저에 놓인 원통형 물체에 미치는 수평 유체력은 해저면의 마찰력이 충분하지 않으면 물체를 미끄러지게 하거나 구르게 하며, 부력과 양력은 해저면의 마찰력을 감소시켜 물체를 수평력에 의해 쉽게 움직일 수 있게 하고, 만약 물체의 무게가

부력과 양력의 합력보다 작으면 물체를 바닥에서 뜨게 한다. 물체 주위의 와류형성에 의해 물체는 주기적인 유체력을 받을 가능성도 있으며 공진현상에 의한 과도한 운동응답도 예상할 수 있다.

본 연구는 해저에 원통형 물체가 놓여졌을 때, 파도나 조류에 의한 유체력 계산결과<sup>12)</sup>를 이용하여 주어진 해저의 토양특성을 기본변수로 택하여 그에 상응하는 원통형 물체의 운동응답을 수치모델을 사용하여 계산하였다. 본 연구에서는 원통형 물체의 2차원 평면상의 운동을 해저면에 평행한 직선운동과 질량중심축에 대한 회전운동으로 분리하여 이들 각각의 운동방향에 따른 운동방정식과 운동응답, 즉 운동가속도, 속도, 변위 등을 구하였고 이를 통해 운동발생의 여부를 검토하였다.

## 2. 기본운동방정식

해저 원통형 물체의 동역학적인 운동응답의 추정은 유체력과 물체와 해저토양 사이의 상호작용을 현실성있게 얼마나 정확히 산정하는가에 달려 있다. 해저 송유관의 실험에 의해 얻어진 결론은 이들 유체력과 해저면 마찰력은 대단히 비선형적인 것으로서 상대운동으로 연관되어 작용하기 때문에 그 운동응답 역시 비선형의 거동을 보여 주고 있다.

원통형 물체는 최초에 수평한 해저면에 놓인 상태에서 2차원 평면상에서 3자유도운동(즉, 수평, 수직, 회전운동)을 하는 것으로 가정한다. 그러나 본 연구에서 수직운동은 물체에 작용하는 부력과 유체양력이 물체의 무게에 비해 비교적 작은 까닭에 물체가 해저면에 파묻히는 penetration을 제외하면 거의 움직이지 않는다고 볼 수 있다. 또한 강제운동이므로 인접한 구조체의 존재로 인한 축방향 인장력은 생각할 필요가 없고 또한 구조체의 감쇄력과 구조강성을 무시할 수 있다. 원통형 물체에 대한 운동방정식은 다음과 같다.(Fig.1 참조)

1) 수평운동(x-direction) :

$$M_p \ddot{x}(t) = F_h(t) - F_s(t) \dots\dots\dots (1)$$

$\ddot{x}(t)$  : 원통형 물체의 수평 가속도

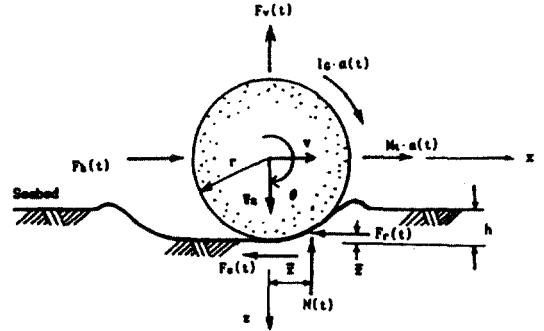


Fig.1 Definition Sketch for a Cylinder Motion Analysis

$M_p$  : 원통구조의 질량

$F_h$  : 유체력(hydrodynamic drag force + inertia force)

$F_s$  : 해저면 마찰력(총수평반력)

2) 수직운동(z-direction) :

$$N(t) = W_s - F_v(t) \dots\dots\dots (2)$$

$N(t)$  : 원통형 물체에 작용하는 총수직반력

$W_s$  : 수중에서의 중량

$F_v(t)$  : 양력(hydrodynamic lift force)

3) 회전운동 :

$$I_G \alpha(t) = F_s(t) r \dots\dots\dots (3)$$

$I_G$  : 질량중심에 관한 관성모멘트

$\alpha(t)$  : 회전 가속도

$r$  : 원통의 반경

식(3)은 초기 파묻힘이 없을 경우 ( $h=0$ )와 초기 파묻힘이 있더라도 원통의 순간적 위치가 흠안쪽에 위치할 경우에만 성립하는 식이다. 만일 초기 파묻힘이 생겨서 원통이 흠언덕을 밀어내는 동안에는 식(3a)로 표현된다.

$$I_G \alpha(t) = F_s(t) (r - \bar{z}) - N(t) \bar{x} \dots\dots\dots (3a)$$

$(h \neq 0 \text{ and } x \geq x_{max})$

여기서  $\bar{z}$ 와  $\bar{x}$ 는 Fig.1에 도시된 것처럼 수평반력

$F_s(t)$ 와 수직반력  $N(t)$ 가 작용하는 위치로서 파물 린 깊이와 거리의 1/2로써 정의하였다. 한편 이러한 3자유도의 기본운동방정식에 있어서 식(1)의 해저면의 마찰반력항  $F_s$ 는 다음과 같이 토양에 의한 선형탄성복원력  $K_s x$ 과 점성감쇄력  $C_s \dot{x}$ , 그리고 토양의 소성변형도에 연관되는 비선형 마찰력인  $F_{s,p}$ 의 합으로 표시된다.

$$F_s(t) = K_s x + C_s \dot{x} + F_{s,p} \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $F_{s,p}$ 는 식(5)와 같이 평면 위를 미끄러지는 물체의 마찰력을 나타내는 Coulomb friction  $F_c$ 와 여기에 추가로 물체가 해저면을 파고들게 됨으로써 물체의 운동방향 전방에 형성되는 흩어짐을 극복해야하는 저항력을 나타내는 soil resistance force  $F_r$ 의 합으로 표시된다. 이 두번째 항  $F_r$ 이 추가되는 것은 penetration에 의해 양력과 부력의 합이 물체의 무게에 도달할 때에도 양의 마찰력을 나타내는 실험결과에 근거하고 있다.<sup>8)</sup>

$$F_{s,p} = F_c + F_r \dots\dots\dots (5)$$

$$F_c = \mu(ws - F_v) \quad (F_c = 0 \text{ for } W_s \leq F_v) \quad (5a)$$

$$F_r = \beta \gamma A_s \quad (h \neq 0 \text{ and } x \geq x_{max}) \quad (5b)$$

- $\mu$  : Coulomb 마찰계수
- $\beta$  : 실험에 의해 결정되는 마찰력 계수
- $A_s$  : 물체가 해저면을 파들어 간 면적(displaced area, Fig.2 참조)
- $\gamma$  : 토양의 비중(submerged unit weight of soil)

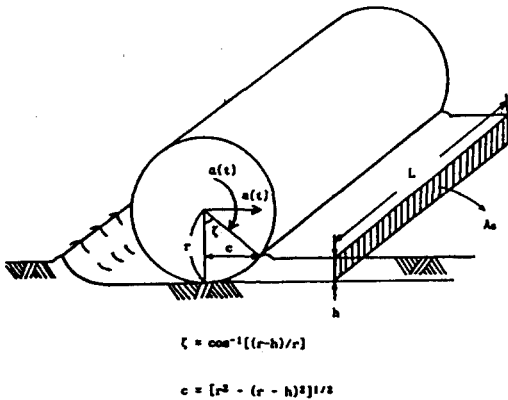


Fig.2 Definition of Displaced Area

그러나 식(5a)는 원통의 운동형식에서 유체력이 마찰력보다 크기 때문에 미끄러짐이 발생할 때의 표현식일 뿐이고 만일 원통이 미끄러짐 없이 굴림(rolling) 운동에 의해 움직일 때는 마찰력  $F_c$ 를 유체력의 1/3로써 추정 계산할 수 있다.(즉  $F_c = F_h/3$ ). 또한 식(5b)의 마찰력  $F_r$ 에 있어서 초기 파물힘이 없거나 초기 파물힘이 있더라도 원통의 운동순간의 위치가 흠 안쪽에 위치할 경우에는 이 힘은 작용하지 않는다.

이상의 식(1)에서 식(5) 까지를 정리하면 수평 운동에 대한 운동방정식으로 식(6)을 얻는다. 시간에 따른 적분은 4차의 Runge-Kutta 계산법을 사용하였다.

$$M_t \ddot{x}(t) + C_t \dot{x}(t) + K_t x(t) = F_h(t) - \mu[W_s - F_v(t)] - F_r \dots\dots\dots (6)$$

- $M_t$  : 원통의 질량(즉  $M_t = M_p = W_s/g$ )
- $C_t$  : 토양의 감쇄계수(즉  $C_t = C_s$ )
- $K_t$  : 토양의 강성계수(즉  $K_t = K_s$ )

### 3. 기본변수의 선택

본 연구에서는 다음과 같은 제원을 가진 원통형의 물체가 해저에 놓여 있는 실제 상황을 전제로 수치계산을 수행하였다.

- 원통의 질량  $M_t$  : 863Kg
- 원통의 직경  $D$  : 0.56m
- 원통의 길이  $L$  : 1.7m
- 해수의 밀도  $\rho$  : 1034kg/m<sup>3</sup>
- 해수중에서 원통의 중량  $W_s$  : 4214.59N
- 해수중에서 원통의 관성모멘트  $I_G$  : 16.86Kg-m<sup>2</sup>

운동방정식에 포함되는 여러 변수들은 크게 나누어 유체력의 세기를 결정하는 수심, 파도의 주기, 파장, 조류의 속도 등에 관한 입력자료와 해저면 토양의 재료특성을 나타내는 토양감쇄계수(soil damping coefficient), 강성계수(soil stiffness coefficient), Coulomb 마찰계수, 토양의 비중, 초기 파물힘의 깊이(initial penetration depth) 등의 입력자료로 구분할 수 있다. 유체력 계산에 관여하는

변수들은 현장 수역의 상황을 임의로 선정할 수 있어서 그 선택에 어려움이 없으나 토양의 특성을 결정하는 변수들은 충분한 실험자료의 뒷받침이 없는 한 그 값의 선택에 많은 어려움이 따른다.

원통의 횡동요에 대한 반력으로서의 토양 마찰력은 탄성부와 소성부로 나눌 수 있는데 두 변수  $K_s$ ,  $C_s$ 는 그 중 탄성변위와 관련된 복원력과 감쇄력에 해당한다. 실제로 송유관이나 원통의 횡동요시 작용하는 마찰력의 대부분이 토양의 소성변위에 관련된다는 것이 알려져 있다.<sup>10), 11)</sup> 따라서 이 두 변수의 값은 소성변위에 관련되는 비선형 마찰력 계수들( $\mu$  또는  $\beta$ ) 보다는 상당히 작은 값을 추측할 수 있다. 특히  $K_s$ 는 거의 0에 가까운 값으로서 이 경우 원통이 가지는 고유진동수는  $\omega_n = (K_s/Mt)^{1/2} \sim 0$ 이 된다. 물체의 고유진동수가 0이면 고유진동주기는 무한대가 되어 실제 원통의 운동은 전적으로 외부에서 가해지는 힘(유체력과 마찰력의 상대적 크기)에 의해서 결정된다. 따라서 외력이 작용하는 주기와 물체의 고유진동주기가 같아지는 경우 생길 수 있는 공진현상은 피할 수 있다. 한편 점성감쇄력은 탄성변위에 의한 마찰력중 비교적 작은 부분을 차지하는 것으로서  $C_s$  역시 작은 값을 갖는다고 볼 수 있는데 몇 가지 특별한 경우를 제외하고는 무시되어도 무방할 것이다.

Coulomb 마찰계수는 물체와 물체의 표면사이에서 상대적인 운동이 있음으로써 발생하는 마찰력을 계수의 도입으로 표현한 것이다. 이 힘은 물체사이의 접촉면적이나 마찰속도의 크기와는 무관한 것으로 단지 물체의 중량에 마찰표면의 거칠기를 대변하는 일정한 계수  $\mu$ 를 곱함으로써 산정된다. 이러한 단순화된 마찰력 표현은 정지마찰, 운동마찰, 미끄럼마찰, 굴림마찰 등의 운동형식이 복합적으로 관여되는 경우 그 사용에 주의해야 될 필요가 있다. 본 연구에서 해저면 토양의 Coulomb 마찰계수  $\mu$ 의 값을 결정하는 일은 또 다른 어려움이 따른다. 점토질(clay)과 모래질(sand)로 대표되는 해저면의 토양은 실제 현장 수역에서는 이 두 가지 종류만으로는 구분할 수 없는 다양한 성분과 비율로 혼합되어 있기 때문에  $\mu$ 의 값도 토질변화 만큼 다양한 값을 가질 수 있다는 점이다. 기본적으로  $\mu$ 의 값은 실험에 의존하여 결정될 수 밖에 없지만

실험의 조건이 얼마 만큼 현장의 상황을 그대로 표현할 수 있느냐에 어려움이 있다. 본 연구에서는  $\mu$ 의 값으로 PIPESTAB의 실험결과<sup>8)</sup>인 0.2와 0.6을 선택하였다.

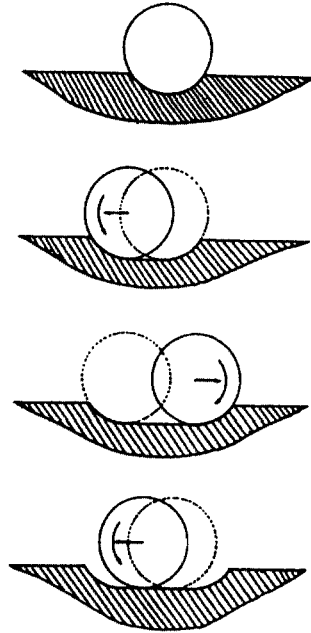


Fig.3 Embedment of Oscillating Cylinder in Soft Sediment

실험에 의해 결정되는 변수  $\beta$ 는 물체와 해저면의 마찰에 기인한 Coulomb 마찰력  $F_c$ 에 추가하여 물체가 해저면에 일부 파묻힌 경우 물체의 운동방향 전방에 형성되는 흠언덕을 극복해야 하는 수평 반력  $F_r = \beta \gamma A_s$ 을 나타낸다. 원통형 물체의 회전운동에 있어서 두번째 항  $F_r$ 의 크기가 첫번째 항  $F_c$ 에 비하여 어느 정도 수준이 되는지에 대한 직접적인 실험결과가 보고된 것은 없으나, PIPESTAB 연구의 송유관 횡동요에 대한 결과로부터 간접적으로 알 수 있는 수치로는 순간최대마찰력이 모래질 해저에서 대략 30~50% 증가, 그리고 점토질 해저에서 대략 50~80% 증가하는 것으로 추정할 수 있다. 이 값은 최초 어느 정도의 깊이로 원통이 파묻히느냐에 따라 달라지며, 넓은 범위에 분산된 실험결과를 대략적으로 추정한 결론이기

때문에 엄밀한 수치를 얻어내기란 불가능하지만 마찰력의 증가가 해저면 토양의 특성과 초기 파문힘의 크기 등에 밀접한 관련을 가지리라는 것은 분명하다. 본 연구에서 사용되는  $\beta$  값의 범위는 위의 토양마찰 저항력의 증가량을 기준으로 하여 대략 0.1에서 0.6정도 까지 변화시키며 실제 해역의 다양한 조건을 만족시킬 수 있도록 parametric study를 수행하였다.

한편 해수중의 토양의 비중(정확히 말하자면 단위체적당 중량, submerged unit weight of soil)에 해당되는  $\gamma$ 의 값은 표준화된 토질실험을 통하여 비교적 정교하게 결정할 수 있는데 본 연구에서는 점토질에 대하여  $7.3\text{KN/m}^3$  모래질에 대해서는  $8.2\text{KN/m}^3$ 의 값을 사용하였다. 다음으로 원통물체가 해저면을 밀어내야 하는 면적을 나타내는  $A_s$ 는 Fig.2에 도시된 바와 같이 초기 파문힘의 깊이  $h$ 에 원통의 길이  $L$ 을 곱한 면적으로서의 정의된다. 즉 수평반력  $F_r = \beta \gamma A_s$ 의 크기는 원통이 밀어낸 흙의 무게에 해당한다고 보는 것이다. 따라서 면적  $A_s$ 의 결정은 초기 파문힘의 크기  $h$ 를 결정하는 문제로 귀결된다. 그러나 원통형 물체가 해저면에 안착했을 때의 초기 파문힘의 크기를 구하는 문제는 토질기초에 관한 기본적 이론을 이용하여 구조물의 하부구조(footing)가 특정 토양에서 설치 후 얼마만큼 침하하는가를 대략적으로 계산할 수도 있는데 본 연구의 원통형 구조물의 경우 수 cm의 수 준임을 확인할 수 있다.

#### 4. 계산결과 및 고찰

수치계산 결과의 비교검증을 위해 참고로 이용하려는 몇 가지 실험자료는 원래 원통의 회전운동을 고려한 것이 아니라 해저 송유관의 수평 횡동요에 관한 실험으로 부터 얻어진 불완전한 자료이기 때문에 여기서 본 연구의 원통 운동의 계산결과와 직접적인 비교는 부적합하고 다만 운동응답의 대체적인 형태나 그 변하는 경향만을 비교할 수 있을 뿐이다.

파도에 의한 원통형 물체의 운동응답특성을 파악하기 위하여 대표적인 환경조건을 선택하여 계산을 수행하였다. 수심 20m에 파고 2m, 파도의

주기 10.6초를 선택한 경우 KC수(Keulegan-Carpenter Number)가 30이 되고 이 경우 함께 사용될 해저면 토양 특성값으로 모래질에 대해  $\mu=0.6$ ,  $\beta=0.15$ ,  $\gamma=8.2\text{KN/m}^3$ 을 선택하였다.

우선 초기 파문힘이 없다고 가정했을 때( $h=0$ ), Fig.4는 유체력 계산과 운동응답 계산이 상호작용하는 상태의 운동특성을 보여주고 있다. 초기 파문힘이 없는 경우 원통은 미끄럼(slip)과 굴림(rolling) 운동 형식이 함께 일어나는데 마찰력이 유체력보다 크면 미끄럼운동은 방지되지만 굴림운동은 오히려 증가된다. 또한 마찰력이 없는 경우 굴림운동은 없고 미끄럼운동만 존재한다. 즉 어떤 경우라도 운동이 일어나지 않고 정지해 있는 경우는 생길 수 없다는 사실을 확인할 수 있다. 정상 상태에서의 원통의 왕복운동 주기는 파도의 주기와 동일한 것을 알 수 있다.

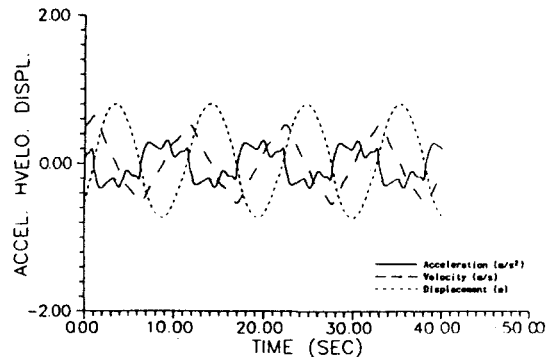
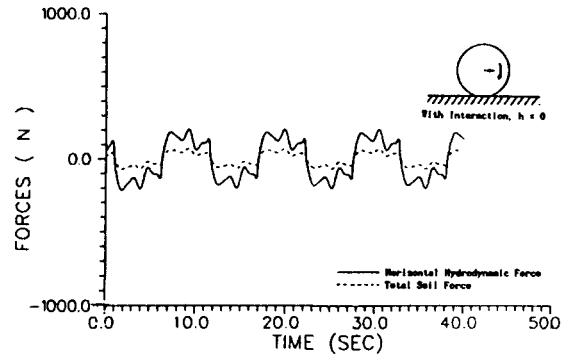


Fig.4 Sample Calculation on Flat Surface( $h=0$ )

다음으로 초기 파문힘이 생겼을 경우의 계산결과를 Fig.5( $h=0.06m$ )와 Fig.6( $h=0.11m$ )에 수록하였다. Fig.5에서 알 수 있는 것은 초기 파문힘이 있음으로써 원통의 운동 초기에 운동(변위)을 억제하는 저항력이 토양의 표면 마찰력에 추가로 더해지는 사실과 일단 초기에는 변위가 억제된다고 하더라도 일단 원통이 조금이라도 움직이기 시작하면 왕복운동 침식을 통해 점점 더 큰 변위가 발생하여 결국에는 초기 파문힘이 없는 경우의 운동특성과 동일한 정상상태로 돌아간다는 점이다. 이 경우 원통이 흠뎀덕을 밀어내는 동안 마찰력의 크기와 방향이 순간적으로 바뀌므로 인해서 시간변화에 따른 유체력과 운동가속도의 변화가 앞서 Fig.4( $h=0$ )의 경우와는 상당히 다른 모습을 보이고 있다. 한편 초기 파문힘의 크기가 충분히 크면 파도에 의한 유체력이 어떻게 변화하여도 아무런 움직임이 일어나지 않는다는 것을 Fig.6에서 볼 수

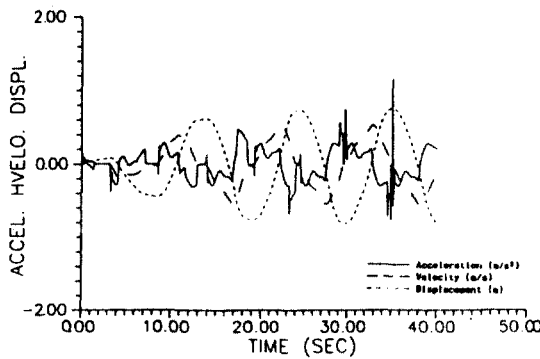
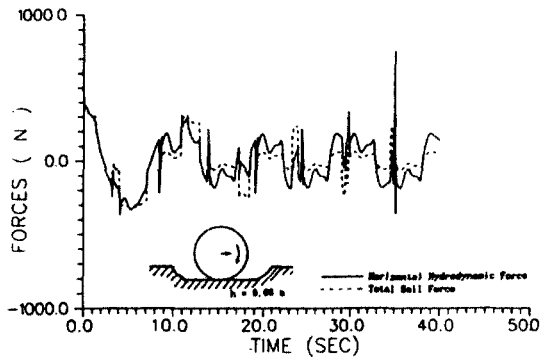


Fig.5 Sample Calculation with small Penetration( $h=0.06m$ )

있다. 이 때 운동가속도의 값이 항상 0이기 때문에 원통에 작용하는 유체력과 마찰력은 정적인 평형상태에 놓여 있다는 것을 알 수 있다. Fig.6에서 얻을 수 있는 중요한 점은 주어진 환경조건과 물체의 크기에 대하여 원통의 운동이 발생하지 않을 파문힘의 한계를 예측할 수 있다는 것이다.

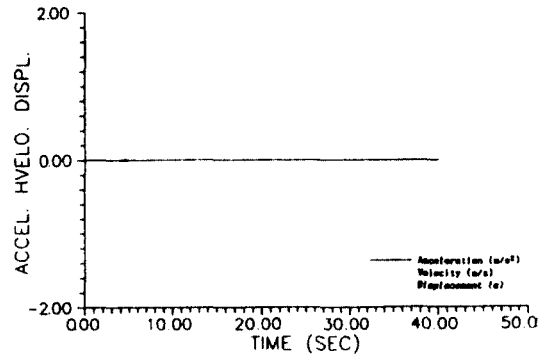
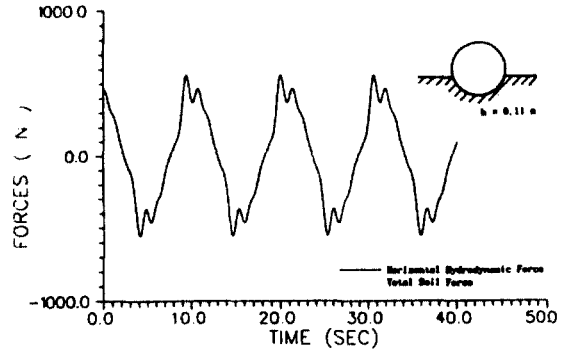


Fig.6 Sample Calculation with large Penetration( $h=0.11m$ )

모래질의 해저토질에 대하여 parameter 분석을 수행한 결과가 Fig.7에 수록되어 있다. 우선 수심 20m와 50m의 해역에서 KC 수를 10에서 50까지 변환시켰을 때 원통의 움직임이 나타나지 않는 한계조건이 되는 초기 파문힘의 크기  $h_{min}$ 를 변수  $\beta$ 의 함수로써 나타내었다. 그림을 통하여 알 수 있듯이 모든 KC 수에 대하여  $\beta$ 값이 클 수록, 즉 토양의 마찰반력이 커질수록 최소 초기 파문힘( $h_{min}$ )의 깊이가 반비례로서 작아지는 현상을 확인할 수 있다. 동일수심에서 KC 수가 크다는 말은

큰 파도에 의한 큰 유체력을 뜻하므로 그만큼 원통이 안정을 유지하기 위한  $h_{min}$ 의 값도 KC 수가 커질수록 커지는 것을 알 수 있다. Fig.7에서 각 곡선의 윗쪽은 원통이 움직이지 않을 상태를 의미하며 곡선의 아래쪽은 원통의 움직임이 발생할 조건을 뜻한다.

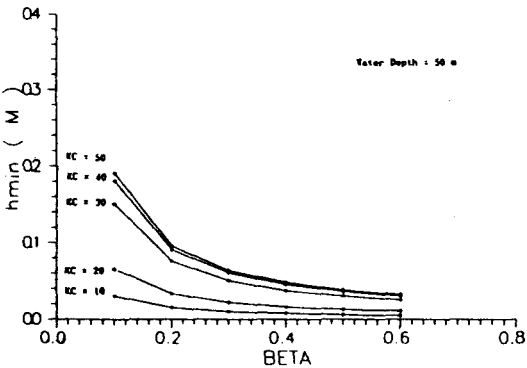
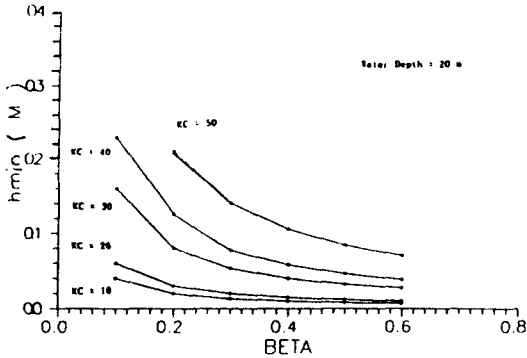


Fig.7 Parametric Study for Minimum Penetration Depth in Sand

Fig.8에는 최대 유체력의 크기를  $\beta$ 와 KC 수의 함수로써 나타내었다. 이 계산에서 수심과 변수  $h$ 의 값으로 각각 20m, 0.06m이 사용되었다. 이 그래프를 통해 알 수 있는 것은,  $\beta$ 가 작을 때는 마찰반력이 작은 만큼 유체력의 움직임이 커지게 되므로 유체입자의 운동과 원통의 상대운동으로 인하여 유체력의 세기가 작은 반면,  $\beta$ 가 클 때는 운동이 억제되어 유체력이 증가하다가 원통의 움직임이 전혀 생기지 않는 수준의 한계 마찰력에 대해서는 더 이상의 유체력 증가가 없다는 사실이다.

마찰력의 최대치도 동일한 패턴을 따르고 있으며 원통의 움직임이 없을 때 유체력과 마찰력은 동일한 크기를 갖는다는 것을 확인할 수 있었다. 기본 변수들의 적절한 조합에 따라 여러 가지 환경조건에 대한 parameter 분석이 가능하지만 본 연구에는 제한된 결과만을 수록하였다.

환경조건으로서 파도의 주기, 파장, 수심 등을 알고 원통물체의 직경, 길이, 중량이 입력자료로서 주어졌을 때, 원통의 운동응답을 구하기 위해서는 수치계산에 필요한 해저면 토양에 대한 상세한 정보가 필요하다.  $\mu$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $h$  등 토양에 대한 정보는 마찰력 계산에 필요한 기본변수로서 입력이 되며 이들 모든 자료가 확정되면 수치 시뮬레이션 프로그램을 통하여 원통의 운동응답이 무리없이 계산된다. 문제는 마찰력의 산정에 관한 수치모델링의 불완전성과 함께 이들 토양에 관한 기본변수의 결정이 현장의 상황을 얼마만큼 정확히 나타내느냐

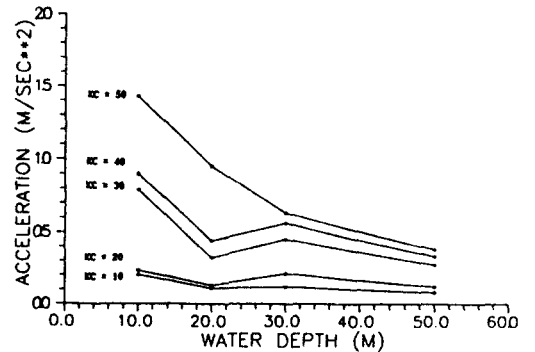
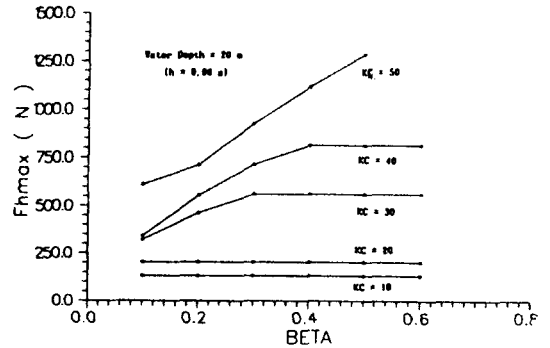


Fig.8 Parametric Study for Maximum Forces and Motion in Sand



하는 점이다. 현재까지 참고로 이용할 수 있는 실험자료의 양은 극히 제한되어 있고 그나마 원통의 회전운동을 고려한 실험자료가 아닌 해저 송유관의 횡동요에 관한 실험으로 부터 얻어진 불완전한 자료일 뿐이다. 따라서 본 연구에서 사용한 수치모델의 검증을 위해서는 적절한 실험작업을 통해 기본변수의 값이 올바르게 도입되도록 해야 할 것이다.

원통물체가 해저면에 묻혀 얼마나 빨리 안정상태에 도달하느냐의 문제와 함께 해저토질 특성이 쉽게 파문하기 어려운 상황이라면 그 상황에서도 운동을 억제할 수 있는 방법의 고안도 중요한 의미가 있을 것이다. 원통형 물체의 운동형식은 미끄럼(slip)에 의한 이동보다는 굴림(rolling)에 의한 이동이 주를 이루기 때문에 원통의 회전을 막을 수 있는 손잡이 또는 fin과 같은 부착물을 원통 주위에 배치하는 방법도 생각할 수 있다. 원통의 중량을 증가시키는 것도 운동 억제에 도움이 되지만 실제상 제한이 있을 것이다.

## 5. 결 론

본 연구는 해저에 놓인 원통형 물체의 2차원 평면상의 강제운동을 해저면에 평행한 직선운동과 질량중심축에 대한 회전운동으로 분리하여 이들 각각의 운동방향에 따른 운동방정식을 유도하고 그 해를 구함으로써 시간에 따른 원통의 운동응답을 구하고 주어진 환경조건과 해저토양조건에 따른 운동발생의 여부와 경향 파악, 그 한계치의 조사를 목적으로 한다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 원통형 물체의 운동형식 중에서 회전운동의 존재로 인하여 원통형 물체는 마찰력이 아무리 작은 경우라 해도 마찰력이 존재하면 안정된 상태(즉 움직이지 않는 상태)를 유지할 수 없다. 이러한 회전운동(직선운동도 마찬가지)을 효과적으로 억제하는 수단은 해저토양에 물체의 일부가 묻히는 것인데 물체의 크기와 해저지질의 특성이 알려지면 물체의 파문힘 크기도 정해진다.

2) 초기 파문힘이 생겼을 때 원통물체가 흙덩덕에 의해 저항받는 힘이 토양의 표면 마찰력에 추

가로 더해지기 때문에 일단 운동의 초기에는 운동이 억제된다고 하더라도 일단 원통이 조금이라도 움직이기 시작하면 왕복 침식과정을 통해 점점 더 큰 변위가 발생하여 결국에는 초기 파문힘이 없는 경우의 운동특성과 동일한 정상상태로 돌아간다. 결국 운동에 의해 최종적으로 정상상태의 왕복 변위폭에 해당하는 다져진 구덩이가 형성된다. 그러나 원통의 운동에 의해 형성되는 평평한 구덩이는 파도의 주기의 2~3배 정도의 짧은 시간 동안에 만들어지는데, 점차 시간이 지나면서 와류형성으로 인한 해저면 침식이나 퇴적물 이동의 효과가 지면변화에 주도적인 역할을 한다고 볼 때 운동에 의해 형성되는 지면변화는 상대적으로 그 중요성이 덜하다고 판단된다.

3) 초기 파문힘의 깊이가 충분히 크면 원통의 움직임을 완전히 억제할 수 있다. 이때 유체력과 토양 마찰력은 원통이 일부 묻힌 상태에서 정적인 힘의 평형을 이루게 된다. 모래질보다는 점토질 해저에서 더 깊이 파문하게 되며, 점토질의 경우 오랜 시간 후에는 침식깊이가 증가하는 것으로 알려져 있으나 본 운동응답을 계산하는 시간 단위에 비해 장시간 후의 결과이므로 본 수치모델은 시간에 따른 파문힘의 깊이 변화를 고려하지 않았다.

4) 3차원 양끝단 효과(3-dimensional end effect)가 운동응답계산 자체에 미치는 영향은 유체력 계산이나 해저면 침식 계산 등에서의 3차원 효과보다는 경미하리라 추측된다. 우선 원통의 축방향에 대한 운동방정식을 생략한 것 외에는 원통의 3차원 실제 운동과 2차원 평면운동 사이에 마찰력 등 기본변수들의 선정에 아무런 차이가 없기 때문이다. 그러나 유한길이의 물체에 대한 3차원 유체 흐름을 고려했을 때 계산되는 유체력의 크기가 2차원 평면내에서의 흐름에 비해 상당히 작아지는 까닭에 그에 상응하는 운동응답이 감소된다고 말할 수 있다.

## 참고문헌

- 1) Sarpkaya, T. and Rajabi, F., "Hydrodynamic Drag on Bottom-mounted Smooth and Rough Cylinders in Periodic Flow," 11th Annual Of-

- offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC-3761, 1979.
- 2) Bryndum, M.B., Jacobsen, V. and Brand, L.P., "Hydrodynamic Forces from Waves and Current Loads on Marine Pipelines," 15th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC-4454, 1983.
  - 3) Verley, R.L.P., Lambrakos, K.F. and Reed, K., "Prediction of Hydrodynamic Forces on Seabed Pipelines," 19th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC-5503, 1987.
  - 4) Lambrakos, K.F., Chao, J.C., Beckman, H. and Brannon, H.R., "Wake Model of Hydrodynamic Forces on Pipelines," Ocean Engineering, Vol.14, No.2, pp. 117~136, 1987.
  - 5) Ayers, R.R., Allen, D.W., Lammert, W.F., Hale, J.R. and Jacobsen, V., "Submarine Pipeline On-bottom Stability: Recent AGA Research," 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, The Hague, The Netherlands, Vol.5, pp. 95~102, 1989.
  - 6) Wolfram Jr., W.R., Getz, J.R. and Verley, R.L. P., "PIPESTAB Project: Improved Design Basis for Submarine Pipeline Stability," 19th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC-5501, 1987.
  - 7) Brennodden, H., Sveggen, D., Wagner, D.A. and Murff, J.D., "Full-Scale Pipe-Soil Interaction Tests," 18th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC-5338, 1986.
  - 8) Wagner, D.A., Murff, J.D., Brennodden, H. and Sveggen, O., "Pipe-Soil Interaction Model," 19th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC-5504, 1987.
  - 9) Lambrakos, K.F., "Marine Pipeline Soil Friction Coefficients from In-Situ Testing," Ocean Engineering, Vol.12, No.2, pp. 131~150, 1985.
  - 10) Holthe, K., Sotberg, T. and Chao, J.C., "An Efficient Computer Model for Predicting Submarine Pipeline Response to Waves and Current," 19th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, OTC-5502, 1987.
  - 11) Zimmerman, M., Hudspeth, R., Leonard, J., Tedesco, J. and Borgman, L., "Dynamic Behavior of Deep-Ocean Pipeline," ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.112, No.2, pp. 183~199, 1986.
  - 12) 강신영, 최경식, 강효진, "해저 원통형 물체의 유동(운동) 연구", 국방과학연구소 위탁연구 보고서, 1991.