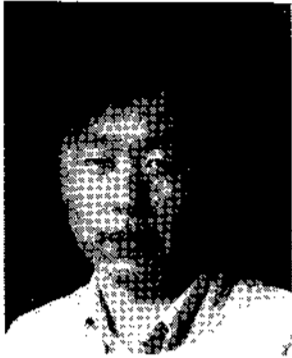


준설효율 향상을 위한 커터헤드의 동수역학적 특성 고찰



김영도 |

인제대학교 환경공학부 조교수
ydkim@inje.ac.kr



박재현 |

인제대학교 토목공학부 부교수
jh-park@inje.ac.kr



이만수 |

현대건설(주) 기술연구소 차장
mslee@hdec.co.kr

1. 서론

일반적으로 항만 시설에서 항로, 박지, 선류장을 조성하거나 개량하기 위하여 수심을 증가시킬 필요가 있을 때 해저의 토사 등을 굴착하는 공사가 필요하게 된다. 이때, 장비를 이용하여 해저의 토사 등을 굴착하여 구역 외로 배송 투기하는 일련의 공사를 준설이라고 하며 준설장비를 갖춘 선박을 준설선이라 한다. 준설공사는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 선박의 운항을 위한 항로나 박지를 조성하거나 유지하기 위한 준설로서 이는 준설자체가 공사의 최종 목적이 되는 경우와 매립이나 구조물의 기초를 조성하기 위한 목적으로 해저의 토사를 준설하는 경우로 나눌 수 있

다. 전자의 경우, 기초 지반의 종류나 상태에 관계없이 해당지역을 소요심도까지 준설하여야 하지만, 후자의 경우는 매립, 구조물 기초 등의 용도에 부합하는 재료의 토사만을 준설하게 된다.

준설은 수중굴착, 운반(배송), 매립 기술로 구분되는데, 국내에서는 아직까지 각 기술을 통합한 체계적인 연구가 수행되지 못하고 있다. 그 이유는 외형상 단순해 보이지만 수공학 및 지반공학 등의 토목 분야 기술뿐만 아니라 기계공학, 전자제어, 환경공학 등 여러 분야의 기술들이 매우 복잡하게 연계되어 있으며, 현재 제한된 소수의 기술자들과 특수 대형 장비 및 준설선에 의해 준설작업이 수행되고 있기 때문이다. 본고에서는 국토해양부 건설핵심기술연구개발사업의 지원에 의해 수행되고 있는 “준설효율 향상을 위한 최적 배송시스템 및 친환경 커터헤드 개발”의 다양한 연구내용중 향후 이 분야에 좀 더 많은 수공학 분야의 연구가 수행되기 위하여 준설수조시험 (Cutting Tank Test)에 관해 소개하고자 한다.

2. 국내외 준설기술 현황

준설은 수중굴착, 운반(배송), 매립 기술로 구분되는데, 이와 같은 준설공정을 이해하고 최적의 준설작업을 시행하기 위해서는 다음과 같은 기술적 사항들을 이해해야 한다.

- (1) 관련 유체역학 이론에 대한 이해(정/동수 역학, 부력/유체역학 등)
- (2) 준설펌프 기술에 관한 사항

- (3) 준설장비 및 준설기술에 관한 사항
- (4) 지반의 퇴적에 대한 이해 (침강/퇴적이론, 조사 기술, 준설매립 후 지반특성)
- (5) 연약지반개량에 관한 사항
- (6) 준설에 의한 환경영향
- (7) 각종 계측에 관한 사항 (유량/토량 관측장비, 현장시험장비, 측량장비)
- (8) 각종 법규에 관한 사항 (준설 및 환경과 관련된 법규)

준설공사의 대상은 수중이므로 육상에 비하여 지질조건을 파악하기 어렵고 공사 중 기상과 수체의 흐름조건의 영향을 많이 받게 된다. 또한 시공장비의 건조비와 유지관리비가 많이 소요되는 등 시공관리상의 관리요소가 많으며 내용도 복잡한 특징이 있다. 따라서 준설공정의 계획 및 설계시 이러한 복잡한 요인을 충분히 고려하여 가장 효율적이고 경제적인 방법을 적용하되, 대상 수체의 조건, 지반조건과 현장여건 등을 비교 검토 후 최적의 설계를 하고 이에 따라 시공하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

준설선을 포함한 준설 장비는 최근 30년간 유럽과 미국 주도로 급속히 대형화, 첨단화 되었고, 국내 업체들도 수입, 제작하여 다량 보유 하고는 있으나, 대부분 매립 관련 분야로 국한되어 연구 개발이 수행되면서, 1990년대 이후로 준설분야 국제 경쟁력이 저하되기 시작하였고, 2000년대에 와서는 자체 기술만으로는 해외 선진업체들과 경쟁이 되지 않는 실정에 이르렀다. 한국의 준설 기술 현황 파악을 위해 국·내외 준설 현장조사, 준설선 성능분석, 준설선 시운전 결과를 분석한 결과 준설 공사의 원가 구성요소는 장비비가 약 40~45%, 유류비가 약 30~40%, 인건비가 약 10~15%, 소모품 및 기타비용이 10~20% 정도를 차지하며, 준설 원가의 구성 요소 중 유류비와 인건비가 차지하는 부분이 약 40~55%이었다(그림 1 참조). 준설 생산량 영향 인자 중 준설기술이 생산량에 미치는 영향이 40%로 매우 크게 나타나 준설기술

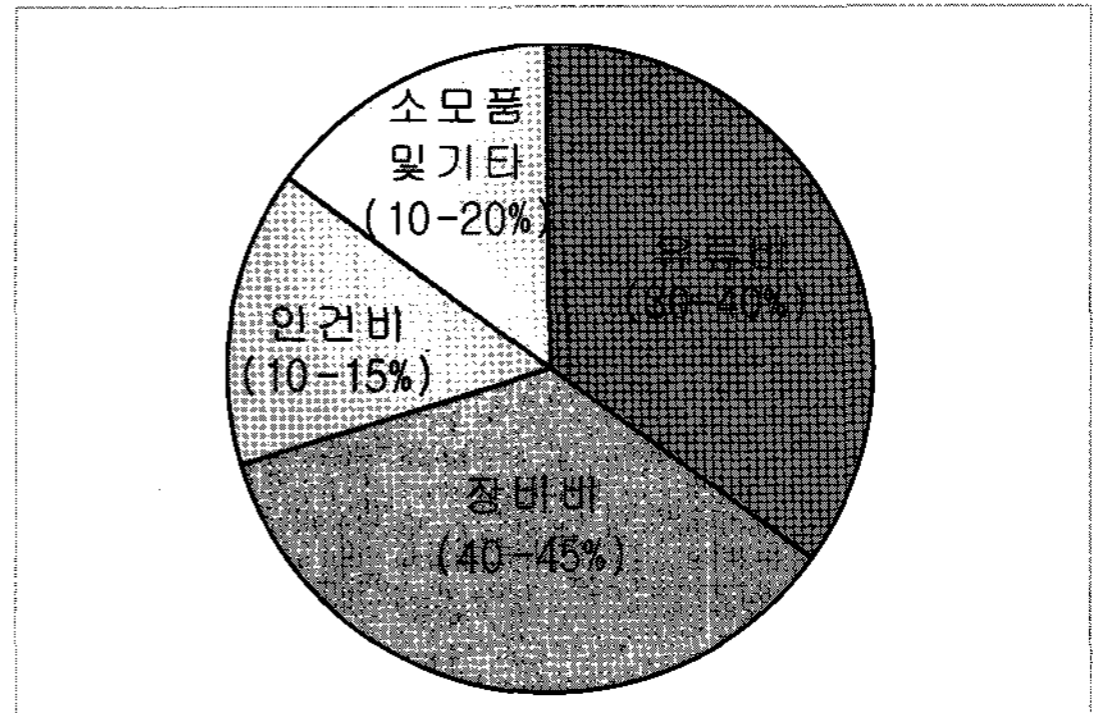


그림 1. 준설원가 구성요소

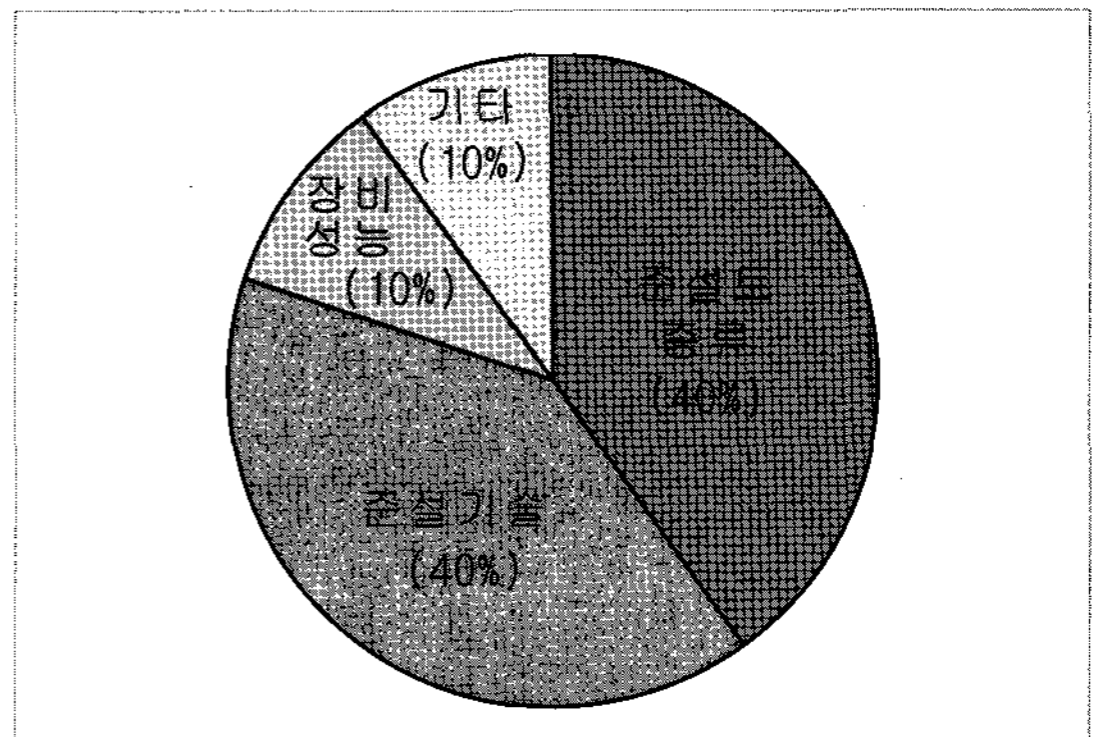


그림 2. 생산성 영향 인자

에 대한 체계적인 연구가 절실히 요구되고 있다.

고효율 최적배송의 기본 개념과 친환경 준설을 위한 커터헤드는 이미 선진국에서는 실용화에 이르고 있다(표 1 참조). 그러나 설계와 시공에 필요한 핵심적인 요소기술은 각 국가의 해당 기업이 철저하게 고유의 기술로 확보하고 있고 대외 유출은 극히 꺼리고 있는 실정이다. 준설 기술의 첨단화, 대형화를 주도하고 있는 유럽은 델프트공대(준설시험실)와 세계 최대 준설선 건조 회사인 IHC, 주요 준설회사들로 구성된 준설협회(Central Dredging Association)를 중심으로 10년간 준설관련 요소 기술의 개발과 실용화를 추진하여 전 세계 주요 준설분야 시장을 선점하고 있다. 미국의 준설 기술은 미공병단 준설 프로그램(DOTR, DOER)과 환경청(EPA), 연방수로국, 항만청 등의 국가 기관 주도하에 성장, 발전하고 있다.

표 1. 국내 업체와 유럽 선진업체의 준설기술 분석

구분	국내 업체	유럽 선진업체	비고
배송농도	-저농도 (15%-20%)	-고농도 (30%-40%)	-배송 운전 방법 개선 필요
준 설 선	-저렴, 복잡, 신조 -수동 운전	-고가 첨단 장비 -자동화 운전	-장비 성능 개선 필요
종 사 자	-기술 수준 높음 -낮은 처우	-기술 수준 높음 -연속성, 안정성	-고기능 인력 양성 필요

TEXAS A&M 대학의 준설 시험실과 엘리코트, GIW 등의 제조 회사들과 Great lakes 등의 대형 준설선단을 보유한 건설 회사들이 미주준설협회(Western Dredging Association)를 설립, 운영하며, 관·산·학 연계가 조화를 이루고 있으며, 2000년 이후에는 인도, 중동 등 해외 시장 진출을 시작하였다. 일본의 국제 경쟁력은 준설선 설계, 환경 준설, 기계, 자동제어 분야에서 우세하지만, 80년대 이후에는 상대적으로 저렴한 인건비 구조인 한국과의 가격 경쟁력이 약화되어, 동남아시아 준설 공사에서는 한국 건설 업체와 심한 경쟁 중에 있다. 중국은 자국내 황하 강, 양쯔 강, 광둥 성, 동부해안 등의 개발로 인한 연간 2억m³ 이상의 준설 공사 물량을 소화하기 위해 최근 대형 점보급 준설선을 수입 또는 자체 제작하고 있다. 난징 호하이 대학은 델프트 공대와 연구 협약하여 준설 시험실을 설치하였고, 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 조화시킴으로써 우리나라에게는 가장 강력한 위협이 되고 있다.

친환경 고효율 준설 기술을 개발하는 것은 국내 준설 기술의 수준을 한 단계 상승시키는 계기가 되며, 고유가 시대의 준설기술의 국제경쟁력 확보 및 해외로의 기술료 지출을 절감하는 계기가 될 것이다. 현재 국내에서는 몇몇 대표적인 시공사를 중심으로 고효율 배송 및 친환경 준설에 대하여 풍부한 시공의 실적을 보유하고 있다. 그러나 기반기술 및 핵심기술에 대한 다학제간 연구개발이 부족하여 범용화된 일

반기술을 확보하고 있지는 못한 실정이다. 친환경적 고효율 준설기술을 개발하기 위해서는 다음과 같은 연구가 수행되어야 하며, 이 중 본고에서는 수공학 분야와 밀접한 준설수조실험(Cutting Tank Test)에 관해 소개하고자 한다.

- (1) 준설루프시험(Dredging Loop Test)
- (2) 준설 모니터링시스템 개발 및 적용
- (3) 현장 배송 시험
- (4) 최적배송기술 현장 적용 및 실용화
- (5) 친환경 커터헤드 개발
- (6) 준설수조실험(Cutting Tank Test)
- (7) 환경 모니터링 및 준설토 재활용 기술 개발
- (8) 준설시 발생한 부유물의 혼합거동에 관한 해석 기술 개발

3. 준설수조시험(Cutting Tank Test)

준설수조시험(Cutting Tank Test)이란 대형수조에 준설선 모형을 제작하여 커터헤드(cutter head)의 속도, 석션펌프(suction pump)의 흡입속도, 준설선의 이동속도, 준설 깊이 등의 조건들을 달리하여 최적의 준설효율의 조건을 찾아주는 일종의 기계역학 분야가 결합된 수리모형실험이다. 현재 인제대학교에는 길이 4.2m, 폭 2.2m, 높이 1.5m 규모의 수조에 현대건설(주)의 아산3호를 원형으로 한 준설선 모형이 설치되어 있다(그림 3 참조). 이와 같은 준설효율을 연구한 사례를 살펴보면, Hatamura 등(1975)은 준설 메카니즘에 대한 연구를 진행하였으며,

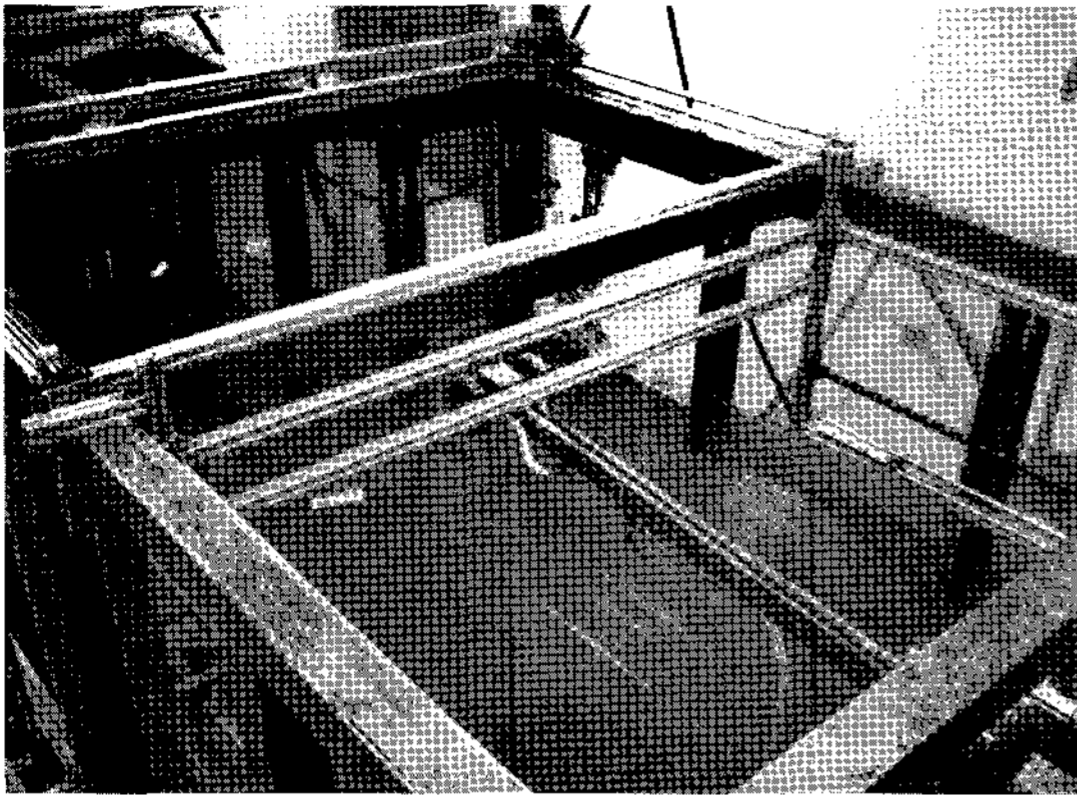


그림 3. 준설선 모형과 실험수조

Joanknecht(1974)는 준설입자에 대한 수중에서의 커터헤드의 힘에 대한 연구를 수행하였고, Leussen 등(1986)은 준설토에 대한 커팅 메카니즘의 연구를 수행하였다. Miedema(2003)는 실제 대형커터헤드의 준설각도에 관한 운동학적 분석을 수행하였으며, 또한 Miedema(2003)는 커터헤드의 준설각도에 따른 유속과 마찰크기를 연구하였다. Verheul(2004)는 커터헤드와 준설깊이와의 관계에 대한 연구를 수행하였다. Matousek(1999)는 준설 처리과정에서의 수리학적 이송에 관하여 연구하였다. Wieren 등(2007)은 준설수행시 효율적 처리과정을 위한 연구를 하였으며, Jisong 등(1998)은 준설시 커터헤드의 크기, 경사 및 각도에 대한 수치모델링을 수행하였다.

커터헤드의 날개는 총 12개로 제작하였으며, 커터헤드모형은 직경을 16cm로 제작하였고, 개방형(그림

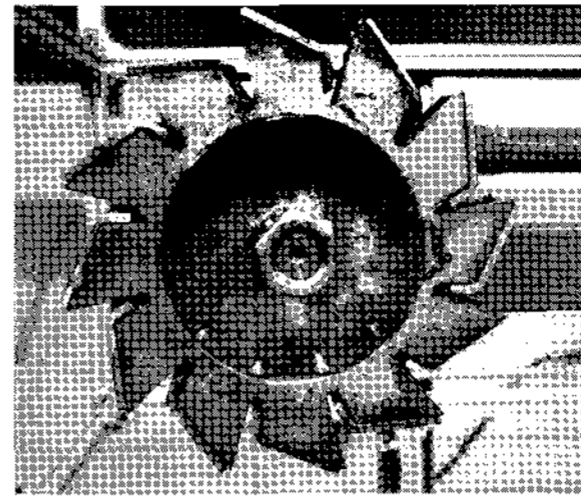


그림 4. 개방형 커터헤드

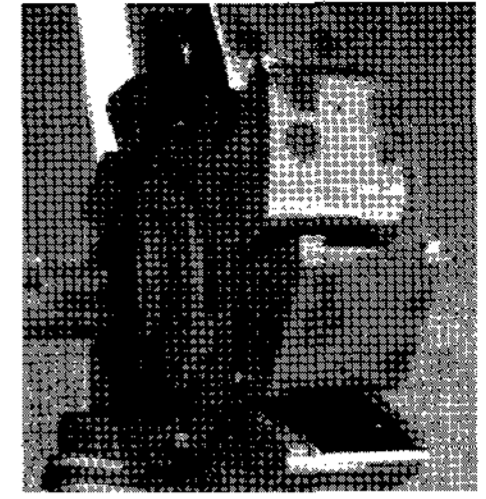


그림 5. 폐쇄형 커터헤드

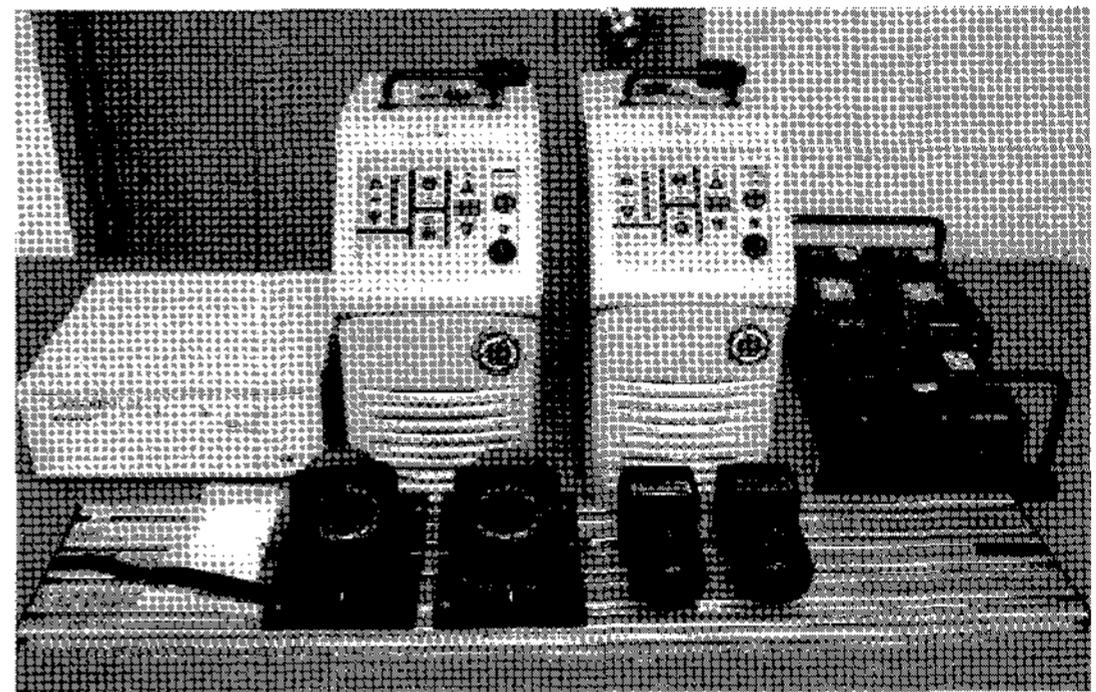


그림 6. 3차원 입자영상유속계(Stereo-PIV)

4 참조)과 폐쇄형(그림 5 참조)으로 분류하여 각각에 대한 준설효율 실험을 진행하였다. 이 때 발생하는 준설토 입자의 확산 및 난류특성을 분석하기 위하여 대형수조에서 비교란 광학 유속측정 장비인 입자영상 유속계(PIV)를 이용하여 유속장을 측정하고, 이를 통해 난류특성을 분석하고, 부유물의 확산되는 속도 및 확산·이동의 흐름 특성을 파악하였다(그림 6 참조).

준설시 부유물의 이동 및 확산에 영향을 미치는 커

표 2. 커터헤드 주변의 유동장 분석 실험 조건

조 건	지 점	frame 수	시간간격	커터헤드(rpm)	흡입속도(m/sec)
비흡입	-	-	-	-	-
CASE 1	0.5 cm	200	0.067	40	-
CASE 2	2.0 cm	200	0.067	40	-
CASE 3	3.5 cm	200	0.067	40	-
흡 입	-	-	-	-	-
CASE 4	0.5 cm	200	0.067	40	2.0
CASE 5	2.0 cm	200	0.067	40	2.0
CASE 6	3.5 cm	200	0.067	40	2.0

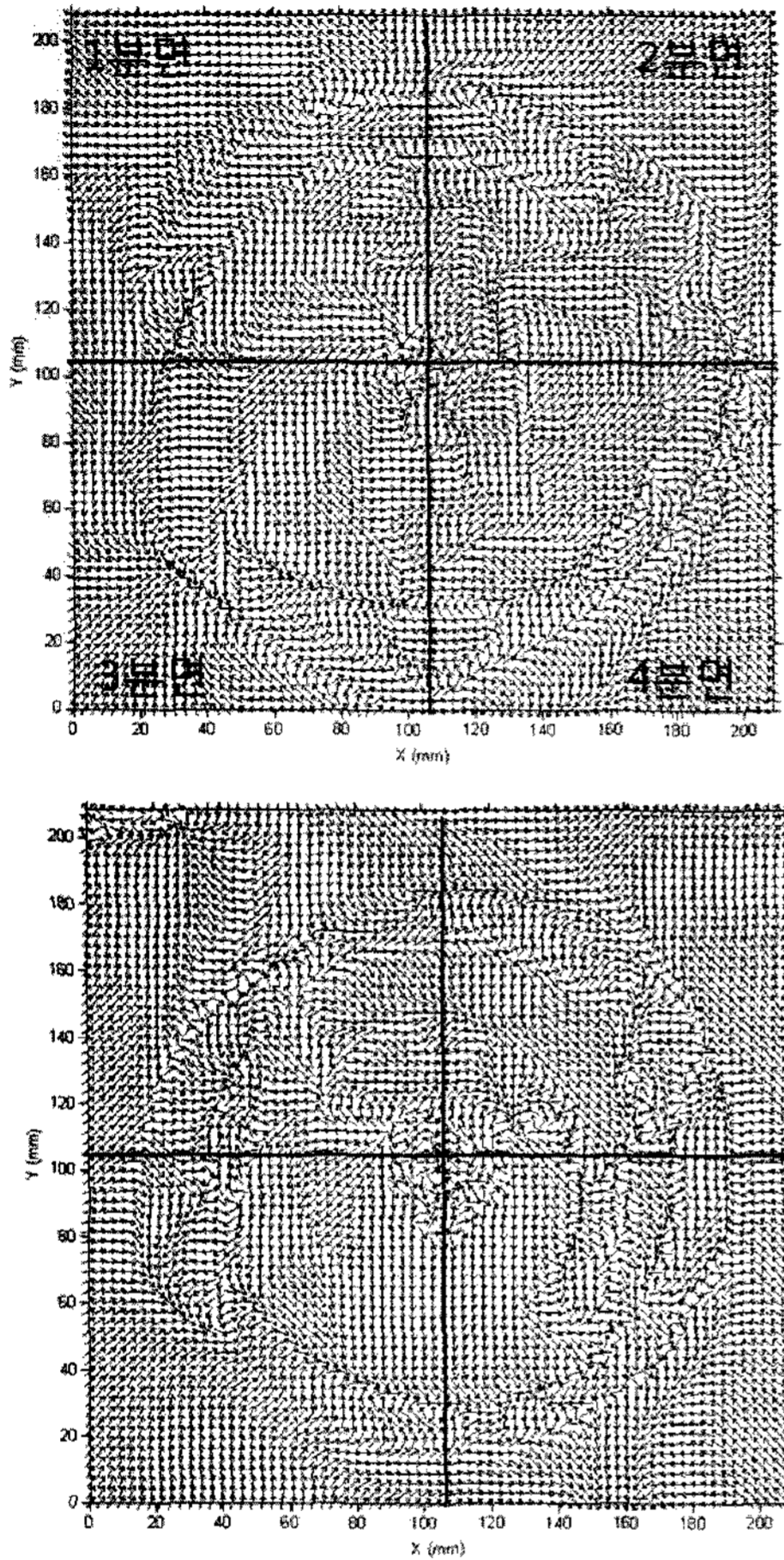


그림 7. 유속벡터도(CASE 1과 2)

터헤드 주변의 유속장의 분포특성을 살펴보기 위하여 준설토 비흡입시와 흡입시로 나누어 실험을 수행하였다(표 2 참조). 커터헤드의 회전속도는 준설효율 실험 중 최적의 효율을 나타낸 42 rpm으로 고정하였으며, 이 때 흡입속도는 2.0m/sec를 유지하였다. 각 실험 조건별로 PIV를 이용하여 200개의 Frame을 찍었으며 시간간격은 0.067초로 하였으며, 오류벡터들을 제거한 후 나머지 Frame으로 평균 유속분포를 구하였다. 그림 7은 CASE 1과 2의 유속벡터도를 나타낸 것이고, 그림 8은 동일한 조건의 유속장의 크기를 등유속선도로 나타낸 것이다. CASE 1의 유속벡터도와 등유속선도를 분석해 보면, 커터헤드의 날개 주변으

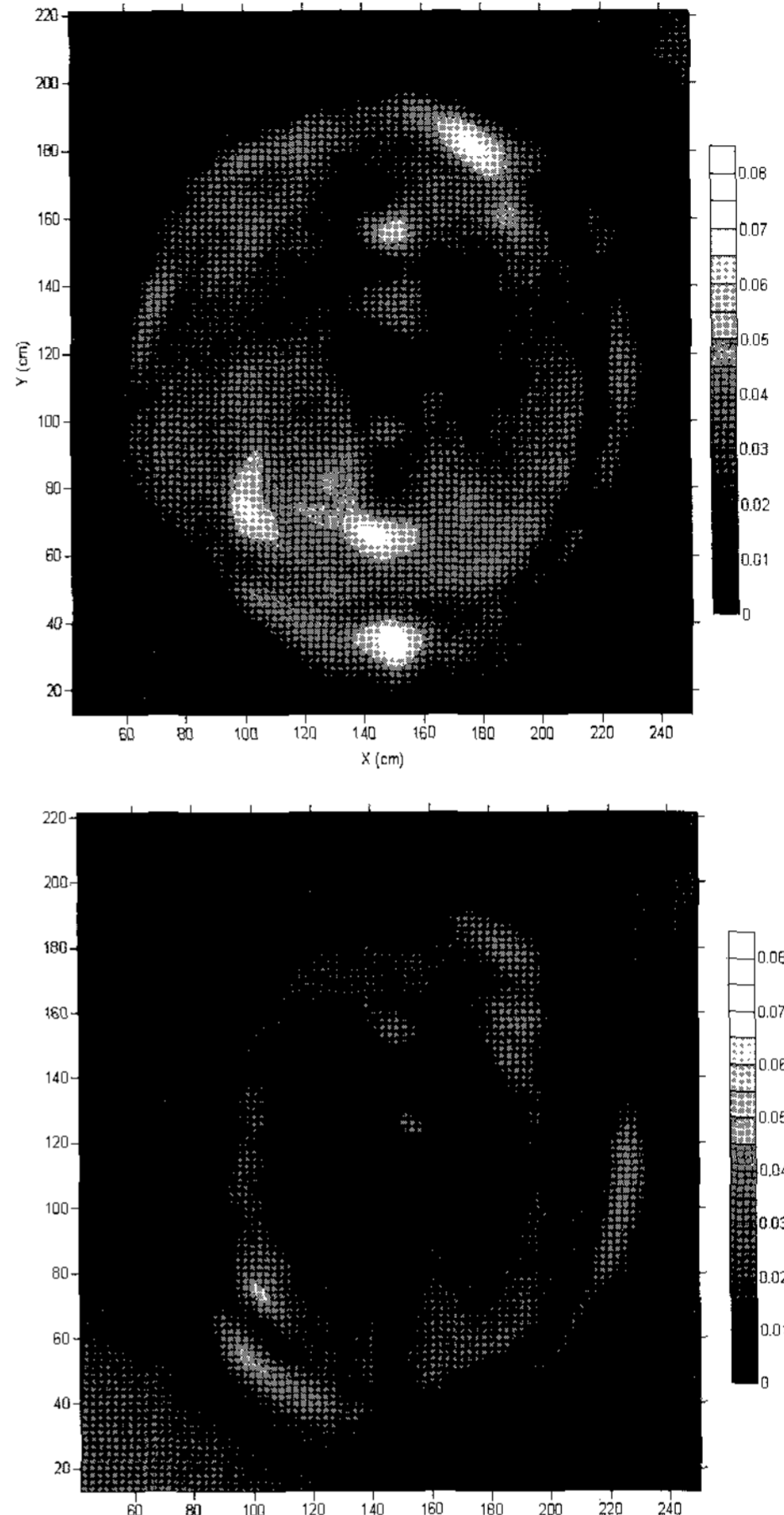


그림 8. 등유속선도(CASE 1과 2)

로 유속장의 값이 크게 나타났으며, 커터헤드가 돌아가는 시점에서부터 내부의 유속장과 외부의 유속장이 차이가 크게 나타나며, 외부에서 돌아가는 유속장으로 인하여 부유물이 점진적으로 퍼져나갈 것을 예상할 수 있다.

커터헤드 주변의 유동장 분석실험 결과를 살펴보면 비흡입시에는 커터헤드 주변에서 멀어질수록 평균 유속값이 최대 50% 이하로 떨어짐을 보였는데 이는 커터헤드의 움직임에 따라 확산되는 에너지의 크기가 거리별로 급격히 떨어짐을 의미한다. 그러나 흡입시의 유동장 크기를 살펴보면 커터헤드에서 멀어져도 근처의 유속장의 크기와 비교하여 크게 벗어나지 않

표 3. 커터헤드 주변의 유동장 분석 실험 결과

조 건	지 점 (cm)	최저값 (m/sec)	최고값 (m/sec)	평균값 (m/sec)	흡입/비흡입 (%)	0.5cm 지점 대비 유속변화율(%)
비흡입	-	-	-	-	-	-
CASE 1	0.5	0.002	0.077	0.021	-	-
CASE 2	2.0	0.001	0.056	0.017	-	81
CASE 3	3.5	0.001	0.029	0.011	-	52
흡 입	-	-	-	-	-	-
CASE 4	0.5	0.001	0.071	0.019	90	-
CASE 5	2.0	0.001	0.052	0.018	106	98
CASE 6	3.5	0.001	0.045	0.018	163	98

는 모습을 보이는데 이는 흡입시 추가된 에너지가 유속장에 크게 영향을 미치는 것으로 판단되어진다. 이와 같은 커터헤드 주변의 유동장 분석 실험결과를 정리하면 표 3과 같다.

그림 9는 CASE 1과 2의 난류강도의 크기를 나타낸 것이다. 커터헤드의 날개 주변으로 대부분의 난류강도 크기가 크게 나타났는데, 흡입시와 비흡입시를 비교하였을 경우 그 크기가 0.5 cm 지점에서는 약 15%정도 감소하였지만 3.5 cm 지점에서는 50% 정도로 급격하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 흡입시 x, y 방향뿐만 아니라 z 방향에 위치한 흡입력의 에너지로 인하여 z 방향의 변위특성인 w가 증가하여 x, y 방향의 변위특성인 u', v'에 영향을 미친것으로 판단된다.

4. 결론

본고에서는 준설효율 향상과 친환경적 커터헤드 개발을 위한 준설수조실험을 소개하였다. 이와 같은 준설수조실험이 국내에서는 현재까지 체계적으로 이루어진 바가 없으며, 본고에서 소개한 내용을 기초로 준설분야에 있어서 향후 수공학 분야의 다양한 연구과제를 도출하였으면 한다. 예를 들어, 준설 깊이, 커터헤드 속도, 준설 흡입속도 등의 수리학적 조건과 입자크기, 입도분포, 점착성 등의 토질역학적 특성에

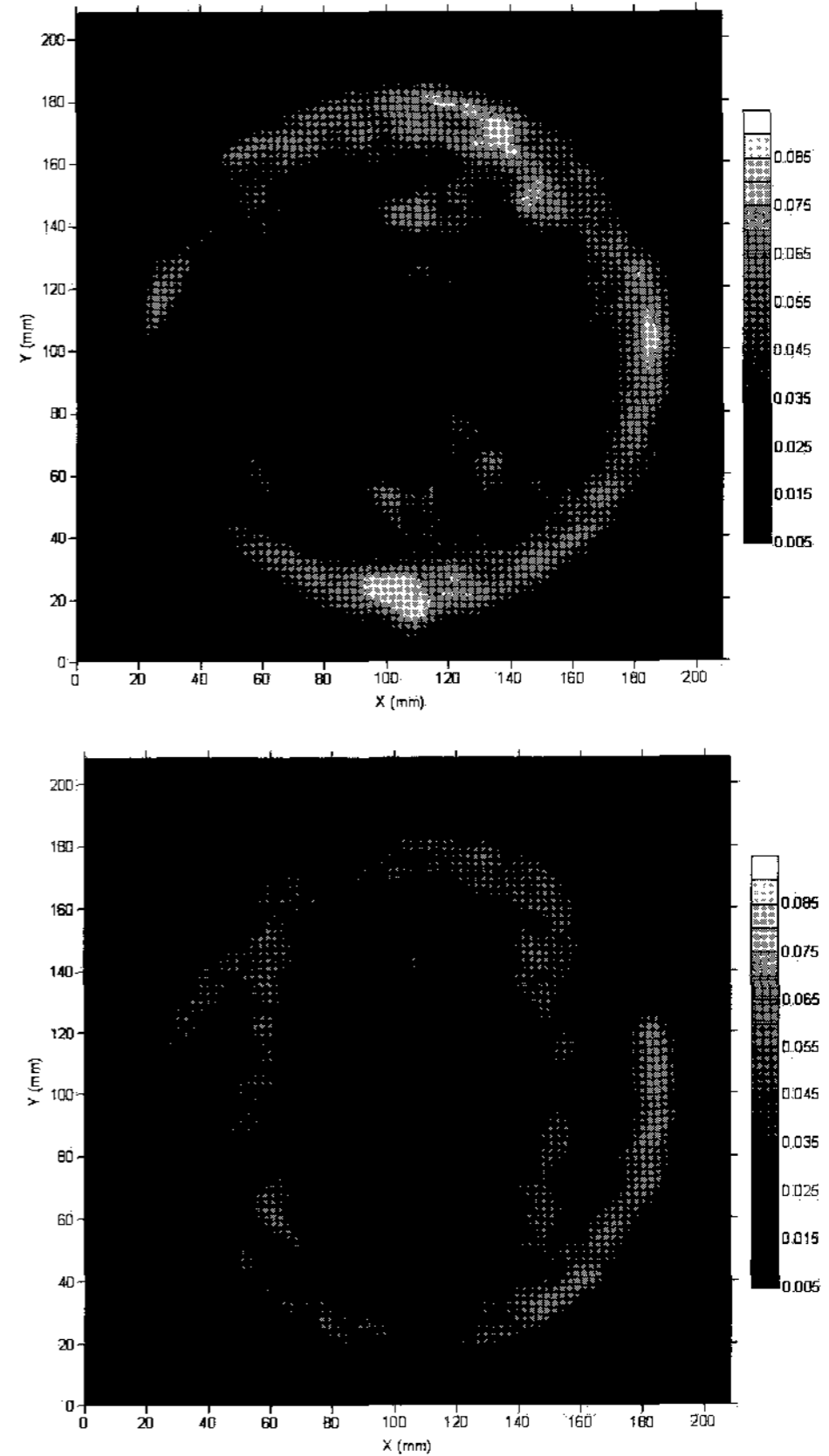


그림 9. 등유속선도(CASE 1과 2)

따라 다양한 조건의 실험을 수행함으로써, 친환경적 커터헤드 개발과 준설선의 최적 운영 조건을 찾아낼 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본고는 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(C106A1000007 -06A060000711)에 의해 주관연구기관인 현대건설(주)과 위탁연구기관인 인제대학교에서 수행된 연구결과를 바탕으로 작성되었습니다.

참고문헌

- Hatamura, Y. and Chijiwa, K. Analyses of the mechanism of soil cutting. 1st report, Bulletin of the JSME, vol. 18, No. 120, June 1975.
- Joanknecht, L.W.F., "Cutting Forces in Submerged Soils". T.H.Delft, 1974, The Netherlands.
- Jisong He & W.J.Vlasblom, "Modelling of saturated sand cutting with large rake angle". 15th world dredging congress, June 1998, Las Vegas, Nevada, USA
- Leussen, W. van & Os, A.G. van, "Basic Research On Cutting Forces In Saturated Sand". Paper submitted for publication in proceedings ASCE. Delft Hydraulics Laboratory, Delft July 1986 (beschikbaar 28 Augustus 1986).
- Matousek, V. (1999). Hydraulic transport as one of the dredging processes, Syllabus, Faculty of Design, Construction and Production, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Miedema, S.A. (2003). The Existence of Kinematic Wedges at Large Cutting Angles, in Proceedings of CHIDA Dredging Days, Shanghai, China.
- Miedema, S.A. and Frijters, D. (2003). The Mechanism of Kinematic Wedges at Large Cutting Angles Velocity and Friction Measurements, in Proceedings of 23rd WEDA Technical Conference & 35th TAMU Dredging Seminar, Chicago, Illinois, USA.
- 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.
- W. van Wieren and G.T. Mallee, IHC Systems Hydrographic Department Merging Hydrographic functions into the concept of Efficient Dredging