

준설토의 유실률 평가에 관한 연구

A Study on the Estimation of Loss Rate of Dredged Fills

김홍택* · 김석열** · 강인규*** · 박재역****

Kim, Hong-Taek · Kim, Seog-Yeol · Kang, In-Kyu · Park, Jae-Eock

Abstract

Volume change of the dredged soils is composed of loss amount of the soil particles flowing over an outflow weir with water and settlements due to both the self-weight consolidation in reclaimed layer and the desiccation at the surface of reclaimed layer. In order to estimate the amount of soil particles flowing over an outflow weir with water, the evaluation procedure of loss rate of the dredged fill is proposed in the present study based on the Marsal's modified breakage theory and the results of hydrometer analyses. To verify a validity of the proposed procedure, evaluated loss ratio is compared with various estimates from the other existing methods.

Keywords : Dredged fills, Particle breakage, Hydrometer analysis, Loss rate

요 지

준설토의 체적변화는 여수토를 통해 물과 함께 빠져나간 토립자의 유실량과 침강되어 새로이 형성된 지반 표면에서의 건조수축과 지반 내에서의 자중압밀에 의한 침하량의 합으로 생각할 수 있다. 그러나 현재까지 체적변화요인과 관련하여 자중압밀과 건조수축에 관한 연구에 비해 토립자의 유실과 관련된 연구는 미미한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 준설토의 체적변화요인 중 여수토를 통해 외부로 유실되는 토량을 보다 명확히 규명하기 위해 준설작업을 실시하기 전의 원지반과 준설토를 투기하여 조성된 매립 지역에서, 각각 채취한 시료에 대한 비중계 분석결과에 Marsal의 수정파쇄율을 적용하여 평균잔류율곡선에 의한 유실률 평가 방법을 제안하였고, 이를 검증하기 위하여 기존의 방법을 이용하여 평가한 유실률과 비교·검토해 보았다.

주요어 : 준설토, 입자파쇄, 비중계분석, 유실률

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, 최근 들어 급속한 산업사회의 발달과 경제성장으로 인해 공장용지, 택지, 농경

지 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 세립분은 배출유속으로 인해 weir나 여수토(outflow weir)를 향해 흐르다가 일부는 침전되고 일부는 여수토를 넘어 유실되는데(Haliburton, 1978) 이러한 유실토에 대한 평가는

* 정회원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정회원, 농업기반공사 책임연구원

*** 브니엘컨설턴트 책임연구원

**** 홍익대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

일반적으로 표준품셈(건설교통부, 1998) 또는 항만설계기준(해양항만청, 1993)에 의하여 평가되고 있다. 그러나 이같은 평가 방법은 개략적인 공사비를 산출하는데 이용되고 있으며, 현장에서 시공시에는 별도로 시험포를 운영하여 평가하고 있으나 합리적인 산출방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 합리적인 유실율(loss ratio)을 평가하기 위한 방법으로 Marsal의 수정파쇄율(일본토질공학회, 1990)을 이용하여 준설패립과정에서 발생하는 입자의 유실을 입도분포곡선의 변화로부터 구할 수 있는 유실률 결정방법 즉, 평균잔류율 곡선법을 제안하고 이를 검증하기 위하여 현장에서 시험포를 조성하여 유실률을 서로 비교·분석하였다.

2. 기존의 유실률 평가방법

준설패립지역의 유보율(retained ratio) 또는 유실률은 식(1) 및 (2)와 같이 정의된다. 그러나 준설패립지역이 대부분 담수호나 해양이기 때문에 바닥의 불규칙한 굴곡으로 인하여 정확한 체적을 측정하기 힘들고, 준설패립지역에서도 유실률은 토사의 입경, 여수토의 위치, 높이, 배출구로부터의 거리, 내부개답지 면적, 매립고 및 펌프 준설패립에서의 배사관 거리, 속도 등에 따라 차이가 발생하며, 또한 해상에서 커터를 이용한 준설패립시 발생하는 유실도 상당부분 발생하게 된다(김석열 등, 1999).

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

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

표준품셈 및 항만설계기준에 따르면, 준설패립시 유실률에 대한 평가는 실험을 토대로 결정하는 것이 가장 바람직하나 그렇지 못한 경우에는 표 1과 같이 적용할 수 있다고 하였으며, 참고적으로 일본토질공학회에서 제시한 토립자의 입경별 유실률 조사결과를 표 2와 같다.

표 1. 토질별 유보율(건설교통부, 1998 ; 해양항만청, 1993)

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

표 2. 입경별 유실율(日本土質工學會, 1990)

입경(mm)	유실율(%)	입경(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	0.075이하	30 ~ 100

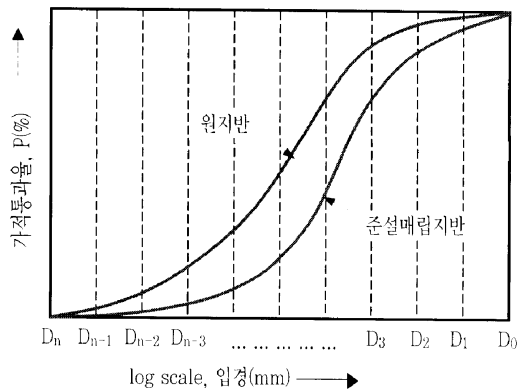
그러나 유보율 평가시, 표 1에서 나타난 바와 같이 점토 및 점토질 실트는 70%이하, 모래 및 모래질 실트는 70~95%로 범위가 크기 때문에 적용하는데 어려움이 있어 개략적인 공사비의 산출 등에 적용하고 있다. 따라서, 시공시에는 시험포를 조성하여 현장에서 유실률을 실측함으로써 설계보완에 반영하고 있으나 현장에서 실측하는 것이 용이한 문제점은 아니다.

현장 시험포에서의 유실률 평가시, 준설패립량은 준설패립선의 위치와 전진거리를 GPS와 육분의에 의해 측정하여 축척 1/3,000 평면도 상에 나타내어 용적을 계산하고 있으며, 매립량은 준설패립선의 배사관을 통해서 나오는 토출구에서 토립자 함니율과 유속을 측정하여 유량공식에 의해 용적을 구하거나, 내부개답지 내에서 준설패립 전후를 측정하여 용적을 계산하고 있다. 그러나 이와 같은 방법으로 유실률을 평가하기에는 GPS 등의 기계적인 오차, 축척에 따른 도상오차, 조류의 변화, 인위적인 오차 및 실측을 하기 위한 작업지장 등의 많은 어려움이 있다. 또한 준설패립선에서 기계적인 조작 등 준설패립시공자의 도움을 받아야 하는데 서로의 입장차이로 인하여 정확한 유실률을 평가한다는 것은 상당한 어려움이 따르고 있는 실정이다.

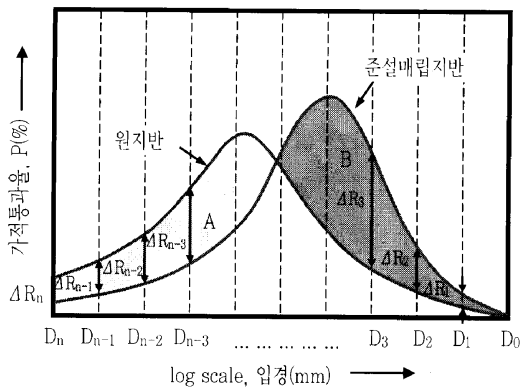
3. 준설패립시 유실률 결정법의 제안

본 연구에서는 현장 시험포에서의 유실률 평가시 보다 합리적인 방안으로 Marsal의 수정파쇄율을 적용하여 평균잔류율 곡선을 작도한 후, 이를 토대로 유실률을 결정할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. Marsal의 수정파쇄율은 토립자의 다짐시 발생하는 입자의 파쇄정도를 의미하며(Marsal, 1973), 다짐전·후의 잔류율 곡선의 변화를 이용하여 평가된다. Marsal의 수정파쇄율 자체는 준설패립토의 유실률 평가방법으로 제안된 것은 아니나 세립분과 조립분의 증감을 토대로 평균잔류율 곡선을 작도한 후, 이를 토대로 준설패립토의 유실률을 근사적으로 예측할 수 있다.

현장에서의 준설패립 원지반 및 시험포 내의 준설패립지반에 대한 일반적인 입도분포곡선 및 잔류율곡선은 그림 1과 같다. 그림 1을 살펴보면 시험포 내에 매립된 지반은 준설패립과정에서 주로 세립분에 대한 유실이 발생하기 때문에 원지반에 비하여 세립분이 적고 조립분이 상대적으로 많은 입도분포 양상을 나타내게 된다.



(a) 입경가적곡선



(b) 잔류율곡선

그림 1. 준설매립시 유실률 결정방법

그림 1(b)의 잔류율곡선은 체분석 및 비중계분석을 통해 먼저 결정된 입도분포곡선을 대수상에서 n등분한 후, 각각의 입경에 대해 잔류율(=전체 흙시료량에 대한 입경별 잔류량)을 구함으로써 작도할 수 있다. 그림 1에서 A부분은 준설매립과정에서 발생한 세립분의 감소율이며, B부분은 조립분의 증가율을 의미하며, 세립분의 감소율과 조립분의 증가율은 서로 같다. 따라서 준설매립시의 유실률은 세립분의 감소율 또는 조립분의 증가율

과 같으며, 식(3)과 같이 세립분의 감소율과 조립분의 증가율에 대한 평균값으로 정의할 수 있다.

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

제안된 준설매립시의 유실률은 원지반 및 준설매립지반을 채취하여 체분석 및 비중계분석을 통해 입도분포곡선 및 잔류율곡선을 작도한 후, 입도분포곡선을 대수상에서 n등분하여 결정된 입경에 대해 입자의 변화량(=조립분의 증가율과 세립분의 감소율)에 대한 평균을 계산함으로써 결정된다.

4. 현장계측 및 입도시험

4.1 현장에서의 유실률 평가

본 연구에서는 현장에서의 유실률을 평가하기 위하여 전남 KK지구와 KH지구를 대표지구로 선정하여 현장에서의 실험을 통해 유실률을 평가하였다. 각 지구별 원지반의 토질특성은 표 3과 같다. 또한 이들 두 현장에서의 유실률 평가에 있어서, KK지구의 경우에는 현장에서 실측한 전체 준설 작업량과 내부개답지 내부에 매립된 토량을 이용하여 유실률을 평가하였으며, KH지구의 경우에는 준설지역에서 준설된 흙의 중량과 내부개답지 내에 매립된 흙의 중량을 이용하여 유실률을 평가하였다.

KK지구에서의 시험포에 대한 준설량은 128,602m³이고 매립량은 101,293.8m³으로 측정되어, 유실률은 21.23%로 평가되었다. KH지구의 경우에는 준설체적을 측정하기 위해 해상에서 수심을 측정하였고, 측심 작업시에는 담수호 내부 준설선의 전진방향으로 100m, 횡방향으로 60m 크기의 면적을 선정하여 횡방향 및 종방향 모두 10m씩의 등간격으로 심도를 측정하였으며, 측심작업구역내 5개소에서 시료채취를 실시하여 단위중

표 3. 토질특성

현 장	입도(%)			단위중량 γ(gf/cm ³)	함수비 (%)	비 중 Gs	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

표 4. 현장에서의 유실률 평가(KH지구의 경우)

구 분	준설/매립체적 (m ³)	포화단위중량 (t/m ³)	함수비(%)	건조단위중량 (t/m ³)	중 량 (t)
준설지역	5145.4	1.9	50	1.27	6534.7
침사지	12520.07	1.2	200	0.4	5008.03

량 및 물리적인 특성 등을 파악하였다. 또한 내부개답지에 대해서는 광과측량기를 이용하여 준설도 투기전과 투기후의 지반고 변화를 측량하였고, 이를 위해 가로 200m, 세로 150m의 내부개답지 2개소를 선정하여 등간격으로 계측을 실시하였다. KH 지구에 대한 준설지역에서의 준설체적 및 내부개답지 내의 매립체적과 평균단위중량 및 평균함수비 등은 표 4와 같으며, 준설도의 중량과 내부개답지 내에 매립된 흙의 중량을 토대로 유실률을 평가해 본 결과 23.36%로 나타났다.

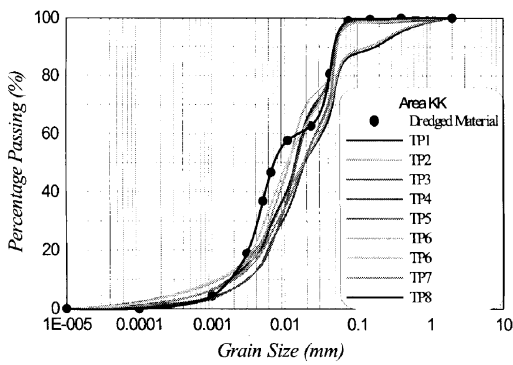
4.2 입도시험 결과

본 연구에서는 KK지구와 KH지구의 원지반 및 준설매립지반에 대하여 입도분포곡선 및 잔류율곡선을 작도하기 위해 현장에서 시료를 채취하여 입도시험을 실시하였다. 이를 위해 본 연구에서는 담수호내의 준설지역의 경우에는 두 현장 모두 5개소에서 시료를 채취하여 입도시험을 실시하였으며, 내부개답지 내에 준설매립된 지반에 대해서는 KK지구의 경우 8개소, KH지구의 경우 6개소에서 각각 시료를 채취하여 입도시험을 실시하였다. 시료채취시에는 관내부의 성상 및 시료의 교란여부를 확인하기

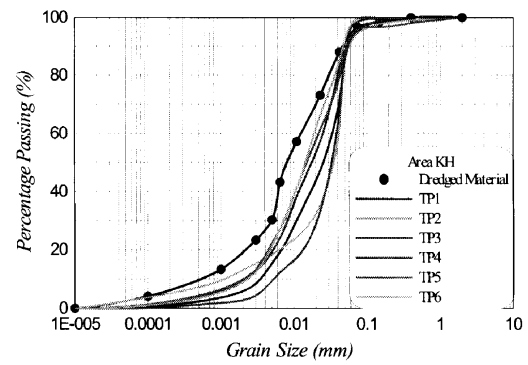
용이하도록 길이 1m, 내경 60mm의 아크릴재질 관으로 특수 제작하였다. 채취된 시료는 20cm 침도별로 균등하게 절단하여 각 개소당 4~6회의 입도시험을 실시한 후, 이들의 평균값을 각 시료채취 지역의 대표값으로 취하였다. 또한 준설도의 입경이 극히 미세하여 입도분포곡선 상에서 곡선이 0%에 근접하지 않음으로 시험 데이터 이후 입경의 값은 회귀분석을 통하여 가정하였으며, 입도시험결과를 토대로 원지반 흙의 입도분포와 준설후 내부개답지 내의 입도분포를 비교하여 나타내면 그림 2와 같다.

내부개답지 내의 토립자는 입경분포를 개략적으로 판단하기 위해 유효경 D_{60} 값의 분포를 각 현장별로 도시하면 그림 3과 같다. 그림 3으로부터 토출구에서 가까울수록 입자가 굵어지는 경향을 알 수 있었다.

준설매립시의 합리적인 유실률을 결정하기 위해 본 연구에서 제안한 유실률 결정법으로부터 KK지구와 KH지구 내부개답지에서의 유실률을 평가하기 위해 원지반 및 내부개답지 내의 TP 점들에서 채취된 시료의 평균잔류율 곡선을 작도하면 그림 4와 같다. 또한 KK지구 및 KH지구에 대하여 본 연구에서 제안한 바와 같이 평균잔류율 곡선법을 토대로 준설매립시의 유실률을 결정하면 표 5와 같다.

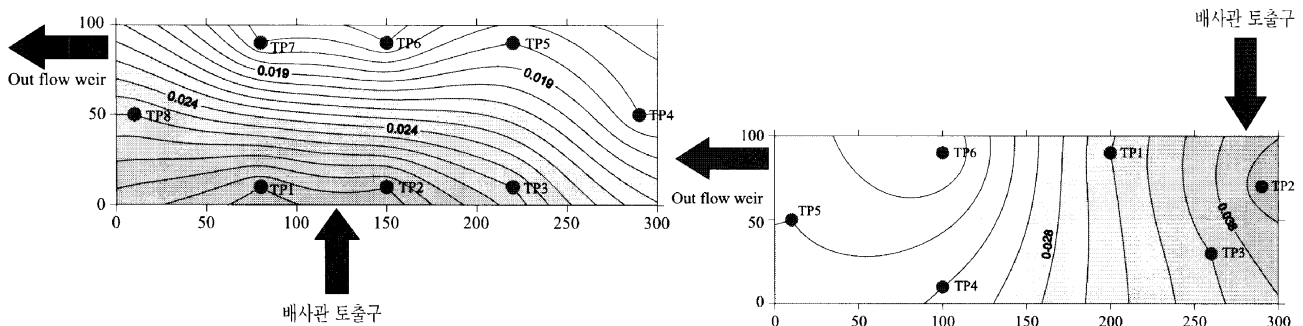


(a) KK 지구



(b) KH 지구

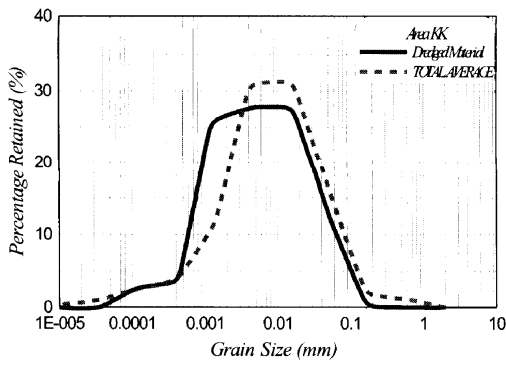
그림 2. 입도분포곡선



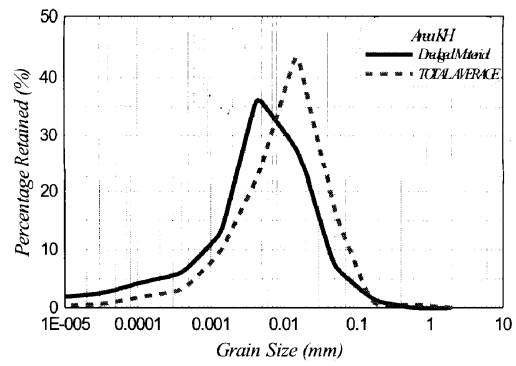
(a) KK 지구

(b) KH 지구

그림 3. 내부개답지 내의 유효경 D_{60} 분포도



(a) KK - TOTAL AVERAGE

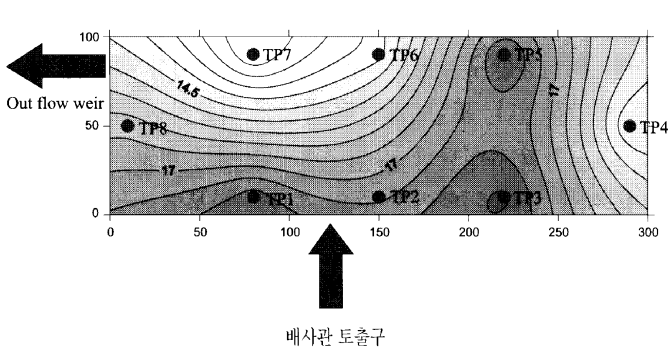


(b) KH - TOTAL AVERAGE

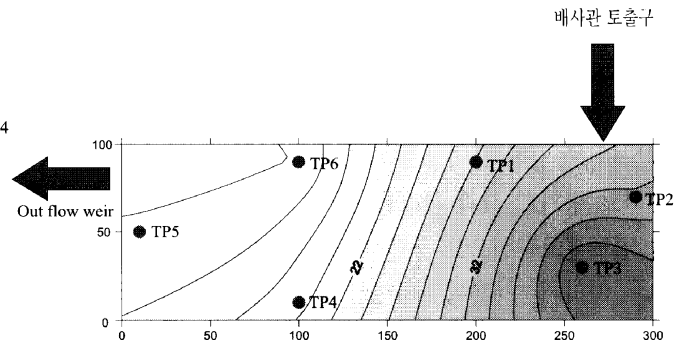
그림 4. 각 지구 TOTAL AVERAGE 잔류율곡선

표 5. 평균잔류율 곡선법에 의한 유실률의 평가

지구	TP	각 입경별 잔류율의 증감량(%)											Σ ΔR _i	유실률 (%)	중량 (t)
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀	R ₁₁			
KK	ave	0	.1	1.6	3.5	3.5	3	14.2	0.2	0.1	0	0.4	28.6	14.3	14.3
KH	ave	0	0.5	0.6	9.1	16.1	13.1	3.2	2.9	2.5	1.9	1.5	51.4	25.7	25.7



(a) KK지구



(b) KH지구

그림 5. 내부개답지 내의 유실률 분포도

표 5에서와 같은 방법으로 평가된 각 TP점에서의 유실률을 토대로 내부개답지 내의 유실률 분포를 나타내면 그림 5와 같다. 그림 5에서 알 수 있듯이 평균잔류율 곡선법에 의해 평가된 유실률은 토출구에서 가까울수록 크며 여수토쪽으로 갈수록 작아지는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 준설매립과정에서 토출구쪽으로 굽은 입자가 많이 쌓이면서 원지반의 입도분포와는 큰 차이가 발생하기 때문으로 판단된다.

현장에서 계측된 유실률과 기존의 설계시 사용하고 있는 도표(표 1 참조)를 이용하여 개략적으로 평가된 유실률 및 본 연구에서 검토된 평균잔류율 곡선법에 의한 유실률을 정리하면 표 6과 같다. 표 6을 살펴보면, 표 1을 이용하여 근사적으로 평가된 유실률은 지나치게 과다한 측면이 있으며, 본 연구에서 검토된 평균잔류율 곡선법에 의한 유실률은 현장에서 평가된 유실률보

표 6. 각 방법별 유실률의 비교

구분	유실률(%)	
	KK 지구	KH 지구
현장계측결과	21.23	23.36
기존방법	30.0	27.0
본 연구(평균잔류율 곡선법)	14.3	25.7

다 다소 큰 경향을 보이고 있다.

또한, 유효경 D₆₀ 분포도(그림 3) 및 유실률 분포도(그림 5)를 통해서 볼 때, 토출구의 위치를 KK지구와 같이 내부개답지의 중앙부에 설치한 경우가 KH지구와 같이 단부에 설치한 경우보다 입도분포 및 유실률의 분포가 고르게 분포하고 있어 재료분리가 적게 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한, KH지구에서 평

균잔류율 곡선법에 의한 유실률이 실제 현장에서의 계측에 의해 평가한 유실률과 비교해 좀더 안전측의 값으로 들어가고 기존방법에 의해 추정된 유실률보다는 작게 평가되어 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

그러나, KK지구의 경우에는 유실률이 다소 큰 차이를 보이고 있으나, 이는 KK지구의 현장 계측 결과가 준설이 이루어진 후 6개월 정도가 지난 시점에서 계측이 되었기 때문에 어느 정도의 건조수축 및 자중압밀에 의한 영향을 포함하고 있다. 따라서, 평균잔류율 곡선법에 의해 평가된 유실률은 건조수축 및 자중압밀에 의한 영향이 반영되지 않았기 때문에 이와 같은 차이를 보이는 것으로 판단된다.

5. 분석 및 고찰

본 연구에서 내부개답지 내의 토립자 분포를 확인하기 위해 실시했던 유효경 D₆₀에 대한 분포도를 작성하는 과정에서 토출구가 한쪽으로 치우쳐 있는 경우보다 가운데서 투기하는 방법보다 재료분리 없이 효과적으로 준설토를 투기하는 방법으로 확인되었다(그림 3 및 7 참조).

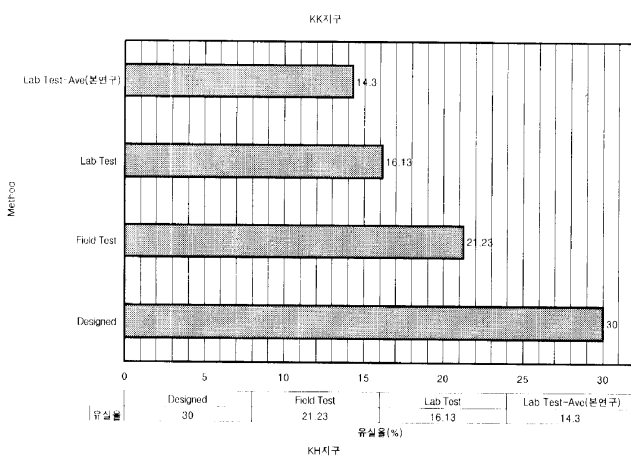
그림 6에서와 같이 설계 유실률은 다소 과다설계되어 있는 것으로 판단되며, 동일한 방법으로 평가된 유실률도 각 TP점들의 유실률을 따로 평가한 값과 각 TP점들의 가적통과율을 평균 내어 작성한 입도분포곡선으로 구한 유실률은 거의 유사함을 확인할 수 있다. 따라서, 차후에 Marsal의 수정파쇄율을 적용하여 유실률을 산정하고자 할 때는 각 TP점들에서 각각의 유실률을 구하지 않고도 평균적인 입도분포곡선만을 이용하여 전체의 유실률을 평가하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

아울러, 현장에서 실측한 데이터를 이용해서 구한 유실률과 평균잔류율 곡선법을 토대로 구한 유실률은 KH지구에서는 큰 차이가 없으나 KK지구에서는 다소의 차이를 보이고 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 현장에서의 계측 시점이 내부개답지에 준설토를 투기한 이후에 약 6개월 정도가 경과한 시점의 값이므로, 건조수축 및 자중압밀에 의한 침하발생으로 인해 현장에서 계측에 의해 평가된 유실률이 좀더 크게 평가된 것으로 판단된다. 또한, 평균잔류율 곡선법으로 평가된 유실률은 실제 계측에 의한 유실률보다는 다소 크고 기존의 방법으로 평가한 유실률보다는 다소 적게 평가됨으로써 경제적이고도 안정적인 유실률 평가가 가능할 것으로 판단된다.

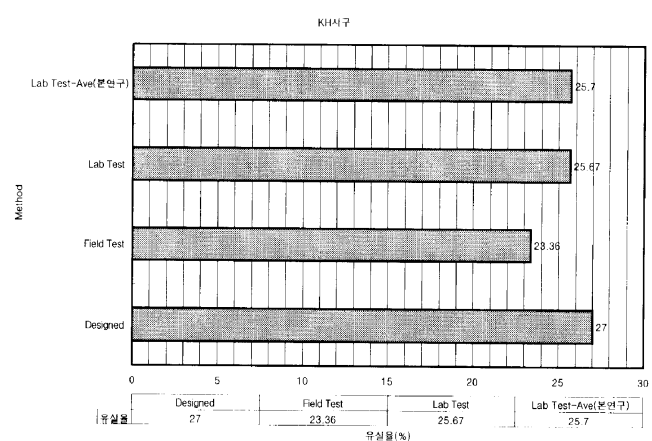
6. 요약 및 결론

본 연구에서는 준설토의 체적변화요인 중 여수토를 통해 외부로 유실되는 토량을 보다 명확히 규명하기 위해, 준설작업을 실시하기 전의 원지반과 준설토를 투기하여 조성된 매립 지역에서 각각 채취한 시료에 대한 입도분석결과에 Marsal의 수정파쇄율을 적용한 후, 평균잔류율 곡선법에 의한 유실률 평가방법을 제안하였다. 또한, 제안된 방법의 검증차원에서 기존의 방법으로 평가한 유실률과 본 연구결과를 서로 비교·검토해 보았으며, 이를 토대로 얻어진 주요 결과를 항목별로 요약·정리하면 아래와 같다.

- (1) 준설토를 대상으로 유효경(D₆₀) 분포곡선을 도시하였으며, 그 결과 토출구를 중앙에 설치하는 방안이 준설토 입자를 고르게 분포시키고 또한, 재료분리를 최소화시킬 수 있는 것으로 확인되었다.



(a) KK 지구



(b) KH 지구

그림 6. 각 지구의 유실률 평가 방법별 유실률 분포

- (2) 평균잔류율 곡선법에 의한 유실률 평가방법이 실제 계측을 통해 평가한 유실률과 거의 유사한 값을 가지는 것으로 나타나는 등, 준설토의 유실률을 평가하는 방법으로 그 적용 가능성을 부분적으로 확인하였다.
- (3) 평균잔류율 곡선법에 의해 평가된 유실률이 실제 계측을 통해 평가된 유실률 보다는 다소 크고 표준품샘표를 이용한 기존 설계방식보다는 다소 작게 평가되는 등, 경제적이고 안정

적인 유실률 평가방법으로의 그 활용가능성을 부분적으로 확인하였다.

향후 다양한 현장조건과 토질특성에 따른 현장신축자료들을 확보하고 유실률 산정방법과의 비교·검증을 통해 보다 합리적인 유실률 결정기준을 제시하는 것이 필요할 것으로 판단된다. ☺

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1998), 표준품샘(토목), pp.466.
2. 김석열, 김승욱, 노종구(1999), "준설토의 유실률 결정에 관한 연구", 1999년 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. Haliburton, T. A.(1978), "Guidelines for Dewatering/Densifying Confined Dredged Material", Technical Report DS-78-11, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Environmental Station.
6. Marsal, R. J.(1973), "Mechanical Properties of Rockfill, Embankment-Dam Engineering", Casagrande Volume, John Wiley & Sons, pp.109~199.