

준설용 커터헤드 운영방식에 따른 준설효율 향상특성 분석

Analysis of Dredging Efficiency for Operation of Dredging Cutter Head

채 동 석¹⁾ · 박 재 현²⁾ · 김 영 도[†] · 김 명 학³⁾ · 이 만 수⁴⁾

Chae, Dongseok · Park, Jae-Hyeon · Kim, Young Do · Kim, Myunghak · Lee, Mansoo

ABSTRACT : In this experiment, the cutter head was designed as the down-scaled shape from the cutter head of the Asan-3 of Hyundai Construction Company. The dredging simulation instrument was installed in the experiment water tank which has the dimension of 4.2 m (L) × 2.2 m (W) 1.5 m (H). The speed of all components were controlled manually through the hydraulic tool and motors to find the effective desilting condition. As the results, the experiment was conducted to find the optimum dredging cutter head operation rate. To compare the factors which effect on the dredging effectiveness, the dimensionless dredging volume ratio was introduced and it can be found the best effectiveness at 2.0 m/s suction speed, 8 cm dredging depth and 4~4.5 dimensionless dredging volume ratio. Therefore, in order to take the best effectiveness these 3 components factors should be adequately considered.

Keywords : Cutter head, Dredging effectiveness, Dimensionless dredging volume

요 지 : 본 연구에서는 준설용 커터헤드의 운영특성에 따라 준설효율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 수리실험을 수행하였다. 실험을 위해 현재 현대건설에서 보유중인 아산 3호의 설계도를 바탕으로 커터헤드를 설계하였으며, 수리실험을 위해 4.2m × 2.2m × 1.5m 대형수조를 제작하였고, 준설 운영에 필요한 여러 실험용 장치를 제작하였다. 준설효율 실험에서는 다양한 커터헤드 속도, 준설 깊이, 흡입 속도, 등에 관해 실험을 수행하였는데 커터헤드의 회전 속도가 준설효율 결과에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 또한 커터헤드의 준설깊이에 따른 준설효율특성을 분석하였다. 최대 준설효율은 흡입속도가 2.0m/s 일 경우에 발생하였다. 잠재준설부피에 대한 커터헤드의 거동부피에 대한 무차원 분석을 수행한 결과 준설깊이에 따른 적절한 커터헤드의 회전력과 좌우 이동 속도가 결정되어야 최적의 효율을 보임을 알 수 있었다.

주요어 : 커터헤드, 준설효율, 무차원 준설부피

1. 서 론

준설기술은 토목공학과 기계, 조선, 제어 등 여러 학문이 복합적으로 융합되어 있다. 하지만 학제간 융합연구팀을 구성하여 운영하기가 어려워 과거 실질적인 준설기술 발전이 어려웠다. 따라서 준설 현장 기술자들은 현재까지도 경험에 의존하여 운영되어지고 있다. 현재 준설선을 포함한 준설 장비는 최근 30년간 유럽과 미국 주도로 급속히 대형화, 첨단화 되었고, 국내 업체들도 수입, 제작하여 다량 보유하고는 있으나, 국내에서는 매립 관련 분야로 국한되어 연구 개발이 수행되면서, 1990년 대 이후로 준설분야 국제 경쟁력이 저하되기 시작하였고, 2000년대에 와서는 자체 기술만으로는 해외 선진업체들과 경쟁이 되지 않는 실정에 이르렀다. 현재 국내에서는 문제가 되었던 준설효율 문제와 더불어 환경적인 측면까지 고려한 준설사업을 진행하고 있지만, 기계장비들의 노후와 운영체제의 미흡함으로 인하여 그 어

려움을 해결하기 위한 노력이 필요하다.

국내·외에서 준설효율을 모의하는 연구사례를 살펴보면, Hatamura 등(1975)은 준설 메카니즘에 대한 연구를 진행하였으며, Joanknecht 등(1974)은 준설입자에 대한 수중에서의 커터헤드의 힘에 대한 연구를 수행하였고, Leussen 등(1986)은 준설토에 대한 커팅 메카니즘의 연구를 수행하였다. Miedema 등(2003a)은 실제 대형커터헤드의 준설각도에 관한 운동학적 분석을 수행하였으며, 또한 Miedema 등(2003b)은 커터헤드의 준설각도에 따른 유속과 마찰크기를 연구하였다. Verheul 등(2004)은 커터헤드와 준설깊이와의 관계에 대한 연구를 수행하였다. Matousek(1999)는 준설 처리과정에서의 수리학적 이송에 관하여 연구하였다. Jisong 등(1998)은 준설시 커터헤드의 크기, 경사 및 각도에 대한 수치모델링을 수행하였으며, 채동석 등(2009)은 커터헤드의 흡입형태를 비교하여 준설효율 실험을 수행하였다.

미국의 준설 기술은 미 공병단 준설 프로그램(DOTR,

1) 정회원, 인제대학교 토목공학과 박사과정

2) 정회원, 인제대학교 토목공학과(건설기술연구소) 부교수

† 정회원, 인제대학교 환경공학부(낙동강유역환경연구센터) 조교수(E-mail : ydkim@inje.ac.kr)

3) 정회원, 인제대학교 토목공학과 교수

4) 비회원, 현대건설(주) 기술/품질개발원 부장

DOER)과 연방환경청(EPA), 연방수로국, 항만청 등의 국가 기관 주도하에 성장, 발전하고 있다. 중국 Hohai 대학은 네덜란드의 Delft 공대와 연구 협약하여 연구를 수행하며 대규모 준설 실험실(Fig. 1, 2)을 보유하고 있으며, 중국의 주요 준설회사들은 중국 준설 협회(China Dredging Association)를 조직하여 국제 준설 세미나를 개최하는 등 활발한 국제 기술 교류를 통해 저임금의 풍부한 노동력과 기술 개발을 조화시켜 세계적으로 두각을 나타내고 있다.

본 연구에서는 우리나라에서 작업 중인 준설 현장 조건과 준설선 특성 및 흙의 종류 등을 고려하여 흙과 물 혼합물의 배송농도 및 속도를 조절하는 고효율 최적 배송 기술과 커터 헤드드를 개발하여 현장에 적용하고 실용화하고자 하였다. 이를 위해 현재 가장 널리 사용되고 있는 Cutter Suction Dredger(이하 CSD) 형태의 준설선을 축소 제작하여 대형수조에서 실험을 수행하고, 준설효율을 결정하는 각 요소의 특성을 분석하여 최적 준설효율조건을 도출하고자 하였다.

2. 연구방법

준설효율을 평가하는 방법으로 배송관에서의 밀도를 평가하는 방법이 있으며, 준설전·후의 입도분포곡선에 Marsal의 수정과쇄율을 적용한 연구결과(김홍택 등, 2000)를 통해 유실율을 평가하는 방법과, 유실율을 평가후 이를 검증하기

위하여 기존의 방법을 이용하여 평가한 유실율과 비교·검토하였고, 실내모형시험을 실시하여 현장계측 결과와 비교하여 실제 준설효율을 분석(김석열 등, 2002)등의 방법이 제시되었다.

본 연구에서는 준설운영 방식에 따른 준설효율을 분석하기 위하여 준설작업시 운용되어지는 커터헤드속도, 흡입속도, 준설 깊이 등의 조건을 달리하여 실험을 수행하였다. 대표적 커터헤드인 CSD를 축소제작 하였으며, 실험을 수행함에 있어 토사입경과 커터의 크기 등의 요소에 대한 상사 특성을 완벽히 만족시키는 것이 쉽지 않기 때문에 커터의 크기를 축소했음에도 불구하고, 본 실험기기 구성에 맞도록 커터의 회전수 및 흡입속도 등을 결정하여 실험을 수행하였고, 실험에 사용된 준설토는 체분석 실험결과 평균 토사입경 D_{50} 이 0.5mm, 함수율은 13.7%, 습윤단위중량 1.82g/cm^3 그리고 건조단위중량 1.60g/cm^3 을 나타냈다.

2.1 모형제작

준설모형은 Fig. 3와 같이 실험수조는 $4.2\text{m} \times 2.2\text{m} \times 1.5\text{m}$ (가로×세로×높이) 크기의 수조에 돌출부 $0.7\text{m} \times 2\text{m} \times 1.5\text{m}$ (가로×세로×높이)로 제작되었다. 수위는 1m의 깊이로 유지하고, 이를 흡입하기 위해서 커터헤드는 수심 20cm~80cm에 위치 할 수 있도록 Ladder의 길이를 1m로 제작하였다. 커터날은 총 12 개, 커터헤드모형(Fig. 4)은 직경 16cm,



Fig. 1. Dredging Tank (Hohai Univ.)



Fig. 3. Cutter Head Test Tank



Fig. 2. Pilot size crown Head (Hohai Univ.)

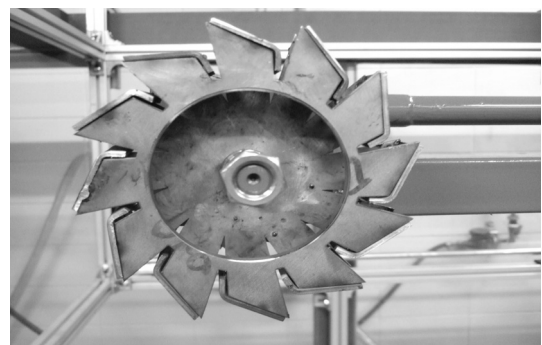


Fig. 4. Cutter Head

흡입장치의 흡입관의 크기는 1.8cm인 원형관으로 설계되었고, 준설흡입속도, 커터헤드속도 및 이동속도는 항시 조절 가능하도록 설계하였다.

2.2 실험종류

준설 효율을 살펴보기 위하여 커터헤드의 이동속도(0.015 m/sec)를 일정하게 유지한 후, 흡입 속도는 2.2m/sec, 2.0m/sec, 1.8m/sec 로 변화시키며 실험을 진행하였다. 그리고 각각의 흡입속도에 대한 커터헤드의 회전속도는 33~60rpm 까지 각 3rpm 간격으로 변동시키며 실험을 수행하였으며, 준설 깊이는 커터헤드의 중심점(0.5D)을 기준으로 0.44D, 0.56D의 준설깊이를 유지하여 각각에 대한 준설효율 실험을 수행하였다(Table 1).

3. 실험결과

3.1 준설효율 실험결과

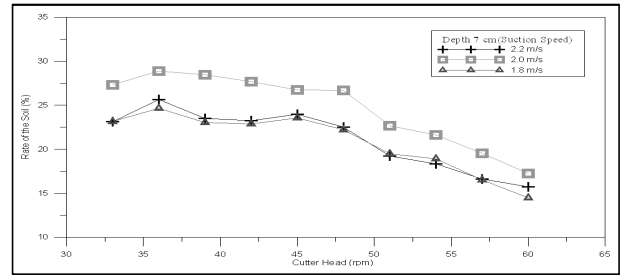
준설효율 실험결과 흡입속도, 커터헤드 회전력을 깊이별 (0.43D, 0.50D, 0.56D)로 나누어 결과를 정리하였다(Fig. 5).

Case 1은 준설 깊이 0.43D 에서의 결과를 살펴보면 커터헤드의 속도가 50rpm~60rpm 사이에서는 그 효율이 급격히 감소함을 볼 수 있고, 흡입속도 33rpm~48rpm 사이에서 대체적으로 효율이 높았다. 그리고 준설속도에 따른 효율을 살펴보면 선행 실험했던 것과 비교하여 Case 3도 흡입속도 2.0m/sec에서 가장 큰 효율을 보였으며, 1.8m/sec에 비하여 최고 흡입속도 42rpm에서 18%의 준설효율을 나타냈다. 준설 깊이가 0.43D일 경우에는 거의 흡입속도별로 2.2m/sec와 1.8m/sec는 큰 차이를 보이지 않았다.

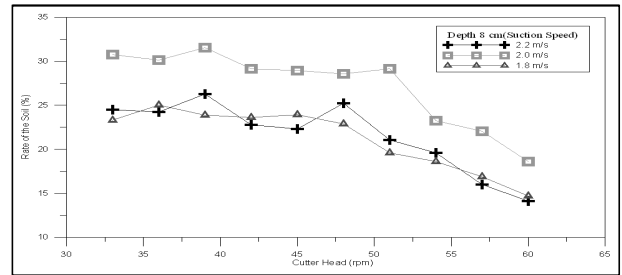
Case 2는 준설 깊이 0.50D에서의 결과를 살펴보면 커터헤드의 속도가 50rpm~60rpm 사이에서는 그 효율이 급격히 감소함을 볼 수 있고, 흡입속도 33rpm~48rpm 사이에서 대체적으로 효율이 높았다. 그리고 준설속도에 따른 효율을 살

펴보면 준설깊이 0.56D 지점과 동일하게 흡입속도 2.0m/sec에서 가장 큰 효율을 보였으며, 1.8m/sec에 비하여 최고 흡입속도 42rpm에서 13%의 준설효율을 나타냈다. 준설 깊이가 0.50D 일 경우에는 흡입속도별로 큰 차이를 보이지 않았다.

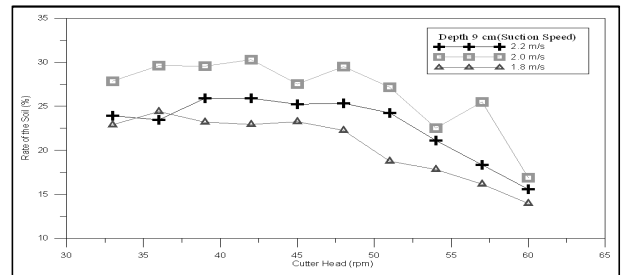
Case 3은 준설 깊이 0.56D에서의 결과에서는 커터헤드의 속도가 50rpm~60rpm 사이에서는 그 효율이 떨어짐을 볼 수 있으며, 반면에 흡입속도 39rpm~48rpm 사이에서 대체적으로 효율이 높았다. 그리고 준설속도에 따른 효율을 살



(a) case 1-1 (0.43D)



(b) case 1-2 (0.50D)



(c) case 1-3 (0.56D)

Fig. 5. Dredging effectiveness

Table 1. Experiment cases

Case	Cutting head moving speed (m/sec)	Suction Speed (m/sec)	Cutting Head (rpm)	Depth
Case 1	0.015	2.2	33 ~ 60 (term:3 rpm)	0.43D
		2.0		
		1.8		
Case 2	0.015	2.2	33 ~ 60 (term:3 rpm)	0.50D
		2.0		
		1.8		
Case 3	0.015	2.2	33 ~ 60 (term:3 rpm)	0.56D
		2.0		
		1.8		

해보면 흡입속도 2.0m/sec에서 가장 큰 효율을 보였으며, 1.8m/sec에 비하여 최고 흡입속도 42rpm에서 25%의 준설 효율을 나타냈다.

최적흡입능률은 준설흡입속도 2.0m/sec에서 나타났으며, Case 1의 준설 깊이 0.56D 일 경우 준설효율이 다른 깊이에 비하여 크게 나타났고, 그 중 커터헤드 42rpm일 경우 가장 큰 효율을 나타냈다. 또한 준설 깊이가 깊어질수록 효율의 크기가 증가함을 보였다.

본 실험에서는 커터헤드의 속도가 최고치에서는 준설의 효율이 떨어짐을 보였는데 이는 토질의 상태, 커터헤드의 이동속도에 따라 그 효율이 다를 것으로 생각되며 차후 실험에서는 준설토의 종류, 커터헤드의 이동속도, 준설 깊이, 커터헤드 종류 등의 여러 인자들을 다르게 하여 여러 가지 실험을 수행하고, 실험실 내에서의 최적의 준설 효율 조건을 도출해 내야 할 것으로 판단된다.

3.2 무차원 준설효율 실험결과

커터헤드는 자체회전을 하면서 동시에 좌우로 회전이동하는 구조로 설계를 한다. 따라서 좌우 이동속도와 커터헤드의 회전수의 상관관계에 대한 평가가 필요하다. 이를 위해서 커터헤드의 회전에 의해 발생하는 커터 부피에 대한 커터헤드의 이동에 의해 형성되는 부피의 비를 무차원화 하였고, 이에 대한 준설 효율을 분석하였다.

여기서 잠재준설부피(Potential dredging volume)라 함은 커터헤드가 이동하는 시간동안 준설 가능한 최대 부피를 의미하며, 커터헤드의 잠입깊이에 따라 변하게 된다. 커터헤드의 거동부피간 이동하는 일정한 시간 동안 커터헤드의 회전에 의해 발생하는 총 부피량을 의미하며, 잠재준설부피에 대한 커터헤드거동부피의 비를 무차원 준설부피비(Dimensionless dredging volume ratio)라 한다.

$$V_d = \frac{\text{커터헤드거동부피}}{\text{잠재준설부피}} = \frac{\text{rpm} \times t \times \text{커터헤드부피}}{A \times L}$$

여기서, V_d : 무차원 준설부피비

· t : 커터헤드 작동시간

· L : 커터헤드 Swing의 이동거리

· rpm : 커터헤드 회전수

· A : 커터헤드에 의해 잘려나가는 준설단면적

준설부피에 대한 무차원 값이 작을수록 효율적인 준설에 해당되는데 준설 깊이별 특성을 살펴보면 깊이가 깊을수록 준설효율 및 에너지 효율특성이 증가함을 알 수 있다. 준설의 전체적인 효율은 흡입속도가 2.0m/s 일 경우가 가장 높

으며 다음으로 2.2m/s가 높은 것으로 나타났다. 따라서 단순히 흡입량을 늘린다고 해서 준설효율이 증가하는 것이 아님을 알 수 있었다. 또한 무차원 부피비를 비교한 결과 0.5D

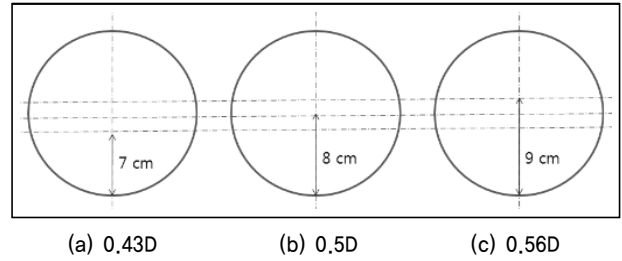


Fig. 6. Dredging area by moving cutter head

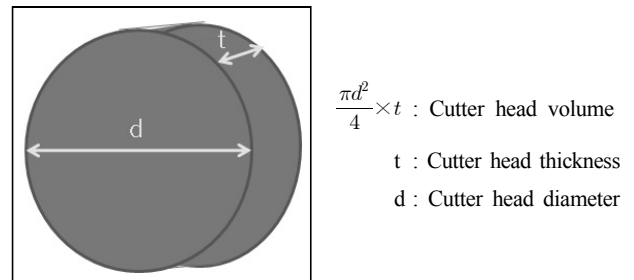
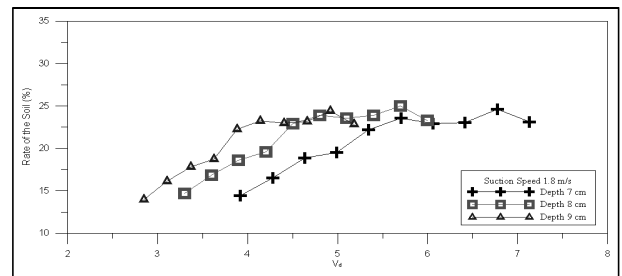
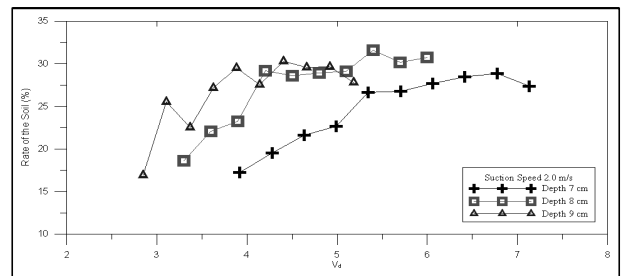


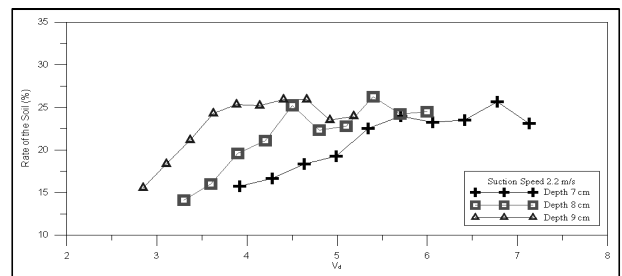
Fig. 7. Cutter head volume



(a) Suction Speed 2.0 m/s



(b) Suction Speed 2.0 m/s



(c) Suction Speed 2.2 m/s

Fig. 8. Dredging effectiveness for dimensionless dredging volume ratio

잠입시 무차원값이 4.5 이상 이어야 효율이 최대가 되며, 0.56D 잠입시 무차원 값이 4 이상이면 최대 효율이 유지되는 결과를 나타내고 있다. 하지만 0.43D 잠입시 효율은 0.5D, 0.56D 에 비해 현저히 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 적절한 준설 깊이와 커터헤드 회전수, 스윙(swing) 속도 등이 상호 연동되며 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 준설효율 향상과 준설시 최적의 효율을 찾기 위해 현대 아산 3호 준설 커터헤드를 모델로한 모형실험을 수행하였다. 이를 위해 매개변수(준설 깊이, 커터헤드 속도, 준설흡입속도 등)에 따른 여러 조건의 실험을 진행하였으며, 실험을 통해 커터날의 최적 운영 조건을 분석하였다.

- (1) 준설효율 실험에서는 커터헤드의 이동속도를 일정하게 유지한 후 준설시 고려되는 여러 매개변수를 달리하여 실험한 경우 커터헤드속도에 따른 준설효율 결과 값이 가장 큰 차이를 보였다. 이는 커팅 회전수를 늘린다고 하여 효율이 증가되는 것이 아니라는 것을 의미하며, 준설을 위해서는 적정수준의 회전력을 유지하는 것이 더 좋은 효과를 나타내는 것을 의미한다.
- (2) 준설부피에 대한 무차원 값에 대한 효율을 분석한 결과 준설 깊이가 깊을수록 준설효율 및 에너지 효율특성이 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (3) 본 실험연구 자료를 현장에 적용시키기 위해서는 매개변수를 달리한 여러 가지 실험이 추가되어야 할 것이며, 이를 매뉴얼로 만들어 기존의 경험의존도로 진행되어 오던 준설 작업이 보다 효율적이고, 환경적인 준설효율 방안을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 향후 준설효율 실험에서는 준설토사의 종류, 흡입속도, 커터헤드속도, 준설 깊이, 커터헤드 이동속도에 따른 다각적인 실험을 통하여 최적의 조건을 산출하며, 실험을 통해 도출된 최적의 조건을 현장에 적용시키기 위한 방안이 제시되어야 할 것으로 보인다. 또한 준설토 입자의 종류 및 크기를 달리하여서 실험을 진행하여, 이를 각 조건에 따라 비교하는 작업이 수행되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(C106A1000007 -06A060000711)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 김석열, 최효범, 박재익, 김승욱 (2002), 준설토의 유실율 평가방법 정립에 관한 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, 제3권, 제1호, pp. 67~77.
2. 김홍택, 김석열, 강인규, 박재익 (2000), 준설토의 유실률 평가에 관한 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, 제1권, 제1호, pp. 57~63.
3. Hatamura, Y. and Chijiwa, K. (1975), Analyses of the mechanism of soil cutting. 1st report, *Bulletin of the JSME*, Vol. 18, No. 120.
4. Jisong, H. and Vlasblom, W.J. (1998), Modelling of saturated sand cutting with large rake angle. *15th world dredging congress*, Las Vegas, Nevada, USA.
5. Joanknecht, L.W.F. (1974), Cutting Forces in Submerged Soils. T.H.Delft, The Netherlands.
6. Leussen, W. van and Os, van, A.G. (1986), Basic Research On Cutting Forces In Saturated Sand. *Paper submitted for publication in proceedings ASCE*. Delft Hydraulics Laboratory.
7. Matousek, V. (1999), *Hydraulic transport as one of the dredging processes*, Syllabus, Faculty of Design, Construction and Production. Delft University of Technology, The Netherlands.
8. Miedema, S.A. (2003a), The Existence of Kinematic Wedges at Large Cutting Angles. *Proceedings of CHINA Dredging Days*, Shanghai, China.
9. Miedema, S.A. and Frijters, D. (2003b), The Mechanism of Kinematic Wedges at Large Cutting Angles Velocity and Friction Measurements. *Proceedings of 23rd WEDA Technical Conference & 35th TAMU Dredging Seminar*, Chicago, Illinois, USA.
10. Verheul, O. (2004), Dredging at unconventional depths, Conceptual design study of a depth independent remotely operated dredging device. *Delft University of Technology*, Section Dredging Technology, The Netherlands.

(접수일: 2008. 5. 13 심사일: 2008. 5. 28 심사완료일: 2009. 5. 21)