

준설토의 유실을 평가방법에 관한 연구

A Study on Estimation of Loss Rate of Hydraulic Fills

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 노종구²⁾, Jong-Koo Ro, 김석열³⁾, Seog-Yol Kim
강인규⁴⁾, In-Kyu Kang, 김승욱⁵⁾, Seung-Wook Kim, 박재역⁶⁾, Jae-Eock Park

- 1) 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Hong-Ik University
- 2) 농업기반공사 농어촌연구원 수석연구원, Research Fellow, Rural Research Institute
- 3) 농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원, Chief Researcher, Rural Research Institute
- 4) (주)브니엘컨설팅트 책임, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.
- 5) 농업기반공사 농어촌연구원 연구원, Researcher, Rural Research Institute
- 6) 홍익대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Hong-Ik University

개요(Synopsis) : Recently, the hydraulic fill method is commonly used in many reclamation projects due to lack of fill materials. The method of hydraulic fill in reclamation is executed by transporting the mixture of water-soil particles into a reclaimed land through dredging pipes, then the dredged soil particles settle down in the water or flow over an out flow weir with the water. In the present study, practice each three method in order to suggest method of determining the loss rate of the dredged fills. The first sieve and hydrometer analysis were performed with the soil samples obtained before and after dredging and then apply theory of particle breakage, the second compare with the volume of dredged soil between at the dredging area and the target pond and the last compare with weight of dredged soil between before and after dredging at the dredging area and in the target pond for estimating the amount of soil particles residual at the reclaimed area and the loss of soil particles passed through the weir. In addition to compare with the loss ratio between as using Marsal's modified theory of particle breakage and measured weight and volume in the field.

주요어(Key words) : hydraulic fills, particle breakage, hydrometer analysis, loss rate

1. 서론

준설매립은 수면아래의 지반을 굴착하여 물과 토립자가 혼합된 상태로 배송관을 통해 매립지역으로 이송하는 공법이다. 과거의 준설은 부지이용을 위한 측면보다는 저수지, 수로 등의 수심을 유지하기 위한 방법으로 사용되어 왔으나, 최근들어 급속한 산업사회의 발달과 경제성장으로 인해 공장용지, 택지, 농경지 등의 확보를 위해 해안매립사업이 활발하게 추진되고 있다.

지금까지 간척지의 내부개답지를 조성하는데 있어 관리수위 이하의 단지를 담수호내의 퇴적토를 준설하여 개답지에 투기할 때 조립의 흙은 배송관 토출구 부근에 즉시 침전되지만 실트질 이하의 세립분

은 배출유속으로 인해 weir나 여수토(out flow weir)를 향해 흐르다가 일부는 침전되고 일부는 여수토를 넘어 유실되는데 이러한 유실도에 대한 평가는 일반적으로 표준품셈 또는 항만설계기준에 의하여 계산되고 있다. 그러나 이같은 계산방법은 개략적인 공사비를 산출하는데 이용되고 있으며, 현장에서 시공시에는 별도로 시험포를 운영하여 평가하고 있으나 합리적인 산출방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 합리적인 유실율을 평가하기 위한 방법으로 Marsal의 수정파쇄율(1973)을 이용하여 준설매립과정에서 발생하는 입자의 유실을 입도분포곡선의 변화로부터 구할 수 있는 유실을 결정방법을 제안하고, 이를 검증하기 위하여 현장에서 시험포를 조성하여 유실율을 서로 비교·분석하였다.

2. 기존의 유실율 평가시 문제점

준설매립지역의 유보율 또는 유실율은 식(1) 및 (2)와 같이 정의된다. 그러나 준설지역이 대부분 담수호나 해양이기 때문에 바다의 불규칙한 굴곡으로 인하여 정확한 체적을 측정하기 힘들고, 준설 매립 지역에서도 유실율은 토사의 입경, 여수토의 위치, 높이, 배출구로부터의 거리, 침사지 면적, 매립고 및 펌프준설선에서의 배사관 거리, 속도 등에 따라 차이가 발생하며, 또한 해상에서 커터를 이용한 준설시 발생하는 유실도 상당부분 발생하게 된다.

$$\begin{aligned} \text{유보율}(\%) &= \frac{\text{매립토의 중량}}{\text{준설토의 중량}} \times 100(\%) \\ &= \frac{\text{매립토의 체적}}{\text{준설토의 체적}} \times 100(\%) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{유실율}(\%) &= (100 - \text{유보율})(\%) \\ &= \frac{\text{준설토의 중량} - \text{매립토의 중량}}{\text{준설토의 중량}} \times 100(\%) \\ &= \frac{\text{준설토의 체적} - \text{매립토의 체적}}{\text{준설토의 체적}} \times 100(\%) \end{aligned} \quad (2)$$

표준품셈(건설교통부 발행, 1998) 및 항만설계기준(해운항만청, 1993)에 따르면, 준설매립시 유실율에 대한 평가는 실험적으로 결정하는 것이 가장 정확하나 그렇지 못한 경우에는 표 1과 같이 적용할 수 있다고 하였으며, 일본에서 조사한 토립자의 입경별 유실율 조사결과는 표 2와 같다.

표 1. 토질별 유보율

토 질 별	유보율(%)
점토 및 점토질 실트	70이하
모래 및 모래질 실트	70~95
자갈	95~100

표 2. 입경별 유실율

입 경(mm)	유실율(%)	입 경(mm)	유실율(%)
1.2이상	없음	0.3~0.15	20~27
1.2~0.6	5~8	0.15~0.075	30~35
0.6~0.3	10~15	0.075 이하	30~100

그러나 유보율 평가시, 표 1에서 나타난 바와 같이 점토 및 점토질 실트는 70%이하, 모래 및 모래질 실트는 70~95%로 범위가 크기 때문에 적용하는데 어려움이 있어 개략적인 공사비의 산출 등에 적용하고 있다. 따라서, 시공시에는 시험포를 조성하여 현장에서 유실율을 실측함으로써 설계보완에 반영하고 있으나 현장에서 실측하는 것이 용이한 문제만은 아니다.

현장 시험포에서의 유실율 평가시, 준설량은 준설선의 위치와 전진거리를 GPS와 육분의에 의해 측

정하여 축척 1/3,000 평면도 상에 나타내어 용적을 계산하고 있으며, 매립량은 준설선의 배사관을 통해서 나오는 토출구에서 토립자 함니율과 유속을 측정하여 유량공식에 의해 용적을 구하거나, 침사지에서 준설 전후를 측량하여 용적을 계산하고 있다. 그러나 이와 같은 방법으로 유실율을 평가하기에는 GPS 등의 기계적인 오차, 축척에 따른 도상오차, 조류의 변화, 인위적인 오차 및 실측을 하기 위한 작업지장 등의 많은 어려움이 있다. 또한 준설선에서 기계적인 조작 등 준설시공자의 도움을 받아야 하는데 서로의 입장차이로 인하여 정확한 유실율을 평가한다는 것은 상당한 어려움이 따르고 있는 실정이다.

3. 준설매립시 유실율 결정법의 제시

본 연구에서는 현장 시험포에서의 유실율 평가시 보다 합리적인 방안으로 Marsal의 수정과쇄율을 이용하여 유실율을 결정하는 방법을 제시하고자 한다. Marsal의 수정과쇄율은 토입자의 다짐시 발생하는 입자의 과쇄정도를 의미하며, 다짐전·후의 잔류율 곡선의 변화를 이용하여 계산된다.

현장에서의 준설시 원지반 및 시험포 내의 준설매립지반에 대한 일반적인 입경가적곡선 및 잔류율곡선은 그림 1과 같다. 그림 1에서 알 수 있듯이 시험포 내에 매립된 지반은 준설매립과정에서 주로 세립분에 대한 유실이 발생하기 때문에 원지반에 비하여 세립분이 적고 조립분이 상대적으로 많은 입도분포 양상을 나타내게 된다.

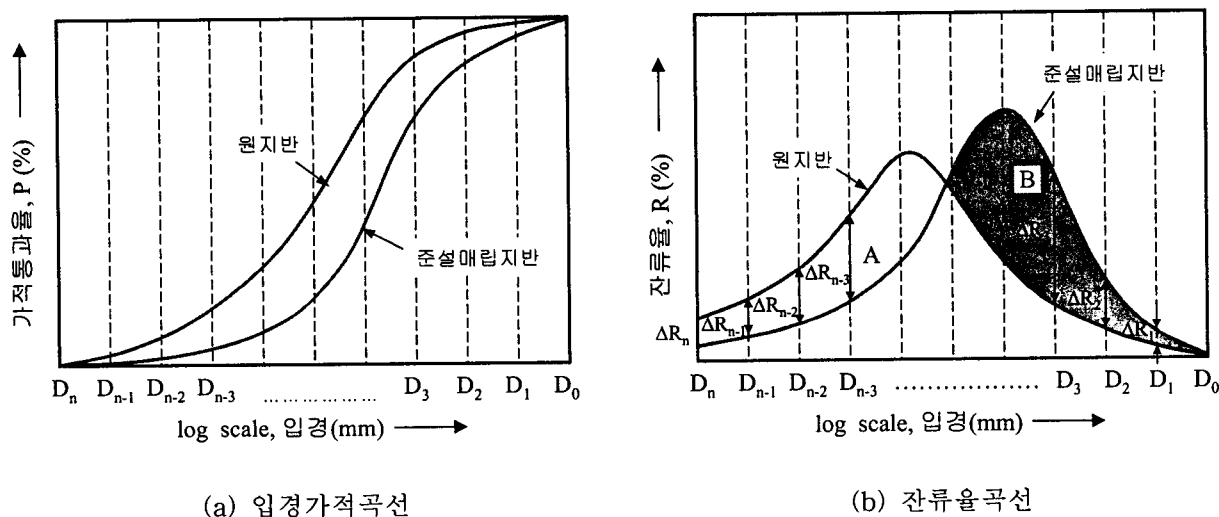


그림 1. 준설매립시 유실율 결정방법

그림 1에서 A부분은 준설매립과정에서 발생된 세립분의 감소율이며, B부분은 조립분의 증가율을 의미하며, 세립분의 감소율과 조립분의 증가율은 서로 같다. 따라서 준설매립시의 유실율은 세립분의 감소율 또는 조립분의 증가율과 같으며, 식(3)과 같이 세립분의 감소율과 조립분의 증가율에 대한 평균값으로 정의할 수 있다.

$$\text{유실율}(\%) = \frac{\sum |\Delta R_i|}{2} \quad (3)$$

본 연구에서 제시된 준설매립시의 유실율은 원지반 및 준설매립지반을 채취하여 체분석 및 비중계분 석을 통해 입경가적곡선 및 잔류율 곡선을 작도한 후, 입경가적곡선을 대수상에서 n등분하여 결정된 입경에 대해 입자의 변화량(=조립분의 증가율과 세립분의 감소율)에 대한 평균을 계산함으로써 결정된다.

4. 현장계측 및 입도시험

4.1 현장에서의 유실율 계측

본 연구에서는 현장에서의 유실율을 평가하기 위하여 전남 KK지구와 KH지구를 대표지구로 선정하여 현장에서의 실측을 통해 유실율을 평가하였다. 각 지구별 원지반의 토질특성은 표 3과 같다. 또한 이들 두 현장에서의 유실율 평가에 있어서, KK지구의 경우에는 현장에서 실측한 전체 준설 작업량과 침사지 내부에 매립된 토량을 이용하여 유실율을 계산하였으며, KH지구의 경우에는 준설지역에서 준설된 흙의 중량과 침사지 내부에 매립된 흙의 중량을 이용하여 유실율을 계산하였다.

표 3. 토질특성

현 장	입 도(%)			단위중량 γ_t (gf/cm^3)	함수비 (%)	비 중 G_s	통일분류
	점 토	실 트	모 래				
KK지구	21.0	77.9	1.1	1.6	67.1	2.658	CL
KH지구	19.0	79.5	1.5	1.9	50.0	2.672	CL

KK지구에서의 시험포에 대한 준설량은 $128602 m^3$ 이고 매립량은 $101,293.8 m^3$ 으로 측정되어, 유실율은 21.23%로 평가되었다. KH지구의 경우에는 준설체적을 측정하기 위해 해상에서 수심을 측정하였고 측심작업시에는 답수호 내부 준설선의 전진방향으로 100m, 횡방향으로 60m 크기의 면적을 선정하여 횡방향 및 종방향 모두 10m씩의 등간격으로 심도를 측정하였으며, 측심작업구역내 5개소에서 시료채취를 실시하여 단위중량 및 물리적인 특성 등을 파악하였다. 또한 침사지에 대해서는 광파기를 이용하여 준설토 투기전과 투기후의 지반고 변화를 측정하였고 이를 위해 가로 200m, 세로 150m의 침사지 2개소를 선정하여 등간격으로 계측을 실시하였다. KH지구에 대한 준설지역에서의 준설체적 및 침사지 내의 매립체적과 평균단위중량 및 평균함수비 등은 표 4와 같으며, 준설토의 중량과 침사지 내에 매립된 흙의 중량을 토대로 유실율을 계산한 결과 18.41%로 나타났다.

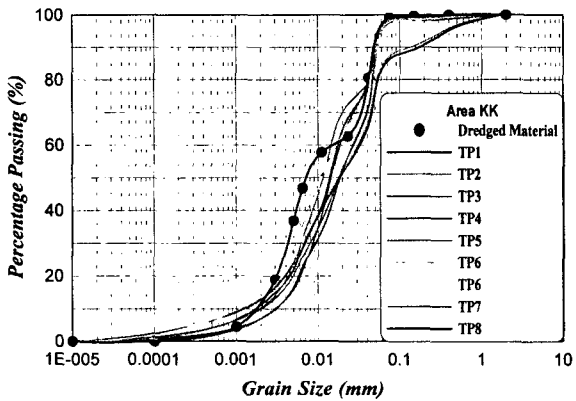
표 4. 현장에서의 유실율 계산(KH지구의 경우)

구 분	준설/매립체적 (m^3)	포화단위중량 (t/m^3)	함수비(%)	건조단위중량 (t/m^3)	중량 (t)
준설지역	5145.4	1.9	50	1.27	6534.7
침 사 지	13329.6	1.2	200	0.4	5331.84

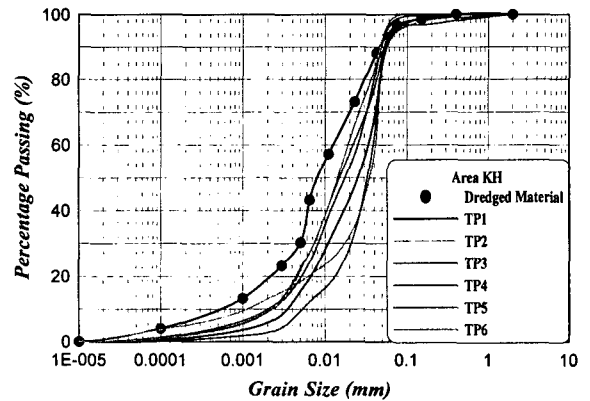
4.2 입도시험결과

본 연구에서는 KK지구와 KH지구의 원지반 및 준설매립지반에 대하여 입경가적곡선 및 잔류율곡선을 작도하기 위해 현장에서 시료를 채취하여 입도시험을 실시하였다. 이를 위해 본 연구에서는 답수호 내의 준설지역의 경우에는 두 현장 모두 5개소에서 시료를 채취하여 입도시험을 실시하였으며, 침사지 내에 준설매립된 지반에 대해서는 KK지구의 경우 8개소, KH지구의 경우 6개소에서 각각 시료를 채취하여 입도시험을 실시하였다. 시료채취시에는 관내부의 성상 및 시료의 교란여부를 확인하기 용이하도록 길이 1m, 내경 60mm의 아크릴재질 관으로 특수 제작하였다. 채취된 시료는 20cm 심도별로 균등하게 절단하여 각 개소당 4~6회의 입도시험을 실시한 후 이들의 평균값을 각 시료채취 지역의 대표값으로 취하였다. 또한 준설토의 입경이 극히 미세하여 입도분포곡선 상에서 곡선이 0%에 근접하지 않음으

로 시험 데이터 이후 입경의 값은 회기분석을 통하여 가정하였으며, 입도시험결과를 토대로 원지반혹의 입도분포와 준설후 침사지내의 입도분포를 비교하여 나타내면 그림 2와 같다.



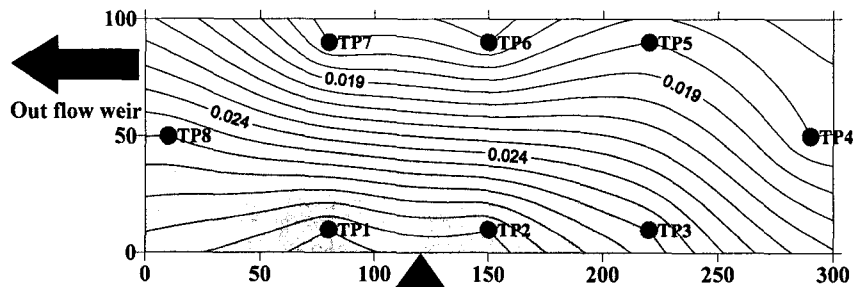
(a) KK지구



(b) KH지구

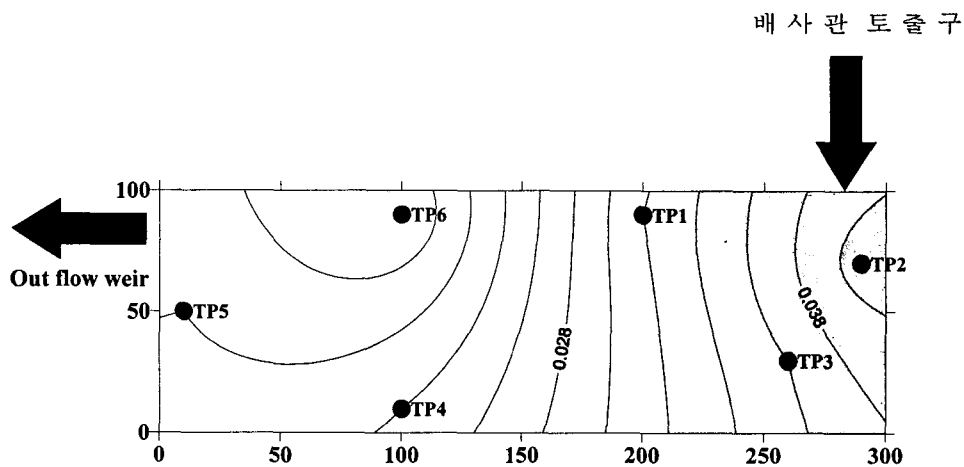
그림 2. 입경가적곡선

침사지내의 토립자는 입경분포를 개략적으로 판단하기 위해 유효경 D_{60} 의 분포를 각 현장별로 도시하면 그림 3과 같다. 그림 3으로 부터 토출구에서 가까울수록 입자가 굵어지는 경향을 알 수 있었다.



배사관 토출구

(a) KK지구



배사관 토출구

(b) KH지구

그림 3. 침사지내 유효경 D_{60} 분포도

준설매립시의 합리적인 유실율을 결정하기 위해 본 연구에서 제안한 유실율 결정법으로부터 KK지구와 KH지구 침사지에서의 유실율을 평가하기 위해 원지반 및 침사지 내의 TP1점에서 채취된 시료의 잔류율 곡선을 작도하면 그림 4와 같다. 또한 KK지구 및 KH지구에 대하여 본 연구에서 제안한 바와 같이 Marsal의 수정파쇄율을 이용하여 준설매립시의 유실율을 결정하면 표 5와 같다.

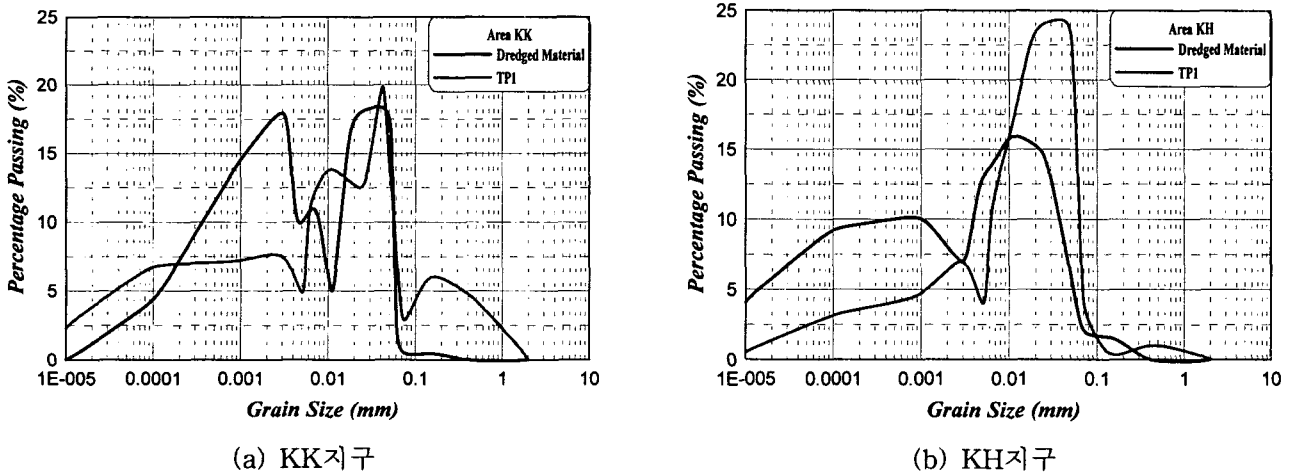


그림 4. TP-1의 잔류율 곡선

표 5. Marsal의 수정파쇄율을 이용한 유실율의 계산

지구	TP	각 입경별 잔류율의 증감량(%)											$\sum \Delta R_i $	유실율 (%)	평균 유실율 (%)
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀	R ₁₁			
KK	1	2.1	5.3	3.3	1.8	8.7	10.3	7.4	2.0	2.4	2.9	2.3	48.5	24.25	23.3
	2	1.91	4.58	3.33	1.58	9.0	10.5	7.33	1.92	2.33	2.83	2.17	47.48	23.74	
	3	0.1	0.25	0.6	2.0	17.0	11.25	8.75	4.63	1.13	0.3	0.75	46.76	23.38	
	4	1.25	1.63	1.0	2.0	6.38	11.0	21.0	3.9	0.13	0.3	0.25	48.84	24.42	
	5	0.6	1.25	0.0	2.8	22.75	12.2	7.95	4.13	1.38	0.13	0.38	53.58	26.79	
	6	0.3	0.6	0.0	5.9	19.5	8	6.93	2.5	1.25	1.7	1.0	47.68	23.84	
	7	0.38	0.8	0.25	2.1	10.7	6.6	6.75	1.55	3.0	3.25	2.0	37.38	18.69	
	8	0.2	0.3	0.13	3.1	14.0	10.88	7.7	2.7	1.38	1.63	0.6	42.62	21.31	
KH	1	0.5	0.7	0.0	12.6	0.0	0.25	5.35	6.25	6.05	5.0	3.5	40.2	20.1	20.6
	2	0.4	0.8	0.2	20.3	6.46	4.2	4.2	4.0	3.5	2.1	0	46.16	23.08	
	3	0.0	0.0	0.2	20.65	2.3	2.3	7.5	8	7.47	6.0	4.0	58.42	29.21	
	4	0.0	0.2	1.2	10.05	2.25	0.15	3.35	4.5	4.75	4.0	2.8	33.26	16.63	
	5	1.0	1.8	1.0	5.6	3.6	1.7	3.3	4.1	4.0	3.5	2.9	32.5	16.25	
	6	0.0	0.25	1.45	5.0	8.25	1.7	3.25	4.5	4.75	4.1	3.0	36.25	18.13	

표 5에서 계산된 유실율을 토대로 유실율 분포를 나타내면 그림 5와 같다. 그림 5에서 알 수 있듯이 Marsal의 수정파쇄율을 이용하여 계산된 유실율은 토출구에서 가까울수록 크며 여수토쪽으로 갈수록 작아지는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 준설매립과정에서 토출구쪽으로 굵은 입자가 많이 쌓이면서 원지반의 입도분포와는 큰 차이가 발생하기 때문으로 판단된다.

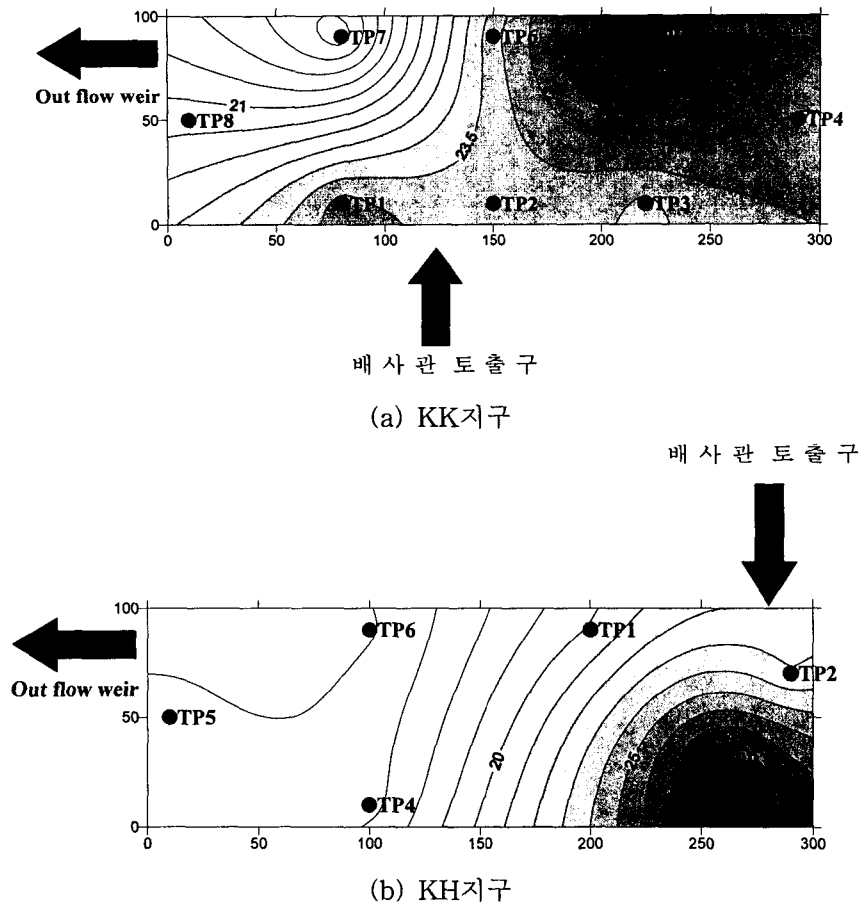


그림 5. 침사지 내의 유실율 분포도

현장에서 계측된 유실율과 기존의 설계시 사용하고 있는 도표(표 1 및 2)를 이용하여 개략적으로 계산된 유실율 및 본 연구에서 제안된 Marsal의 수정파쇄율을 이용한 유실율을 정리하면 표 6과 같다. 표 6에서 알 수 있듯이 표 1 및 2를 이용하여 개략적으로 계산된 유실율은 지나치게 과도한 측면이 있으며 본 연구에서 제안된 Marsal의 수정파쇄율을 이용한 유실율은 현장에서 계측된 유실율보다 다소 큰 경향을 보이고 있다.

표 6. 각 방법별 유실율의 비교

구 분	유 실 율(%)	
	KK 지구	KH 지구
현장계측결과	21.23	18.41
기 존 방 법	30.0	27.0
본 연 구	23.3	20.6

또한 유효경 D_{60} 분포도(그림 3) 및 유실율 분포도(그림 5)를 통해서 볼 때, 토출구의 위치를 KK지구와 같이 침사지의 중앙부에 설치한 경우가 KH지구와 같이 단부에 설치한 경우보다 입도분포 및 유실율의 분포가 고르게 분포하고 있어 재료분리가 적게 발생하는 것을 알 수 있었다.

6. 결 론

기존의 유실을 결정방법은 토질 및 입경에 따라 경험적으로 사용하고 있는 유실율의 범위가 커서 사용하는 데 어려움이 있어 개략적인 공사비의 산출 등에 적용하고 있으며, 시공시에는 시험포를 조성하여 현장에서 유실율을 실측함으로써 설계보완에 반영하고 있다. 그러나 실측시 GPS 등의 기계적인 오차, 축척에 따른 도상오차, 조류의 변화, 인위적인 오차 등의 많은 어려움이 따르고, 준설선에서 기계적인 조작 등 준설시공자의 도움을 받아야 하는데 서로의 입장차이로 인하여 정확한 유실율을 평가하기에는 많은 어려움이 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현장 시험포에서의 유실율 평가시 보다 합리적인 방안으로 Marsal의 수정파쇄율(1973)을 이용하여 준설매립과정에서 발생하는 입자의 유실을 입도분포곡선의 변화로부터 구할 수 있는 유실율 결정방법을 제안하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 침사지내의 토립자는 입경분포를 개략적으로 판단하기 위해 유효경 D_{60} 값의 분포를 도시한 결과, 토출구에서 가까울수록 입자가 굵어지는 경향을 알 수 있었다.

(2) 본 연구에서 제안한 Marsal의 수정파쇄율을 이용하여 계산된 유실율은 토출구에서 가까울수록 크고, 여수토쪽으로 갈수록 작아지는 경향을 보이고 있으며. 이러한 경향은 준설매립과정에서 토출구쪽으로 굵은 입자가 많이 쌓이면서 원지반의 입도분포와는 큰 차이가 발생하기 때문으로 판단된다.

(3) 토질 및 입경에 따라 경험적으로 사용하고 있는 기존의 유실율 결정방법은 현장에서 계측된 유실율과 비교해 볼 때 지나치게 과다한 측면이 있으며, 본 연구에서 제안된 Marsal의 수정파쇄율을 이용한 유실율은 현장에서 계측된 유실율보다 다소 큰 경향을 보이고 있으나 실측시의 오차 등을 감안할 때 합리적인 유실율 결정방법으로 판단된다.

(4) 또한 향후 실내모형실험을 실시하여 준설토의 투기위치 및 투기속도, 여수토의 크기 및 위치 등에 따른 유실율의 변화를 실험적으로 연구하여 실무차원에서 활용할 수 있는 유실율 결정방법을 제시하는 것이 장차의 연구과제이다.

참고문헌

1. 건설교통부(1998), 표준품셈(토목), pp.466.
2. 김석열, 김승욱, 노종구(1999), "준설토의 유실율 결정에 관한 연구", 한국농공학회 학술발표회 논문집, pp.606-611.
3. 해운항만청(1993), 항만설계기준, pp.646~647.
4. 日本土質工學會(1990), 粗粒材料の現場締固め, pp.73-74.
5. Fukumoto, T.(1990), "A Grading Equation for Decomposed Granite Soils", Soils and Foundations, Vol.30, No.1, pp.27-34.
6. Fukumoto, T.(1992), "Particle Breakage Characteristics of Granular Soils", Soils and Foundations, Vol.32, No.1, pp.26-40.
7. Marsal, R.J.(1973), "Mechanical Properties of Rockfill, Embankment-Dam Engineering", Casagrande Volume, John Wiley & Son, pp.109-199.