

해상 양식시설의 계류시스템 실험 및 해석

김진하⁺ · 김현주 · 홍 섭
한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

Experiment and Analysis of Mooring System for Floating Fish Cage

Jin-Ha KIM⁺, Hyeon-Ju KIM and Sup HONG
Ocean Development System Research Center, KRISO, KORDI, Daejeon 305-343, Korea

This paper deals with optimal mooring system to secure fish cage in a desired location. Through field investigation and paper works, we surveyed disasters by breakdown of cage frame and mooring system due to higher wave attack and selected compliant buoy mooring method for shallow water mooring system against severe coastal external forces. To analyze interaction between external forces and compliant buoy mooring system, theoretical model has developed as quasi-static nonlinear analysis. After verifying the feasibility of the numerical model compared with experiment, static analysis has tried for various mooring systems with different angle of array, number of mooring points, length of horizontal and inclined rope. Optimal mooring method using compliant buoy has selected for fish cage through numerical simulation. This results can apply for preliminary design for cage mooring system.

Key words: Floating fish cage, Compliant buoy mooring system, Quasi-static analysis, Experiment

서 론

재료 및 방법

해상가두리를 이용한 수산양식은 급증하는 수산물의 수요를 충족시키기 위한 유효한 수단으로 제공되어 왔다. 그러나, 내만이나 반폐쇄성 천해역을 중심으로 발달한 종래의 가두리 양식은 밀식과 과다급이 등에 의한 자가오염을 심화시켜 왔고, 이로 인한 환경오염 피해를 막대하게 입고 있다. 따라서, 외해 양식장의 개발이 강조되고 있으며, 이를 위한 기술적 지원이 요청되고 있다 (부경대학교 해산연, 1996).

한편, 현재의 반폐쇄성 천해역에 설치된 양식가두리에서도 태풍이나 폭풍성 저기압 내습에 의한 시설의 파괴 및 양식 어류의 도주에 의한 피해가 연례행사처럼 발생하고 있다. 이로부터 내파성 가두리의 개발이 강조되고 있으며, 내파성의 확보를 위해서는 (1) 내파 구조형 가두리 및 최적 계류시스템의 개발, (2) 부침식 가두리에 의한 황천시 침하에 의한 대피, (3) 이동식 가두리에 의한 황천시 정온역으로 이동 등의 방법을 생각할 수 있다 (Beveridge, 1996).

여기서는 해상가두리의 안정성 및 기능성 향상을 위한 최적 계류시스템의 개발을 위한 기초연구로서 부유식 해상가두리의 계류시스템의 문제점 및 개발방향을 제시하고자 한다. 이를 위해, 천해 계류시스템의 타당성을 평가하고, 준정적 계류계 해석이론을 정립하여 수리실험으로 검증한 후, 이를 이용하여 적용가능한 계류시스템을 대상으로 장단점을 비교함으로써 적정 계류시스템을 제시하고자 한다.

1. 해상가두리의 계류시설 현황 및 문제점

어류양식용 해상가두리는 주로 수심 5~25 m에 설치되어 있으며, 위치 유지를 위하여 나일론, 와이어, 체인 등의 계류삭을 이용하여 맞으로 고정하고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 가두리는 10 m×10 m~14 m×14 m의 사각가두리이며, 주로 목재 (apitong) 프레임과 15~28개의 스티로폴 부자 (400~500 L)를 사용하여 구성하고 있다. 계류는 합성섬유로프 (PP 또는 PE)를 이용하여 가두리와 콘크리트 블록이나 멍을 연결하여 구성하는 다점계류 방식이며, 경우에 따라서는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 중간부이 (스티로폴 부자)를 사용하기도 한다.

황천시 수산양식시설의 피해는 실로 막대하며, '95년의 경우 태풍 페이에 의해 3,950조의 가두리 시설이 피해를 입어 62억원의 피해를 경험하기도 하였다. 이러한 피해는 목재 프레임 자체나 연결부가 파랑하중을 견디지 못하고 파손되거나 계류시스템이 변형 또는 파손되어 가두리 끼리의 충돌에 의한 가두리의 파손 및 양식어류의 도주에 의한 것으로 판단된다 (국립수산진흥원, 1996).

해상가두리의 적정 계류시스템의 설계를 위해 계류시스템 구성 (Berteaux, 1976)별 장단점을 조사하고 비교하였다. Table 1에 각 계류방식별 고려사항과 문제점을 비교하고, 50 m 이하의 천해역에 설치되는 해상가두리의 적용성을 평가하였다. 그 결과로서 Fig. 2와 같은 유연부이 계류시스템을 선정하고, 이에 대한 적용성을 평가하고자 한다.

2. 천해계류시스템의 이론해석

4점 유연부이 계류시스템에 대한 해상가두리의 수평변위와 공간고정 국소좌표인 계류점의 변위와 부이의 수평변위를 Fig. 3과 같이 정적평형위치에서의 공간고정 전체좌표계로 나타내었다.

⁺Corresponding author: jhakim@kriso.re.kr



Fig. 1. Example of moored fish cage.

Table 1. Feasibility study on mooring system for floating fish cage

Mooring	Concern	Problem	Capability
Spread Catenary Mooring	mooring stiffness	shallow water effect of catenary	low
Multiple Buoy Catenary Mooring	mooring weight	severe deflection of anchor chain	low
Steep-S Catenary	anchor chain length reduction	reduction of mooring stiffness & holding force of anchor	low
Compliant Buoy Mooring	compliance for external force	reduction of gravity anchor holding force & directionality	high
Catenary Slack Mooring	exclusive of buoy	shallow water effect of catenary	low

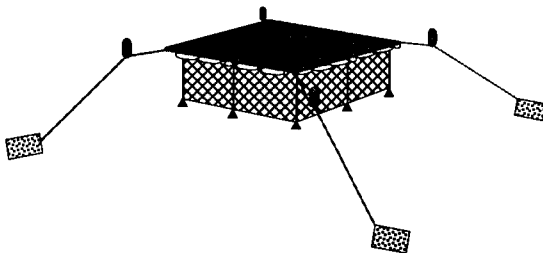


Fig. 2. Compliant buoy mooring system for fish cage.

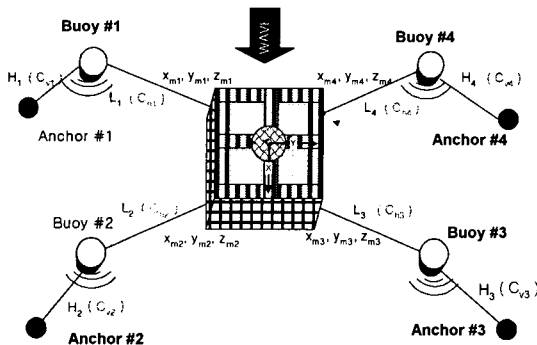


Fig. 3. Coordinate system.

작용외력에 의한 부유체의 정적변형후의 나일론 로프의 길이 l_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_i = \sqrt{(x_{Fi} - x_{Bi})^2 + (y_{Fi} - y_{Bi})^2 + (z_{Fi} - z_{Bi})^2} \quad (i=1, \dots, 4) \tag{1}$$

여기서, x_{Fi} , y_{Fi} , z_{Fi} 와 x_{Bi} , y_{Bi} , z_{Bi} 는 각각 i 번째 부이에 취부된 해상가두리와 부이의 계류점의 좌표이다.

나일론과 와이어 로프의 장력성분 T_{ji} 와 F_{ji} 는 각각 식(2)와 식(3)으로 나타낸다. 여기서, 밑첨자는 Fig. 3에서 명기한 바와 같이 F와 B는 각각 해상가두리와 부이를 나타내며, i 와 j 는 각각 해당 부이의 번호 및 좌표를 나타낸다.

$$T_{ji} = -T_i \frac{x_{Fji} - x_{Bji}}{l_i} \quad (i=1, \dots, 4; j=x, y, z) \tag{2}$$

$$F_{ji} = F_i \frac{x_{Bji} - x_{Oji}}{h_i} \quad (i=1, \dots, 4; j=x, y, z) \tag{3}$$

여기서, T_i 와 F_i 는 각각 i 번째 나일론과 와이어 로프의 장력이고, x_{Oji} 는 i 번째 와이어 로프에 취부된 앵커의 j 번째 좌표성분을 나타낸다. 또한, 선형축강성의 적합조건식은 다음과 같다.

$$\frac{T_i}{l_i} = C_{hi} \left(1 - \frac{l_0}{l_i}\right) \quad (i=1, \dots, 4) \tag{4}$$

$$\frac{F_i}{h_i} = C_{vi} \left(1 - \frac{h_0}{h_i}\right) \quad (i=1, \dots, 4) \tag{5}$$

여기서, C_{hi} 와 C_{vi} 는 각각 수평, 수직계류삭인 나일론과 와이어 로프의 선형 축강성 [ton/m]이고, l_0 와 h_0 는 각각 나일론과 와이어 로프의 초기 길이를 나타낸다.

식(1)~식(5)를 대입하여 정리하면 힘과 모멘트의 평형방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{i=1}^4 T_{ji} + F_{Fj} = 0 \quad (j=x, y) \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^4 T_{zi} - C_{Fzz} z_F - W_F + C_{Fzz} z_{KM} = 0 \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^4 \{x_{mi}' (-T_{xi} \sin \phi + T_{yi} \cos \phi) - y_{mi}' (T_{xi} \cos \phi + T_{yi} \sin \phi)\} + M_{ext} = 0 \quad (j=x, y, z) \tag{8}$$

$$-F_i \frac{(x_{Bji} - x_{Oji})}{h_i} + T_i \frac{(x_{Fji} - x_{Bji})}{l_i} + F_{Bji} = 0 \quad (i=1, \dots, 4; j=x, y, z) \tag{9}$$

여기서, F_{Fj} 는 해상가두리의 j 방향의 하중 성분을 나타내고, C_{Fzz} 는 복원력 계수, W_F 는 중량, ϕ 는 회전각, z_{KM} 은 해상가두리의 연직방향 계류점 좌표, x_{mi}' , y_{mi}' , z_{mi}' 은 해상가두리 계류점의 공간고정구조좌표이며 M_{ext} 은 작용외력에 의한 부유체의 모멘트이다.

계류시스템의 구성요소 제원에 대해 보다 효율적인 고려를 위하여 증분법 (incremental method)을 이용한 수치계산으로 식(6)~(9)의 비선형방정식의 해를 구하는 준정적 해석 전산프로그램 (MBMM)을 개발하였다.

결과 및 고찰

1. 수리모형실험 및 해석

4점부이 계류시스템의 준정적 해석프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 해상가두리를 1/22.5 모형으로 제작하고, 수치계산을 실시하여 유연부이 계류시스템의 나일론 및 와이어 로프의 길이를 결정하고 한국해양연구원 해양시스템 안전연구소 (KRISO)의 2차원 조파수조(길이: 25 m, 폭: 0.6 m, 수심: 0.6 m)에서 검증실험을 수행하였다. 해상가두리는 목재 프레임과 스티로폴 부이로 구성하였고, 중간부이는 스티로폴 부이 2개를 설치하였다.

정적해석에 대응한 실험은 수평방향으로 인장력을 가하여 그에 따른 해상가두리의 변위 및 앵커부분에서의 장력변화를 계측하여 계산결과와 비교한 것이다. 모형시험에 사용된 가두리 및 부이계류시스템의 제원은 Table 2와 같고, 정적 모형시험에 대한 사진을 Fig. 4에 나타내었다.

Table 2. Experimental conditions

Buoy			Nylon rope		Wire rope	
angle (α)	dia./height (cm)	weight (g)	length (cm)	dia. (mm)	length (cm)	Initial-tension (g)
0	4.8/5.5	1.8	0.25	1.2	1.2	16

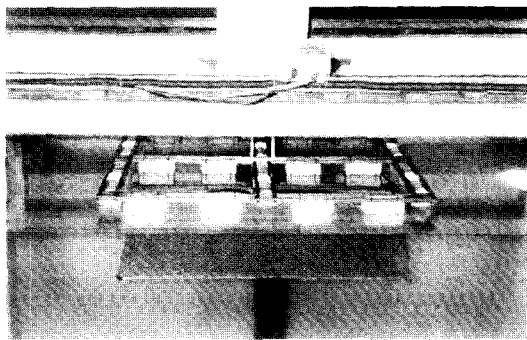


Fig. 4. Model test of floating fish cage with 4-point buoy mooring system.

모형실험 결과와 수치계산 결과를 Fig. 5(a)와 (b)에 나타내었으며, 그림으로부터 실험치와 계산치는 잘 일치함을 알 수 있다.

2. 해상가두리용 계류시스템의 최적화

해상가두리의 계류를 위한 유연부이 계류시스템 초기설계를 위한 해석프로그램의 적용성을 수리모형실험을 통하여 확인하였고, 이를 토대로 사각가두리형 해상양식시설의 계류시스템 최적화를 위한 기초적 검토를 실시한다.

이를 이용한 계류시스템의 초기설계는 가두리-나일론 로프-완충부이-와이어 로프-닻으로 구성되는 계류시스템의 극한환경에서의 해상 가두리의 안전성 확보를 위해 나일론과 와이어 로프 길이 및 닻의 설계를 대상으로 하였다. 이를 위해 계류시스템은

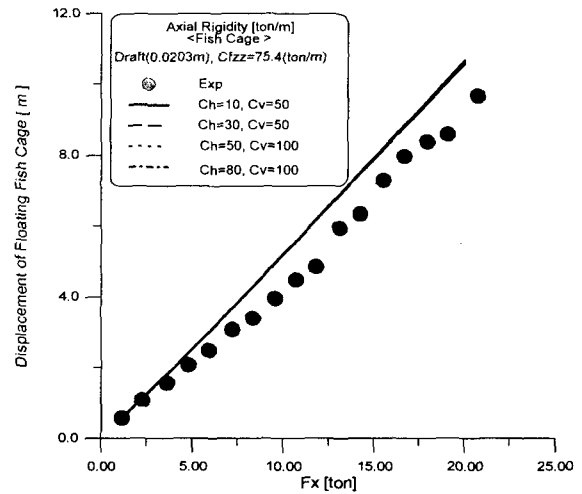


Fig. 5(a). Displacement of fish cage versus mooring force.

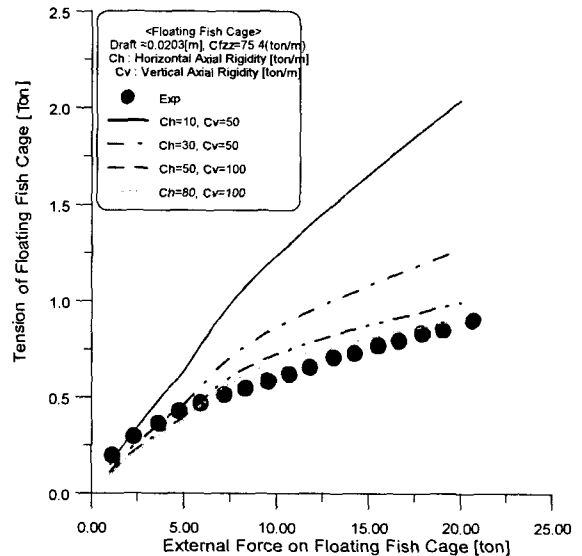
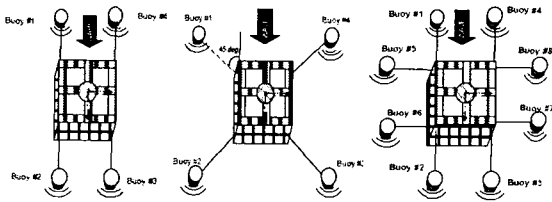


Fig. 5(b). Tension of wire rope versus external force.

Fig. 6과 같이 3종류로 구성하였고, 나일론 및 와이어 로프의 적정길이를 Table 3에 나타내 것과 같이 가두리 길이의 1/2 및 수심을 기준으로 배가시키며 검토하고, 가두리의 변위 및 닻의 소요중량이 최소화되는 경우를 선정하여 유연부이 계류시스템을 초기설계 하였다.

3종류의 유연부이 계류시스템에 대해 통영해역의 설계외력 환경조건 (이 김, 1998; 설계파고 6 m, 설계파주기 12 sec, 유속 0.5 m/sec, 풍속 30.8 m/sec)을 대상으로 수치계산을 실시하여 그 결과를 비교하였다. Fig. 7~9는 나일론 (x축) 및 와이어 로프 (y축)의 길이변화에 대한 장력과 가두리의 변위 및 소요 닻 중량을 비교하여 나타내고 있다.

그림으로부터 가두리의 변위는 나일론 및 와이어 로프의 길이에 비례하나, 로프 장력과 닻 소요중량은 나일론 및 와이어 로프의 길이에 반비례함을 알 수 있다. 이들 결과를 종합적으로 살펴보면 나일론 로프길이는 가두리 길이의 0.5배 이상, 와이어 로프의 길이는 수심의 2배 이상이 적합함을 알 수 있다.



(a) Case I (b) Case II (c) Case III

Fig. 6. Buoy mooring systems for fish cage.

Table 3. The mooring conditions for feasibility study on floating fish cage

Case	Mooring point (angle)	Nylon rope length (m)	Wire rope length (m)
Case I	4 point (0 deg.)	10, 20, 30, 40	2.5, 5, 7.5, 10
Case II	4 point (45 deg.)	10, 20, 30, 40	2.5, 5, 7.5, 10
Case III	8 point (0 deg.)	10, 20, 30, 40	2.5, 5, 7.5, 10

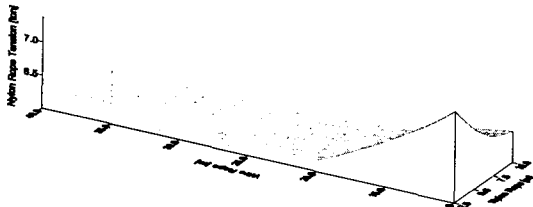


Fig. 7(a). Tension of nylon rope ($N_p=4, \theta=0^\circ$).

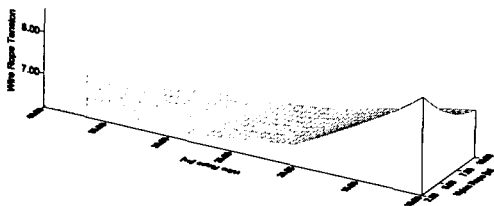


Fig. 7(b). Tension of wire rope ($N_p=4, \theta=0^\circ$).

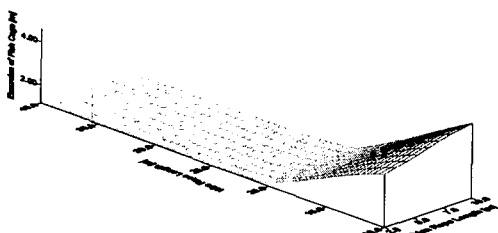


Fig. 7(c). Excursion of fish cage ($N_p=4, \theta=0^\circ$).

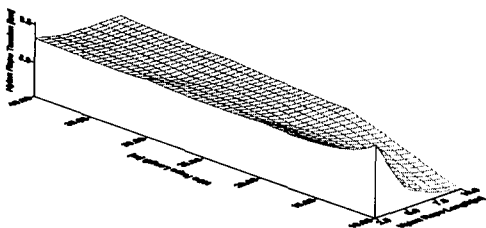


Fig. 8(a). Tension of nylon rope ($N_p=4, \theta=45^\circ$).

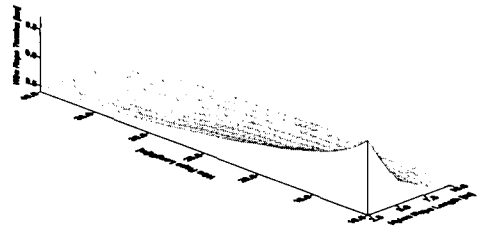


Fig. 8(b). Tension of wire rope ($N_p=4, \theta=45^\circ$).

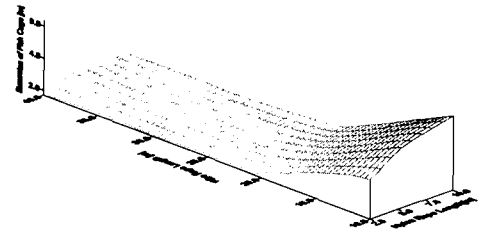


Fig. 8(c). Excursion of fish cage ($N_p=4, \theta=0^\circ$).

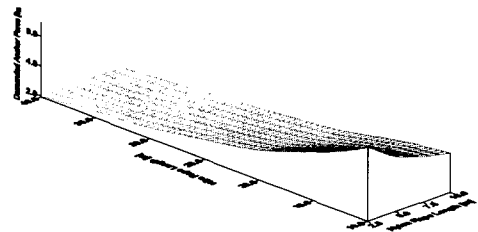


Fig. 8(d). Demanded anchor weight ($N_p=4, \theta=45^\circ$).

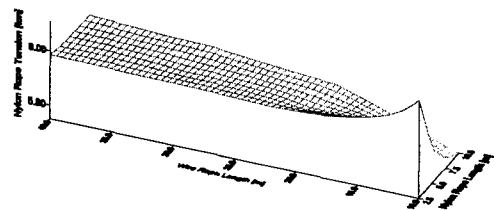


Fig. 9(a). Tension of nylon rope ($N_p=8, \theta=0^\circ$).

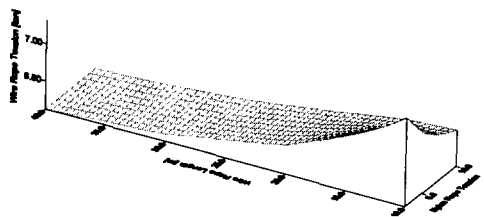


Fig. 9(b). Tension of wire rope ($N_p=8, \theta=0^\circ$).

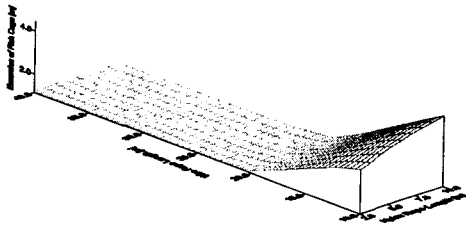


Fig. 9(c). Excursion of fish cage ($N_p=8, \theta=0^\circ$).

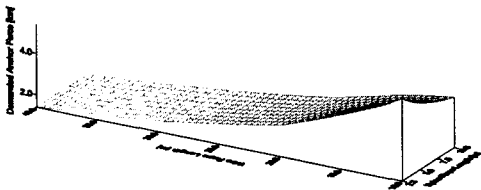


Fig. 9(d). Demanded anchor weight ($N_p=4, \theta=0^\circ$).

요 약

해상가두리의 안정성 및 기능성 향상을 위한 최적 계류시스템을 개발하기 위하여 천해역에 적합한 계류시스템을 검토하여 유연부이 계류시스템을 선정하였다. 이를 위한 해석프로그램을 정립하고, 수리모형실험 결과와 비교하였다. 해석프로그램의 타당성을 확인한 후, 적용할 만한 계류시스템을 구성하고 수치계산을 통하여 해상가두리를 위한 적정 계류시스템을 제시하였다.

해상가두리의 계류시스템은 유연부이 계류시스템이 권장되며, 계류배치는 탁월 외력환경과 일치하는 방향으로 하고, 수평계류사

인 나일론 로프는 해상가두리 길이의 0.5배 이상, 경사 와이어 로프는 수심의 2배 이상이 바람직한 것으로 나타났다. 또한, 중간부이의 증설은 계류장력 및 표류변위를 감소시키는 효과를 가질 것으로 판단된다.

차후, 해상가두리의 동적응답 특성을 계류시스템 해석모델의 개발과 계류시스템의 설계가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부 바다목장화사업의 일환으로 지원된 “신소재를 이용한 유동제어구조물 및 해상 중간육성시설 설계기술 개발”을 위한 연구결과의 일부임을 밝힌다.

참 고 문 헌

Berteaux, H.O. 1976. Buoy Engineering, John Wiley & Sons, Inc.
 Beveridge, M. 1996. Cage Aquaculture, Fishing News Books, 346pp.
 국립수산물진흥원. 1996. 내파성 양식시설 개발에 관한 연구, 해양수산부, 287pp.
 부경대학교 해양산업개발연구소. 1996. 양식공학, 332pp.
 이나리, 김현주. 1998. 부침식 가두리 계류용 말뚝의 최적설계, 1998년 추계 해양수산관련학회 공동학술대회 발표요지집, 83~84.
 中村充. 1992. 水産土木學, 工業時事通信社. 561pp.

2001년 8월 29일 접수
 2001년 11월 27일 수리